

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới cố GS.TS Vũ Đình Lợi và TS Lê Anh Tuấn đã tận tình chỉ bảo, giúp đỡ tôi về nhiều mặt trong suốt quá trình hoàn thành luận án nghiên cứu này.

Tôi cũng xin trân trọng cảm ơn Bộ môn Cơ sở kỹ thuật công trình, Bộ môn Xây dựng công trình quốc phòng, Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Phòng Sau đại học - Học viện Kỹ thuật Quân sự đã luôn tạo điều kiện và giúp đỡ tôi trong quá trình nghiên cứu.

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu và kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả

Nguyễn Công Nghị

MỤC LỤC

MỤC LỤC	iii
DANH MỤC KÝ HIỆU	vii
DANH MỤC VIẾT TẮT.....	xiii
DANH MỤC HÌNH VẼ	xv
DANH MỤC BẢNG.....	xxi
MỞ ĐẦU	1
Chương 1 TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	4
1.1. Sơ lược về cơ chế và đặc tính của vụ nổ	4
1.1.1. Tác động của vụ nổ.....	4
1.1.2. Sóng xung kích.....	5
1.1.3. Ảnh hưởng khối lượng nổ hiệu dụng và khoảng cách	6
1.1.4. Giới hạn tải trọng nghiên cứu	6
1.2. Một số giải pháp giảm tác dụng áp lực nổ lên công trình	7
1.2.1. Giải pháp chung.....	7
1.2.2. Ứng dụng vật liệu chống tác động của áp lực nổ.....	8
1.2.3. Bàn luận hiệu quả các giải pháp.....	16
1.3. Ứng dụng vật liệu xốp giảm tác động của áp lực nổ	17
1.3.1. Một số nghiên cứu điển hình trên thế giới.....	17
1.3.2. Tình hình nghiên cứu trong nước	21
1.3.3. Mô hình hóa vật liệu xốp mật độ thấp.....	22
1.3.4. Bàn luận vấn đề nghiên cứu.....	27
1.4. Nghiên cứu thực nghiệm nổ và mô phỏng số	27
1.4.1. Thực nghiệm nổ hiện trường	27

1.4.2. Phần mềm phân tích phân tử hữu hạn mô phỏng số vụ nổ	28
1.5. Kết luận chương	30
Chương 2 NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG HẤP THỤ ÁP LỰC CỦA VẬT LIỆU XÓP VÀ ỨNG DỤNG.....	32
2.1. Giới thiệu chung về vật liệu xốp	32
2.2. Ứng xử cơ học của vật liệu xốp chịu nén	33
2.2.1. Tính chất cơ học của vật liệu xốp	33
2.2.2. Ứng xử cơ học của vật liệu xốp chịu nén	36
2.2.3. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng đến ứng xử của vật liệu	43
2.3. Nghiên cứu phương pháp mô hình hóa vật liệu xốp chịu áp lực nén	47
2.3.1. Thí nghiệm nén đơn trục mẫu xốp XPS	47
2.3.2. Lựa chọn mô hình vật liệu cho xốp XPS trong LS-DYNA	49
2.3.3. Mô phỏng thí nghiệm nén xốp bằng LS-DYNA	52
2.3.4. Bàn luận kết quả phương pháp mô hình hóa	60
2.4. Ứng dụng hấp thụ áp lực tác động của vật liệu xốp	61
2.4.1. Nguyên lý chung hấp thụ năng lượng tác động của vật liệu xốp	61
2.4.2. Vật liệu xốp hấp thụ áp lực nổ	62
2.4.3. Vật liệu xốp hấp thụ động năng va chạm	66
2.4.4. Giảm rung động của vật liệu xốp	67
2.4.5. Giảm chấn của vật liệu xốp.....	69
2.5. Kết luận chương	70
Chương 3 NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG VÀ CHUẨN HÓA MÔ HÌNH MÔ PHỎNG SỐ	71
3.1. Mô phỏng vụ nổ trong không khí.....	71

3.1.1. Phương pháp nghiên cứu	71
3.1.2. Thiết lập mô hình mô phỏng số	74
3.1.3. Kết quả mô phỏng số	76
3.1.4. Đánh giá kết quả chuẩn hóa mô hình	84
3.2. Mô phỏng số vật liệu bê tông cốt thép	84
3.2.1. Mô hình vật liệu bê tông.....	85
3.2.2. Mô hình vật liệu cốt thép	86
3.2.3. Thí nghiệm hiện trường	88
3.2.4. Thử nghiệm mô phỏng số	91
3.2.5. Kết quả mô phỏng số.....	94
3.2.6. Đánh giá kết quả chuẩn hóa mô hình	97
3.3. Mô phỏng số vật liệu xốp cứng không phục hồi chịu áp lực nổ	97
3.3.1. Thực nghiệm nổ hiện trường	98
3.3.2. Mô phỏng thí nghiệm số bằng LS-DYNA	98
3.3.3. Kết quả mô phỏng số.....	99
3.3.4. Đánh giá kết quả chuẩn hóa mô hình	101
3.4. Bàn luận chung về kết quả chuẩn hóa mô hình	101
3.5. Kết luận chương	102
Chương 4 NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG KẾT CẤU BẢO VỆ BẰNG VẬT LIỆU XỐP GIẢM TÁC ĐỘNG CỦA ÁP LỰC NỔ	104
4.1. Tính toán kết cấu bảo vệ cơ bản	104
4.1.1. Tính toán kết cấu bảo vệ sử dụng vật liệu xốp	104
4.1.2. Thí nghiệm hiện trường đánh giá giải pháp kết cấu bảo vệ	105
4.1.3. Xây dựng mô hình số trong LS-DYNA	107

4.1.4. So sánh kết quả thí nghiệm và mô phỏng số	110
4.1.5. Bàn luận kết quả	110
4.2. Nghiên cứu khảo sát cấu tạo cho kết cấu bảo vệ	111
4.2.1. Khảo sát chiều dày tấm thép dàn lực.....	111
4.2.2. Khảo sát kết cấu bảo vệ dạng nhiều lớp	113
4.2.3. Khảo sát đặc tính vật liệu dàn lực	117
4.2.4. Phân nhỏ kết cấu bảo vệ	119
4.2.5. Bàn luận kết quả khảo sát	122
4.3. Cấu tạo kết cấu bảo vệ giảm tác dụng của áp lực nổ lên kết cấu công trình	123
4.3.1. Vật liệu nhôm bọt.....	123
4.3.2. Tính toán và lựa chọn kết cấu bảo vệ.....	125
4.4. Kết luận chương	133
KẾT LUẬN CHUNG.....	134
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN ĐÃ CÔNG BỐ.....	136
TÀI LIỆU THAM KHẢO	137

DANH MỤC KÝ HIỆU

a	Tham số của hàm tỷ số giữa ứng suất kéo và ứng suất nén
A	Kết cấu thanh chống mô hình Cunningham
A_{emax}	Diện tích đo theo cạnh dài nhất
A_f	Diện tích mặt cắt ngang thanh xóp
A_{jwl}	Hằng số vật liệu TNT
b	Tham số của hàm tỷ số giữa ứng suất kéo và ứng suất nén
B	Ma trận mô đun khối lượng mô hình Cunningham
B_{jwl}	Hằng số vật liệu TNT
b^*	Hệ số giảm
C_f	Hằng số
C_{ijkl}	Ma trận mô đun tiếp tuyến đàn hồi
c_m	Vận tốc truyền âm của vật liệu
C_l	Chiều dài bước sóng
c_{pl}	Vận tốc sóng xung kích đàn hồi lan truyền trong xóp
c_0, c_1	Hệ số độ nhớt
C_0, \dots, C_6	Hệ số trong phương trình trạng thái của không khí
D	Tỷ lệ tổn thất năng lượng trên mỗi chu kỳ
D_s	Đường kính khối cầu cứng
E	Mô đun đàn hồi của vật liệu
E_f	Mô đun đàn hồi của xóp
E_f^g	Mô đun đàn hồi do phần không khí đóng góp
E_s	Mô đun đàn hồi vật liệu nền
E_m	Năng lượng bên trong vật liệu
E_q	Mô đun dẻo tái bền
E_t	Mô đun tiếp tuyến

E_0	Nội năng của đơn vị thể tích
F	Lực tác dụng vào phần tử lỗ rỗng
F_{crit}	Lực tới hạn bắt đầu uốn cong khung xương lỗ rỗng
G	Mô đun trượt
G_0	Khối lượng tương đối của không khí
h_{blast}	Chiều dày vật liệu xốp
HU	Tham số đỡ tải động
$H(\omega)$	Hàm truyền
I	Mô men quán tính
I_1	Bất biến thứ nhất của ten xơ ứng suất
J_2	Bất biến thứ 2 của ten xơ ứng suất lệch
J_3	Bất biến thứ 3 của ten xơ ứng suất lệch
J_s	Xung lượng pha nén
J_s^-	Xung lượng pha dãn
k_1, k_2	Tham số của hàm tỷ số giữa ứng suất kéo và ứng suất nén
l	Chiều dài phần tử dầm trong lỗ rỗng
L_e	Độ dài đặc trưng phần tử
l_f	Chiều dài thanh xốp
l_{mesh}	Mật độ lưới chia nhỏ nhất
l_i	Chiều dài sợi
\bar{l}	Chiều dài trung bình sợi
M	Khối lượng vật nặng
M_u	Chỉ số của vật liệu
M_s	Động lượng tấm dàn lực
m_1	Khối lượng trên đơn vị diện tích
p	Áp suất cuối của khí trong lỗ rỗng

p^0	Áp suất khí ban đầu trong lỗ rỗng
p'	Áp suất tải cần vượt qua
p_{at}	Áp suất khí quyển
P_{CJ}	Áp suất Chapman-Jouget
p_n	Áp suất nén
P_s	Áp lực cực đại pha nén
P_s^-	Áp lực cực đại pha dẫn
P_0	Áp suất khí quyển
Q	Hệ số chất lượng
Q_e	Hàm biểu diễn độ nhót theo thể tích
R	Khoảng cách đến tâm lượng nổ
R_1, R_2	Hằng số vật liệu TNT
SHAPE	Tham hình dạng đỡ tải
t	Diện tích tiết diện phần tử dầm trong lỗ rỗng
T	Thời gian tính toán
TSSFAC	Tỉ lệ bước thời gian
t_a	Thời gian đến
t_d	Thời gian duy trì pha nén
t_d^-	Thời gian duy trì pha dẫn
U	Năng lượng biến dạng đàn hồi trên một đơn vị thể tích
U_s	Động năng của tấm dàn lực
v	Vận tốc của tấm dàn lực
V	Thể tích sau khi bị nén
v_D	Vận tốc tại thời điểm xóp bắt đầu bị nén chặt
V_s^0	Thể tích ban đầu của khí trong lỗ rỗng
V_g	Thể tích cuối của khí trong lỗ rỗng

v_e	Thể tích phần tử
V_N	Khối lượng tương đối
v_n	Tốc độ phát nổ
V_{vc}	Vận tốc va chạm
V_0	Thể tích ban đầu của xốp
W	Khối lượng thuốc nổ
W_{vol}	Năng lượng hấp thụ của xốp
x	Hàm tác động đầu vào
X	Biên độ của tác động đầu vào
X_0	Vị trí ban đầu của mặt cứng
y	Hàm chuyển dịch tương đối
Y	Biên độ chuyển dịch tương đối
Z	Khoảng cách tỉ lệ
α_i	Góc định hướng phần tử mô hình Cunningham
γ	Hệ số nhiệt dung riêng của không khí
Δt	Bước thời gian
ΔU	Năng lượng tiêu tán sau một chu kỳ
$\Delta \varepsilon_{kl}$	Ten xơ biến dạng tăng dần
δ	Độ võng phần tử dầm trong lỗ rỗng
δ_{td}	Chiều dày tấm dầm lực
ε	Biến dạng
$\dot{\varepsilon}$	Tốc độ biến dạng
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	Ten xơ tốc độ biến dạng
ε_D	Biến dạng vật liệu xốp bắt đầu bị nén chặt
$\dot{\varepsilon}_{kk}$	Tensor tốc độ biến dạng
ε_{eff}^q	Biến dạng dẻo hữu hiệu

$\dot{\epsilon}_{eff}^q$	Tốc độ biến dạng dẻo
$\dot{\epsilon}_{eff}^s$	Tốc độ biến dạng tổng
$\dot{\epsilon}_{eff}^e$	Tốc độ biến dạng đàn hồi
ζ	Hệ số cản
η	Hệ số tổn thất
μ	Hệ số nhớt động
ν	Hệ số Poisson
ν_f	Hệ số Poisson vật liệu xốp
ν_s	Hệ số Poisson vật liệu nền
ρ	Khối lượng riêng
ρ_f	Mật độ vật liệu xốp
ρ_s	Mật độ vật liệu nền
ρ_0	Khối lượng riêng ban đầu
ρ_{td}	Khối lượng riêng tấm dàn lực
σ	Ứng suất
σ^f	Ứng suất vật liệu xốp
$(\sigma_D)_{peak}$	Ứng suất nén cực đại
σ_{el}^f	Ứng suất chuyển tiếp từ giai đoạn đàn hồi sang đoạn bằng
σ_{max}	Ứng suất cực đại dưới tác động của tải đàn hồi
σ_{pl}	Ứng suất đoạn bằng
σ_{ys}	Ứng suất chảy của vật liệu nền
σ_{pl}^f	Ứng suất sụp đổ dẻo
σ_t	Ứng suất kéo
σ_c	Ứng suất nén

σ_D	Ứng suất tại thời điểm xốp bắt đầu bị nén chặt
σ_{ij}^{trail}	Ứng suất chính
σ_y	Ứng suất chảy
σ_{ij}^*	Ứng suất được xác định thông qua mô đun đàn hồi
σ_i^*	Ứng suất chính
σ_0	Cường độ chảy ban đầu
σ'_{ij}	Ten xơ ứng suất thử nghiệm
σ_{ij}^n	Ten xơ ứng suất của bước thứ n
ϕ	Tỷ lệ chất rắn của phần khung xương lỗ rỗng
χ	Lượng giảm logarit
ψ	Góc tổn thất
Ψ	Hệ số tổn thất
ω	Tần số tác động
ω_1	Tần số dao động riêng
$\omega_{1,s}$	Tần số dao động riêng vật liệu nền
ω_{jwl}	Hằng số vật liệu TNT
\propto	Tỉ lệ với

DANH MỤC VIẾT TẮT

ALE	Phương pháp tùy biến Lagrangian-Eulerianian
AFRP	Sợi aramid
ANFO	Thuốc nổ amoni nitrat
BTCT	Bê tông cốt thép
CFRP	Polyme sợi carbon
CPU	CFRP lai với PU
CSC	Mô hình Continuous Surface Cap
CONTACT_...	Thẻ thiết lập tương tác giữa các miền vật liệu khác nhau
CTYPE	Tham số giằng buộc
DOD	Tiêu chuẩn Xây dựng an toàn chất nổ
EOS	Phương trình trạng thái
EOS_...	Thẻ phương trình trạng thái trong LS_DYNA
EPS	Xốp Expandable PolyStyrene
FCC	Hình khối hướng tâm
FEM	Phần tử hữu hạn
FRC	Bê tông cốt sợi
FRP	Sợi polyme gia cố
GFRP	Polyme sợi thủy tinh
HEX	Hình lục giác
HU	Tham số đỡ tải động
KCC	Mô hình Karagozian & Case Concrete
MAT_...	Thẻ vật liệu trong LS_DYNA
MAT_084	Mô hình Winfrith
LLNL	Phòng thí nghiệm Lawrence Livermore National Laboratory
LS-DYNA	Phần mềm LS-DYNA
LSTC	Hãng Livermore Software Technology Corporation

PFRC	Bê tông cốt sợi polyetylen
PU	Vật liệu có độ dẻo cao (sơn polyurea)
PUR	Polyurethane
PVC	Poly Vinylclorua
RHT	Mô hình RHT
SFRC	Bê tông cốt sợi thép
SHAPE	Tham hình dạng đỡ tải
SOD	Khoảng cách tác động
SRP	Tấm polyme gia cường bằng thép
TN_01	Thí nghiệm nổ khảo sát đặc trưng động học
TN_02	Thí nghiệm nổ gần
TNT1	Mô hình mô phỏng tương ứng lưới chia TNT 1/10
TNT2	Mô hình mô phỏng tương ứng lưới chia TNT 1/15
TNT3	Mô hình mô phỏng tương ứng lưới chia TNT 1/20
TNT4	Mô hình mô phỏng tương ứng lưới chia TNT 1/25
TSF1	Mô hình mô phỏng tương ứng TSSFAC = 0.1
TSF2	Mô hình mô phỏng tương ứng TSSFAC = 0.2
TSF3	Mô hình mô phỏng tương ứng TSSFAC = 0.3
TSF4	Mô hình mô phỏng tương ứng TSSFAC = 0.4
TSF5	Mô hình mô phỏng tương ứng TSSFAC = 0.5
TSF6	Mô hình mô phỏng tương ứng TSSFAC = 0.6
TNT	Thuốc nổ trinitrotoluene
TSSFAC	Tỉ lệ bước thời gian
UHFRC	Bê tông cốt sợi cường độ siêu cao
UHSFRC	Bê tông cốt sợi thép cường độ siêu cao
XPS	Xốp Extruded Polystyrene

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Tác động của vụ nổ lên công trình [6]..... 5

Hình 1.2. Biểu đồ áp lực sóng xung kích của vụ nổ trong không khí 6

Hình 1.3. Tấm bê tông gia cường sợi FRP [27] 12

Hình 1.4. Cấu trúc tồn tại tự nhiên của vật liệu xốp 14

Hình 1.5. Quan hệ ứng suất - biến dạng đặc trưng vật liệu xốp..... 15

Hình 1.6. Áp lực nổ và áp lực khi truyền qua vật liệu xốp [34] 18

Hình 1.7. Nhôm bọt, Skydex®, Nomex® tổ ong và xốp EPS trong thí nghiệm của H. Bornstein và K. Ackland [36]..... 19

Hình 1.8. Bố trí thí nghiệm hiện trường của H. Bornstein và K. Ackland [36] 19

Hình 1.9. Độ vòng tấm trong thí nghiệm của H. Bornstein và K. Ackland [36] 19

Hình 1.10. Cấu tạo dầm bê tông cốt thép trong thí nghiệm của Schenker [42] 20

Hình 1.11. Kết quả biến dạng tại giữa thanh cốt thép của dầm trong thí nghiệm của Schenker [42]..... 20

Hình 1.12. Thí nghiệm kết cấu chịu áp lực nổ của Schenker [37] 21

Hình 1.13. Kết quả đo gia tốc trong thí nghiệm của Schenker [37]..... 21

Hình 1.14. Các mô hình thông thường, dựa trên cách cấu tạo ô lỗ rỗng: (a) Mô hình khối lập phương, (b) Khối tetrakaidecahedron, (c) Khối 12 mặt hình thoi, (d) Khối 12 mặt hình thang [52] 22

Hình 1.15. Mô hình xốp ngẫu nhiên của Lederman [58]..... 23

Hình 1.16. Mô hình hỗn hợp của Cuningham [59, 60]..... 24

Hình 1.17. Mô hình phần tử tứ diện của Warren và Kraynik [61]..... 24

Hình 1.18. Quy trình tạo mô hình vật liệu xốp 3D [72] 26

Hình 1.19. Giao diện phần mềm LS-DYNA: a) Mô đun LS-PrePost b) Mô đun LS-DYNA Program Manager 30

Hình 2.1. Cấu trúc lỗ rỗng mở (trái) và lỗ rỗng kín (phải) 32

Hình 2.2. Một số dạng vật liệu xốp trong thực tế.....	33
Hình 2.3. Sự nén của xốp lỗ rỗng đóng kín cho thấy sự biến dạng cấu trúc khung xương và màng các lỗ rỗng [73]	34
Hình 2.4. Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng vật liệu xốp.....	35
Hình 2.5. Sự khác biệt quá trình chịu nén: cấu trúc lỗ rỗng mở (a) và lỗ rỗng kín (b) [52]	36
Hình 2.6. Mô hình của Gibson và Ashby cho phần tử lỗ rỗng mở	37
Hình 2.7. Độ võng của khung xương (dầm) khi chịu tải	37
Hình 2.8. Mô hình của Gibson và Ashby cho phần tử lỗ rỗng đóng kín.....	39
Hình 2.9. Ứng xử của phần tử lỗ rỗng đóng kín khi chịu nén	41
Hình 2.10. Sự hình thành sức kháng do độ trễ của không khí trong cấu trúc lỗ rỗng mở.....	43
Hình 2.11. Minh họa ảnh hưởng của tốc độ biến dạng đối với ứng xử tăng ứng suất của vật liệu xốp [77].....	44
Hình 2.12. Đường cong ứng suất-biến dạng cho nhôm bột Alulight với mật độ tương đối là 0.18 ở hai tốc độ biến dạng: 3.6×10^{-3} /s và $3.6 \times 10^{+3}$ /s [81]...	46
Hình 2.13. Ứng suất đoạn bằng được hiệu chỉnh cho mật độ tương đối, được vẽ đồ thị dựa trên tốc độ biến dạng. Về cơ bản, nó không phụ thuộc vào tốc độ biến dạng lên đến $3.6 \times 10^{+3}$ /s [81]	46
Hình 2.14. Mẫu xốp XPS trong thí nghiệm nén.....	48
Hình 2.15. Quá trình tiến hành thí nghiệm nén mẫu xốp XPS	49
Hình 2.16. Kết quả quan hệ ứng suất - biến dạng của mẫu XPS thí nghiệm..	49
Hình 2.17. Quan hệ ứng suất - biến dạng của xốp EPS [88]	51
Hình 2.18. Quan hệ ứng suất - biến dạng vật liệu xốp cứng [92]	52
Hình 2.19. Các dạng phần tử khối trong LS-DYNA	53
Hình 2.20. Phần tử khối lục diện 8 nút trong LS-DYNA	53
Hình 2.21. Mô hình phần tử dầm Hughes - Liu	54
Hình 2.22. Mô hình phần tử vỏ 4 nút trong LS-DYNA.....	55
Hình 2.23. Một số dạng tiếp xúc cơ bản	56

Hình 2.24. Quan hệ ứng suất - biến dạng sau hiệu chuẩn.....	57
Hình 2.25. Mô hình mô phỏng mẫu nén xốp XPS trong LS-DYNA	58
Hình 2.26. Quá trình mô phỏng nén ép mẫu xốp XPS trong LS-DYNA	58
Hình 2.27. Kết quả mô phỏng mẫu xốp theo mô hình MAT_53	59
Hình 2.28. Kết quả mô phỏng mẫu xốp theo mô hình MAT_57	59
Hình 2.29. Kết quả mô phỏng mẫu xốp theo mô hình MAT_63	60
Hình 2.30. Tương quan kết quả nén mẫu xốp giữa các mô hình mô phỏng...	60
Hình 2.31. (a) Đường cong lực - chuyển vị và (b) đường cong ứng suất - biến dạng của vật liệu xốp.....	62
Hình 2.32. Đường cong áp lực theo thời gian của nổ trong không khí	63
Hình 2.33. Dạng tam giác áp lực theo thời gian.....	64
Hình 2.34. Ứng suất, vận tốc ở hai bên của sóng xung kích đàn hồi	66
Hình 2.35. (a) Dao động một bậc tự do chịu tác động của đầu vào chấn động x ở tần số ω . (b) Hàm truyền cho chuyển dịch tương đối y	68
Hình 2.36. Hệ số tổn thất η đo lường năng lượng phân đoạn bị tiêu tán trong một chu kỳ ứng suất – biến dạng	69
Hình 3.1. Phân vùng khu vực gần và khu xa trong vụ nổ không khí [2].....	73
Hình 3.2. Bố trí thí nghiệm đo áp lực nổ không khí hiện trường.....	74
Hình 3.3. Mô hình số trên LS-DYNA.....	75
Hình 3.4. Điểm khảo sát cách tâm nổ 100cm.....	77
Hình 3.5. Điểm khảo sát cách tâm nổ 80cm.....	77
Hình 3.6. Điểm khảo sát cách tâm nổ 60cm.....	78
Hình 3.7. Chênh lệch đỉnh áp lực so với lưới 1cm	78
Hình 3.8. Áp lực sóng xung kích cách tâm nổ 1m	79
Hình 3.9. Chênh lệch áp lực đỉnh	80
Hình 3.10. Áp lực sóng xung kích cách tâm nổ 1m	81
Hình 3.11. Chênh lệch áp lực đỉnh	81
Hình 3.12. Áp lực sóng xung kích điểm khảo sát	82

Hình 3.13. Áp lực sóng xung kích thử nghiệm nổ cách tâm nổ 1m.....	82
Hình 3.14. Áp lực mô phỏng LS-DYNA và thực nghiệm nổ hiện trường	83
Hình 3.15. Ứng xử đàn hồi dẻo quá trình tái bền đẳng hướng và động học [92]	87
Hình 3.16. Công tác chế tạo cấu kiện thí nghiệm hiện trường.....	89
Hình 3.17. Thí nghiệm mẫu bê tông	89
Hình 3.18. Thí nghiệm mẫu cốt thép	90
Hình 3.19. Thí nghiệm xác định đặc trưng động học tấm BTCT	91
Hình 3.20. Thí nghiệm kết cấu BTCT chịu tác dụng của nổ gần.....	91
Hình 3.21. Xây dựng mô hình hình học cho mô phỏng số	94
Hình 3.22. Quá trình lan truyền sóng nổ trong không khí.....	94
Hình 3.23. Hình thành vết nứt mặt dưới tấm BTCT (TN_01).....	95
Hình 3.24. Phá hoại mặt dưới tấm BTCT (TN_02).....	95
Hình 3.25. Chuyển vị tấm BTCT (TN_01).....	95
Hình 3.26. Gia tốc tấm BTCT (TN_01).....	96
Hình 3.27. Chuyển vị tấm (TN_02).....	96
Hình 3.28. Công tác thí nghiệm hiện trường.....	98
Hình 3.29. Mô hình mô phỏng số thí nghiệm	99
Hình 3.30. Xốp XPS bị xẹp khi chịu áp lực nổ	100
Hình 3.31. Chuyển vị của tấm thí nghiệm	100
Hình 3.32. Gia tốc của tấm thí nghiệm	100
Hình 4.1. Năng lượng hấp thụ của vật liệu xốp (Wvol)	105
Hình 4.2. Kết cấu thí nghiệm hiện trường.....	106
Hình 4.3. Chuyển vị tấm bê tông cốt GFRP thí nghiệm.....	106
Hình 4.4. Gia tốc tấm bê tông cốt GFRP thí nghiệm.....	107
Hình 4.5. Mô hình mô phỏng số thí nghiệm tấm cốt GFRP chịu nổ trực tiếp	108
Hình 4.6. Chuyển vị tấm bê tông cốt GFRP mô phỏng	108

Hình 4.7. Gia tốc tấm tấm bê tông cốt GFRP mô phỏng.....	109
Hình 4.8. Hình ảnh mặt dưới tấm bê tông mô phỏng tại $t=6ms$	109
Hình 4.9. Tấm bê tông chịu áp lực nổ trực tiếp.....	110
Hình 4.10. Tấm bê tông có kết cấu bảo vệ.....	110
Hình 4.11. Chuyển vị tấm bê tông khảo sát	111
Hình 4.12. Gia tốc tấm bê tông khảo sát.....	112
Hình 4.13. Hình ảnh mặt dưới tấm bê tông khảo sát tại $t=6ms$	112
Hình 4.14. Hình ảnh sơ đồ cơ bản của cấu trúc nhiều lớp điển hình	113
Hình 4.15. Cấu trúc cơ bản: thép - xốp.....	114
Hình 4.16. Cấu trúc nhiều lớp loại 1 (thép-xốp-thép)	114
Hình 4.17. Cấu trúc nhiều lớp loại 2 (thép-xốp-thép-xốp)	114
Hình 4.18. Cấu trúc nhiều lớp loại 3 (thép-xốp-thép-xốp-thép)	115
Hình 4.19. Kết quả chuyển vị tấm mô phỏng.....	115
Hình 4.20. Kết quả gia tốc tấm mô phỏng	116
Hình 4.21. Kết quả chuyển vị tấm mô phỏng.....	118
Hình 4.22. Kết quả gia tốc tấm mô phỏng	118
Hình 4.23. Phân đoạn kết cấu bảo vệ 20x20cm	119
Hình 4.24. Phân đoạn kết cấu bảo vệ 25x25cm	120
Hình 4.25. Phân đoạn kết cấu bảo vệ 33x33cm	120
Hình 4.26. Phân đoạn kết cấu bảo vệ 50x50cm	120
Hình 4.27. Chuyển vị tấm mô phỏng.....	121
Hình 4.28. Gia tốc tấm mô phỏng.....	121
Hình 4.29. Mẫu nhôm bọt lỗ rỗng kín thực tế sử dụng trong nghiên cứu	124
Hình 4.30. Thí nghiệm nén đơn trục mẫu nhôm bọt	124
Hình 4.31. Quan hệ ứng suất - biến dạng nén đơn trục mẫu nhôm bọt.....	125
Hình 4.32. Vụ tấn công khủng bố ngày 19.4.1995 nhằm vào Tòa nhà Liên bang Murrah tại thành phố Oklahoma, Mỹ	126
Hình 4.33. Công trình 3 tầng dạng điển hình	126

Hình 4.34. Vị trí và đối tượng nghiên cứu	127
Hình 4.35. Cấu tạo cột nghiên cứu	127
Hình 4.36. Năng lượng hấp thụ của vật liệu nhôm bột (W_{vol})	128
Hình 4.37. Cấu trúc nhiều lớp cho kết cấu bảo vệ.....	129
Hình 4.38. Phân đoạn kết cấu bảo vệ cột khảo sát	129
Hình 4.39. Hình ảnh vết nứt trên cột: (a) ban đầu, (b) trực tiếp, (c) bảo vệ .	130
Hình 4.40. Hình ảnh phá hủy cột: (a) ban đầu, (b) trực tiếp, (c) bảo vệ	131
Hình 4.41. Chuyển vị cột mô phỏng	131
Hình 4.42. Gia tốc cột mô phỏng	132
Hình 4.43. Ứng suất theo phương chịu lực chính.....	132

DANH MỤC BẢNG

Bảng 2.1. Thông số vật liệu xốp XPS theo nhà sản xuất [91]	48
Bảng 2.2. Tham số vật liệu xốp XPS	57
Bảng 3.1. Tham số mô hình vật liệu không khí	76
Bảng 3.2. Tham số mô hình vật liệu TNT [120]	76
Bảng 3.3. Tham số mô hình vật liệu bê tông.....	92
Bảng 3.4. Tham số mô hình vật liệu cốt thép.....	92
Bảng 3.5. Bảng tổng hợp kết quả.....	96
Bảng 3.6. Tham số mô hình vật liệu GFRP [133]	99
Bảng 3.7. Bảng tổng hợp kết quả.....	101
Bảng 4.1. Bảng kết quả tính kết cấu bảo vệ	105
Bảng 4.2. Bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm	107
Bảng 4.3. Bảng đánh giá hiệu quả (mô phỏng)	109
Bảng 4.4. Bảng tổng hợp kết quả so sánh giữa thí nghiệm và mô phỏng	110
Bảng 4.5. Bảng tổng hợp hiệu quả so với cấu trúc cơ bản	116
Bảng 4.6. Tham số mô hình vật liệu chì và nhôm [139]	117
Bảng 4.7. Bảng tổng hợp hiệu quả so với cấu trúc lõi thép	118
Bảng 4.8. Bảng tổng hợp hiệu quả phân đoạn kết cấu bảo vệ	122
Bảng 4.9. Tham số vật liệu nhôm bọt	125
Bảng 4.10. Bảng kết quả tính kết cấu bảo vệ	128
Bảng 4.11. Bảng tổng hợp kết quả.....	132

MỞ ĐẦU

1. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Thực tế hiện nay các vụ nổ có chủ đích (khủng bố) là một mối đe dọa lớn đến an ninh, an toàn dân sinh, ảnh hưởng rất lớn đến các công trình xây dựng và gây ra những thiệt hại nặng nề. Một loạt các vụ tấn công như vụ đánh bom Tòa nhà Liên bang Murrah ở thành phố Oklahoma vào tháng 4 năm 1995, vụ đánh bom đáng chú ý thứ hai là vụ đánh bom Tháp Khubar ở Ả Rập Xê Út vào tháng 6 năm 1996. Chấn động cả thế giới vào ngày 11 tháng 9 năm 2001 là các cuộc tấn công vào Trung tâm Thương mại Thế giới (WTC) của Thành phố New York. Liên tiếp sau đó các vụ đánh bom xảy ra ở Istanbul (năm 2003), Madrid (năm 2004) và London (năm 2005) là các sự kiện quan trọng nâng cao mức độ quan tâm cao về việc bảo vệ các mục tiêu cơ sở hạ tầng trọng yếu trước các vụ nổ.

Những vụ nổ có chủ đích đã thúc đẩy các nghiên cứu mạnh mẽ và sâu rộng nhằm giảm thiệt hại cho các công trình và đảm bảo an toàn cho con người. Các tiêu chuẩn và phương pháp thiết kế đã được phát triển để phân tích tính năng của kết cấu chịu tác động của vụ nổ và hướng dẫn cho các kỹ sư thiết kế. Tuy nhiên, đối với những công trình đã được thiết kế và xây dựng mà chưa được tính toán đến khả năng chịu tác động của vụ nổ, rất cần những giải pháp nhằm giảm thiểu tác động của loại tải trọng đặc biệt này. Vụ nổ bao gồm nhiều tác động khác nhau, trong đó áp lực của sóng xung kích có tác động lớn, trên diện rộng và được coi là tác nhân chính gây phá hoại công trình.

Đã có nhiều giải pháp được đưa ra để giảm thiểu tác động của áp lực nổ lên kết cấu công trình như đẩy xa tâm nổ ra khỏi công trình, gia cường cho kết cấu để gia tăng khả năng chịu lực. Một giải pháp được đưa ra là tận dụng khả năng hấp thụ năng lượng của vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng (vật liệu xốp) để hấp thụ năng lượng tác động của áp lực nổ, điều này sẽ cho phép kết cấu không phải tiếp nhận trực tiếp tác động của áp lực nổ nên sẽ làm gia tăng khả năng bảo vệ và hạn chế bị phá hoại. Hướng nghiên cứu này đã và đang tiếp tục được quan tâm nghiên cứu, ứng dụng và phát triển. Vì vậy, luận án **“Nghiên cứu ứng dụng vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng để giảm áp lực nổ lên kết cấu công trình”** là vấn đề có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

2. Mục đích của luận án

Mục đích của luận án là nghiên cứu cơ chế ứng xử và khả năng ứng dụng của vật liệu xốp trong việc hấp thụ năng lượng khi chịu tác động của áp lực từ vụ nổ. Từ đó đưa ra giải pháp cấu tạo phù hợp của kết cấu bảo vệ sử dụng vật liệu xốp để giảm tác dụng của áp lực nổ lên kết cấu công trình.

3. Đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là vật liệu xốp và ứng dụng vật liệu xốp để tạo thành kết cấu bảo vệ cho kết cấu công trình khi chịu tác động của áp lực từ vụ nổ gây ra.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu tập trung vào vật liệu xốp không phục hồi khi chịu tác động của lực nén ép.

Đối với tải trọng nghiên cứu chỉ xác định tác động do áp lực từ vụ nổ gây ra mà không kể đến các tác động khác từ vụ nổ.

Đối tượng kết cấu được bảo vệ trong cả thí nghiệm và mô phỏng là vật liệu bê tông cốt thép thông thường.

3.3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết, xây dựng các thí nghiệm trên mô hình trong phòng thí nghiệm và ngoài thực địa. Xây dựng và chuẩn hóa mô hình mô phỏng vụ nổ, tương tác đa vật liệu dựa trên việc xác minh chéo kết quả mô phỏng với kết quả thí nghiệm. Từ kết quả mô phỏng số đã được chuẩn hóa, tiến hành các thử nghiệm số để khảo sát, đánh giá hiệu quả của kết cấu bảo vệ có cấu trúc khác nhau và ứng dụng vào bảo vệ kết cấu công trình.

4. Cấu trúc của luận án

Luận án gồm phần mở đầu, 04 chương, phần kết luận và danh mục tài liệu tham khảo.

Mở đầu: Trình bày tính cấp thiết, mục đích, đối tượng, phạm vi, phương pháp nghiên cứu và bố cục của luận án.

Chương 1: Tổng quan về vấn đề nghiên cứu.

Chương 2: Nghiên cứu khả năng hấp thụ áp lực của vật liệu xốp và ứng dụng.

Chương 3: Nghiên cứu xây dựng và chuẩn hóa mô hình mô phỏng số.

Chương 4: Nghiên cứu ứng dụng kết cấu bảo vệ bằng vật liệu xốp giảm tác động của áp lực nổ.

Phân kết luận: Nêu các kết quả chính, các đóng góp của luận án, các hạn chế và phương hướng nghiên cứu tiếp theo.

Danh mục của các tài liệu tham khảo.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

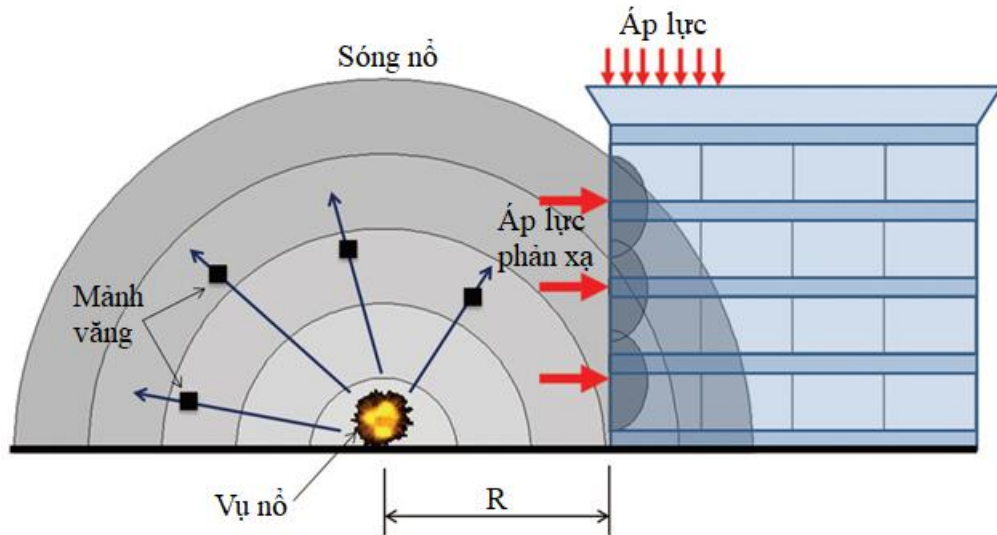
Trong chương trình bày sơ lược về đặc tính của vụ nổ, tổng quan về các giải pháp để giảm thiểu tác hại cho kết cấu khi chịu áp lực nổ. Trình bày các nghiên cứu sử dụng vật liệu xốp để giảm tác động của áp lực nổ, các phương pháp mô hình hóa tính chất cơ học của vật liệu xốp và khó khăn khi tính toán vật liệu xốp với kích thước lớn. Đánh giá khả năng ứng dụng mô phỏng số cho vụ nổ để khắc phục những khó khăn trong thực nghiệm nổ và cũng là giải pháp khả thi nhằm tính toán vật liệu xốp kích thước lớn.

1.1. Sơ lược về cơ chế và đặc tính của vụ nổ

Khi vụ nổ trong không khí xảy ra sẽ tạo ra một số các nhân tố tác động tiêu cực đến công trình nói chung và kết cấu công trình nói riêng, có thể kể đến một số yếu tố chính như tác động cháy, tác dụng mảnh văng và tác dụng nổ. Đối với tác dụng nổ thì tùy thuộc vào vị trí của vụ nổ, công trình có thể chịu tác dụng xung nổ tiếp xúc khi sản phẩm nổ có áp suất, nhiệt độ lớn tác dụng trực tiếp lên công trình hoặc chịu tác dụng của áp lực nổ do sóng xung kích lan truyền trong không khí [1-4].

1.1.1. Tác động của vụ nổ

Trong một vụ nổ, một phản ứng hóa học xảy ra dẫn đến sự tăng nhiệt độ và áp suất đột ngột. Các sóng xung kích do vụ nổ tạo ra, truyền đi và tác động vào các cấu trúc chướng ngại với áp suất lớn hơn áp suất khí quyển (Hình 1.1). Nói chung, các vụ nổ trong không khí tác động đối với một công trình thường tạo ra bốn loại tải trọng, bao gồm tác động của các mảnh vỡ chính, tác động của các mảnh thứ cấp, áp lực và áp lực phản xạ [5].

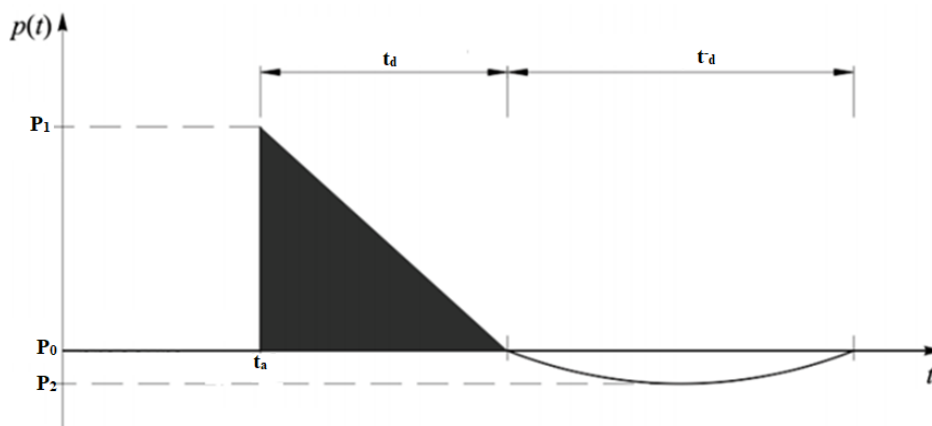


Hình 1.1. Tác động của vụ nổ lên công trình [6]

Các mảnh vỡ chính và thứ cấp đều có thể gây thương vong đáng kể, tuy nhiên chúng không gây ra hư hỏng lớn cho kết cấu. Khi sóng xung kích tác động đến một vật thể vuông góc với đường đi của nó, sóng bị phản xạ tạo ra áp lực cao. Độ lớn của áp lực phản xạ này phụ thuộc vào hình dạng, độ cứng của cấu trúc chướng ngại và hướng của nó đối với sóng nổ. Do đó, đối với các phần tử kết cấu, áp lực phản xạ được coi là tác động chính gây phá hoại của áp lực nổ [5].

1.1.2. Sóng xung kích

Vụ nổ là sự giải phóng năng lượng trên diện rộng, nhanh và đột ngột do quá trình đốt cháy mạnh của vật liệu nổ. Quá trình đốt cháy xảy ra trong vòng vài mili giây, tạo ra một thể tích khí có nhiệt độ cao và áp suất cao [3, 7]. Các khí này nở ra gây ra sự giải phóng năng lượng nhanh chóng và dẫn đến hình thành sóng nổ. Bề mặt của sóng (gọi là “mặt sóng xung kích”) truyền nhanh hơn tốc độ âm thanh, tạo ra áp lực phá hoại [2, 4, 8]. Chuyển động nhanh của sóng làm áp suất nổ vượt quá áp suất khí quyển, dẫn đến việc tạo ra một khoảng chân không đằng sau sóng nổ, được gọi là pha âm hay pha dẫn [2, 4, 9]. Trong giai đoạn này một phần chân không được tạo ra và không khí bị hút vào mang theo các mảnh vỡ ra xa nguồn nổ [10]. Áp lực của sóng xung kích, nhất là áp lực phản xạ là nguyên nhân tác động chính gây phá hoại các phần tử kết cấu công trình trên diện rộng. Do đó, đây là đối tượng tải trọng tính cần được quan tâm cũng như xem xét các yếu tố chính của vụ ảnh hưởng đến áp lực sóng xung kích là khoảng cách và khối lượng nổ.



Hình 1.2. Biểu đồ áp lực sóng xung kích của vụ nổ trong không khí

1.1.3. Ảnh hưởng khối lượng nổ hiệu dụng và khoảng cách

Để tính toán áp lực nổ theo thời gian của sóng nổ từ một vụ nổ thông thường, cần xem xét hai yếu tố quan trọng: khối lượng nổ hiệu dụng và khoảng cách tác động (SOD). Khối lượng nổ hiệu dụng phản ánh khối lượng chất nổ được kích nổ. Nó thường được biểu thị bằng trọng lượng tương đương của thuốc nổ trinitrotoluene (TNT). Đối với lượng nổ hình trụ, áp lực đỉnh và xung lực phụ thuộc vào vị trí kích nổ. Khi tỷ lệ chiều dài trên đường kính nhỏ, năng lượng hơn nổ được hướng nhiều hơn theo hướng trục, còn khi tỷ lệ chiều dài trên đường kính lớn, năng lượng được hướng nhiều hơn theo hướng xuyên tâm. Do đó, hình dạng lượng nổ về cơ bản sẽ ảnh hưởng đến áp lực đỉnh và xung lực [11].

SOD được tính từ trọng tâm của lượng nổ đến các bộ phận của công trình [12]. Đối với các vụ nổ có chủ đích, việc xác định SOD thích hợp cho một công trình xây dựng nhất định để chống lại các tác động của vụ nổ thường là rất khó, nhất là trong môi trường các đô thị. Thông thường, trong môi trường đô thị việc xác định SOD chính xác là khó có thể thực hiện và không thực tế. Hơn nữa, việc dự đoán khối lượng nổ của vũ khí hay một vụ tấn công nói chung là không khả thi. Tuy nhiên, DOD (2005) quy định một SOD tối thiểu dựa trên mức độ bảo vệ cần thiết [13]. Nếu SOD tối thiểu có thể được đáp ứng, các kỹ thuật xây dựng thông thường có thể được sử dụng để đạt được mức độ bảo vệ thích hợp, còn không thì công trình phải được tăng cường hoặc có các giải pháp bảo vệ khác.

1.1.4. Giới hạn tải trọng nghiên cứu

Thông qua tóm lược cơ bản nhất về tác động của vụ nổ cho thấy ảnh hưởng của sóng xung kích có tác động mạnh cũng như trên diện rộng và là yếu tố

chính tác động đến công trình. Khoảng cách từ lượng nổ tới đối tượng tác động được đặc biệt quan tâm vì áp lực của lượng nổ sẽ suy giảm nhanh khi khoảng cách tác động tăng lên. Bên cạnh đó để đảm bảo nội dung nghiên cứu phù hợp với đáp ứng của thiết bị thí nghiệm tại Học viện Kỹ thuật Quân sự, trong nghiên cứu này giới hạn tác động của tải trọng là áp lực của sóng xung kích từ vụ nổ.

1.2. Một số giải pháp giảm tác dụng áp lực nổ lên công trình

Để giảm tác dụng của áp lực nổ và gia tăng khả năng chịu lực cho kết cấu công trình, trong thực tế đã có nhiều giải pháp khác nhau để giảm tác dụng của loại tải trọng đặc biệt này.

1.2.1. Giải pháp chung

Tác động của vụ nổ lên công trình phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau như khoảng cách từ tâm nổ đến công trình, các chướng ngại giữa tâm nổ và công trình, điều kiện địa hình, khối lượng nổ hiệu dụng,... mà gây ra các tác động khác nhau lên công trình. Từ các đặc điểm cơ bản đó, trong thực tế ứng dụng đã có rất nhiều giải pháp khác nhau được đưa ra để giảm thiểu tác động của vụ nổ lên công trình.

Giải pháp đẩy xa tâm nổ khỏi công trình: đây là một trong những giải pháp mang ý nghĩa quan trọng do áp lực nổ được giảm thiểu đáng kể, sẽ hạn chế được tối đa khả năng nổ tiếp xúc để giảm áp suất, nhiệt độ lớn tác động trực tiếp lên công trình. Các kết quả thực nghiệm cho thấy áp lực nổ tác động lên công trình phụ thuộc rất lớn vào khoảng cách từ tâm nổ đến công trình, việc làm tăng khoảng cách này sẽ làm giảm đáng kể áp lực lên công trình [1, 2, 4].

Giải pháp sử dụng kết cấu bảo vệ phía trước công trình: trong thiết kế và chế tạo các công trình quân sự (công sự), việc sử dụng kết cấu tấm chắn đạn để đẩy xa tâm nổ nhằm làm giảm tác dụng của áp lực nổ lên kết cấu là một giải pháp hữu hiệu [14]. Ngoài ra để bảo vệ cho các công trình dân sinh, các tòa nhà (công trình nội) còn sử dụng các giải pháp tường chắn, hào, màn chắn sóng,... để giảm áp lực từ vụ nổ. Bên cạnh đó việc sử dụng các vật liệu trong tự nhiên có đặc tính xốp rỗng cũng được ứng dụng rộng rãi như việc sử dụng đất, cát, mùn cưa,... và đặc biệt là cát để làm lớp dàn lực (công sự lâu bền), sử dụng bao cát xếp xung quanh công trình (công sự dã chiến) đem lại hiệu quả tốt để giảm tác dụng của vụ nổ [14, 15].

Những giải pháp ở trên có nhiều ưu điểm nổi bật và được ứng dụng rộng rãi trong bảo vệ các công trình mang tính quân sự. Tuy nhiên, với các công

trình dân sinh thì việc áp dụng các giải pháp trên là khó khăn do yêu cầu sử dụng cũng như không gian hạn chế. Với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ chế tạo vật liệu mới đã mở ra nhiều những giải pháp khác nhau hữu ích và tiện lợi cho cả thiết kế chế tạo kết cấu, sử dụng vật liệu gia cường và vật liệu hấp thụ tác động nhằm giảm tác động của áp lực nổ lên công trình. Cũng như mở ra những giải pháp phù hợp hơn cho mỗi loại kết cấu công trình cần được bảo vệ. Trong nội dung tiếp theo sẽ đề cập đến giải pháp ứng dụng vật liệu giảm tác động của áp lực nổ.

1.2.2. Ứng dụng vật liệu chống tác động của áp lực nổ

Đối với kết cấu công trình hiện nay phần lớn được chế tạo từ bê tông cốt thép (BTCT), BTCT là loại bê tông thông thường được tạo ra từ các vật liệu cấu thành hỗn hợp tiêu chuẩn (xi măng, cốt liệu, nước, ...) và được gia cố bằng thép cây. Khi chịu áp lực nổ, kết cấu BTCT thể hiện ứng xử độc đáo được gọi là hiện tượng “chấn sụp”, xuất hiện ở mặt bên kia của kết cấu, đối diện với bề mặt chịu tác dụng của vụ nổ. Do đó, khi sóng nén ban đầu do vụ nổ tạo ra truyền qua cấu kiện và phản xạ tại bề mặt tự do, sóng xung kích được chuyển thành sóng kéo, gây nứt bê tông ở mức độ cao và gây nên sự vỡ mảnh của bê tông với tốc độ cao [15]. Kết cấu bê tông bị hư hỏng xảy ra ở tốc độ biến dạng cao (hiện tượng chấn sụp) có thể bị đẩy ra dưới dạng các mảnh vỡ. Đối với áp lực nổ dạng xung động cực hạn, phản ứng của kết cấu BTCT xảy ra trong một thời gian rất ngắn nên không tồn tại quá trình cản nhót [16]. Đỉnh dịch chuyển đầu tiên của kết cấu có biên độ lớn nhất, tiếp theo là các đỉnh dịch chuyển có biên độ thấp hơn đáng kể. Kết cấu thường bị phá hoại ngay trong lần dịch chuyển đầu tiên do biến dạng quá mức. Nếu kết cấu vượt qua được thì sẽ không bị hư hỏng trong các lần chuyển dịch tiếp theo. Do đó, đỉnh dịch chuyển đầu tiên thường được lựa chọn xem xét trong phân tích phản ứng của kết cấu BTCT đối với áp lực nổ [17].

Để gia tăng khả năng kháng lực cho kết cấu BTCT đã có nhiều giải pháp khác nhau như sử dụng các loại bê tông mới, gia cường cho bê tông thông thường [6], và sử dụng vật liệu hấp thụ năng lượng để giảm áp lực tác động.

1.2.2.1. Vật liệu tăng cường khả năng kháng lực cho kết cấu

a) Bê tông cốt sợi

Bê tông cốt sợi (FRC) tương tự như BTCT, song thép cây được thay thế một phần hoặc toàn bộ bằng các sợi rời rạc. Những sợi này có thể được phân

loại dựa trên vật liệu, loại, chiều dài, hình dạng, phần thể tích và kết cấu bề mặt của chúng. Thêm sợi vào hỗn hợp bê tông có thể làm tăng đáng kể độ dẻo cho bê tông bằng cách kết nối các vết nứt vi mô và vĩ mô trong khối kết dính bên trong bê tông [16]. Kết quả là, FRC thể hiện đặc tính dẻo hơn so với bê tông thông thường không có cốt sợi. Cốt sợi có thể nâng cao các đặc tính kỹ thuật của khối kết dính tùy thuộc vào tính chất và số lượng của cốt sợi đối với tổng khối lượng bê tông [17]. Điều này đã thúc đẩy các nhà nghiên cứu coi FRC như một giải pháp thay thế cho bê tông thông thường trong kết cấu chịu tác động từ vụ nổ.

Ứng xử của kết cấu bê tông cốt sợi thép (SFRC) khi chịu tác dụng nổ đã được nghiên cứu bởi Nam và cộng sự [18]. Kết quả cho thấy, độ bền uốn và độ bền kéo của sợi thép được tăng cường đáng kể. Khi kiểm tra độ sâu và đường kính vùng chấn sục, việc bổ sung thêm sợi thép đã làm giảm đáng kể phá hoại này. Hơn nữa, dưới tác dụng của vụ nổ, các phần tử BTCT thường bề mặt xuất hiện vùng chấn sục lớn và các mảnh vỡ bay ra theo nhiều hướng, trong khi các tấm SFRC chỉ xuất hiện những đốm nhỏ chấn sục [19].

Một yếu tố nữa là khối lượng sợi thép có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất của các tấm bê tông cường độ cao khi chịu tác dụng nổ. Chu-Jie và cộng sự đã chỉ ra rằng việc tăng khối lượng sợi thép có thể làm giảm đáng kể sóng ứng suất do nổ trong FRC, giảm gia tốc đỉnh ở đáy các tấm bê tông và giảm sự phá hủy các mặt tấm [19].

Hiệu suất tương tự cũng được thể hiện bởi bê tông cốt sợi polyetylen (PFRC) khi chịu tác dụng nổ [20]. PFRC có hiệu quả trong việc giảm hư hỏng do nứt vỡ và các mảnh bê tông phóng ra ngoài kết cấu bê tông. Tuy nhiên, kích thước vùng chấn sục trong cả mẫu PFRC và bê tông thông thường là tương đương nhau, nhưng tổng độ sâu phá hủy trong khối PFRC thấp hơn. Điều này có thể là do độ dai của sợi cao hơn, PFRC thể hiện độ bền uốn cao hơn SFRC [20]. Độ dẻo này là một đặc tính cơ học rất quan trọng đối với các phần tử chịu tác dụng nổ vì sự phá hủy kết cấu chủ yếu phụ thuộc vào sóng ứng suất kéo được phản xạ ở mặt sau của tấm.

Maalej và cộng sự đã nghiên cứu FRC lai (sử dụng kết hợp sợi thép và sợi polyetylen trong cùng một hỗn hợp bê tông). Họ kết luận rằng việc sử dụng FRC lai làm tăng khả năng chống nổ, chống lại hiện tượng chấn sục, vỡ và phân mảnh thấp hơn, đồng thời thể hiện khả năng hấp thụ năng lượng nổ tốt hơn [21].

Ngoài các loại sợi, cường độ nền bê tông có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng tổng thể của FRC khi chịu tác động nổ. Song và cộng sự đã đánh giá tính năng của bê tông cốt sợi cường độ siêu cao (UHFRC) khi chịu tác dụng nổ [22]. Các mẫu thử cho thấy độ bền cao hơn và hiệu suất vượt trội hơn về khả năng chống vụ nổ so với BTCT thông thường. Hệ số nén của UHFRC khi nổ tiếp xúc là 0.041, gấp khoảng ba lần so với FRC bình thường. Chính những đặc điểm ưu việt này đã cho ra đời bê tông cường độ siêu cao và đã thu hút sự quan tâm ngày càng lớn đến việc sử dụng các đặc tính ưu việt của nó trong việc chống nứt và tiêu hao năng lượng của áp lực nổ.

b) Bê tông cốt sợi thép cường độ siêu cao

Bê tông cốt sợi thép cường độ siêu cao (UHSFRC) là một thể hệ vật liệu kết dính tương đối mới. Thiết kế hỗn hợp của nó được đặc trưng bởi hàm lượng xi măng cao và tỷ lệ nước/xi măng rất thấp. Loại bỏ các cốt liệu thô và tối ưu hóa phân cấp kích thước hạt dẫn đến mật độ đóng rắn hạt cốt liệu cao và giảm thiểu sự không đồng nhất. UHSFRC có khả năng hấp thụ năng lượng rất cao, năng lượng đứt gãy của nó nằm trong khoảng từ 20,000 đến 40,000 J/m² [23]. Một số lo ngại đã nảy sinh liên quan đến các vấn đề mất ổn định tiềm ẩn của UHSFRC và chi phí cao của nó so với hiệu quả thu được. Yi và cộng sự đã khảo sát khả năng kháng nổ của UHSFRC so với bê tông thông thường. Các phép đo chuyển vị, biến dạng và gia tốc từ các thử nghiệm vụ nổ cho thấy, các mẫu UHSFRC có khả năng chống nổ cao hơn so với các mẫu bê tông thông thường. Điều này được cho là do sự hiện diện của các sợi thép ngắn trong hỗn hợp bê tông, giúp cải thiện các đặc tính giảm vết nứt và khả năng hấp thụ năng lượng. Trái ngược với mẫu bê tông thông thường, mẫu UHSFRC cho thấy chuyển vị thấp hơn và ít vết nứt hơn. Các thử nghiệm mẫu bê tông chịu tác động nổ cho thấy, việc sử dụng UHSFRC đã nâng cao hiệu quả giảm vết nứt và khả năng hấp thụ năng lượng một cách đáng kể [24].

c) Bê tông được gia cường bằng tấm cốt sợi

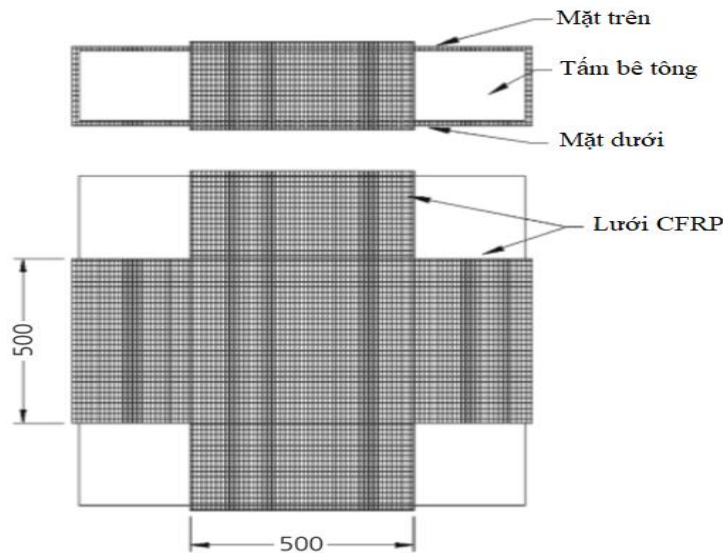
Đối với các kết cấu hoặc tòa nhà hiện có khi chịu tác động của vụ nổ, cần có các phương pháp mới để bảo vệ và tăng cường thêm khả năng chống nổ cho kết cấu. Sợi polyme gia cố (FRP) là vật liệu tổng hợp được làm từ cấu trúc cao phân tử và được dệt bằng các sợi có các đặc tính cơ học và hình học khác nhau. Khi kết cấu bê tông thông thường được bổ sung thêm lớp gia cố sợi polyme làm cho đặc tính cơ học được cải thiện và khả năng hấp thụ năng lượng được nâng cao, nên các tấm FRP được sử dụng trong các hệ thống chống nổ. Các thử

nghiệm nổ khác nhau đã được thực hiện trên các kết cấu BTCT thông thường được gia cố thêm FRP.

Trong nước, GS Vũ Đình Lợi và các cộng sự đã có nhiều nghiên cứu thực nghiệm hiện trường để đánh giá khả năng chống nổ của kết cấu chịu tác dụng nổ khi được gia cường các tấm polyme sợi carbon (CFRP) và tấm polyme sợi thủy tinh (GFRP) [25]. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khả năng chống nổ của tấm BTCT tăng đáng kể so với không được gia cường, đặc biệt khi tăng lượng nổ hiện tượng chấn sục trên các tấm BTCT có gia cường không xuất hiện trên cùng một khối lượng nổ và khoảng cách so với tấm BTCT không được gia cường. Một đóng góp lớn nữa của các nghiên cứu này khi chủ trương thay thế các thanh cốt thép thông thường bằng các thanh cốt sợi GFRP, với mục tiêu áp dụng cho các công trình trên hệ thống các đảo xa bờ chống lại các yếu tố xâm thực mạnh từ môi trường biển tới cốt thép. Thử nghiệm nổ được tiến hành trên các tấm BTCT và các mô hình thu nhỏ cho thấy kết quả tốt trong điều kiện cấp chịu lực của công trình cần áp dụng. Một mô hình thực của công trình đã được tác giả xây dựng và thử nghiệm với áp lực nổ đảm bảo khả năng chịu lực trong cấp kháng lực được xác định cho loại công trình đó. Tuy nhiên, một số vấn đề khó khăn nhất là việc tạo hình các thanh cốt GFRP không thực sự thuận lợi trong điều kiện thi công thực tế.

Trên thế giới, Muzsynski và Purcell đã tiến hành một loạt các thử nghiệm nổ quy mô lớn trên các bức tường BTCT thông thường được gia cố thêm tấm CFRP và GFRP [26]. Kết quả cho thấy, việc gia cố thêm trên bề mặt chịu kéo của tường đã tăng cường khả năng chống nổ của kết cấu so với các bức tường không được gia cố. Kết quả đối với các bức tường được gia cố thêm trên bề mặt chịu nén của chúng cho thấy các bức tường có thể chống lại ứng suất và chuyển vị cao hơn mà không bị phá hoại so với các bức tường không được gia cố.

Razaqpur và cộng sự đã nghiên cứu những cải tiến trong khả năng chống nổ của các tấm BTCT thông thường được gia cố thêm trên mỗi mặt với hai tấm GFRP được sắp xếp theo hình chữ thập, với mỗi tấm nằm song song với một trong các cạnh của tấm (Hình 1.3) [27].



Hình 1.3. Tấm bê tông gia cường sợi FRP [27]

Ở áp lực nổ thấp (thử nghiệm thuốc nổ amoni nitrat (ANFO) với khối lượng nổ 22.4 kg và khoảng cách 3.1 m), tấm bê tông được gia cố thêm GFRP thể hiện khả năng chống nổ cao hơn đáng kể so với tấm BTCT không được gia cố. Độ bền tĩnh sau vụ nổ của tấm bê tông được gia cố thêm lớn hơn 75% so với của tấm bê tông không được gia cố. Ở áp lực nổ cao (thử nghiệm nổ ANFO với khối lượng 33.4 kg và khoảng cách 3.1 m), hiệu suất của các tấm được gia cố thêm so với các tấm không được gia cố là không nhất quán. Trong một số trường hợp, tấm BTCT được gia cố thêm hoạt động tốt hơn tấm BTCT không được gia cố, trong khi các trường hợp khác cho thấy xu hướng ngược lại. Từ kết quả của các tấm BTCT khi chịu áp lực cao hơn ở một mức nào đó, rất khó để đưa ra kết luận chắc chắn về hiệu quả giảm áp lực nổ của các tấm có gia cường GFRP.

Ha và các cộng sự đã đề xuất một loại vật liệu mới bổ sung cho khả năng kháng nổ, bao gồm sử dụng kết hợp CFRP và phun sơn polyurea (PU) [28]. Vật liệu này có thể cải thiện độ cứng, độ dẻo và hiệu ứng bắn mảnh vỡ của các kết cấu BTCT được gia cường, vì nó là sự kết hợp của vật liệu có độ cứng và độ bền cao và vật liệu có độ dẻo cao. Các mẫu thử nghiệm là bê tông thường, được gia cố thêm CFRP, PU và CPU (CFRP lai với PU). Một kiểu nứt dạng lưng rùa rời rạc được quan sát thấy trong các mẫu BTCT. Các đường nứt có hình dạng của một loại lăng trụ hình nón với đường chảy dẻo từ tâm đến bốn góc, cho thấy cơ chế phá hoại màng hai chiều. Ngoài ra, các vết nứt cắt chéo hình thành trên các bề mặt bên, cho thấy khả năng bị trượt của tấm. Các phân bố vết nứt do cắt chỉ ra rằng, việc thiết kế các kết cấu bảo vệ bê tông thông thường phải

xem xét khả năng chịu tải. Các mẫu được gia cố thêm CFRP đã bị bong tróc và hư hỏng nghiêm trọng ở tâm và rìa mép. Các mẫu PU cho thấy nhiều vết nứt và bong tróc hơn so với các mẫu CFRP. Các mẫu lai CPU ít hiện rõ sự hư hại trên bề mặt của tấm, cho thấy hiệu quả gia cường tốt hơn. Dựa trên kết quả thử nghiệm, các mẫu CFRP, PU và CPU có hiệu quả tăng cường lần lượt là 21.4%, 15.7% và 37.4% so với các mẫu bê tông thông thường. Điều này cho thấy rằng, các mẫu lai CPU có mức kháng lực cao nhất và có khả năng đại diện cho một kiểu gia cố chống tác động nổ.

Tương tự, Ohkubo và cộng sự đã nghiên cứu hiệu quả của việc sử dụng các tấm cốt sợi để gia cường cho các tấm bê tông chịu tác động nổ [29]. Sự phá hoại của các tấm bê tông thông thường và bê tông tăng cường đã được kiểm chứng. Hai loại tấm cốt sợi khác nhau đã được đánh giá, bao gồm CFRP và sợi aramid (AFRP). Chiều dày tấm bê tông thực nghiệm 100 mm và cường độ mẫu bê tông là 25.9 MPa. Sự phá hoại của mẫu bê tông đối chứng là một vùng chấn sập ở phía đối diện với lượng nổ bị nứt vỡ đáng kể. Đối với các tấm bê tông được gia cố thêm một tấm CFRP thì sự phá hoại là vùng chấn sập, nứt vỡ, vết nứt chéo và hư hại bề mặt với mức độ nhỏ hơn so với các tấm bê tông không được gia cố. Đối với các mẫu thử được gia cố một tấm AFRP, sự phá hoại bao gồm vùng chấn sập và hư hại bề mặt nhỏ đi đáng kể. Khi tăng số lượng tấm gia cường lên hai tấm thì gia cố bằng tấm CFRP không cho thấy sự thay đổi đáng kể trong các chế độ phá hoại của chúng so với tấm tăng cường bằng một tấm. Ngược lại, khi sử dụng hai tấm AFRP thì vùng chấn sập gần như không hình thành. Do đó, tấm AFRP hiệu quả hơn nhiều trong việc tăng cường khả năng chống nổ của bê tông so với tấm CFRP trong việc giảm sự phá hoại kết cấu. Việc giảm đường kính vùng chấn sập đối với các tấm được gia cố bằng một lớp tấm CFRP là 10% so với mức giảm 43% đối với các tấm được gia cố bằng một lớp tấm AFRP. Sự cải thiện thậm chí còn rõ rệt hơn khi sử dụng hai lớp để gia cố là giảm 40% đường kính vùng chấn sập đối với CFRP và hơn 62% đối với các tấm AFRP. Tác động của việc tăng gấp đôi số lượng tấm CFRP và AFRP đối với độ sâu của vùng chấn sập là không đáng kể. Tuy nhiên, các mẫu được tăng cường bằng các tấm AFRP cho thấy độ sâu của vùng chấn sập giảm đi khoảng bốn lần so với các mẫu được tăng cường bằng các tấm CFRP. Điều này cho thấy khả năng chống nổ được tăng cường cao hơn của AFRP.

Ngoài ra, tấm polyme gia cường bằng thép (SRP) đã được đề xuất như một giải pháp thay thế tiềm năng cho CFRP để tăng cường cho dầm BTCT. Do

thành phần thép có trong loại vật liệu này, các tấm SRP có giá thành thấp hơn và có thể lắp đặt được tại các vị trí vuông góc nhưng cần sự chuẩn bị bo góc tối thiểu để tăng sự bám dính giữa tấm gia cố và kết cấu. Khả năng kháng nổ được so sánh giữa các mẫu không được gia cố và được gia cố bằng tấm SRP được Carriere và cộng sự thực hiện [30]. Tăng cường các cấu kiện BTCT bằng tấm SRP cho thấy bê tông ít bị phá hoại hơn. Điều này có được là do hiệu ứng tăng cường khả năng chịu lực của kết cấu sau khi được gia cố tấm SRP.

1.2.2.2. Vật liệu hấp thụ năng lượng tác động bảo vệ kết cấu

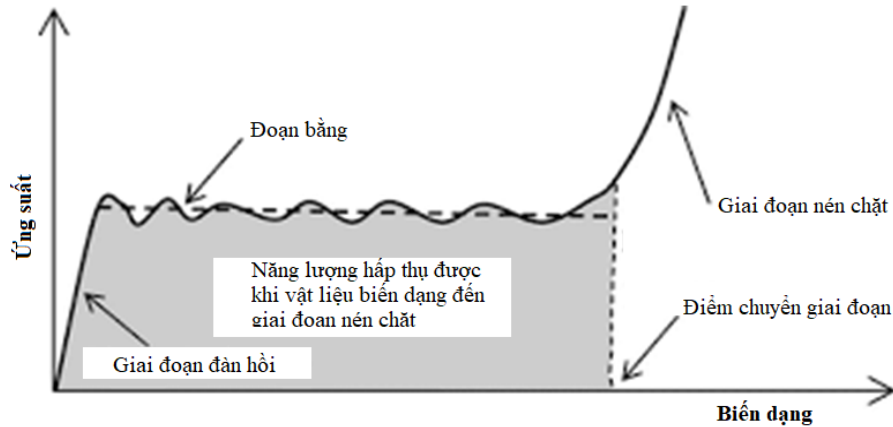
Trong tự nhiên có các thể lỗ rỗng có trong xương, tổ ong, thân cây và thành tế bào sống, như trong Hình 1.4.



Hình 1.4. Cấu trúc tồn tại tự nhiên của vật liệu xốp

Các vật liệu thành phần của những dạng này được phân phối một cách hiệu quả để đạt được độ bền cao như cấu trúc nhẹ hoặc tính linh hoạt cao tuân theo kết quả của quá trình tiến hóa và chọn lọc tự nhiên. Do đó, cấu trúc dạng màng cứng bên ngoài và thể rỗng bên trong giúp cho cấu trúc có độ cứng, độ bền cao và trọng lượng tương đối thấp. Chúng cũng có khả năng hấp thụ năng lượng cao, cùng với các đặc tính cách nhiệt và cách âm.

Một đặc tính quan trọng trong ứng xử cơ học của vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng (vật liệu xốp) là thêm chảy dẻo dài của vật liệu khi chịu nén, cho phép vật liệu có khả năng cao trong việc hấp thụ năng lượng. Đặc điểm này của vật liệu đã nảy sinh nhiều ý tưởng trong việc ứng dụng để làm kết cấu bảo vệ, nhằm giảm thiểu tác động của áp lực nổ lên kết cấu công trình.



Hình 1.5. Quan hệ ứng suất - biến dạng đặc trưng vật liệu xốp

Tỷ lệ hấp thụ năng lượng (hấp thụ năng lượng trên một diện tích) có thể được tính bằng cách sử dụng đường cong ứng suất - biến dạng [31]. Với vật liệu xốp kim loại, tỷ lệ hấp thụ năng lượng được tăng lên khi mật độ tăng là do khả năng chống biến dạng tăng nhanh theo mật độ kim loại. Kim loại dạng xốp cho thấy tốc độ biến dạng 5 ~ 40km/h với kết quả biến dạng 23 ~ 93%. Do đó, nó có hiệu quả cao trong việc hấp thụ năng lượng. Vật liệu xốp kim loại nhôm (nhôm bọt (Aluminium foam)), kết hợp nhôm và các lỗ rỗng đang được công nhận là chất hấp thụ năng lượng có thể đáp ứng các yêu cầu tăng cường trong hấp thụ năng lượng dạng xung lực và áp lực nổ [31-37]. Tỷ trọng của nhôm bọt thông thường bằng 10% nhôm nguyên khối, khả năng biến dạng cao và vật liệu này cho thấy tính năng hấp thụ va chạm lớn hơn gấp ba lần so với nhôm thông thường nên được dùng nhiều trong việc phát triển kết cấu bảo vệ chống tác dụng nổ.

Nhìn chung vật liệu xốp là vật liệu nhẹ, được phát triển có thể được sử dụng làm lớp bảo vệ cho các kết cấu trước các tác động xung kích. Chúng được đặc trưng bởi khả năng hấp thụ năng lượng cao với giá thành tương đối thấp. Kết cấu công trình bằng bê tông thông thường khi được bảo vệ bằng lớp phủ xốp, lớp xốp sẽ trải qua biến dạng lớn và hấp thụ một lượng lớn năng lượng nổ, do đó nâng cao khả năng chống lại áp lực nổ của kết cấu cần được bảo vệ. Trong số các dạng vật liệu xốp thông dụng hiện nay thì nhôm bọt là vật liệu mới được phát triển, bao gồm một mạng lưới kim loại dạng xương liên thông với nhau hoặc có màng đóng kín như dạng các túi chứa khí. Do thêm dẻo dai của vật liệu khi nén, nhôm bọt cho phép hấp thụ năng lượng cao ở mức ứng suất gần như không đổi. Điều này làm cho nó trở thành vật liệu “hoàn hảo” để giảm áp lực nổ lên kết cấu.

1.2.3. Bàn luận hiệu quả các giải pháp

Các vật liệu có độ bền cao, khả năng hấp thụ năng lượng cao và độ dẻo cao, được khuyến nghị sử dụng cho mục đích giảm tác động của áp lực nổ lên kết cấu công trình. Bê tông cốt sợi cường độ cao tiêu hao nhiều năng lượng hơn so với bê tông thông thường do cường độ kéo cao hơn và ảnh hưởng đáng kể của sợi trong việc hạn chế các vết nứt. Các mảnh bê tông vỡ ra và bắn ra xa có thể được giảm thiểu bằng cách sử dụng thép hoặc FRC do chúng tăng cường độ cũng như độ dẻo của bê tông. Thay đổi hàm lượng vật liệu chế tạo cốt sợi có thể dẫn đến sự thay đổi của kiểu hình thành vết nứt và giảm chuyển vị tối đa khi kết cấu chịu áp lực nổ. Việc tăng tỷ lệ cốt thép trong các cấu kiện BTCT giúp tăng cường khả năng chịu tải và khả năng hấp thụ năng lượng của chúng khi chịu tác dụng của áp lực nổ. Ngoài ra, sử dụng bê tông dễ vỡ cũng có thể là một giải pháp bảo vệ hiệu quả, giảm thiểu tác động của vụ nổ khi được đặt ở khoảng cách an toàn và sự nứt vỡ của bê tông dễ vỡ thành những mảnh nhỏ thường đi kèm với sự tiêu tán một lượng lớn năng lượng nổ thay cho những tường rào bằng bê tông thông thường.

Đối với các kết cấu công trình hiện có và chưa được tính toán thiết kế chịu tác dụng của tải trọng thì việc gia cố các kết cấu bê tông với lớp tấm cốt sợi, hay phun sơn polyurea phủ bên ngoài có thể nâng cao khả năng chịu lực của kết cấu. Tuy nhiên, kết cấu công trình vẫn phải tiếp nhận toàn bộ áp lực nổ nên vẫn có nguy cơ bị hư hỏng. Một yếu tố khác là các giải pháp này cần thời gian khá dài (khoảng 72 giờ hoặc hơn) để đảm bảo vật liệu gia cường có thể chịu lực được. Mặt khác, việc thi công lắp dựng (dán tấm cốt sợi, phun sơn) cũng yêu cầu kỹ thuật cao và máy móc chuyên dùng.

Việc sử dụng kết cấu bảo vệ được cấu tạo từ vật liệu xốp bao che bên ngoài kết cấu công trình, sẽ hấp thụ và tiêu tán một phần lớn năng lượng tác động của áp lực nổ trước khi tác động vào kết cấu công trình. Từ đó làm giảm khả năng bị hư hỏng và gia tăng khả năng chịu lực của kết cấu công trình khi được tính toán phù hợp với cấp áp lực đặt ra. Ngoài ra, với trọng lượng nhẹ và linh hoạt kết cấu bảo vệ dạng này có thể được lắp dựng đơn giản, tháo lắp và di chuyển khỏi kết cấu công trình, cũng như có thể tạo hình dễ dàng để đảm bảo về mặt không gian và thẩm mỹ cho công trình. Bên cạnh đó kết cấu bảo vệ hoạt động ngay được sau khi lắp dựng và việc thi công lắp dựng các tấm kết cấu bảo vệ ốp bên ngoài cũng đơn giản hơn so với các giải pháp gia cường bằng tấm cốt sợi hay phun sơn. Do đó, việc nghiên cứu ứng dụng vật liệu xốp cấu

tạo thành kết cấu bảo vệ cho kết cấu công trình chịu tác dụng của áp lực nổ có tính khả thi và thực tiễn cao.

1.3. Ứng dụng vật liệu xốp giảm tác động của áp lực nổ

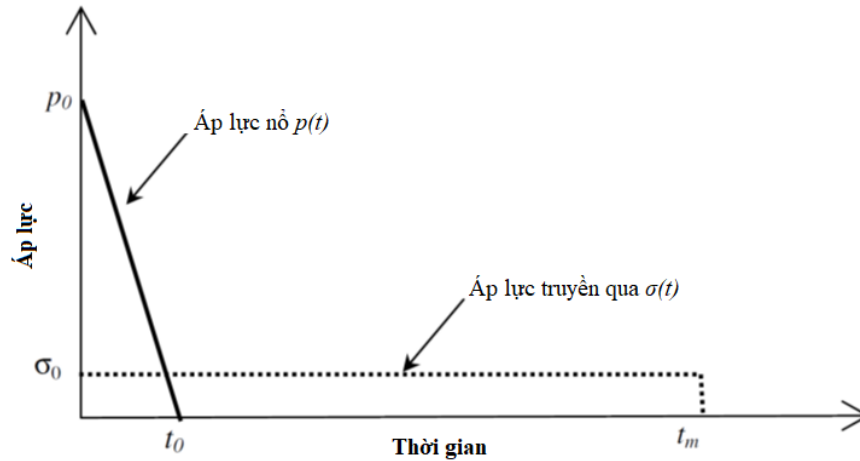
Các nghiên cứu công bố gần đây đều cho thấy khả năng giảm tác dụng nổ của vật liệu xốp đặc biệt vật liệu là nhôm bọt.

1.3.1. Một số nghiên cứu điển hình trên thế giới

Nghiên cứu của Mukai và cộng sự, Ma và Ye, các tác giả đã chỉ ra: Vật liệu nhôm bọt rất phù hợp để sử dụng làm kết cấu bảo vệ cho kết cấu chịu lực (hư hỏng sau khi chịu tác dụng của áp lực nổ), vì chúng có trọng lượng thấp, rẻ và đặc biệt có khả năng hấp thụ năng lượng lớn hơn so với các vật liệu khác [32, 38].

Trong các nghiên cứu của Ashby và cộng sự, Montanini cho thấy kim loại cấu trúc lỗ rỗng bao gồm vật liệu nền kim loại và các lỗ rỗng chứa khí ở bên trong (điển hình là vật liệu nhôm bọt). Khi chịu tác dụng nén ép từ bên ngoài, vật liệu dạng này cho phép hấp thụ năng lượng cao ở mức ứng suất gần như không đổi, làm cho nó trở thành một vật liệu lý tưởng để giảm tác động của tải nổ lên kết cấu cần bảo vệ [31, 39].

Các nghiên cứu của Skews và cộng sự, Hanssen và cộng sự, Chengqing Wu và cộng sự, cho thấy khi vụ nổ xảy ra, lớp vật liệu xốp trải qua một quá trình biến dạng lớn, hấp thụ một lượng lớn năng lượng. Dựa trên định luật bảo toàn động lượng, khi áp lực nổ tác động lên một kết cấu được bảo vệ bằng vật liệu xốp, xung tác dụng trên vật liệu xốp giống như xung truyền vào tác dụng lên kết cấu được bảo vệ [33]. Các lớp vật liệu xốp kéo dài quá trình tải nổ và chúng làm giảm áp lực cực đại tác động lên bề mặt tiếp xúc giữa xốp và thành phần kết cấu được bảo vệ, như minh họa trong Hình 1.6. Trong Hình 1.6, áp lực nổ được thể hiện dưới dạng áp lực tuyến tính theo thời gian $p(t)$ và lực truyền $\sigma(t)$ được coi là ứng suất trên Vùng 2 trong quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu xốp [34]. Do đó, áp lực nổ có thể được giảm thiểu bằng cách sử dụng tấm ốp bằng vật liệu xốp nếu kết cấu bảo vệ được thiết kế phù hợp [35].

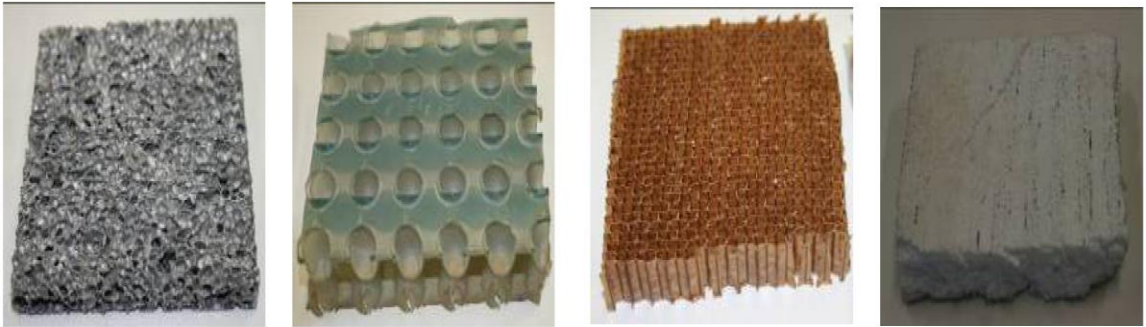


Hình 1.6. Áp lực nổ và áp lực khi truyền qua vật liệu xốp [34]

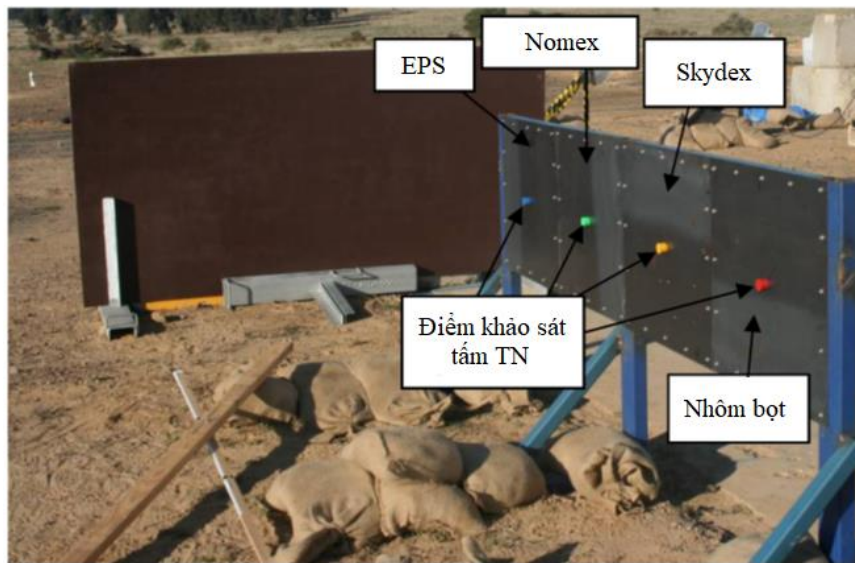
Karagiozova và cộng sự đã nghiên cứu các tính chất của tấm nhôm cấu trúc tổ ong và polystyrene chịu áp lực nổ gần bằng cả thử nghiệm và mô hình số [40]. Họ đã chỉ ra rằng, khi tải tăng lên, sự tăng mật độ của vật liệu có thể dẫn đến việc truyền lực cao đến mặt sau của các tấm thí nghiệm. Điều này cho thấy rằng các vật liệu hấp thụ năng lượng chỉ có thể được tối ưu hóa cho một tải cụ thể và có thể không làm việc với hiệu suất tốt khi vượt qua giá trị tải trọng cho phép. Họ cũng nhận thấy rằng, lực truyền đến mặt sau của các tấm thí nghiệm tăng lên với các tấm vật liệu xốp mỏng hơn. Đánh giá này cũng được hỗ trợ bởi Zhu, người đã so sánh một loạt các vật liệu nhôm cấu trúc tổ ong và nhôm bọt [41]. Đối với các tấm dày hơn, lực truyền có liên quan đến hiệu suất của vật liệu xốp (tỷ lệ giữa năng lượng hấp thụ trên một đơn vị khối lượng và mật độ vật liệu). Điều này dẫn đến gợi ý rằng các vật liệu nhẹ hơn với ứng suất trên Vùng 2 thỏa mãn áp lực do vụ nổ gây ra, có thể là vật liệu hấp thụ tác động tốt nhất và khi sử dụng lớp vật liệu xốp dày sẽ là khả thi với áp lực tác dụng cao hơn.

Bằng nghiên cứu thực nghiệm của mình H. Bornstein và K. Ackland đã công bố các kết quả thực nghiệm nổ cho các vật liệu khác nhau bao gồm: Nhôm bọt, Skydex®, Nomex® cấu trúc tổ ong và xốp EPS (Expandable PolyStyrene) [36]. Kết quả cho thấy nhôm bọt có tác dụng vượt trội so với các vật liệu còn lại khi chịu tác dụng của áp lực nổ tương đương.

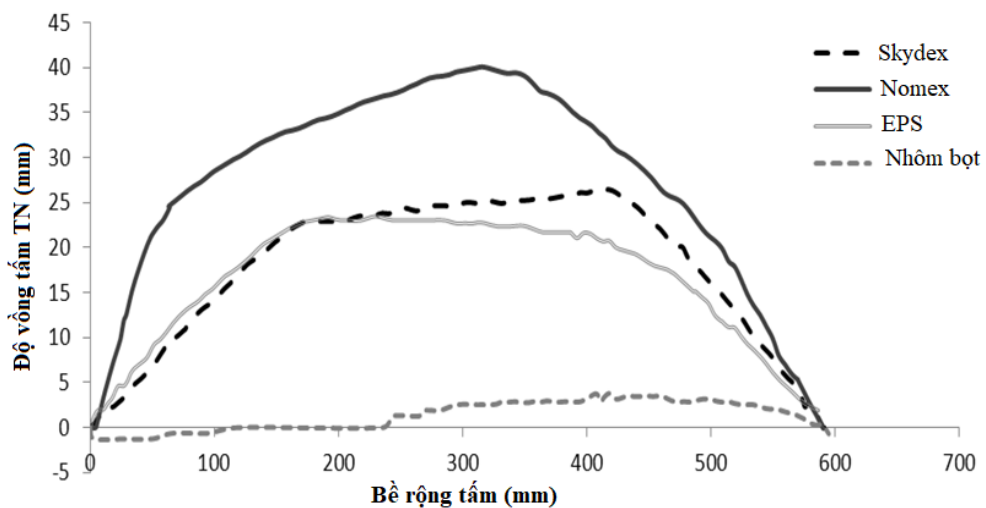
Điểm hạn chế trong thí nghiệm này là các tấm vật liệu có chiều dày không thống nhất trong đó nhôm bọt có chiều dày nhỏ nhất 14mm còn Skydex® có chiều dày lớn nhất là 25mm. Điều này càng cho thấy khả năng giảm tác dụng áp lực nổ của nhôm bọt rất lớn.



Hình 1.7. Nhôm bột, Skydex®, Nomex® tổ ong và xốp EPS trong thí nghiệm của H. Bornstein và K. Ackland [36]



Hình 1.8. Bố trí thí nghiệm hiện trường của H. Bornstein và K. Ackland [36]

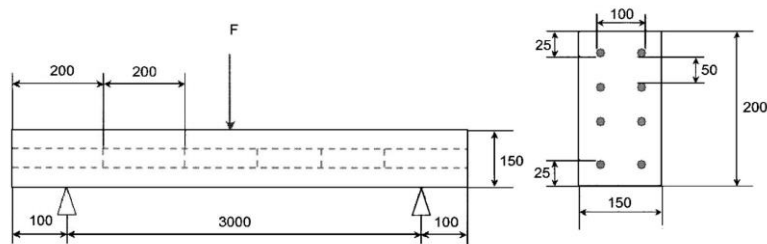


Hình 1.9. Độ võng tấm trong thí nghiệm của H. Bornstein và K. Ackland [36]

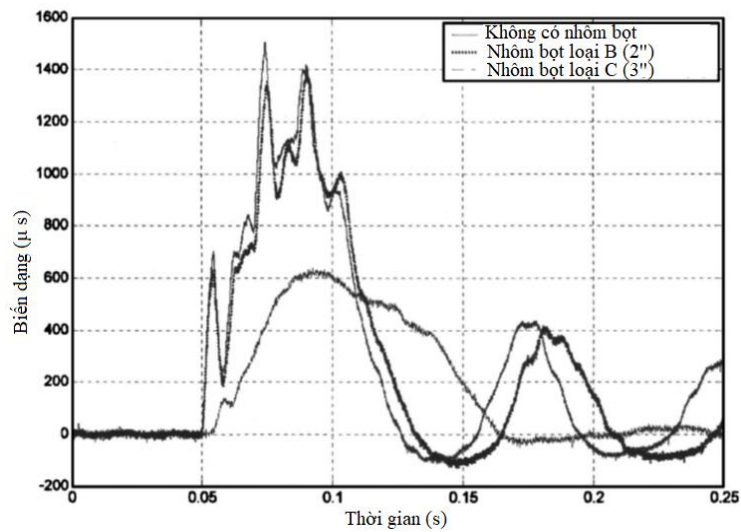
Các thử nghiệm nổ quy mô đầy đủ trên các tấm tường BTCT được phủ thêm nhôm bột đã được tiến hành gần đây. Các quan sát từ các nghiên cứu được thực hiện bởi Schenker và cộng sự chỉ ra rằng, các mẫu thí nghiệm được bảo

vệ bằng nhôm bột đã giảm hiệu quả các tác động của áp lực nổ trên tường BTCT [37, 42]. Các thí nghiệm nổ cũng đã được tiến hành trên các tấm tường BTCT được bảo vệ bằng nhôm bột, để xác minh tính hiệu quả của việc giảm áp lực do nổ [37].

Thí nghiệm của Schenker và cộng sự thực hiện thông qua tải trọng xung va đập trong phòng thí nghiệm lên dầm BTCT trong các trường hợp không có lớp vật liệu nhôm bột và có lớp vật liệu nhôm bột với các chiều dày khác nhau [42].



Hình 1.10. Cấu tạo dầm bê tông cốt thép trong thí nghiệm của Schenker [42]

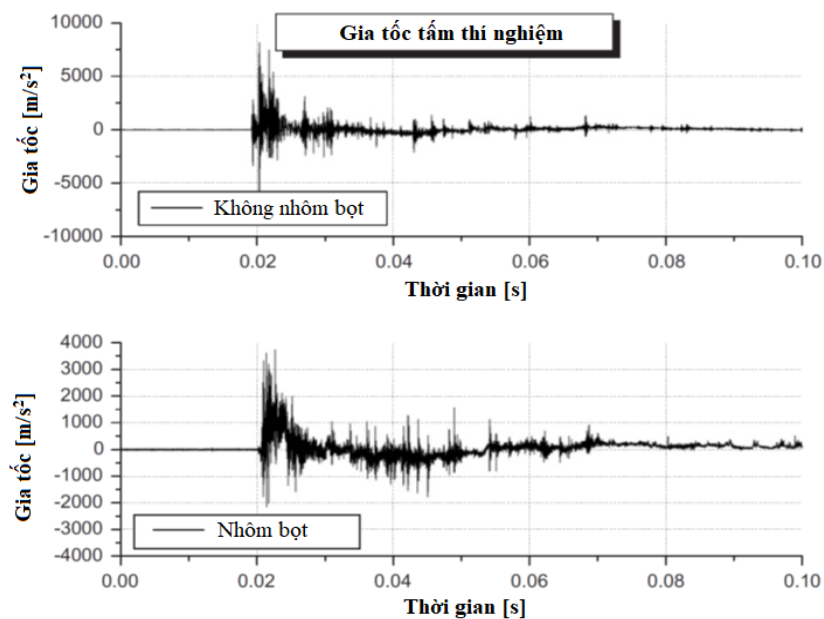


Hình 1.11. Kết quả biến dạng tại giữa thanh cốt thép của dầm trong thí nghiệm của Schenker [42]

Thí nghiệm của Schenker và cộng sự thực hiện đánh giá tác động của áp lực nổ lên kết cấu tấm tường BTCT với khối lượng thuốc nổ TNT lên đến gần 1000kg hình bán cầu [37]. Kết quả thí nghiệm cho thấy hiệu quả tốt trong việc hấp thụ tác động của áp lực nổ, gia tốc giảm lên đến 50% như trên Hình 1.13.



Hình 1.12. Thí nghiệm kết cấu chịu áp lực nổ của Schenker [37]



Hình 1.13. Kết quả đo gia tốc trong thí nghiệm của Schenker [37]

Ngoài những nghiên cứu điển hình trên còn nhiều các nghiên cứu khác gần đây về vật liệu xốp như: Thuy-Tien N Nguyen và William G Proud, H. Ousji và cộng sự, Sigit P. Santota và cộng sự, Ye Xia và cộng sự, Michelle S. Hoo Fatt và cộng sự, Inderpal Singh Sandhu và cộng sự, Jinglin Xu và cộng sự, Hosein Andami và Hamid Toopchi-Nezhad, Chitralekha Dey và cộng sự,...[43-51]. Các nghiên cứu đều cho thấy tác dụng hấp thụ năng lượng vụ nổ của vật liệu xốp, với thêm biến dạng lớn, cho phép một lượng lớn năng lượng nổ bị tiêu tán khi đi qua lớp kết cấu bảo vệ được cấu tạo từ dạng vật liệu này.

1.3.2. Tình hình nghiên cứu trong nước

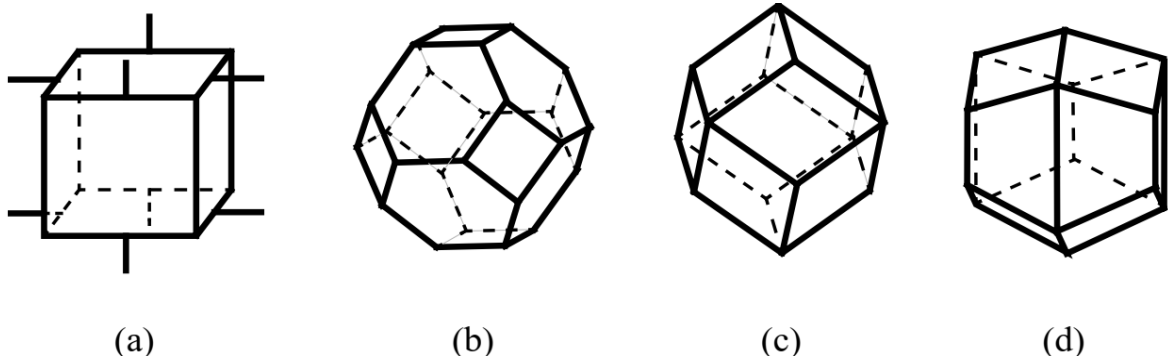
Vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng nói chung đã được ứng dụng nhiều trong các lĩnh vực như cách âm, cách nhiệt cho các công trình dân dụng và công nghiệp.

Ở nước ta, việc nghiên cứu ứng xử của loại vật liệu xốp và ứng dụng nó để giảm tác động của áp lực nổ chưa có công trình nghiên cứu đầy đủ và cụ thể nào được công bố.

1.3.3. Mô hình hóa vật liệu xốp mật độ thấp

1.3.3.1. Các dạng mô hình truyền thống

Từ thực tế cấu trúc vật liệu mà thông thường mô hình 2D ít được xem xét vì chúng không phù hợp để đánh giá đúng cơ chế biến dạng của vật liệu xốp 3D thực. Nhóm đầu tiên của các mô hình thông dụng trong 3D bao gồm các mô hình dựa trên cấu trúc các thanh chống được thể hiện đối xứng, đều đặn. Kích thước của các ô đơn vị trong vật liệu của các mô hình này xấp xỉ bằng chiều dài thanh chống.



Hình 1.14. Các mô hình thông thường, dựa trên cách cấu tạo ô lỗ rỗng: (a) Mô hình khối lập phương, (b) Khối tetrakaidecahedron, (c) Khối 12 mặt hình thoi, (d) Khối 12 mặt hình thang [52]

Mô tả toàn diện nhất về loại mô hình lăng trụ hình chữ nhật như trên Hình 1.14a, được đưa ra bởi Gibson và Ashby [52]. Phản ứng ban đầu của ô đơn vị về biến dạng nén đơn trục được điều chỉnh bởi sự uốn cong của thanh chống. Tiết diện ngang của thanh chống đã được đơn giản hóa thành hình vuông. Một ưu thế lớn là sự đơn giản của các mô hình này, trong đó các ô đơn vị thông thường lấp đầy không gian xốp hoàn toàn thông qua sự lặp lại và xếp chồng của các ô.

Một mô hình mở rộng khác, dựa trên khối Tetrakaidecahedron, đã được xem xét bởi Dementjev và Tarakanov, Renz và Ehrenstein, Lakes và cộng sự, Zhu và cộng sự [53-56]. Mô hình được thể hiện trong Hình 1.14c. Nó bao gồm sáu hình tứ giác và tám mặt hình lục giác. Hình học của mô hình vật liệu xốp dạng này tương ứng với hình học vật liệu xốp thực hơn so với mô hình hình khối lập phương.

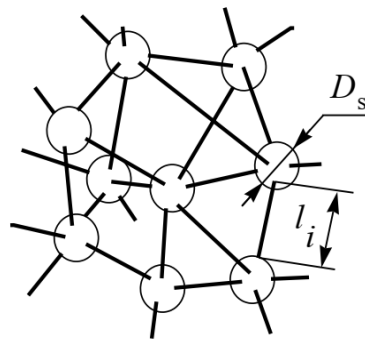
Các cách tiếp cận khác cho các mô hình 3D có cấu tạo “hoàn hảo” là một khối đa diện 12 mặt hình thoi và dạng khối hình thang đều nhau, được mô tả tương ứng như trong Hình 1.14c và Hình 1.14d. Hai dạng lỗ rỗng mở này có thể được bắt nguồn từ hai hình học cấu thành gần nhất với hình cầu: cấu thành dạng hình lục giác (HEX) và dạng hình khối hướng tâm (FCC). Khối đa diện 12 mặt hình thoi có một phép đối xứng lập phương (trục giao), là một khối Tetrakaidecahedron, vì vậy các tính chất cơ học của các cấu trúc lỗ rỗng đơn vị là bằng nhau theo ba hướng chính. Điều này trái ngược với khối hình thang đều nhau tương đối cứng theo một hướng do sự liên kết của các thanh chống theo hướng đó, tính chất đàn hồi của hai lỗ rỗng đơn vị này đã được nghiên cứu bởi Ko [57].

Ngoài các dạng mô hình được mô tả theo các hình khối như trên còn có một số cách tiếp cận khác nhau để mô tả cấu trúc vật liệu xốp như:

Một cách tiếp cận hoàn toàn khác đã được Lederman sử dụng để tạo ra một mô hình vật liệu xốp [58]. Sự ngẫu nhiên được đưa vào mô hình bằng cách sử dụng các sợi phân bố ngẫu nhiên. Các sợi mảnh có chiều dài trung bình

$$\bar{l} = \left(\sum_{i=1}^k l_i \right) / k, \text{ diện tích mặt cắt ngang } a \text{ và được kết nối 3D với các khối cầu}$$

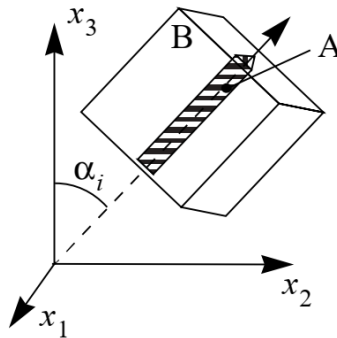
cứng có đường kính D_s (N sợi được nối với mỗi khối cầu). Biểu diễn hình học của mô hình được minh họa trong Hình 1.15. Những hạn chế chính của mô hình này là: không kết hợp sự uốn cong của các thanh chống và các yêu cầu cấu trúc liên kết về kết nối hình học giữa các cạnh, đỉnh của các ô lỗ rỗng không được thỏa mãn. Do đó, định hướng ngẫu nhiên của các sợi trong mô hình không có nền tảng vật lý (vi phạm các định luật của Plateau). Khái niệm về ô lỗ rỗng biến mất và cấu trúc như vậy vi phạm công thức của Euler.



Hình 1.15. Mô hình xốp ngẫu nhiên của Lederman [58]

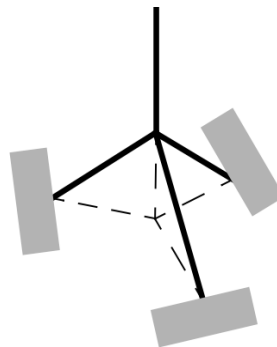
Một loại mô hình khác là mô hình cấu trúc phân tử khối cũng được nghiên cứu bao gồm hai loại cơ bản:

Mô hình hỗn hợp được phát triển bởi Cunningham, bao gồm một kết cấu thanh chống “A” được bao quanh bởi ma trận mô đun khối lượng mật độ thấp “B”, như được minh họa trong Hình 1.16 [59, 60]. Các hằng số hiệu dụng được tính trung bình trên tất cả các hướng có thể có α_i của phần tử thể tích trong không gian 3D. Đối với cấu trúc đẳng hướng, mô đun đàn hồi được xác định chỉ có khoảng gần 1/6 bộ phận của các phần tử cấu trúc khối được định hướng gần với hướng tải và do đó là “phần tử hỗn hợp” chịu tải hiệu quả. Điều này chỉ ra rõ ràng rằng mô hình này dựa chỉ trên biến dạng dọc trục của thanh chống là cơ chế biến dạng chính. Do đó, nó không thực tế, bởi vì việc uốn cong của các thanh chống là rất quan trọng.



Hình 1.16. Mô hình hỗn hợp của Cunningham [59, 60]

Một mô hình khác để dự đoán các tính chất cơ học của vật liệu xốp lỗ rỗng mở là mô hình phân tử tứ diện của Warren và Kraynik, được trình bày trong Hình 1.17 [61]. Nó là sự mở rộng hợp lý của yếu tố cấu trúc 2D, được mô tả bởi Gioumousis, Warren và Kraynik và sau đó được Hall, Papka và Kyriakides sử dụng [62-65].



Hình 1.17. Mô hình phân tử tứ diện của Warren và Kraynik [61]

Trái ngược với trường hợp 2D trong đó phần tử cấu trúc có thể được lắp ráp thành một cấu trúc dạng tổ ong hình lục giác, phần tử tứ diện không thể được tập hợp thành một mạng có trật tự, như Matzke đã chứng minh [66].

Các mô hình nêu trên tuy khá đơn giản về mặt cấu tạo và tính toán nhưng các kết quả mới chủ yếu dừng lại ở việc xác định được mô đun đàn hồi của vật liệu xốp. Các giai đoạn khác trong quan hệ ứng suất - biến dạng chưa thể hiện được, đặc biệt là Vùng 2 với thềm chảy dẻo dài. Để khắc phục các hạn chế này và cùng với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học máy tính, kỹ thuật tính toán và các phương pháp toán học cho phép các phương pháp xây dựng mô hình vật liệu xốp sát với thực tế hơn.

1.3.3.2. Mô hình hóa vật liệu xốp dựa trên kỹ thuật phân vùng Voronoi

Mô hình khối tetrakaidecahedron đã được giả định là phù hợp nhất trong số các khối đa diện lấp đầy không gian cho các điều kiện này. Chỉ có tiêu chí cuối cùng là có hạn chế: góc trung bình giữa các cạnh bằng 110^0 với hai đỉnh là 120^0 và 90^0 . Sự vi phạm hình học này có thể ảnh hưởng đến các đặc tính cơ học của mô hình vật liệu xốp.

Các mô hình thông thường hiện có, có thể được cải thiện bằng cách tăng số lượng các ô bao quanh, tức là kích thước mô hình và bằng cách phát triển mô hình với các khối lỗ rỗng không đồng đều. Một nỗ lực đã được thực hiện bởi Valuyskikh, để ngẫu nhiên hóa một mô hình thông thường thông qua độ lệch ngẫu nhiên của các nút của khối tetrakaidecahedron [67]. Do tính ngẫu nhiên (một cấu trúc ngẫu nhiên được xây dựng trên cấu trúc thông thường ban đầu), kết quả là cấu trúc mô hình đã bỏ qua các đặc điểm hình học rất quan trọng của xốp thực, như mặt của các lỗ rỗng trở thành không phẳng và mô hình lỗ rỗng kín không còn tính đúng đắn. Do đó, mô hình hầu như không đại diện cho các xốp ngẫu nhiên thực tế.

Một cải tiến của mô hình được thực hiện bởi các nghiên cứu của Gent và Thomas, Valuyskikh, cấu trúc vật liệu xốp được mô hình hóa gần hơn với cấu trúc vi mô của vật liệu xốp thực tế [67, 68]. Điều này được thực hiện bằng cách lấy các cấu trúc vi mô xốp 3D trong lỗ rỗng đơn vị từ sự ngắt quãng của không gian lưới Voronoi được mô tả bởi Voronoi [69]. Weaire và Fortes đã chỉ ra rằng tính ngẫu nhiên của cấu trúc rất quan trọng đối với các đặc tính cơ học của mô hình [70]. Họ cũng lưu ý rằng, trái ngược với trường hợp 2D, mô hình 3D Voronoi vẫn chưa được khám phá vào thời điểm đó. Trong lưới Voronoi, dạng

hình học cuối cùng dựa trên sự phân bố của các hạt nhân (tâm của các lỗ rỗng trong xốp). Quy trình này tương tự như quá trình vật lý của quá trình tạo mầm các hạt nhân và phát triển của các bong bóng khí trong chất lỏng trong quá trình hình thành lỗ rỗng. Một dạng hình học Voronoi được tạo ra về mặt cấu trúc liên kết rất giống với các cấu trúc hình học do quá trình tăng trưởng tạo ra theo các giả định sau, được đưa ra bởi Boots [71]:

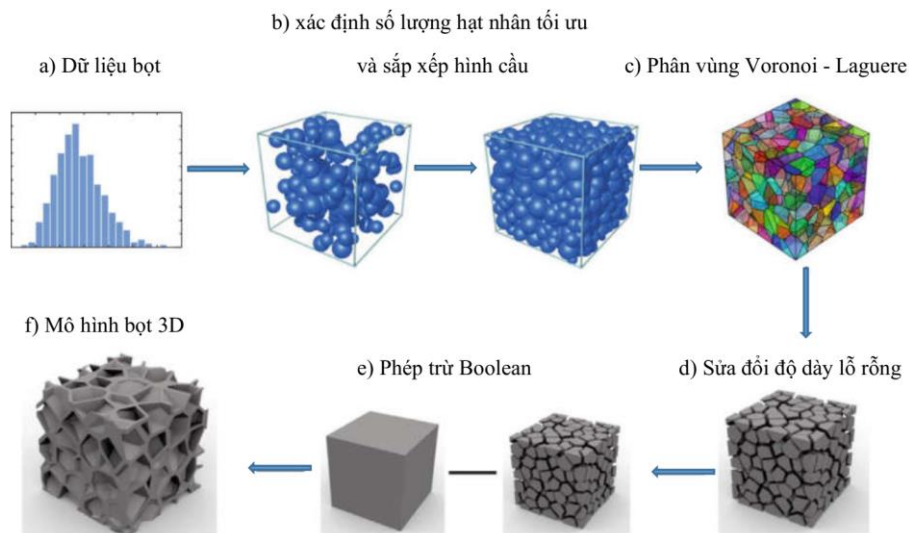
Tất cả các hạt nhân xuất hiện đồng thời;

Tất cả các hạt nhân vẫn cố định ở vị trí trong suốt quá trình tăng trưởng;

Tại mỗi hạt nhân, sự phát triển của lỗ rỗng diễn ra với tốc độ như nhau theo mọi hướng (tức là tăng trưởng đẳng hướng);

Tốc độ tăng trưởng là như nhau đối với mỗi lỗ rỗng liên kết với một nhân;

Sự phát triển của một lỗ rỗng chấm dứt bất cứ khi nào và bất cứ nơi nào lỗ rỗng tiếp xúc với một lỗ rỗng lân cận.



Hình 1.18. Quy trình tạo mô hình vật liệu xốp 3D [72]

Các cấu trúc lỗ rỗng được tạo ra theo phương pháp này sẽ thể hiện được đầy đủ các ứng xử của xốp thực. Tuy nhiên, phương pháp này yêu cầu các giải pháp kỹ thuật phức tạp nhằm thu thập được dữ liệu cấu trúc bột thực cần nghiên cứu. Bên cạnh đó việc xây dựng mô hình số theo phương pháp này cho kết cấu thực có kích thước lớn là khó khả thi trong các điều kiện còn hạn chế về năng lực phần cứng máy tính. Do đó, các nghiên cứu hiện nay cơ bản vẫn dừng ở mức mô tả các mẫu vật liệu xốp có kích thước nhỏ.

1.3.4. Bàn luận vấn đề nghiên cứu

Từ nội dung tổng hợp các nghiên cứu trên thế giới cho thấy các loại vật liệu xốp nói chung và đặc biệt là vật liệu nhôm bọt có khả năng hấp thụ năng lượng rất lớn, trọng lượng nhẹ nên rất phù hợp cho việc cấu tạo thành kết cấu bảo vệ làm giảm tác động của áp lực nổ lên kết cấu công trình.

Có nhiều phương pháp tiếp cận để mô hình hóa ứng xử của vật liệu xốp khi chịu tác động nén ép. Các phương pháp tính truyền thống mới chỉ quan tâm xác định mô đun đàn hồi tức thời của vật liệu xốp, chưa thực sự phản ánh được sự làm việc của vật liệu xốp. Phương pháp mô hình hóa dựa trên kỹ thuật phân vùng Voronoi cho phép xây dựng được mô hình sát với khả năng làm việc của xốp thực. Tuy nhiên, phương pháp này yêu cầu các giải pháp tính toán phức tạp và cũng chủ yếu phù hợp cho nghiên cứu trên các mẫu kích thước nhỏ.

Những nhận xét, đánh giá trên cho thấy hướng nghiên cứu sử dụng vật liệu xốp để tạo thành kết cấu bảo vệ kết cấu công trình chịu áp lực nổ là vấn đề rất có nghĩa thực tế và tiềm năng ứng dụng cao. Các phương pháp mô hình hóa cấu trúc vi mô của vật liệu để áp dụng tính toán trên kết cấu lớn là khó khăn. Do đó, nghiên cứu mô hình vật liệu dựa trên mô phỏng số có kể đến đặc tính ứng xử của vật liệu xốp thực là hướng tiếp cận phù hợp với tính toán kết cấu có kể đến sự làm việc của vật liệu xốp.

1.4. Nghiên cứu thực nghiệm nổ và mô phỏng số

Một vấn đề đặt ra trong nghiên cứu đó là những khó khăn trong thực nghiệm nổ ngoài thực địa với những đòi hỏi quy trình tương đối phức tạp. Hiện nay trên thế giới xu hướng nghiên cứu thực nghiệm nổ bằng mô phỏng số thay thế thông qua xác minh chéo với kết quả thực nghiệm được áp dụng phổ biến. Trong nội dung này trình bày những đánh giá về thực nghiệm nổ và lựa chọn phần mềm mô phỏng số phù hợp cho nội dung nghiên cứu.

1.4.1. Thực nghiệm nổ hiện trường

Thực nghiệm trong kỹ thuật nói chung và đặc biệt là thực nghiệm nổ đòi hỏi một cơ sở vật chất đầy đủ để đảm bảo an toàn khi thực hiện các vụ nổ. Các thực nghiệm nổ trong phòng thí nghiệm thường bị hạn chế về khối lượng nổ. Bên cạnh đó việc thực nghiệm nổ lớn ngoài hiện trường đòi hỏi chi phí lớn, không gian rộng và phải được sự quản lý chặt chẽ của các cấp có thẩm quyền. Một yếu tố quan trọng khác là kỹ thuật thực hiện các vụ nổ phải do các nhà

chuyên môn thực hiện trong một quy trình nghiêm ngặt để hạn chế thấp nhất các rủi ro tiềm ẩn gây ra trong quá trình thực nghiệm.

Từ những hạn chế của thực nghiệm nổ hiện trường, đòi hỏi cần có một phương pháp thay thế tin cậy giúp cho việc nghiên cứu các vấn đề khoa học liên quan đến vụ nổ, vẫn có thể được thực hiện và giảm bớt sự phụ thuộc vào thực nghiệm nổ hiện trường. Cùng với sự phát triển của khoa học máy tính và các phương pháp tính toán động lực học tiên tiến đã cho ra đời nhiều bộ phần mềm cho phép thực hiện các thí nghiệm vụ nổ trên mô hình mô phỏng số và các phần mềm này ngày càng được phát triển, hoàn thiện tốt hơn.

1.4.2. Phần mềm phân tích phần tử hữu hạn mô phỏng số vụ nổ

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) là phương pháp số được áp dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu khác nhau. Phương pháp này là công cụ để xây dựng các phần mềm mô phỏng số như mô phỏng số vụ nổ, mô phỏng số các loại vật liệu kết hợp với tính toán trạng thái ứng suất - biến dạng của kết cấu.

Việc tính toán kết cấu chịu tác dụng của vụ nổ là phân tích phản ứng của kết cấu theo thời gian tác động của tải trọng. Trong đó, thời gian gia tải là ngắn hạn và tần số rung động cao, đây là phân tích động của động lực học tức thời. Ngoài ra, ứng xử của vật liệu, sự thay đổi hình dạng kết cấu và các trạng thái của bài toán đều có tính phi tuyến cao. Để giải quyết các vấn đề liên quan đến mô phỏng số kết cấu chịu tác dụng nổ, công cụ phân tích phải có các tiêu chí sau:

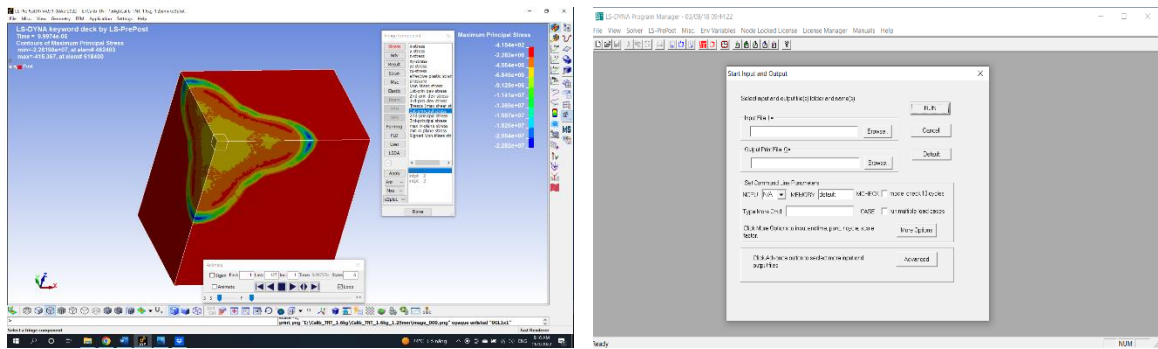
- (1) Có thời gian tải và phản hồi đặc trưng trong một mili giây;
- (2) Có đủ khả năng xử lý các vấn đề phi tuyến vật liệu, phi tuyến hình học và phi tuyến trạng thái;
- (3) Cho phép mô phỏng phân tích động phi tuyến cao;
- (4) Có thể xử lý các vấn đề về yêu cầu vật liệu và tiếp xúc giữa vật liệu mềm và cứng;
- (5) Có khả năng phân tích sự thay đổi lớn hoặc biến dạng lớn của vật liệu chịu ứng suất.

Hiện nay có nhiều phần mềm được phát triển để phân tích mô phỏng số động lực học kết cấu chịu tác động của vụ nổ như LS-DYNA, DYTRAN, ABAQUS, ANSYS, HYPERWORKS,...

Trong các phần mềm mô phỏng nêu trên thì LS-DYNA là phần mềm mô phỏng các bài toán vật lý cơ bản do hãng Livermore Software Technology Corporation (LSTC) nghiên cứu phát triển. Với khả năng giải các bài toán động lực học phi tuyến, LS-DYNA được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công nghiệp ô tô, tàu thủy, xây dựng, quân sự... Từ năm 1976, LS-DYNA được phát triển từ phần mềm DYNA3D, phát triển bởi tiến sĩ John O. Hallquist tại phòng thí nghiệm quốc gia Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) với mục đích quân sự. Vào thời điểm đó, không phần mềm 3D nào có khả năng mô phỏng bài toán nổ mìn, bài toán va chạm trong khi các phần mềm 2D tỏ ra không phù hợp. Sau đó, DYNA3D tiếp tục liên tục được phát triển và từ năm 1978, bộ mã nguồn của DYNA3D được dần sử dụng rộng rãi hơn trong các lĩnh vực dân sự. Năm 1979, DYNA3D ra phiên bản mới được lập trình tối ưu hóa thực thi trên các siêu máy tính. Phiên bản này bao gồm nhiều cải tiến giải bài toán tiếp xúc giữa các vật thể. Tiếp đó, phiên bản được phát hành năm 1982 bao gồm thêm 9 mô hình vật liệu cho phép mô phỏng tương tác giữa vụ nổ với kết cấu (explosive-structure) và tương tác đất đá với kết cấu (soilstructure interactions SSI). Tốc độ tính toán của phiên bản này cũng nhanh hơn 10% so với trước đây. Phiên bản năm 1986 được bổ sung thêm nhiều dạng phần tử như dầm, vỏ, khối cũng như các tính năng mô phỏng mới như tiếp xúc bề mặt, giảm chấn (dampers)... Tính đến năm 1988, tiến sĩ Hallquist đã tư vấn cho gần 60 công ty và tổ chức về việc sử dụng phần mềm DYNA3D. Cuối năm 1988, LSTC được thành lập để tiếp tục phát triển phần mềm DYNA3D. Kết quả là phần mềm LS-DYNA3D (hoặc viết gọn hơn LS-DYNA) ra đời và luôn được mở rộng tính năng. Từ đó LS-DYNA trở thành một công cụ mạnh đáp ứng được hầu hết các yêu cầu mô phỏng bài toán động lực học

LS-DYNA là một phần mềm mô phỏng mạnh mẽ, trong đó phép tích phân hiện (Explicit) được sử dụng để phân tích phản ứng động phi tuyến của các kết cấu ba chiều. LS-DYNA có thư viện mô hình vật liệu phong phú, khả năng phân tích tiếp xúc hoàn toàn tự động và các tính năng kiểm tra lỗi, đã cho phép người dùng giải quyết nhiều vấn đề phức tạp về va đập tốc độ cao và động lực học vụ nổ. Các lĩnh vực ứng dụng chính của LS-DYNA bao gồm: Mô phỏng động lực học và tiếp xúc biến dạng lớn, mô phỏng mức độ va chạm, hệ thống an toàn, tạo hình kim loại, thủy tinh và chất dẻo, ghép nối đa vật lý, phân tích hư hỏng, động lực học chất lỏng, chất khí... Phần mềm LS-DYNA có khả năng mạnh trong phân tích động lực học và tiếp xúc biến dạng lớn, sự đa dạng về mô hình vật liệu, phương pháp ghép nối các miền vật liệu đa dạng và nhất là khả

năng phân tích tiếp xúc hoàn toàn tự động. Ngoài ra, phần mềm cho phép sử dụng miễn phí mô đun chương trình tạo đầu vào và xem kết quả đầu ra (LS-PrePost), mô đun giải bài toán (LS-DYNA Program Manager) ngoài việc có trong LS-DYNA thì cũng được tích hợp sẵn trên phần mềm ANSYS. Do đó, trong nghiên cứu sẽ sử dụng phần mềm LS-DYNA để thực hiện các bài toán mô phỏng số.



(a)

(b)

Hình 1.19. Giao diện phần mềm LS-DYNA: a) Mô đun LS-PrePost b) Mô đun LS-DYNA Program Manager

1.5. Kết luận chương

Từ nội dung tổng quan trên cho thấy:

Tác dụng của vụ nổ gây ra áp lực và rung động mạnh lên công trình làm suy giảm khả năng chịu lực của kết cấu cũng như gây tác động mạnh đến con người và trang thiết bị bên trong. Tác dụng nổ có nhiều thành phần khác nhau và có nhiều yếu tố phức tạp nên trong nội dung của luận án chỉ giới hạn nghiên cứu tác dụng của áp lực nổ do sóng xung kích gây ra.

Vật liệu BTCT là loại vật liệu được dùng phổ biến trong xây dựng hiện nay nên được lựa chọn là vật liệu của đối tượng kết cấu cần bảo vệ trong nghiên cứu. Đã có nhiều nghiên cứu và giải pháp khác nhau trong việc phát triển các loại bê tông mới cũng như gia cường bằng các giải pháp khác nhau để tăng cường khả năng kháng lực của kết cấu công trình chịu tác dụng nổ.

Từ đặc điểm cấu trúc và đặc tính chịu lực của vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng, cùng với các nghiên cứu thực nghiệm đã cho thấy khả năng giảm tác dụng áp lực nổ của vật liệu. Với vật liệu dạng này, do có thêm biến dạng lớn cho phép tiêu tán một lượng lớn năng lượng nổ khi đi qua lớp vật liệu. Việc ứng dụng vật liệu xốp đã và đang được nghiên cứu cũng như phát triển mạnh làm kết cấu bảo vệ kết cấu công trình chịu tác dụng của áp lực nổ.

Việc mô hình hóa ứng xử của vật liệu xốp đã được nghiên cứu phát triển từ các mô hình khối cơ bản đến kỹ thuật phân vùng phức tạp. Tuy nhiên, các nghiên cứu này khó áp dụng trực tiếp vào các bài toán kết cấu lớn. Do đó, đặt ra vấn đề cần kết hợp kết quả thí nghiệm ứng xử của vật liệu xốp với mô hình vật liệu trong mô phỏng số, để tính toán bài toán khi ứng dụng vật liệu xốp làm kết cấu bảo vệ cho kết cấu công trình chịu áp lực nổ.

Việc thực nghiệm nổ hiện trường đòi hỏi chi phí lớn và tiềm ẩn những rủi ro mất an toàn trong quá trình thực hiện. Vì thế, cần ứng dụng phần mềm phù hợp để mô phỏng số vụ nổ để phục vụ quá trình nghiên cứu. Trong nội dung nghiên cứu lựa chọn phần mềm LS-DYNA do có nhiều những ưu điểm, sự phù hợp với các bài toán mô phỏng vụ nổ và tương tác đa vật liệu.

Qua những nhận định ở trên đã mở ra cho nghiên cứu sinh những vấn đề cần nghiên cứu có tính khoa học và thực tiễn cao:

Nghiên cứu ứng xử của vật liệu xốp khi chịu tác dụng của áp lực nén ép và khả năng ứng dụng của vật liệu khi chịu tải xung kích. Từ đó thấy rõ được đặc tính cơ học đặc trưng của vật liệu, cơ sở khoa học để có thể ứng dụng vật liệu xốp nhằm cấu tạo thành kết cấu bảo vệ cho kết cấu công trình chịu tác dụng của áp lực nổ. Nghiên cứu phương pháp mô hình hóa vật liệu xốp trong phần mềm mô phỏng dựa trên dữ liệu thí nghiệm để phản ánh sát nhất ứng xử thực của vật liệu xốp.

Nghiên cứu mô phỏng số bằng phần mềm LS-DYNA kết hợp với kết quả thực nghiệm hiện trường nhằm đưa ra phương pháp mô hình hóa phù hợp cho bài toán mô phỏng nổ đa vật liệu. Mục tiêu là chuẩn hóa được bài toán mô phỏng số bằng cách xác minh chéo với kết quả của thực nghiệm.

Sử dụng mô hình mô phỏng số đã được chuẩn hóa để khảo sát hiệu quả của các giải pháp cấu tạo kết cấu bảo vệ sử dụng vật liệu xốp nhằm nâng cao hiệu quả bảo vệ. Từ kết quả đó, xây dựng mô hình thử nghiệm số để kiểm chứng khả năng kết cấu bảo vệ sử dụng vật liệu xốp giảm tác dụng của áp lực nổ lên kết cấu công trình thực tế.

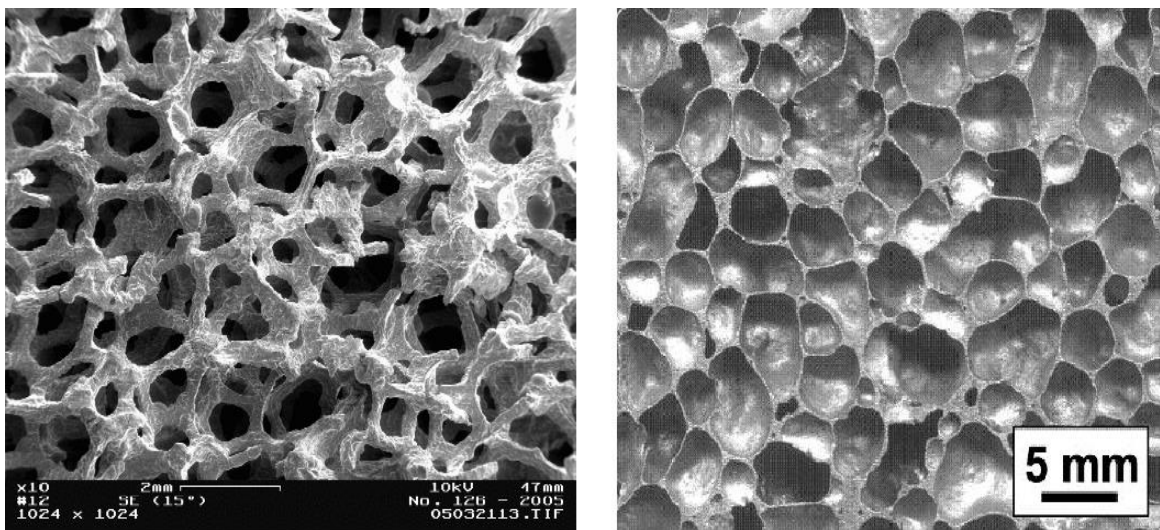
Chương 2

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG HẤP THỤ ÁP LỰC CỦA VẬT LIỆU XÓP VÀ ỨNG DỤNG

Nội dung của chương sẽ trình bày cơ chế ứng xử của vật liệu xốp chịu tác dụng nén ép nói chung và ứng xử của vật liệu khi chịu tác động tốc độ cao. Nghiên cứu ứng dụng mô phỏng số, lựa chọn mô hình vật liệu để đáp ứng xử thực tế của vật liệu xốp, thông qua việc xác minh chéo với dữ liệu thí nghiệm. Trình bày ứng dụng hấp thụ **năng lượng** tác động, giảm rung và giảm chấn của vật liệu xốp, phương thức cấu tạo và tính toán kết cấu bảo vệ hấp thụ áp lực nổ.

2.1. Giới thiệu chung về vật liệu xốp

Vật liệu xốp được tạo ra với hai yếu tố quan trọng là vật liệu nền và hình thái của pha khí. Có hai hình thái pha khí trong vật liệu xốp là lỗ rỗng mở và lỗ rỗng đóng kín (Hình 2.1). Các lỗ rỗng mở có cấu trúc dạng xương cho phép không khí có thể luân chuyển giữa các lỗ rỗng, còn đối với cấu trúc lỗ rỗng đóng kín ngoài cấu trúc xương như lỗ rỗng mở còn được ngăn cách bởi các vách ngăn bằng pha rắn, ngăn không cho khí thoát ra ngoài các lỗ rỗng. Ngoài ra kích thước lỗ rỗng đóng vai trò quan trọng trong ứng xử và kiểm soát tốc độ khí thoát ra khi vật liệu bị nén.



Hình 2.1. Cấu trúc lỗ rỗng mở (trái) và lỗ rỗng kín (phải)

Vật liệu nền có thể được làm từ nhiều loại vật liệu dạng cứng hoặc dẻo (có độ linh hoạt cao). Vật liệu nền dạng cứng thường tạo ra vật liệu xốp cứng ít có khả năng phục hồi. Cấu trúc của vật liệu bị phá vỡ do quá trình biến dạng dẻo hoặc vật liệu nền bị bẻ gãy. Trong ứng xử biến dạng dẻo, vật liệu nền trải qua biến dạng dẻo với rất ít hoặc không có khả năng phục hồi trạng thái.

Vật liệu nền có độ đàn hồi cũng được ứng dụng trong chế tạo vật liệu xốp, vật liệu nền dạng này thông thường là nhựa hoặc cao su. Vật liệu xốp đàn hồi rất linh hoạt và có độ phục hồi trạng thái cao, việc phục hồi trạng thái của vật liệu có thể là tức thời hoặc sau một khoảng thời gian. Xốp Polyurethane dẻo là điển hình của loại vật liệu này, các vật liệu polyethylene và polypropylene thường dùng để tạo ra vật liệu xốp có khả năng đàn hồi.

Sự đa dạng của vật liệu xốp cũng như sự phát triển kỹ thuật sản xuất cao đã cho phép các nhà sản xuất vật liệu đưa ra các dạng vật liệu có tính hấp thụ năng lượng lớn, chống các va đập bất lợi cũng như giảm rung động như ứng dụng làm lớp bọc giảm chấn. Sự đa dạng của vật liệu cũng tạo ra rất nhiều các mô hình tính toán cho vật liệu, nhằm đánh giá đúng ứng xử của vật liệu trong các điều kiện sử dụng khác nhau.

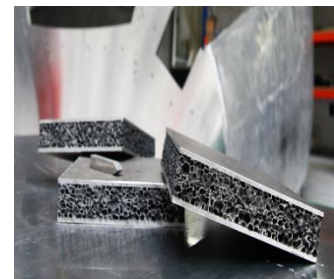
Vật liệu xốp có nhiều ứng dụng khác nhau, trong đó phổ biến nhất là cách nhiệt. Bởi vì chúng chứa không gian lỗ rỗng lớn nên tính dẫn nhiệt của chúng rất nhỏ. Vật liệu xốp được sử dụng làm chất cách nhiệt trong các ứng dụng phổ biến như để cách nhiệt bằng tấm xốp cho các bức tường của công trình. Một ứng dụng phổ biến thường thấy trong việc đóng gói bao bì bảo vệ cho các thiết bị trong quá trình vận chuyển. Một số dạng vật liệu xốp trong thực tế như trên Hình 2.2.



Xốp XPS



Cao su xốp



Nhôm bột

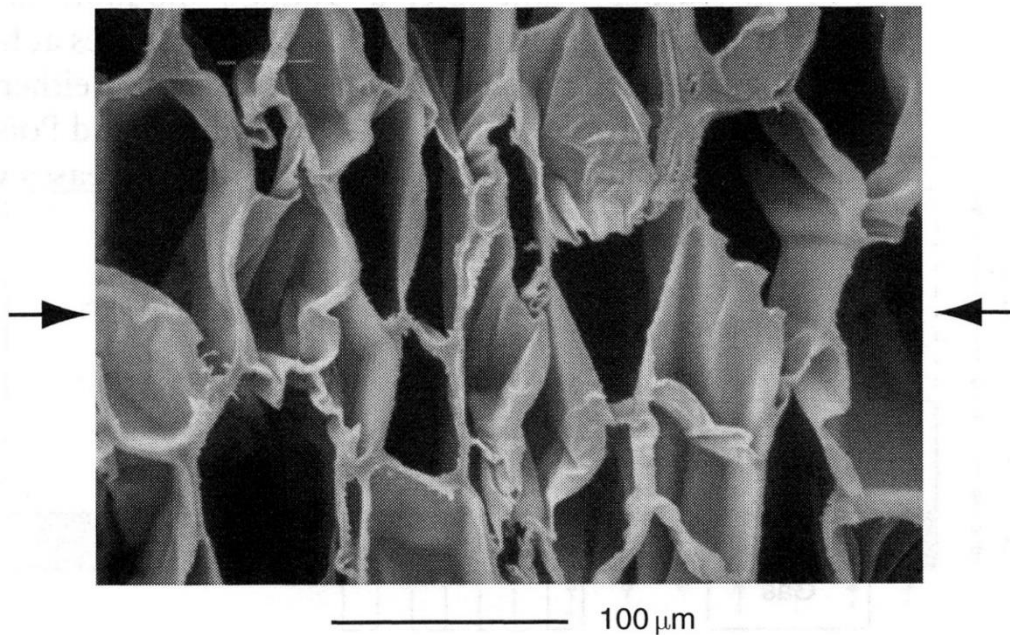
Hình 2.2. Một số dạng vật liệu xốp trong thực tế

2.2. Ứng xử cơ học của vật liệu xốp chịu nén

2.2.1. Tính chất cơ học của vật liệu xốp

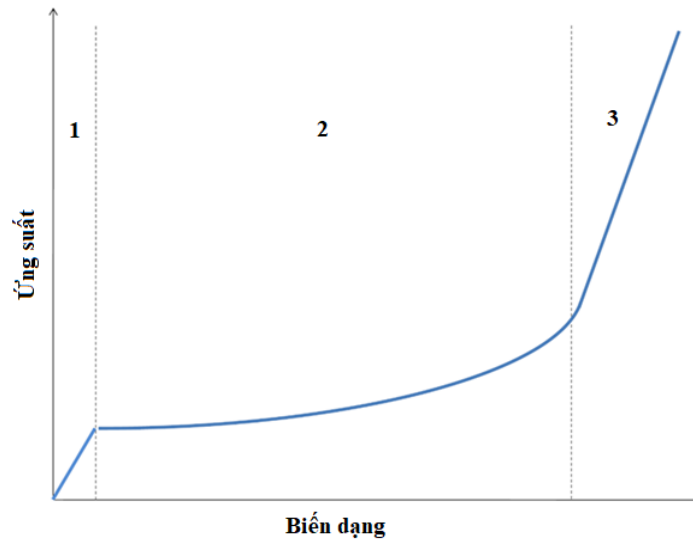
Một đặc điểm quan trọng của xốp là tính chất cơ học của nó phụ thuộc vào mật độ tương đối ρ_f / ρ_s (tỷ số giữa mật độ của vật liệu xốp ρ_f và mật độ của vật liệu nền ρ_s). Khi mật độ tương đối tăng lên, cấu trúc xương và màng tạo nên vật liệu xốp sẽ tăng độ dày khi thành phần pha rắn của xốp chiếm nhiều không gian hơn làm cho thể tích rỗng chứa khí trong vật liệu bị thu nhỏ lại.

Đối với vật liệu xốp có cấu trúc lỗ rỗng đóng kín và mở, khi chịu nén ép thì quan hệ ứng suất - biến dạng ban đầu có dạng tuyến tính liên quan đến ứng xử trước khi cấu trúc lỗ rỗng chưa bị xô lệch (giữ được hình dạng ban đầu). Tiếp theo là quan hệ ứng suất - biến dạng khi cấu trúc của lỗ rỗng bị uốn cong và xô lệch tạo thành một thêm biến dạng dài trong đó ứng suất gần như không đổi (ứng suất “đoạn bằng” (plateau stress)). Trong trường hợp cấu trúc lỗ rỗng mở thì cuối cùng vật liệu xốp sẽ bị nén đến mức các khung xương bắt đầu tiếp xúc với nhau và bắt đầu xít chặt lại với nhau. Sau khi xốp đã thành khối rắn hoàn toàn và không còn không khí trong các lỗ rỗng, khi đó quan hệ ứng suất - biến dạng sẽ trở thành đặc tính của vật liệu nền. Cấu trúc vật liệu xốp lỗ rỗng đóng kín có ứng xử tương tự như cấu trúc lỗ rỗng mở. Chúng thể hiện cả sự kéo giãn của thành lỗ rỗng và nén khí trong lỗ rỗng (Hình 2.3), thay vì chỉ có của khung xương như cấu trúc xốp có lỗ rỗng mở.



Hình 2.3. Sự nén của xốp lỗ rỗng đóng kín cho thấy sự biến dạng cấu trúc khung xương và màng các lỗ rỗng [73]

Ứng xử của quá trình cấu trúc bị uốn cong ở hai dạng cấu trúc là khác nhau, trong đó mật độ đóng rắn hoàn toàn gần như là không thể nhất là với xốp cấu trúc lỗ rỗng đóng kín (trừ khi các lỗ rỗng bị vỡ). Thay vào đó, khi các lỗ rỗng bị nén thì áp suất không khí tăng lên trong các lỗ rỗng (thể tích khí có thể tiệm cận gần đến 0). Về cơ bản ứng xử khi chịu nén của vật liệu xốp thường trải qua ba giai đoạn điển hình, trong Hình 2.4 minh họa ứng suất và biến dạng của vật liệu xốp trải qua ba giai đoạn (Vùng 1 - Vùng 2 - Vùng 3).



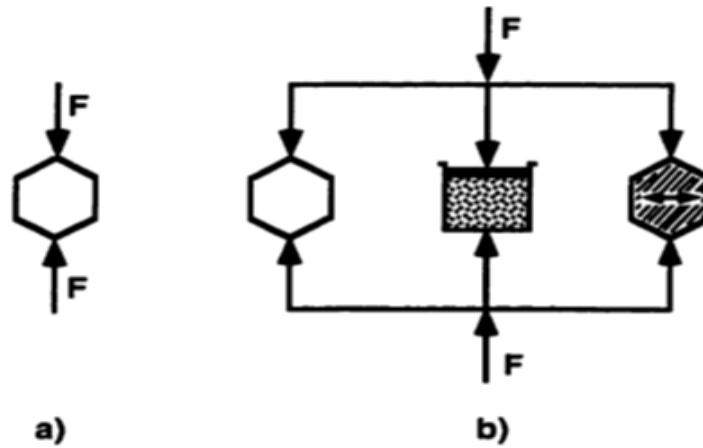
Hình 2.4. Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng vật liệu xốp

Vật liệu xốp trở nên khá độc đáo về mặt cơ học do đặc điểm đường cong ứng suất - biến dạng điển hình của nó. Ban đầu, vật liệu xốp khi chịu nén trải qua biến dạng đàn hồi, với mô đun đàn hồi của xốp E_f (chỉ đối với các biến dạng nhỏ) và tuân theo định luật Hooke.

$$\sigma = E_f \varepsilon \quad (2.1)$$

trong đó: σ là ứng suất, ε là biến dạng danh nghĩa giống như hầu hết các loại vật liệu khác. Tiếp theo là vùng thêm biến dạng lớn, khi ở đó vật liệu xốp trải qua một biến dạng lớn mà không có sự gia tăng ứng suất lớn tương ứng là do quá trình kéo dãn, uốn cong và thậm chí sụp đổ của hệ khung xương và thành các lỗ rỗng. Trong vật liệu xốp đàn hồi, điều này là do sự co dãn đàn hồi của thành lỗ rỗng, trong các vật liệu xốp đàn dẻo, đó là do sự chảy dẻo của thành lỗ rỗng, còn trong các vật liệu xốp giòn đó là do sự nghiền nát và phá vỡ cấu trúc lỗ rỗng.

Khi vật liệu xốp cấu trúc xốp lỗ rỗng mở chịu tác dụng của lực nén, cấu trúc xương vật liệu bị uốn cong và sau đó bị nén chặt hoặc gãy. Tuy nhiên, với vật liệu xốp cấu trúc lỗ rỗng đóng kín ngoài việc uốn cong của xương lỗ rỗng còn có quá trình nén không khí bên trong lỗ rỗng và sự kéo dãn của thành xung quanh lỗ rỗng, sự khác biệt này được mô tả trong Hình 2.5.



Hình 2.5. Sự khác biệt quá trình chịu nén: cấu trúc lỗ rỗng mở (a) và lỗ rỗng kín (b) [52]

Do đó, trong giai đoạn nén chặt, quan hệ ứng suất - biến dạng của cấu trúc lỗ rỗng mở là ứng suất sẽ tăng nhanh khi cấu trúc bị nén ép hoàn toàn. Nhưng trong cấu trúc lỗ rỗng đóng kín quá trình kháng lại sự nén ép lớn hơn do còn xảy ra sự nén ép khí trong lỗ rỗng khi cấu trúc màng xung quanh chưa bị phá vỡ. Với đặc điểm này các vật liệu xốp có cấu trúc lỗ rỗng đóng kín thường được dùng nhiều hơn trong các ứng dụng hấp thụ năng lượng.

2.2.2. Ứng xử cơ học của vật liệu xốp chịu nén

Gibson và Ashby cung cấp một phân tích để xác định và mô tả ứng xử của vật liệu xốp khi bị nén [52]. Việc tóm tắt một phần của phân tích này sẽ cung cấp sự hiểu biết tốt hơn về cách vật liệu xốp tạo ra các đặc tính cơ học của nó. Để xác định mô đun đàn hồi của vật liệu ở giai đoạn ban đầu của vật liệu, khi khung xương lỗ rỗng bị uốn cong, một phần tử lỗ rỗng mở được mô hình hóa đơn giản như một khối gồm các phần tử dạng dầm tiết diện vuông có cạnh t và chiều dài l (xem Hình 2.6). Các ô của phần tử được xếp so le nhau và chúng được nối với nhau tại các điểm giữa của chúng. Mật độ tương đối của vật liệu xốp liên quan đến l và t theo mối quan hệ sau:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s} \propto \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (2.2)$$

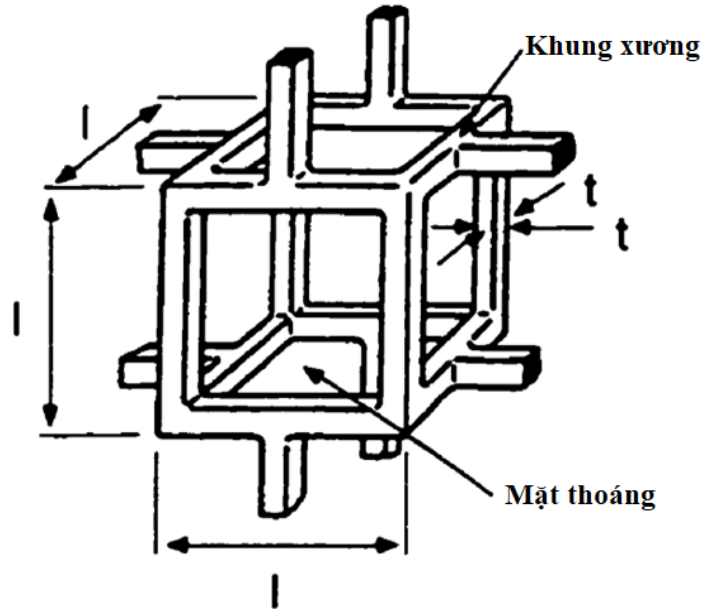
và mô men quán tính I của phần tử phụ thuộc vào chiều dày cạnh t của phần tử:

$$I \propto t^4 \quad (2.3)$$

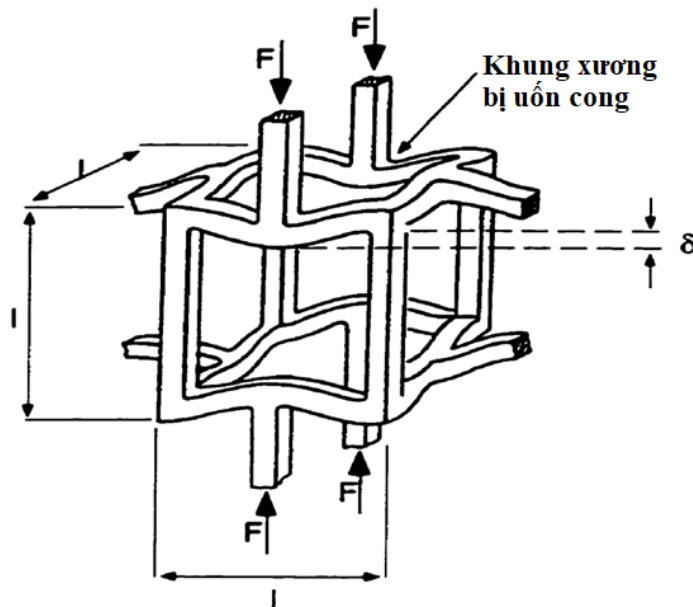
Mô đun đàn hồi sau đó được tính toán bằng cách xem xét độ võng đàn hồi, bằng một lượng δ của một dầm (khung xương) chịu tải tại điểm giữa bởi một

lực F (xem Hình 2.7). Độ võng của dầm có thể được xác định từ cơ học vật rắn cơ bản với E_s là mô đun đàn hồi của vật liệu nền:

$$\delta \propto \frac{Fl^3}{E_s I} \quad (2.4)$$



Hình 2.6. Mô hình của Gibson và Ashby cho phần tử lỗ rỗng mở



Hình 2.7. Độ võng của khung xương (dầm) khi chịu tải

Lực tác dụng F vào phần tử có liên hệ với ứng suất σ bởi:

$$F \propto \sigma l^2 \quad (2.5)$$

và biến dạng ε có liên hệ với độ võng của phần tử dầm bởi:

$$\varepsilon \propto \frac{\delta}{l} \quad (2.6)$$

Kết hợp (2.4) ÷ (2.6), mô đun đàn hồi của vật liệu xốp là:

$$E_f = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{E_s I}{l^2} \quad (2.7)$$

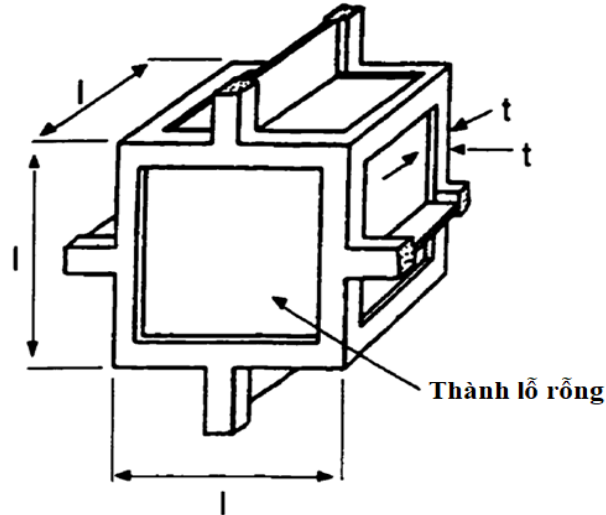
Kết hợp với (2.2) và (2.3) nhận được:

$$\frac{E_f}{E_s} \approx \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.8)$$

Trên đây là mối quan hệ đối với mô đun đàn hồi của một phần tử lỗ rỗng mở (nhưng chỉ thông qua các biến dạng rất nhỏ; tức là vật liệu chỉ làm việc trong giai đoạn đàn hồi tuyến tính) và đã được Gibson và Ashby chỉ ra để khớp với dữ liệu thực nghiệm trên một loạt các loại vật liệu xốp có lỗ rỗng mở khác nhau. Có hai vấn đề quan trọng cần được lưu ý để nhận thấy từ điều này là mật độ tương đối của vật liệu xốp cùng với mô đun đàn hồi của vật liệu nền có tầm quan trọng hàng đầu trong việc xác định mô đun đàn hồi của loại xốp đó.

Với xốp có cấu trúc lỗ rỗng đóng kín được mô hình hóa theo cách tương tự, dạng khối gồm các phần tử dầm (thanh khung xương) nhưng có thêm phần màng bao quanh tạo thành khối kín (xem Hình 2.8). Tuy nhiên, vì các đặc tính vật lý mô hình phụ thuộc vào hai yếu tố bổ sung là thành lỗ rỗng và khí trong lỗ rỗng (xem Hình 2.5), nên mô đun đàn hồi được tạo thành từ ba thành phần:

1. Đối với thành phần uốn các dầm của lỗ rỗng được xác định tương tự như phương trình (2.8) nhưng được nhân với hệ số ϕ^2 , trong đó ϕ là tỷ lệ chất rắn của phần khung xương (ngoài phần màng của lỗ rỗng).



Hình 2.8. Mô hình của Gibson và Ashby cho phân tử lỗ rỗng đóng kín

2. Sự đóng góp của chất khí trong lỗ rỗng khi bị nén vào độ cứng của xốp dựa trên định luật Boyle là mối liên hệ giữa áp suất và thể tích của một chất khí ở nhiệt độ không đổi:

$$pV_g = p^0V_g^0 \quad (2.9)$$

trong đó, V_g là thể tích của khí trong lỗ rỗng và p là áp suất của nó (chỉ số 0 cho biết trạng thái ban đầu). Áp suất p' mà tải trọng tác dụng phải vượt qua để nén được xốp là chênh lệch của áp suất ban đầu và áp suất cuối cùng:

$$p' = p - p^0 \quad (2.10)$$

Giả sử cho rằng xốp được nén đơn trục từ thể tích V_0 đến thể tích V thông qua biến dạng danh nghĩa ε thì các thể tích có liên quan với nhau thông qua biểu thức:

$$\frac{V}{V_0} = 1 - \varepsilon(1 - 2\nu_f) \quad (2.11)$$

trong đó, ν_f là hệ số Poisson của xốp. Tuy nhiên, vì chất khí trong phần tử chỉ chiếm phần lỗ rỗng bên trong nên thể tích khí giảm từ một thể tích V_g^0 đến thể tích V_g theo biểu thức sau:

$$\frac{V_g}{V_g^0} = \frac{1 - \varepsilon(1 - 2\nu_f) - \rho_f/\rho_s}{1 - \rho_f/\rho_s} \quad (2.12)$$

Kết hợp công thức (2.12) với (2.9) và (2.10), khi đó áp suất cần vượt qua của tải trọng tác động vào phần tử vật liệu là:

$$p' = \frac{p_0 \varepsilon (1 - 2\nu_f)}{1 - \varepsilon (1 - 2\nu_f) - \rho_f / \rho_s} \quad (2.13)$$

Phần đóng góp vào mô đun đàn hồi do áp suất không khí chứa trong các lỗ rỗng trong điều kiện biến dạng nhỏ ban đầu là:

$$E_g^f = \frac{dp'}{d\varepsilon} = \frac{p_0 (1 - 2\nu_f)}{1 - \rho_f / \rho_s} \quad (2.14)$$

3. Sự đóng góp cuối cùng vào mô đun đàn hồi của vật liệu xốp với lỗ rỗng dạng đóng kín là do sự kéo dãn của thành lỗ rỗng. Thành phần này được thể hiện bằng cách phân tích và so sánh với thực nghiệm có giá trị như sau:

$$(1 - \phi) \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (2.15)$$

trong đó, ϕ là tỷ lệ chất rắn của phân khung xương lỗ rỗng.

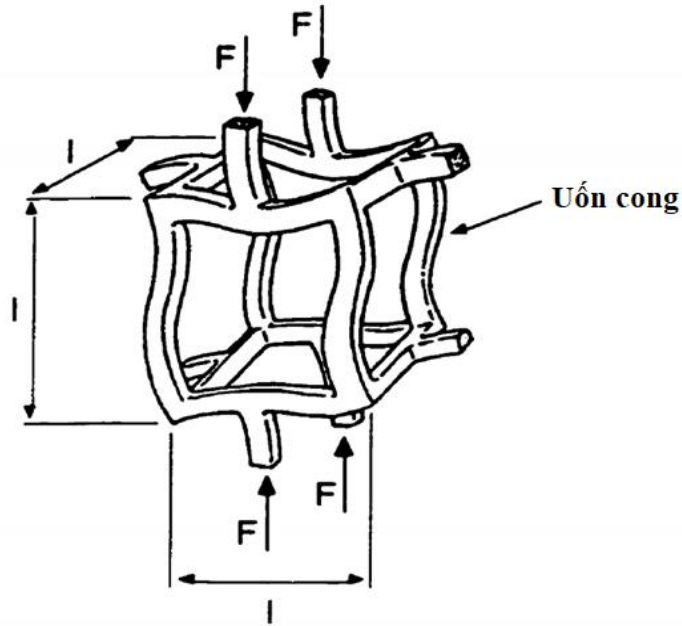
Kết hợp ba thành phần đóng góp này, mô đun đàn hồi của vật liệu xốp lỗ rỗng đóng kín:

$$\frac{E_f}{E_s} \approx \phi^2 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \phi) \frac{\rho_f}{\rho_s} + \frac{p_0 (1 - 2\nu_f)}{E_s (1 - \rho_f / \rho_s)} \quad (2.16)$$

Biểu thức (2.16) đã được xác nhận thông qua những dữ liệu thực nghiệm.

Phân trên minh họa phép phân tích để thu được các đặc tính cơ học của xốp. Hơn nữa, những nội dung trên minh họa sự đóng góp của các thành phần khác nhau tạo nên cấu trúc của vật liệu xốp có cấu trúc lỗ rỗng đóng kín. Cần lưu ý rằng trong tất cả các thành phần của độ cứng đàn hồi của xốp, dù là lỗ rỗng mở hay lỗ rỗng đóng kín, mật độ tương đối đều xuất hiện. Điều này cho thấy tầm quan trọng của mật độ tương đối ảnh hưởng đến các đặc tính của vật liệu xốp.

Trong phân tích của Gibson và Ashby về vùng thềm biến dạng lớn, ứng suất tại thời điểm chuyển tiếp giữa giai đoạn đàn hồi và giai đoạn biến dạng lớn σ_{el}^f , nhận được bằng cách xem xét lực tới hạn F_{crit} cần thiết để bắt đầu sự uốn cong các thanh khung xương của lỗ rỗng có chiều dài l , mô đun đàn hồi E_s , và mô men quán tính I (xem Hình 2.9). Lực này được xác định bởi công thức của Euler.



Hình 2.9. Ứng xử của phần tử lỗ rỗng đóng kín khi chịu nén

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 E_s I}{l^2} \quad (2.17)$$

Bằng cách thực hiện một phân tích tương tự như trong các phương trình (2.2) đến (2.8) và so sánh với thực nghiệm, quan hệ giữa ứng suất với mật độ tương đối và mô đun đàn hồi của pha rắn vật liệu xốp (bao gồm cả cấu trúc lỗ rỗng mở và lỗ rỗng đóng kín), mô tả sự sụp đổ của cấu trúc lỗ rỗng vật liệu xốp được thể hiện thông qua biểu thức:

$$\frac{\sigma_{el}^f}{E_s} \approx 0,05 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.18)$$

Áp suất ban đầu của không khí (xấp xỉ bằng khí quyển) trong vật liệu xốp cấu trúc lỗ rỗng đóng kín được chứng minh là không ảnh hưởng nhiều đến ứng suất trong quá trình sụp đổ của cấu trúc lỗ rỗng vật liệu xốp.

Tương tự đối với vật liệu xốp dạng chất dẻo (xốp nhựa) mà ở giai đoạn thềm biến dạng lớn không thể phục hồi được, thì ứng suất sụp đổ (xẹp xuống) σ_{pl}^f của cấu trúc lỗ rỗng được xác định bằng cách xem xét ứng suất dẻo của các lỗ rỗng. Trong khi với vật liệu xốp dạng giòn, ứng suất sụp đổ được xác định bằng cách xem xét sự phá hoại giòn của cấu trúc lỗ rỗng.

Đối với vật liệu xốp cấu trúc lỗ rỗng đóng kín, trong giai đoạn thềm biến dạng lớn, ứng suất tăng nhanh hơn so với cấu trúc lỗ rỗng mở. Điều này là do

ảnh hưởng của áp suất không khí trong các lỗ rỗng tăng lên khi các thể tích lỗ rỗng thu hẹp khi cấu trúc sụp đổ. Sự đóng góp của áp suất không khí trong giai đoạn thêm biến dạng lớn có thể được tính theo cách giống như đối với giai đoạn đàn hồi tuyến tính theo phương trình (2.13), ngoại trừ nó được đơn giản hóa hơn vì hệ số Poisson trong giai đoạn sụp đổ xấp xỉ bằng không. Do đó, áp suất đóng góp từ phương trình (2.13) trở thành:

$$p' \approx \frac{p_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon - \rho_f / \rho_s} \quad (2.19)$$

Mô tả phân tích cho thêm biến dạng lớn của vật liệu xốp cấu trúc lỗ rỗng đóng kín, quan hệ giữa ứng suất vật liệu xốp và mô đun đàn hồi vật liệu nền (bao gồm các kết quả từ phương trình (2.18) và (2.19)), có dạng:

$$\frac{\sigma^f}{E_s} \approx 0,05 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^2 + \frac{p_0 \varepsilon}{E_s (1 - \varepsilon - \rho_f / \rho_s)} \quad (2.20)$$

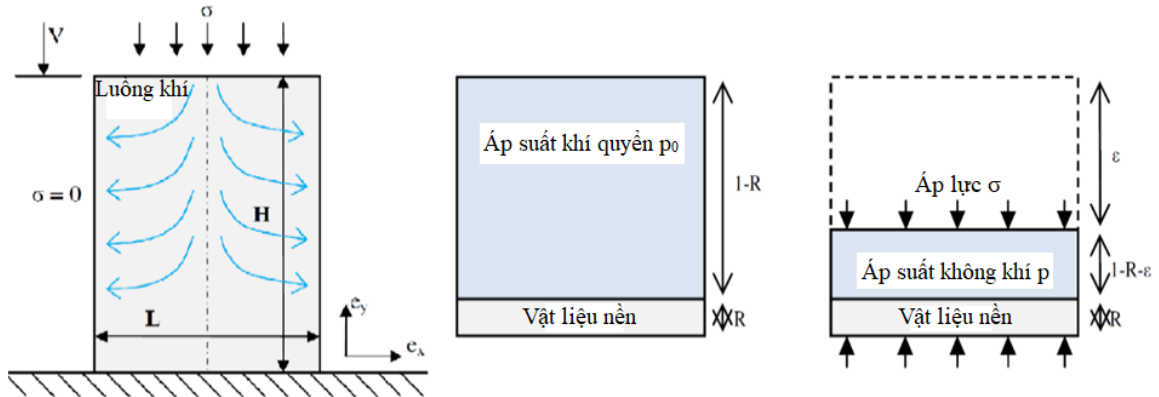
Có thể thấy, mối quan hệ này tạo ra một ứng suất gia tăng với sự gia tăng biến dạng. Tuy nhiên, lưu ý rằng không có sự đóng góp nào của thành lỗ rỗng, phân tích thực nghiệm cho thấy ảnh hưởng thành lỗ rỗng là không đáng kể.

Khi vật liệu xốp bị nén đến giai đoạn nén chặt, độ dốc của đường cong ứng suất - biến dạng có xu hướng theo mô đun đàn hồi của vật liệu nền E_s . Tuy nhiên, biến dạng giới hạn ε_D mà tại đó ứng xử này bắt đầu không phải là khi tất cả các lỗ rỗng của xốp đã được nén chặt lại và mật độ của xốp trở thành mật độ của chất rắn, biến dạng này sẽ là $(1 - \rho_f / \rho_s)$. Qua thực nghiệm, quan sát thấy sự bắt đầu ứng xử của nén chặt xảy ra ở một biến dạng thấp hơn, khi các thành của lỗ rỗng bắt đầu tiếp xúc với nhau, điều này được mô tả cho cả vật liệu xốp có cấu trúc lỗ rỗng mở và lỗ rỗng đóng kín:

$$\varepsilon_D = 1 - 1,4 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \quad (2.21)$$

Các phương trình từ (2.1) đến (2.21), cung cấp một phương pháp mô tả ứng xử vật lý của vật liệu xốp bằng cách sử dụng kết hợp các giả thiết đơn giản hóa cùng với dữ liệu thực nghiệm. Hơn nữa, chúng cung cấp sự hiểu biết về các đặc tính vật lý liên quan, chẳng hạn như độ bền của cấu trúc khung xương lỗ rỗng và sự đóng góp của áp suất không khí trong lỗ rỗng.

Đối với vật liệu xốp cấu trúc lỗ rỗng mở thì sự trễ của không khí thoát ra khi vật liệu bị nén ép cũng tạo ra sự kháng lại quá trình nén từ bên ngoài như trên Hình 2.10 [73].



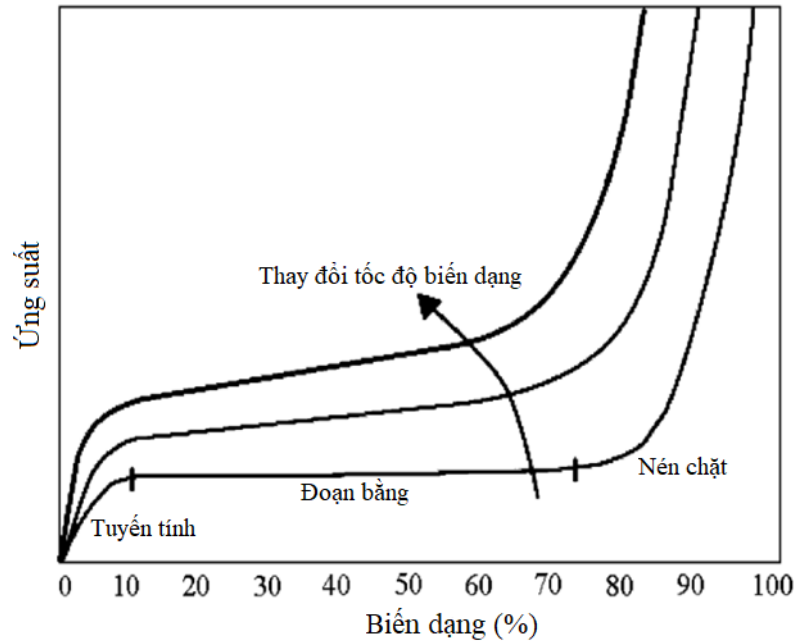
Hình 2.10. Sự hình thành sức kháng do độ trễ của không khí trong cấu trúc lỗ rỗng mở

2.2.3. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng đến ứng xử của vật liệu

2.2.3.1. Ứng xử chung của vật liệu xốp

Áp lực của vụ nổ (tải trọng đột ngột tốc độ cao) gây ra tốc độ biến dạng của vật liệu kết cấu trong khoảng $10^2 - 10^4$ m/s, trong khi tốc độ biến dạng tĩnh thông thường nằm trong khoảng $10^{-6} - 10^{-5}$ m/s [74]. Tốc độ biến dạng cao ảnh hưởng đến độ bền và độ dẻo của vật liệu kết cấu, liên kết gia cường, các dạng hư hỏng của kết cấu và khả năng hấp thụ năng lượng của các loại vật liệu [75].

Ứng xử của vật liệu xốp phụ thuộc vào tốc độ biến dạng khi chịu nén và được chứng minh là biểu hiện một ứng xử tăng cứng khi tốc độ biến dạng tăng lên (Hình 2.11) [76-80]. Vì vật liệu xốp bao gồm hai pha (pha rắn và không khí) nên cần tìm hiểu những đóng góp vào độ nhạy tốc độ biến dạng của mỗi pha.



Hình 2.11. Minh họa ảnh hưởng của tốc độ biến dạng đối với ứng xử tăng ứng suất của vật liệu xốp [77]

Đối với cả xốp lỗ rỗng mở và đóng kín, pha rắn của xốp sẽ thể hiện độ nhạy tốc độ phụ thuộc vào đặc tính ứng suất của vật liệu rắn dưới các tốc độ biến dạng khác nhau. Không có phương tiện phân tích nào để đánh giá điều này đối với nhiều loại vật liệu xốp. Gibson và Ashby (1988) gợi ý rằng [78]: tốc độ biến dạng tăng cũng góp phần vào ứng xử của vật liệu xốp. Nói chung, ứng suất đoạn bằng tăng lên khi tốc độ biến dạng tăng. Đối với vật liệu xốp có cấu trúc lỗ rỗng đóng kín đã được chứng minh rằng, sự phụ thuộc tốc độ này chỉ là kết quả của vật liệu cấu thành nên hệ khung xương trong cấu trúc lỗ rỗng, chứ không phải do khí bao quanh các lỗ rỗng. Có thể dự kiến rằng, khi một xốp cấu trúc lỗ rỗng đóng kín trải qua tốc độ biến dạng tăng lên đến mức chất khí trong lỗ rỗng sẽ ngừng bị nén đẳng nhiệt (như được giả định trong định luật Boyle, xem phương trình (2.9)) và bị nén đoạn nhiệt, do đó sẽ gây ra một biến dạng bổ sung. Tuy nhiên, nó đã được chứng minh rằng điều này không xảy ra. Quá trình nén vẫn đẳng nhiệt vì chất khí luôn tiếp xúc chặt chẽ với cấu trúc rắn của lỗ rỗng có nhiệt dung lớn hơn nhiều so với chất khí. Trong xốp có cấu trúc lỗ rỗng mở, lực nhót liên quan đến việc đẩy chất khí ra khỏi lỗ rỗng tăng lên khi tốc độ biến dạng tăng lên, do đó làm tăng ứng suất đoạn bằng của vật liệu xốp. Tuy nhiên, sự gia tăng này phụ thuộc rất nhiều vào độ nhót của thành phần vật chất trong lỗ rỗng và biểu hiện rõ ràng hơn nhiều ở xốp chứa chất lỏng hơn là xốp chứa chất khí.

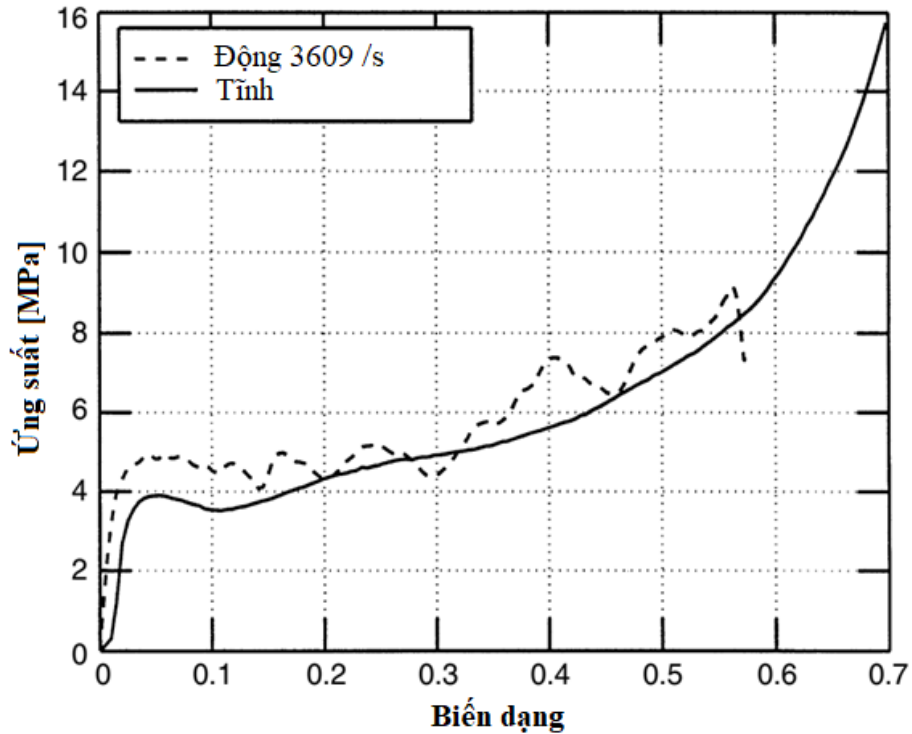
Trên thực tế, xu hướng này có thể không tiếp tục ở tốc độ biến dạng cao được thấy trong tải trọng do vụ nổ gây ra. Trên thực tế, nghiên cứu của Ouellet cho thấy ở tốc độ biến dạng trên $10^3/s$, ứng suất nén vỡ xốp (được xác định là ứng suất ở biến dạng đạt 50%) lúc này mới bắt đầu tăng nhanh với tốc độ biến dạng ngày càng tăng [77]. Điều này có thể là kết quả của sự thay đổi phụ thuộc tốc độ biến dạng pha rắn của xốp ở tốc độ biến dạng cao hoặc sự thay đổi đóng góp của áp suất khí vào độ cứng của xốp. Vì giá trị biến dạng được sử dụng là 50%, việc không khí đóng góp vào độ cứng của xốp không nhất thiết bị bỏ qua.

2.2.3.2. Ảnh hưởng của tốc độ biến dạng đến ứng suất đoạn bằng

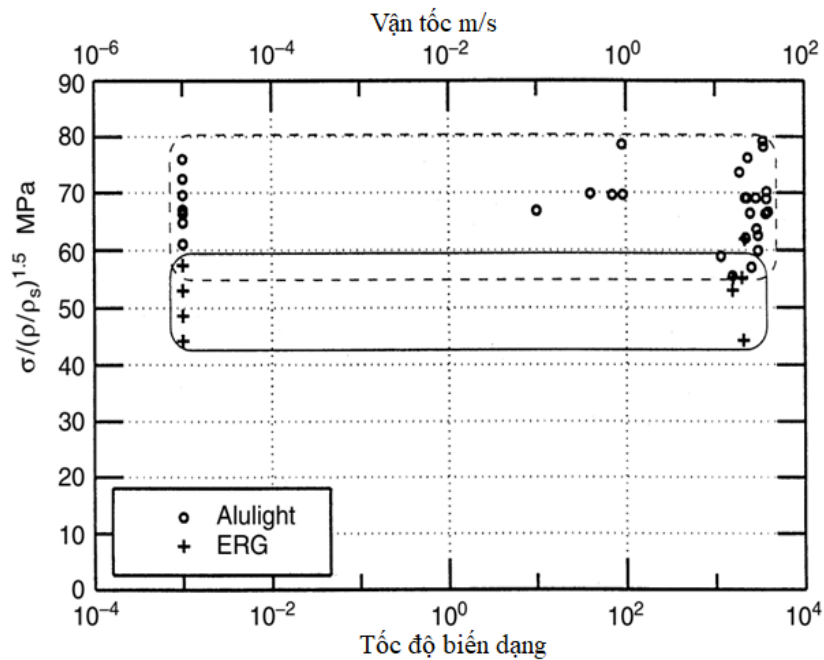
Vận tốc va chạm trên khoảng 1m/s (3.6 km/h) dẫn đến tốc độ biến dạng có thể lớn. Một câu hỏi quan trọng đặt ra là liệu các đặc tính xốp dựa trên các phép đo được thực hiện ở tốc độ biến dạng thấp (thường là $10^{-2}/s$) có còn phù hợp hay không.

Các thử nghiệm trên nhôm bọt cho thấy sự phụ thuộc của ứng suất đoạn bằng vào tốc độ biến dạng là không lớn [81-83]. Dữ liệu được trình bày trong Hình 2.12 và Hình 2.13 đối với nhôm bọt lỗ rỗng đóng kín Alporas và nhôm bọt lỗ rỗng mở ERG Duocel (Al-6101-T6). Các tác giả gợi ý rằng ứng suất đoạn bằng σ_{pl} tăng theo tốc độ biến dạng $\dot{\epsilon}$, nhiều nhất là 30% trong phạm vi: $3.6 \times 10^{-3} / s < \dot{\epsilon} < 3.6 \times 10^{+3} / s$. Các thử nghiệm đối với xốp làm từ magiê cho thấy tác dụng mạnh hơn, ứng suất đoạn bằng được tìm thấy với hệ số tăng khoảng bằng 2 trên cùng một phạm vi tốc độ biến dạng [32].

Điều quan trọng là phải tách ảnh hưởng của tốc độ biến dạng và vận tốc va chạm đến phản ứng động của vật liệu xốp. Ảnh hưởng không đáng kể của tốc độ biến dạng có liên quan đến thực tế là nhôm chỉ hiển thị độ nhạy biến dạng nhỏ. Ngược lại, quán tính của vật liệu dẫn đến ứng suất tăng cường ở vận tốc va chạm cao.



Hình 2.12. Đường cong ứng suất-biến dạng cho nhôm bột Alulight với mật độ tương đối là 0.18 ở hai tốc độ biến dạng: 3.6×10^{-3} /s và $3.6 \times 10^{+3}$ /s [81]



Hình 2.13. Ứng suất đoạn bằng được hiệu chỉnh cho mật độ tương đối, được vẽ đồ thị dựa trên tốc độ biến dạng. Về cơ bản, nó không phụ thuộc vào tốc độ biến dạng lên đến $3.6 \times 10^{+3}$ /s [81]

Từ những kết quả ở trên cho thấy tốc độ biến dạng có ảnh hưởng đến ứng suất đoạn bằng, sự thay đổi của ứng suất đoạn bằng có xu hướng tăng lên nhưng

không quá lớn. Bên cạnh đó dạng đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng vẫn cơ bản tương đồng như khi vật liệu biến dạng tĩnh, điều này được thể hiện trong một số công bố gần đây [84-86]. Bên cạnh đó, trong thí nghiệm nén mẫu nhôm bọt thực tế trong phòng thí nghiệm do nghiên cứu sinh tự thực hiện, cho thấy tốc độ nén (2, 10 và 50 mm/phút) gần như không ảnh hưởng đến ứng suất đoạn bằng (xem trên Hình 4.30). Do đó, việc sử dụng quan hệ ứng suất - biến dạng trong thí nghiệm nén tĩnh áp dụng cho bài toán tác động tốc độ cao là hoàn toàn có thể chấp nhận được.

2.3. Nghiên cứu phương pháp mô hình hóa vật liệu xốp chịu áp lực nén

Như trong phần tổng quan 1.3.3 đã trình bày một số phương pháp mô hình hóa vật liệu xốp mật độ thấp. Các phương pháp mô tả vi mô cấu trúc vật liệu này, chỉ phù hợp cho các nghiên cứu vật liệu dùng ở đánh giá mẫu kích thước nhỏ. Một vấn đề đặt ra là khi tính toán vật liệu xốp ở dạng kết cấu lớn, cần phải có một phương pháp tiếp cận khác. Thực tế nghiên cứu trên thế giới hiện nay, việc sử dụng phần tử khối thông thường kết hợp với mô hình vật liệu phù hợp cho xốp có thể giải quyết tốt bài toán tính toán vật liệu xốp trong kết cấu lớn và là hướng tiếp cận khả thi. Bên cạnh đó, việc áp dụng phần mềm mô phỏng số có mô hình vật liệu phù hợp với xốp là một giải pháp có hiệu quả tốt [87-90]. Trong nội dung nghiên cứu này, tiến hành lựa chọn phương pháp mô hình hóa và mô hình vật liệu phù hợp cho xốp thông qua xác minh chéo giữa kết quả mô phỏng LS-DYNA với kết quả thí nghiệm nén xốp.

Để tiến hành nghiên cứu mô hình vật liệu xốp phù hợp cho tính toán bằng mô phỏng số tiến hành nghiên cứu với xốp cứng không phục hồi. Trong nội dung nghiên cứu lựa chọn xốp cứng XPS (Extruded Polystyrene) cấu trúc lỗ rỗng đóng kín. Việc lựa chọn xốp cứng không phục hồi trong nghiên cứu là do loại xốp này là đặc tính chung của xốp nền kim loại, trong đó tiêu biểu là nhôm bọt đã được giới thiệu trong phần tổng quan. Phương pháp nghiên cứu là lựa chọn mô hình vật liệu kết hợp với dữ liệu thực nghiệm nén để tìm ra mô hình phù hợp nhất cho xốp cứng không phục hồi.

2.3.1. Thí nghiệm nén đơn trục vật liệu xốp XPS

Tiến hành thí nghiệm nén đơn trục vật liệu xốp XPS trong phòng thí nghiệm, nhằm nghiên cứu ứng xử của vật liệu khi chịu nén và thu thập số liệu thí nghiệm thực phục vụ việc lựa chọn mô hình vật liệu phù hợp với ứng xử thực của vật liệu ở bước tiếp theo.

2.3.1.1. Công tác chuẩn bị thí nghiệm

Tiến hành cắt tạo các mẫu thí nghiệm vật liệu xốp XPS có kích thước 50x50x50mm với các thông số cơ bản trong Bảng 2.1. Mẫu xốp XPS thí nghiệm được thể hiện trong Hình 2.14.

Bảng 2.1. Thông số vật liệu xốp XPS theo nhà sản xuất [91]

Đặc tính	Đơn vị	Chỉ số	Phương pháp thử
Tỷ trọng	kg/m ³	40	ASTM 1622
Cường độ chịu nén	KPa	400	ASTM 1621
Độ hấp thụ nước	%(v/v)	<1%	ASTM C272
Hệ số truyền nhiệt	W/m.k	0,28	ASTM C518
Độ ổn định kích thước	%	<2%	



Hình 2.14. Mẫu xốp XPS trong thí nghiệm nén

2.3.1.2. Thiết bị thí nghiệm

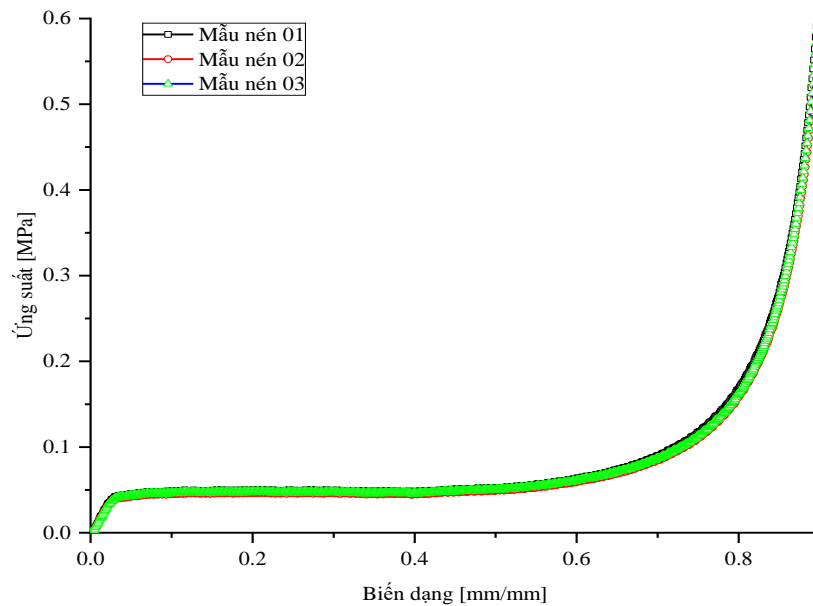
Tiến hành thí nghiệm ép mẫu xốp trên hệ thống máy kéo nén đa năng của hãng MTS sử dụng đầu gia lực 647 Hydraulic Wedge Grips có khả năng gia tải lên đến 500kN với tốc độ nén được điều khiển. Máy ép được kết nối đồng bộ với hệ thống máy tính tích hợp phần mềm điều khiển và xử lý dữ liệu chuyên dụng của hãng. Kết quả nén được thể hiện ngay trên giao diện của phần mềm giúp việc đánh giá kết quả thí nghiệm và điều chỉnh thí nghiệm kịp thời. Quá trình thí nghiệm nén mẫu trong phòng thí nghiệm được thể hiện trong Hình 2.15.



Hình 2.15. Quá trình tiến hành thí nghiệm nén mẫu xốp XPS

2.3.1.3. Kết quả thí nghiệm

Tiến hành thí nghiệm nén các mẫu xốp XPS với cùng tốc độ nén 4mm/phút và quá trình thí nghiệm kết thúc khi mẫu nén biến dạng đạt 90%. Kết quả quan hệ ứng suất - biến dạng đặc trưng của vật liệu trên Hình 2.16.



Hình 2.16. Kết quả quan hệ ứng suất - biến dạng của mẫu XPS thí nghiệm

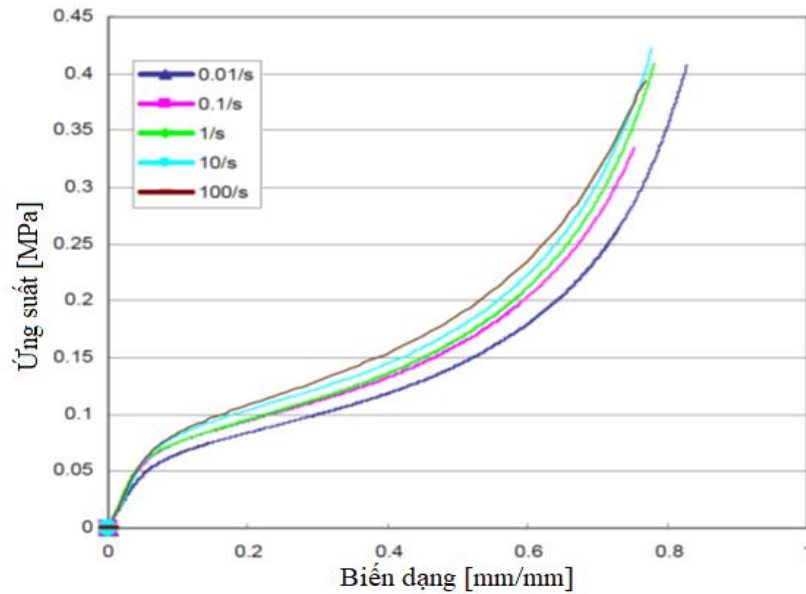
2.3.2. Lựa chọn mô hình vật liệu cho xốp XPS trong LS-DYNA

Việc nghiên cứu và tính toán với các loại vật liệu nói chung cần có sự lựa chọn mô hình ứng xử của vật liệu một cách phù hợp để kết quả tính toán đáp ứng được ứng xử thực tế của vật liệu. Trong nội dung nghiên cứu sẽ đánh giá các mô hình đã được nghiên cứu và khuyến cáo để lựa chọn ra mô hình vật liệu phù hợp nhất cho xốp cứng không phục hồi.

2.3.2.1. *Đánh giá một số mô hình thông dụng*

Với vật liệu xốp mềm có cấu trúc lỗ rỗng mở như xốp Polyurethane phù hợp với mô hình vật liệu MAT_LOW_DENSITY_FOAM (MAT_57). Trong trường hợp đơn giản nhất mô hình chỉ cần kết hợp với biểu đồ lực tác dụng theo thời gian là đủ để mô tả các ứng xử của vật liệu khi chịu tác dụng nén ép. Với các vật liệu dạng này, vật liệu nên không bị phá hủy mà có khả năng phục hồi tốt thì việc bổ sung quá trình dỡ tải sẽ đem lại ứng xử đầy đủ của vật liệu. Tuy nhiên quá trình phục hồi của vật liệu là khác nhau nên điều quan trọng là phải xác định các đường phục hồi của vật liệu một cách chính xác và quá trình này sẽ xác định được các tham số dỡ tải động HU và tham số hình dạng dỡ tải SHAPE. Trong tài liệu hướng dẫn của LS-DYNA cũng đã cung cấp các số liệu tham khảo cho hai tham số trên lần lượt là 0.1 và 6, chúng có thể được điều chỉnh thông qua LS-OPT [92, 93]. Ngoài mô hình MAT_57 các loại vật liệu dạng này có thể sử dụng các mô hình khác như: MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_63), MAT_CLOSED_CELL_FOAM (MAT_53), các mô hình vật liệu này cũng được áp dụng với nhiều loại xốp khác nhau [87-90].

Vật liệu xốp cứng không có khả năng phục hồi trạng thái gốc Polystyrene khi chịu nén ép thì mô hình MAT_63 là một lựa chọn phù hợp với thông số bổ sung cho mô hình thông qua mối quan hệ ứng suất - biến dạng thể tích. Thông qua nghiên cứu của Brian Croop và Hubert Lobo cho thấy quan hệ ứng suất - biến dạng thể tích của xốp EPS (Expanded Polystyrene Foam) hầu như không phụ thuộc vào tốc độ nén ép (Hình 2.17) nên mô hình vật liệu MAT_MODIFIED_CRUSHABLE_FOAM (MAT_163) cũng là một lựa chọn tốt cho việc mô phỏng vật liệu có gốc Polystyrene [88]. Tuy nhiên, mô hình MAT_163 là mô hình mở rộng và yêu cầu thêm nhiều hệ số thực nghiệm ngoài những thông số cơ bản của vật liệu.



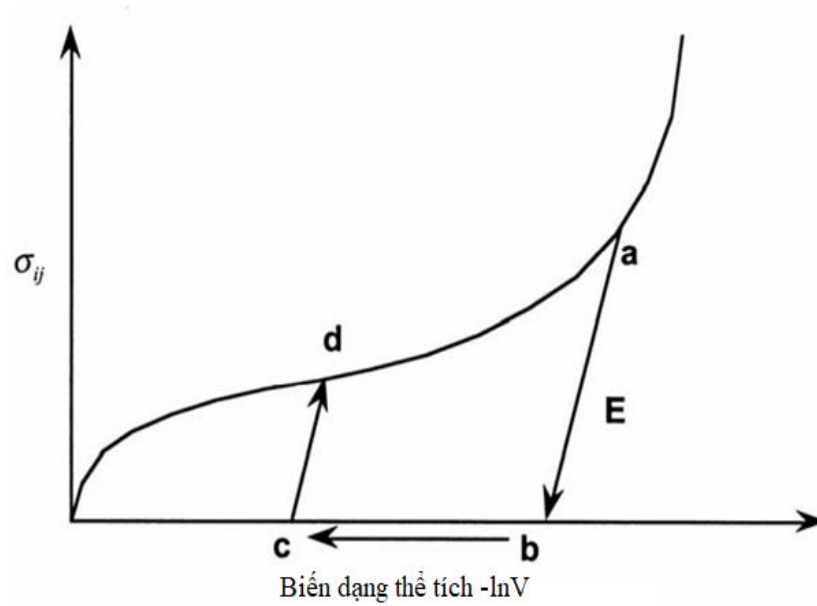
Hình 2.17. Quan hệ ứng suất - biến dạng của xốp EPS [88]

Trong nội dung tiếp theo đi sâu tìm hiểu về mô hình MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_63) trong LS-DYNA đã được áp dụng thành công trong nhiều nghiên cứu trước đây [87-89].

2.3.2.2. Mô hình MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_63)

Mô hình vật liệu MAT_63 có yêu cầu đơn giản khi cung cấp các thông số đầu vào với các tham số cơ bản như khối lượng riêng, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson và biểu đồ mối quan hệ giữa ứng suất - biến dạng từ thí nghiệm nén đơn trục của vật liệu. Mục đích của mô hình này là cho vật liệu xốp có thể nghiền nát (không phục hồi) khi chịu tác động và các ứng dụng khác mà ứng xử theo chu kỳ là không quan trọng.

Mô hình vật liệu xốp đẳng hướng chịu tác động nén một chiều với hệ số Poisson về cơ bản bằng không [92, 94]. Quan hệ ứng suất - suất biến dạng được mô tả trong Hình 2.18, trong đó ví dụ về việc dỡ tải từ điểm **a** đến ứng suất cắt tại **b** sau đó dỡ tải đến điểm **c** và cuối cùng gia tải lại đến điểm **d**. Tại thời điểm gia tải lại sẽ tiếp tục dọc theo đường cong tải. Một lưu ý quan trọng là sử dụng các giá trị khác không đối với giới hạn kéo để ngăn chặn sự hư hỏng của vật liệu dưới tải trọng kéo nhỏ [92].



Hình 2.18. Quan hệ ứng suất - biến dạng vật liệu xốp cứng [92]

Trong quá trình tính toán, giả định rằng mô đun đàn hồi là không đổi và ứng suất cập nhật với ứng xử đàn hồi [92]:

$$\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij}^n + E_f \dot{\varepsilon}_{ij}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (2.22)$$

trong đó, σ_{ij}^* là ứng suất được xác định thông qua mô đun đàn hồi, ten xo tốc độ biến dạng $\dot{\varepsilon}_{ij}$ và bước thời gian Δt . Sau đó, ứng suất chính, σ_i^* ($i=1, 3$), được so sánh với ứng suất chảy σ_y và nếu ứng suất chính vượt quá ứng suất chảy thì nó sẽ được lấy bằng giá trị của ứng suất chảy ở bước tính tiếp theo:

$$\sigma_y < |\sigma_i^*| \text{ thì } \sigma_i^{n+1} = \sigma_y \frac{\sigma_i^*}{|\sigma_i^*|} \quad (2.23)$$

Sau khi các giá trị ứng suất chính được chia tỷ lệ, ten xo ứng suất được chuyển đổi trở lại hệ thống tổng thể. Như đã thấy trong Hình 2.18, ứng suất chảy là một hàm của lôgarit tự nhiên của thể tích tương đối V , tức là biến dạng thể tích.

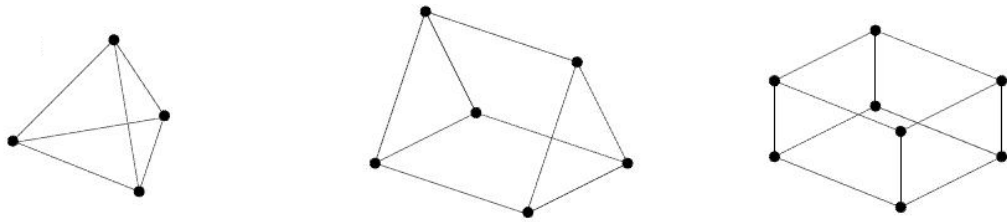
2.3.3. Mô phỏng thí nghiệm nén xốp bằng LS-DYNA

2.3.3.1. Kiểu phần tử chính trong LS-DYNA

a) Phần tử khối

Trong LS-DYNA sử dụng nhiều các loại phần tử khác nhau như phần tử khối, phần tử tấm, phần tử thanh,... Để mô tả các kết cấu dạng khối thường sử

dụng phần tử khối, có ba loại phần tử khối là phần tử khối 8 nút, phần tử khối 6 nút và phần tử khối 4 nút.



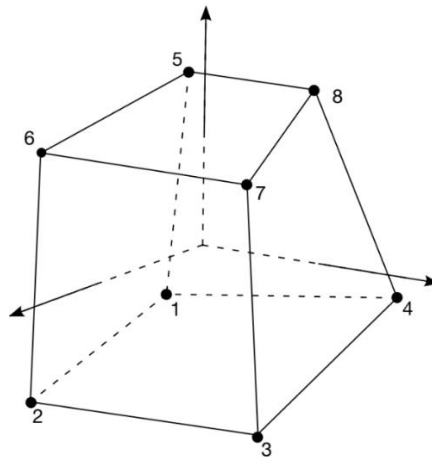
a) Khối tứ diện 4 nút (Tetrahedron)

b) Khối hình nêm 6 nút (Wedge)

c) Khối lục diện 8 nút (Hexahedron)

Hình 2.19. Các dạng phần tử khối trong LS-DYNA

Phần tử khối 8 nút theo mặc định sử dụng tích hợp một điểm ứng suất không thay đổi trong phần tử (tham số $ELFORM = 1$), kết hợp cùng với chế độ điều khiển đồng hồ cát (Hourglass Control) phù hợp để kiểm soát các chế độ năng lượng bằng không phát sinh. Việc sử dụng phần tử tích hợp một điểm này cho phép các kết quả tính nhanh hơn và ít tiêu tốn phần cứng hơn. Các phần tử khối 8 nút được tích hợp đầy đủ cũng có sẵn trong thẻ *SECTION_SOLID, chúng hoạt động tốt hơn khi phần tử biến dạng lớn nhưng tốn thời gian hơn khoảng bốn lần. Loại phần tử này không cần điều khiển đồng hồ cát vì không có chế độ năng lượng bằng không. Các phần tử khối dạng nêm và tứ diện chỉ đơn giản là những khối rút gọn (tức là một số nút được lặp lại), loại phần tử này thường gây ra vấn đề không ổn định và tốt nhất là nên tránh [92].



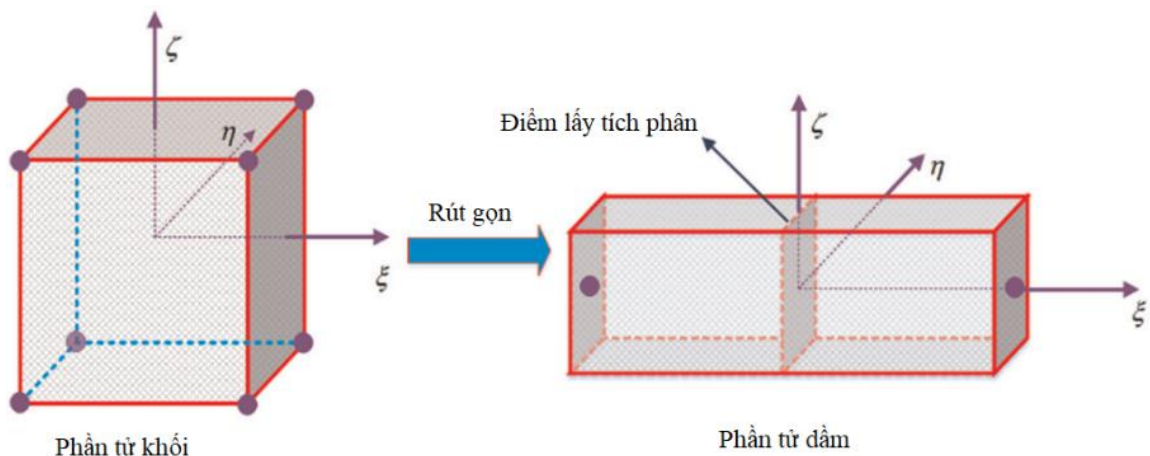
Hình 2.20. Phần tử khối lục diện 8 nút trong LS-DYNA

Trong nội dung của luận án sử dụng phần tử khối 8 nút để mô tả hình học kết cấu vừa đảm bảo khả năng ổn định hơn trong tính toán, vừa phù hợp với việc xây dựng cấu trúc hình học kết cấu và thuận tiện cho giải pháp chia lưới.

b) Phần tử dầm

Trong LS-DYNA có một số loại phần tử phù hợp cho mô tả kết cấu dạng dầm như phần tử dầm Belytschko, phần tử dầm Hughes - Liu, phần tử kéo nén thuần túy (Truss Element),... trong các loại phần tử này thì phần tử dầm Hughes - Liu có nhiều ưu điểm [92]:

1. Làm gia tăng mục tiêu tính toán và được áp dụng nhiều trong thực tế;
2. Dạng phần tử đơn giản cho phép hiệu quả tính toán nhanh và khả năng tính toán mạnh mẽ;
3. Tương thích với phần tử khối vì phần tử dạng này dựa trên phần tử khối rút gọn;
4. Có kể đến biến dạng cắt, có các tính toán bổ sung cần thiết để giữ lại thành phần biến dạng này so với giả định bằng không có hoặc không đáng kể.



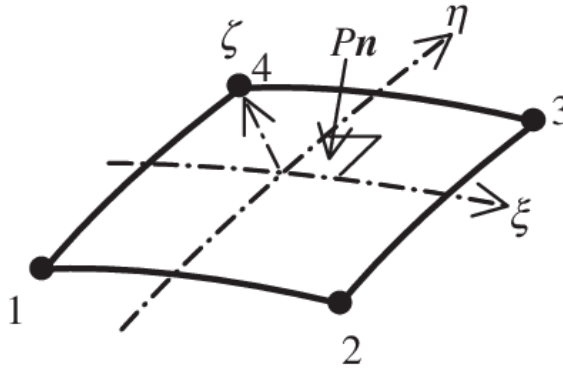
Hình 2.21. Mô hình phần tử dầm Hughes - Liu

Trong nội dung luận án sử dụng phần tử dầm Hughes-Liu để mô tả kết cấu cốt thép và cốt GFRP dạng thanh. Việc sử dụng phần tử dạng này đảm bảo cho lời giải ổn định, nhanh chóng và khả năng tương thích tốt hơn với phần tử khối của bê tông.

c) Phần tử vỏ (Shell Elements)

Trong LS-DYNA có một số loại phần tử phù hợp cho mô tả kết cấu dạng vỏ mỏng như phần tử vỏ Belytschko-Lin-Tsay, phần tử vỏ tam giác (Triangular Shell), phần tử vỏ Hughes-Liu, phần tử vỏ được tích hợp đầy đủ (Fully Integrated Shell). Tất cả các yếu tố của vỏ bao gồm màng, biến dạng uốn và cắt. Công thức Belytschko-Tsay mặc định là hiệu quả nhất, nên được sử dụng trừ khi cần có các tính năng cụ thể đối với các công thức khác.

Trong các loại phần tử trên thì phần tử vỏ tích hợp đầy đủ trong LS-DYNA là loại phần tử được tích hợp đầy đủ với các phép nội suy biến dạng giả định để tăng cường ứng xử uốn trong mặt phẳng [92]. Phần tử loại này sử dụng một hệ tọa độ phần tử tương tự như hệ tọa độ được sử dụng cho phần tử Belytschko-Tsay, trong đó hai vectơ cơ sở đầu tiên là tiếp tuyến đến bề mặt vỏ của phần tử, và vectơ cơ sở thứ ba nằm theo hướng pháp tuyến của bề mặt.



Hình 2.22. Mô hình phần tử vỏ 4 nút trong LS-DYNA

Trong nội dung luận án sử dụng phần tử vỏ tích hợp đầy đủ để mô tả kết cấu tấm thép dàn lực trong cấu trúc kết cấu bảo vệ. Việc sử dụng phần tử dạng này đảm bảo cho lời giải ổn định, nhanh chóng và khả năng ứng xử tốt hơn với tải trọng là áp lực nổ.

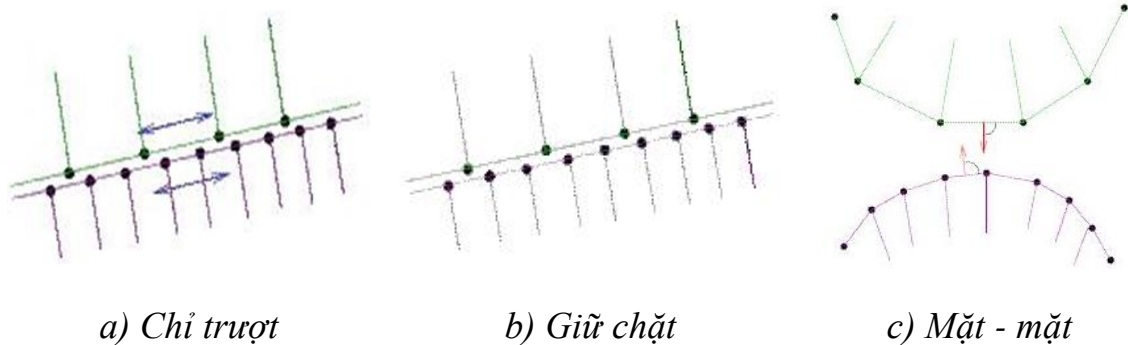
2.3.3.2. Tiếp xúc giữa các miền vật liệu

Xử lý tiếp xúc tạo thành một phần không thể thiếu của nhiều bài toán biến dạng lớn. Mô hình hóa chính xác các giao thức tiếp xúc giữa các phần tử là rất quan trọng đối với khả năng dự đoán của mô phỏng phần tử hữu hạn. LS-DYNA có một số lượng đa dạng các kiểu tiếp xúc. Một số loại dành cho các ứng dụng cụ thể và những loại khác phù hợp với mục đích sử dụng chung cho các bài toán. Nhiều loại tiếp điểm cũ và hiếm khi được sử dụng nhưng vẫn được giữ lại để cho phép các mô hình cũ hơn có thể chạy trong phiên bản mới. Người dùng thường phải đối mặt với nhiều sự lựa chọn trong việc tiếp xúc với mô hình hóa.

Trong LS-DYNA, một tiếp xúc được xác định bằng cách xác định các vị trí có khả năng thâm nhập nút giữa các bề mặt tiếp xúc với nhau. Quá trình tìm kiếm sự thâm nhập được sử dụng các thuật toán khác nhau và thực hiện ở mỗi bước giải. Trong trường hợp tiếp xúc dựa trên hàm phạt, khi phát hiện thấy sự

thâm nhập, một lực tỷ lệ với độ sâu thâm nhập sẽ được tác dụng để chống lại và loại bỏ sự thâm nhập.

Một số dạng tiếp xúc cơ bản như: tiếp xúc chỉ trượt (*CONTACT_SLIDING_ONLY), tiếp xúc giữa mặt với mặt (*CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE), tiếp xúc giữa nút với mặt (*CONTACT_NODES_TO_SURFACE),...; tiếp xúc một chiều; tiếp xúc hai chiều... Trong các loại tiếp xúc được xem xét thì tiếp xúc hai chiều (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE) được khuyến nghị trong mô phỏng va chạm tốc độ cao vì hướng của các bề mặt chỉ tương đối với nhau không phải lúc nào cũng có thể lường trước được khi mô hình trải qua biến dạng lớn [92].



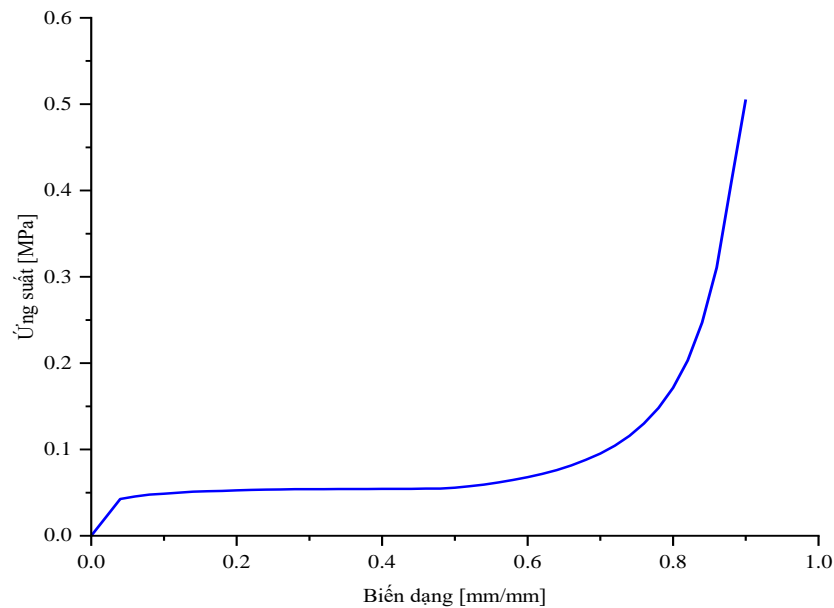
Hình 2.23. Một số dạng tiếp xúc cơ bản

Trong nội dung nghiên cứu lựa chọn sử dụng tiếp xúc hai chiều giữa các mặt (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE) để mô tả tiếp xúc giữa các bề mặt các miền vật liệu với nhau.

2.3.3.3. Mô phỏng thí nghiệm nén xốp XPS

Một trong những yếu tố quan trọng khi mô phỏng trong LS-DYNA là đưa được đường quan hệ ứng suất - biến dạng (hoặc lực - chuyển vị) vào mô hình vật liệu. Với các mô hình vật liệu cho xốp nói chung thì đường quan hệ ứng suất - biến dạng cần thỏa mãn các yếu tố: Trong Vùng 1 đường quan hệ là tuyến tính (độ dốc không đổi) và trong Vùng 2 đường quan hệ là hằng số hoặc tăng nhẹ.

Từ những nhận xét trên tiến hành trung bình, tuyến tính hóa kết quả thí nghiệm nén các mẫu xốp XPS thu được đường đặc trưng quan hệ ứng suất - biến dạng với giá trị ứng suất tại điểm chuyển trạng thái Vùng 1 - Vùng 2 là 0.342 MPa và Vùng 2 - Vùng 3 là 0.498 MPa để đưa vào mô hình vật liệu khi mô phỏng.



Hình 2.24. Quan hệ ứng suất - biến dạng sau hiệu chuẩn

Để tiến hành đánh giá mô hình phù hợp áp dụng cho xốp cứng XPS, lựa chọn các mô hình MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_63), MAT_LOW_DENSITY_FOAM (MAT_57) và MAT_CLOSED_CELL_FOAM (MAT_53) đã được áp dụng nhiều trong các nghiên cứu trước đây [87-90]. Các thông số cơ bản của vật liệu xốp XPS và đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng trên Hình 2.24 và trong Bảng 2.2.

Hệ số Poisson của vật liệu xốp không phải hằng số, có phụ thuộc vào mật độ vật liệu xốp và tốc độ biến dạng [95]. Thông thường mô hình vật liệu xốp được thực hiện bởi tính toán bởi LS-DYNA (và các phần mềm mô phỏng khác) đều giả sử tỷ lệ Poisson thấp [96]. Điều này cho phép xác định biến dạng thể tích của vật liệu dễ dàng hơn, các phần tử vật liệu xốp trong mô phỏng sẽ có xu hướng tăng cứng để chống lại lỗi thể tích âm thường gặp trong mô phỏng vật liệu xốp chịu tốc độ biến dạng cao. Một số công trình nghiên cứu đã công bố, lựa chọn hệ số Poisson của xốp bằng 0 [50, 88, 89, 97-99]. Do vậy, trong nội dung nghiên cứu của luận án lựa chọn hệ số Poisson của vật liệu xốp cứng không phục hồi bằng 0.

Bảng 2.2. Tham số vật liệu xốp XPS

$\rho(\text{kg/m}^3)$	E(Pa)	ν_f
40	1.17xE6	0.0

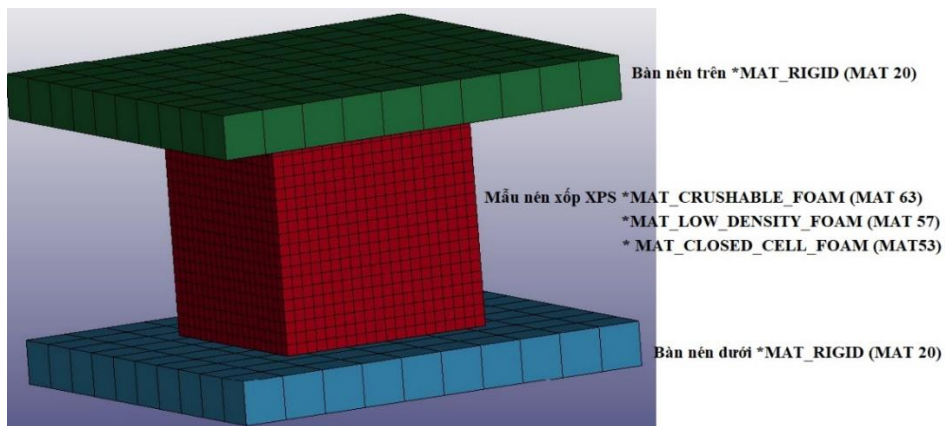
Tiến hành mô phỏng mẫu xốp XPS kích thước 50x50x50mm tương đương mẫu trong thí nghiệm và chia lưới sử dụng phần tử khối 8 nút kích thước 2.5x2.5x2.5mm. Bàn nén phía trên và phía dưới sử dụng vật liệu thép không bị

biến dạng khi nén thông qua mã vật liệu MAT_RIGID (MAT_20). Trong mô phỏng sử dụng liên hệ *CONTACT-AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE cho tương tác tiếp xúc giữa mặt xốp và bàn nén.

Bảng 2.3. Tham số mô hình vật liệu bàn nén thép

$\rho(\text{kg/m}^3)$	E(Pa)	ν
7850	2.05×10^{11}	0.3

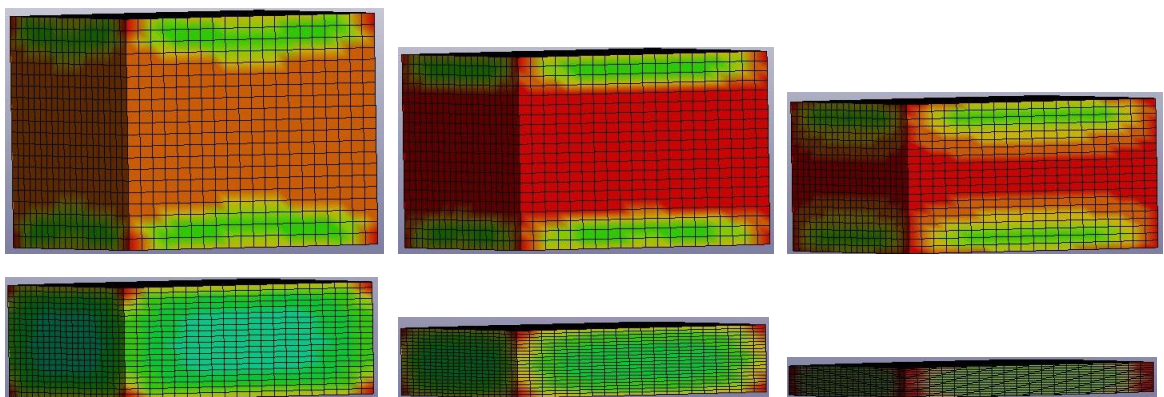
Mô hình mô phỏng mẫu xốp XPS trong LS-DYNA được thể hiện trên các hình từ Hình 2.25.



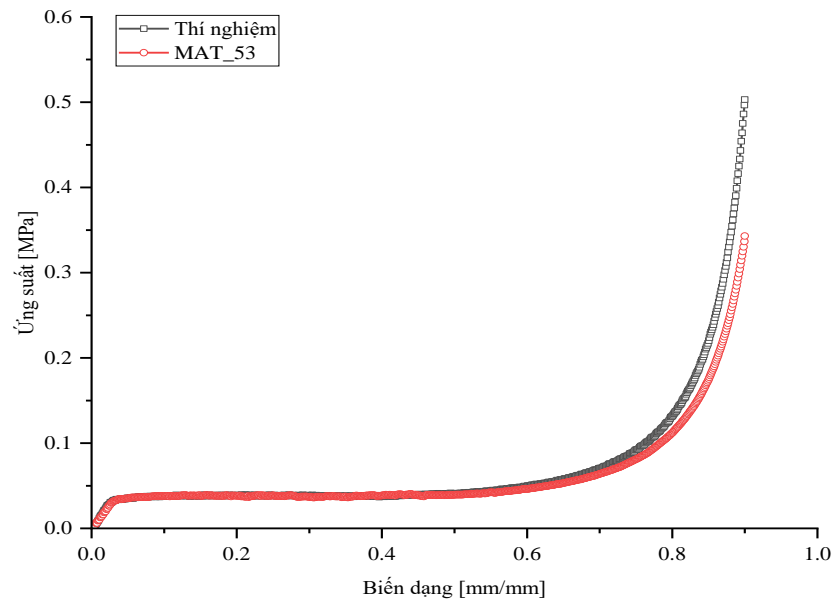
Hình 2.25. Mô hình mô phỏng mẫu nén xốp XPS trong LS-DYNA

2.3.3.4. Kết quả mô phỏng số

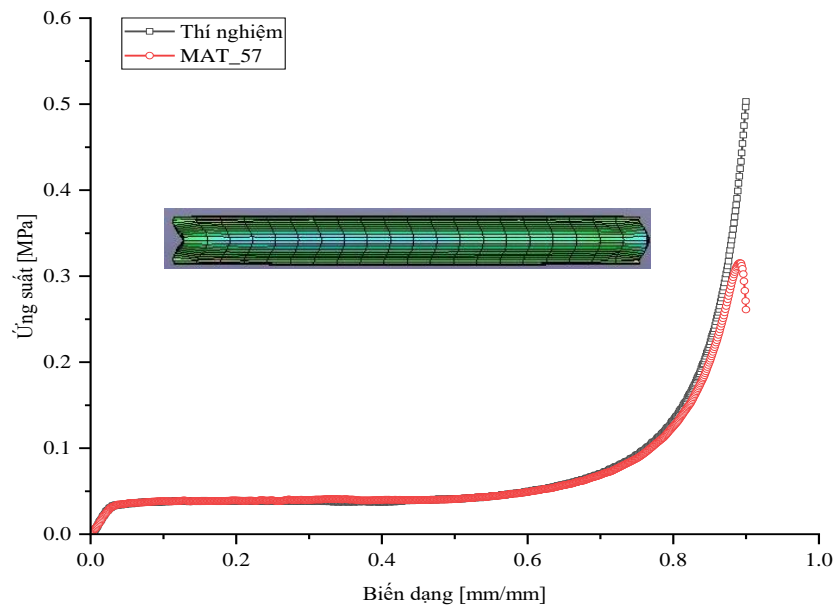
Tiến hành mô phỏng nén mẫu xốp XPS trên phần mềm LS-DYNA cho kết quả quá trình biến dạng mẫu xốp và được công quan hệ ứng suất - biến dạng được thể hiện trên các hình từ Hình 2.26 đến Hình 2.30.



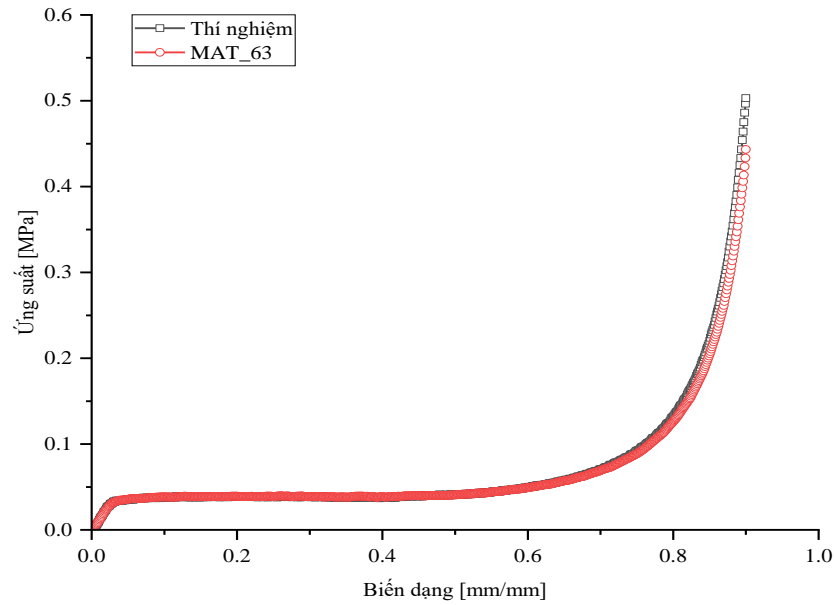
Hình 2.26. Quá trình mô phỏng nén ép mẫu xốp XPS trong LS-DYNA



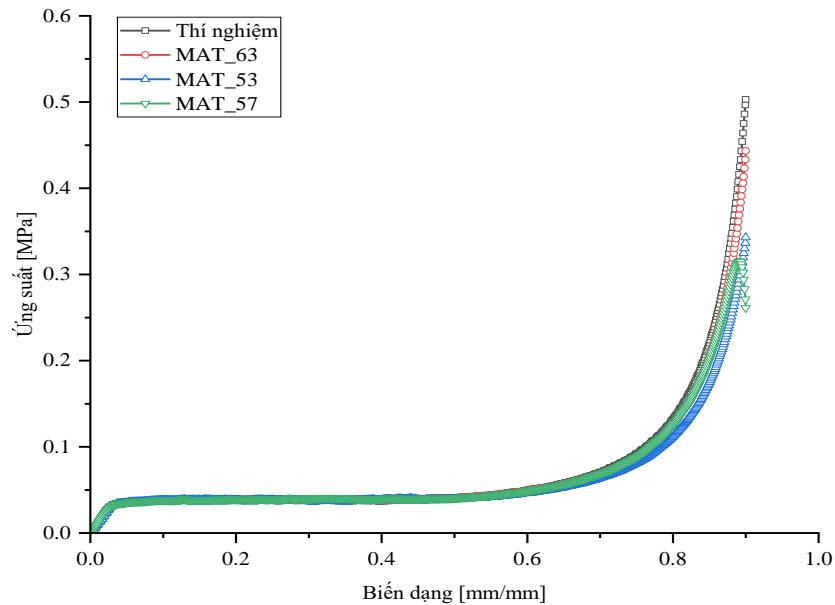
Hình 2.27. Kết quả mô phỏng mẫu xóp theo mô hình MAT_53



Hình 2.28. Kết quả mô phỏng mẫu xóp theo mô hình MAT_57



Hình 2.29. Kết quả mô phỏng mẫu xốp theo mô hình MAT_63



Hình 2.30. Tương quan kết quả nén mẫu xốp giữa các mô hình mô phỏng

2.3.4. Bàn luận kết quả phương pháp mô hình hóa

Từ kết quả mô phỏng thí nghiệm nén mẫu xốp cho thấy các mô hình vật liệu có sẵn trong LS-DYNA được lựa chọn cho kết quả ứng xử sát với kết quả thí nghiệm nén mẫu. Mô hình vật liệu MAT_53 ở giai đoạn nén chặt đường cong ứng suất - biến dạng không bám sát kết quả thí nghiệm và sai lệch giá trị ứng suất lớn nhất 31.81%. Mô hình vật liệu MAT_57 ở cuối giai đoạn nén chặt mẫu thí nghiệm bị biến dạng bất thường (Hình 2.28).

Với mô hình vật liệu MAT_63 ở giai đoạn nén chặt (Vùng 3) có sai lệch với kết quả thí nghiệm (sai lệch giá trị ứng suất lớn nhất 11.88%) nhưng vẫn

phản ánh đúng quy luật ứng xử của vật liệu. Về tổng thể đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng trong mô phỏng bám sát với kết quả thí nghiệm. Kết quả cho thấy mô hình MAT_63 là phù hợp cho mô phỏng mẫu xốp cứng không phục hồi chịu nén trong LS-DYNA.

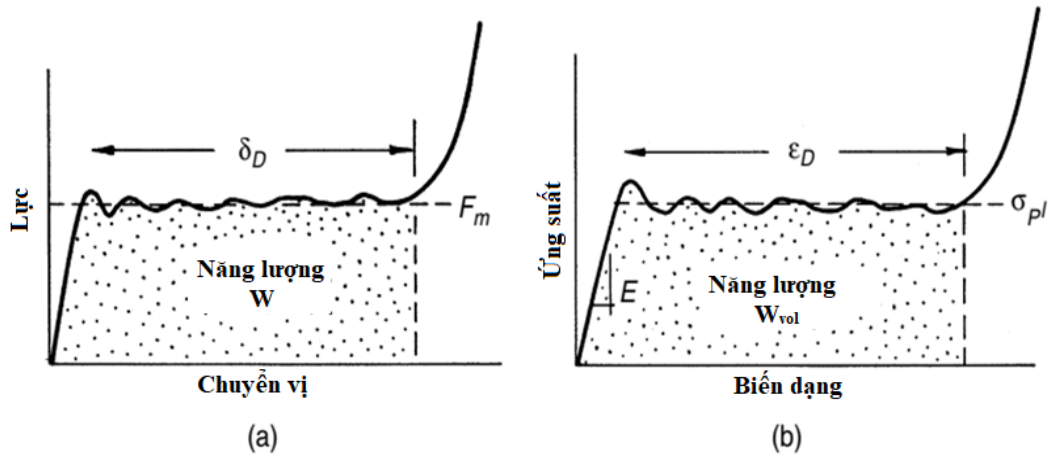
Từ những kết quả thu được cho thấy phương pháp mô hình hóa dựa trên phần tử khối, kết hợp với đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng từ thí nghiệm và lựa chọn mô hình vật liệu phù hợp sẽ phản ánh được ứng xử thực của vật liệu xốp chịu nén. Phương pháp tiếp cận này trong tính toán cũng khắc phục được những khó khăn của phương pháp tính toán dựa trên cấu trúc vi mô của vật liệu xốp, nhất là với kích thước vật liệu lớn.

2.4. Ứng dụng hấp thụ áp lực tác động của vật liệu xốp

Vật liệu xốp được ứng dụng rộng rãi trong các ứng dụng cách âm, cách nhiệt và hấp thụ tác động. Đối với ứng dụng hấp thụ tác động có thể kể đến các ứng dụng như hấp thụ áp lực nổ, hấp thụ động năng va chạm, giảm rung động và giảm chấn. Trong nội dung nghiên cứu tập trung nghiên cứu ứng dụng hấp thụ áp lực nổ của vật liệu xốp và phương pháp tính toán kết cấu bảo vệ sử dụng vật liệu xốp.

2.4.1. Nguyên lý chung hấp thụ năng lượng tác động của vật liệu xốp

Vật liệu hấp thụ năng lượng lý tưởng với đường cong ứng suất - biến dạng có đoạn ứng suất không đổi như các Hình 2.31 (a) và (b). Vật liệu hấp thụ bị sụp đổ dẻo ở một ứng suất danh nghĩa không đổi, được gọi là ứng suất đoạn bằng σ_{pl} đạt đến một biến dạng danh nghĩa giới hạn ε_D . Các vật liệu hấp thụ năng lượng được chọn sao cho ứng suất đoạn bằng nằm ngay dưới mức sẽ gây ra hư hỏng cho kết cấu được bảo vệ. Lựa chọn tốt nhất sau đó là lựa chọn có đoạn bằng dài nhất và do đó hấp thụ nhiều năng lượng nhất trước khi đạt đến ε_D . Diện tích dưới đường cong gần bằng $\sigma_{pl}\varepsilon_D$ là năng lượng mà vật liệu có thể hấp thụ trên một đơn vị thể tích tương ứng đoạn bằng. Các vật liệu xốp có đường cong ứng suất - biến dạng như trong Hình 2.31 thực hiện tốt chức năng này.



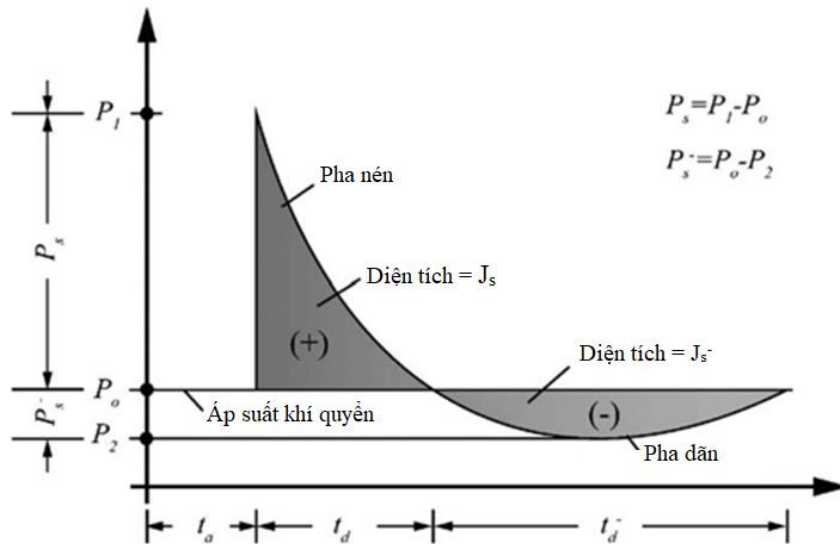
Hình 2.31. (a) Đường cong lực - chuyển vị và (b) đường cong ứng suất - biến dạng của vật liệu xốp.

Trong bảo vệ chống va chạm, vật liệu hấp thụ phải hấp thụ động năng của vật thể chuyển động mà không đạt đến biến dạng nén chặt ϵ_D , khi đó ứng suất không bao giờ vượt quá ứng suất đoạn bằng. Tuy nhiên, điều này là khác khi tác động là áp lực từ vụ nổ gây ra. Vụ nổ truyền một xung lượng và bảo toàn động lượng thay vì truyền năng lượng. Do đó, các tính toán trở nên phức tạp hơn và cần được xem xét cụ thể.

2.4.2. Vật liệu xốp hấp thụ áp lực nổ

2.4.2.1. Xung lượng áp lực nổ tác động lên kết cấu

Biểu đồ áp lực theo thời gian của một vụ nổ lý tưởng trong không khí ở một khoảng cách cố định (R) từ tâm vụ nổ có thể được mô tả như trong Hình 2.32, được gọi là dạng sóng Friedlander. Biểu đồ áp lực theo thời gian có thể được chia thành các giai đoạn của pha nén và pha giãn. Dạng sóng Friedlander lý tưởng có các thông số sóng nổ như: thời gian đến (t_a), áp lực pha nén cực đại (P_s), thời gian pha nén (t_d), áp lực pha giãn (P_s), thời gian pha giãn (t_d^-), xung lượng pha nén (J_s) và xung lượng pha giãn (J_s^-).



Hình 2.32. Đường cong áp lực theo thời gian của nổ trong không khí

Đối với việc nghiên cứu các ảnh hưởng của sóng nổ lên các kết cấu và cũng như thiết kế các kết cấu hoặc cấu kiện, pha nén thường được coi là quan trọng hơn so với pha giãn vì biên độ lớn của áp lực (P_s) và xung lượng (J_s) [100]. Mặt khác, pha giãn thường bị bỏ qua vì độ lớn tương đối nhỏ và rất khó đo [101]. Tuy nhiên, một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, đối với khoảng cách tỷ lệ ($Z=R/W^{1/3}$) lớn hơn $20\text{m/kg}^{1/3}$ (đặc biệt đối với khoảng cách tỷ lệ (Z) lớn hơn $50\text{m/kg}^{1/3}$), không thể bỏ qua ảnh hưởng của pha giãn [102].

Trong giai đoạn của pha nén, sóng xung kích truyền dọc theo một điểm được xét sau khi kích nổ một chất nổ trong một khoảng thời gian, được gọi là thời gian đến (t_a). Sự gia tăng tức thời áp suất môi trường xung quanh xảy ra do không khí bị nén cao ở phía trước xung kích và áp suất đạt đến giá trị đỉnh của nó, được gọi là áp lực đỉnh (P_s). Sau khi đạt đến đỉnh, áp suất giảm về áp suất khí quyển (P_o) trong một khoảng thời gian được gọi là khoảng thời gian pha nén (t_d). Xung trên pha nén được gọi là xung lượng (J_s) [102]. Sự thay đổi áp suất vụ nổ là hiệu số của áp suất đỉnh (P_s) và áp suất âm (P_s^-). Để tính toán và trình bày các đường cong áp suất nổ dương (nén), nhiều công thức đã được đề xuất. Flynn đã đề xuất một đường cong áp suất giảm tuyến tính [103]:

$$P(t) = P_o + P_s \left(1 - \frac{t}{t_d}\right), \quad 0 < t \leq t_d \quad (2.24)$$

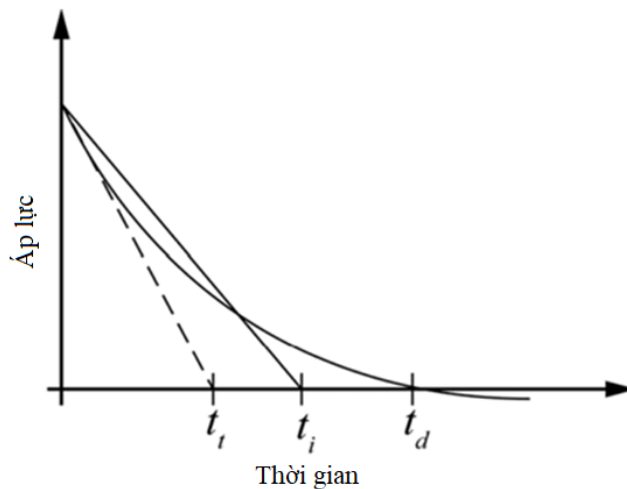
Xem xét bản chất giảm của vụ nổ, một dạng tốt hơn đã được Ethridge trình bày trong công trình năm 1965 [103]:

$$P(t) = P_0 + P_s e^{-ct} \quad (2.25)$$

trong đó t được đo từ thời điểm đến (t_a), sự phù hợp đường cong của công thức (2.25) có thể được thực hiện bằng cách sử dụng áp lực đỉnh và tốc độ giảm của sóng làm tham số. Dạng này thường được gọi là phương trình Friedlander đã sửa đổi, được biểu thị bằng [103-105]:

$$P(t) = P_0 + P_s \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-b^* t/t_d} \quad (2.26)$$

trong đó b^* là hệ số giảm. Để đơn giản, biên dạng vụ nổ có thể được tính gần đúng bởi các xung tam giác giảm tuyến tính được thể hiện trong Hình 2.33. Các dạng tam giác giảm tuyến tính này có cùng áp suất đỉnh ban đầu, nhưng có các khoảng thời gian khác nhau tùy thuộc vào thời gian dự kiến tối đa của phản ứng kết cấu [103, 106].



Hình 2.33. Dạng tam giác áp lực theo thời gian

Xung lượng của pha nén có thể được tính bằng cách tích phân đường cong áp lực theo thời gian trong khoảng thời gian pha nén (t_d). Xung lượng pha nén là tham số có tầm quan trọng chủ yếu đối với tải trọng lên kết cấu và có thể được biểu thị bằng toán học như sau [107]:

$$J_s = \int_{t_a}^{t_a+t_d} [P(t) - P_0] dt \quad (2.27)$$

Xung lượng pha nén cũng có thể được tính toán bằng cách sử dụng khoảng cách tỷ lệ (Z), khối lượng nổ (W) và khoảng cách (R). Phương trình thực nghiệm được trình bày đã được sửa đổi để có đơn vị là Pa-s. Quan hệ thực

nghiệm của xung lượng nén (J_s) được Sadovsky (1952) [104, 108-112] xây dựng dưới đây:

$$J_s = \begin{cases} (34 \sim 36) \times 9.81 \times \frac{\sqrt[3]{W^2}}{R} & Z > 0.5 \\ 147.15 \times \frac{W}{R^2} & Z < 0.25 \end{cases} \quad (2.28)$$

2.4.2.2. Tính toán hệ kết cấu bảo vệ

Các vụ nổ tạo ra một sóng xung kích có dạng gần như tam giác với thời gian tác dụng rất ngắn [113]. Vụ nổ truyền một xung lượng J_s trên một đơn vị diện tích của kết cấu bị tác động, bằng tích phân của áp lực theo thời gian:

$$J_s = \int p dt \quad (2.29)$$

Để đơn giản trong việc xác định xung lượng pha nén có thể sử dụng công thức thực nghiệm (2.28) của Sadovsky (1952).

Bảo vệ kết cấu khỏi tác động của vụ nổ đạt được bằng cách đặt một tấm đệm nặng gắn trên vật liệu xốp (bộ hấp thụ năng lượng) lên trên bề mặt của kết cấu cần bảo vệ. Xung động từ vụ nổ làm tăng tốc tấm đệm, động năng của nó bị tiêu tán bởi vật liệu xốp hấp thụ năng lượng tốt. Cho tấm đệm có chiều dày δ_{td} và khối lượng riêng ρ_{td} (điều kiện tấm đàn lực không bị phá hoại cục bộ bởi áp lực nổ). Sau đó, xung lượng J_s truyền động lượng M_s đến một đơn vị diện tích của bề mặt tấm [31], khi đó:

$$M_s = \rho_{td} \delta_{td} v = J_s \quad (2.30)$$

Với vận tốc của tấm là v , lúc này tấm đệm có động năng là:

$$U_s = \frac{1}{2} \rho_{td} \delta_{td} v^2 = \frac{J_s^2}{2 \rho_{td} \delta_{td}} \quad (2.31)$$

và chính điều này mà vật liệu xốp hấp thụ năng lượng cần tiêu tán của xung lượng nổ thông qua hấp thụ động năng của tấm đệm. Lưu ý rằng tấm đệm càng dày và nặng thì động năng mà vật liệu phải hấp thụ càng thấp.

Việc lựa chọn vật liệu xốp làm vật liệu hấp thụ năng lượng cần phải hấp thụ được động năng U_s trên một đơn vị diện tích tại một ứng suất đoạn bằng σ_{pl} sẽ không làm hư hại đối tượng kết cấu được bảo vệ. Để động năng được hấp thụ trên một đơn vị thể tích lên đến mức nén chặt của vật liệu xốp có ứng suất

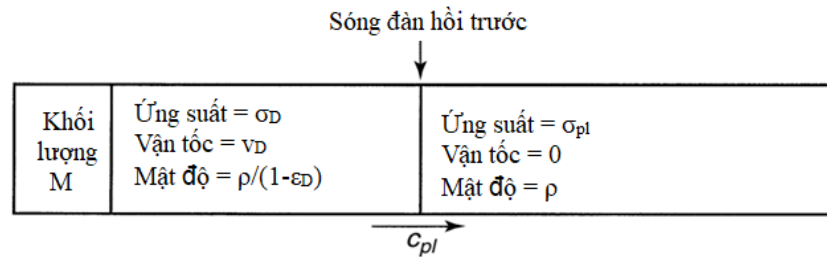
đoạn bằng σ_{pl} là W_{vol} (xem Hình 2.31b). Với W_{vol} là giá trị lớn nhất của năng lượng trên một đơn vị thể tích mà xốp hấp thụ cho đến khi bị nén chặt có thể xác định gần đúng bởi $W_{vol} = \sigma_{pl} \varepsilon_D$. Khi đó, chiều dày h_{blast} của vật liệu xốp cần thiết để hấp thụ xung lượng vụ nổ là:

$$h_{blast} = \frac{J_s^2}{2\rho_{td}\delta_{td}W_{vol}} \quad (2.32)$$

Hiệu quả của sự hấp thụ được tối ưu hóa bằng cách sử dụng một tấm đệm nặng ($\rho_{td}\delta_{td}$) và chọn loại xốp có W_{vol} lớn với đoạn bằng dài.

2.4.3. Vật liệu xốp hấp thụ động năng va chạm

Để hiểu rõ thiết kế tối ưu của bộ hấp thụ năng lượng của vật liệu xốp bằng cách xem xét một thanh dài bằng xốp với mặt cắt ngang có diện tích bằng A_f bởi một vật có khối lượng M với vận tốc va chạm V_{vc} , Hình 2.34.



Hình 2.34. Ứng suất, vận tốc ở hai bên của sóng xung kích đàn hồi

Sau va chạm, một sóng xung kích đàn hồi chuyển động từ đầu tại vị trí va chạm của thanh với tốc độ sóng c_{pl} . Ở thời điểm ban đầu của va chạm, xốp đứng yên (ngoại trừ tốc độ nhỏ do hiệu ứng sóng đàn hồi) và chịu ứng suất đoạn bằng σ_{pl} . Ở thời điểm cuối (xốp bắt đầu bị nén chặt) xốp đã bị nén thành biến dạng ε_D , chịu một ứng suất σ_D và chuyển động với vận tốc v_D bằng vận tốc khối lượng M . Năng lượng được bảo toàn và xác định bởi công thức [31]:

$$\frac{1}{2} \left(M + \frac{\rho_f}{1-\varepsilon_D} \right) v_D^2 + \sigma_{pl} \varepsilon_D A_f \frac{l_f}{1-\varepsilon_D} = \frac{1}{2} M V_{vc}^2 \quad (2.33)$$

Sử dụng quan hệ $v_D = c_{pl} \varepsilon_D$ và cân bằng xung lượng $\sigma_D = \sigma_{pl} + \rho_f c_{pl} v_D$, ứng suất nén σ_D tác dụng lên khối lượng va đập là:

$$\sigma_D = \sigma_{pl} + \frac{\rho_f}{\varepsilon_D} \frac{M V_{vc}^2 - 2\sigma_{pl} A_f l_f \varepsilon_D / (1-\varepsilon_D)}{M + \rho_f A_f l_f / (1-\varepsilon_D)} \quad (2.34)$$

Ứng suất nén làm giảm gia tốc khối lượng M theo chiều dài của xốp $l_f/(1-\varepsilon_D)$. Trong giới hạn $l_f = 0$, ứng suất nén cực đại trên khối lượng là phù hợp với kết quả phân tích sóng xung kích ở trên:

$$(\sigma_D)_{peak} = \sigma_{pl} + \frac{\rho_f V_{vc}^2}{\varepsilon_D} \quad (2.35)$$

Chiều dài của xốp $l_f/(1-\varepsilon_D)$ cần thiết để giữ khối lượng được xác định bằng cách đặt $v_D = 0$ vào (2.33), khi đó:

$$\frac{l_f}{1-\varepsilon_D} = \frac{MV_{vc}^2}{2\sigma_{pl}\varepsilon_D A_f} \quad (2.36)$$

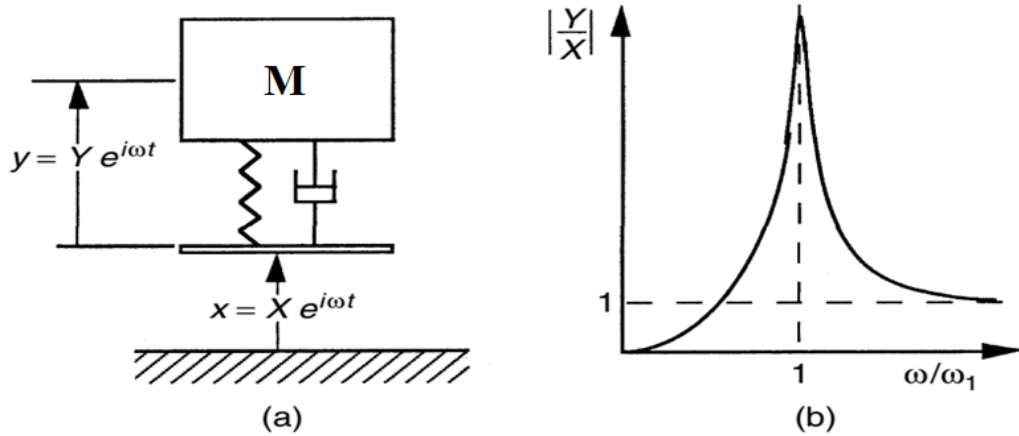
Lưu ý rằng $\sigma_{pl}\varepsilon_D$ bằng năng lượng W_{vol} được xốp hấp thụ trên một đơn vị thể tích, chiều dài tối thiểu của xốp cần thiết để hấp thụ năng lượng có được bằng cách chọn xốp có giá trị lớn nhất là W_{vol} , phù hợp với giá trị của ứng suất σ_{pl} mà không làm quá tải cấu trúc mà xốp được gắn vào. Biểu đồ W_{vol} so với σ_{pl} cho xốp kim loại (Hình 2.31 và Hình 2.34) rất hữu ích cho quá trình lựa chọn này.

2.4.4. Giảm rung động của vật liệu xốp

Xét dao động một bậc tự do tuyến tính như Hình 2.35a: một vật khối lượng M được gắn bởi một lò xo và một van điều tiết vào một khối đế. Giả sử rằng đế dao động với tần số duy nhất ω với biên độ X , sao cho độ dịch chuyển của đế là $x = Xe^{i\omega t}$. Khi đó độ lệch tương đối của khối lượng m là $y = Ye^{i\omega t}$ được cho bởi hàm truyền $H(\omega)$ [31]:

$$H(\omega) = \frac{Y}{X} = \frac{(\omega/\omega_1)^2}{1 - (\omega/\omega_1)^2 + i\zeta(\omega/\omega_1)} \quad (2.37)$$

trong đó ω_1 là tần số dao động riêng của bộ dao động và ζ là hằng số cản. Độ lớn của $H(\omega)$ được thể hiện trên Hình 2.35b.



Hình 2.35. (a) Dao động một bậc tự do chịu tác động của đầu vào chấn động x ở tần số ω . (b) Hàm truyền cho chuyển dịch tương đối y

Đối với các giá trị nhỏ của ω/ω_1 và cản thấp:

$$|Y| = (\omega/\omega_1)^2 |X| \quad (2.38)$$

Nghĩa là đáp ứng Y được giảm thiểu bằng cách làm cho tần số dao động riêng thấp nhất của nó ω_1 càng lớn càng tốt. Các hệ thống rung thực tế có nhiều chế độ rung, nhưng yêu cầu của ω_1 lớn nhất không bị ảnh hưởng bởi điều này. Hơn nữa, kết luận tương tự cũng được đưa ra khi đầu vào là xung lực tác dụng lên khối lượng m chứ không phải là chuyển vị tác dụng lên khối đế. Như vậy, chỉ số vật liệu M_u nên được tối đa hóa để giảm thiểu ứng xử đối với một đầu vào tần số thấp không cản.

$$M_u = \omega_1 \quad (2.39)$$

Xem xét một ví dụ về tác dụng của ω_1 cực đại đối với một tấm hình tròn, giả sử rằng có một tấm hình tròn với bán kính R_t , khối lượng m_1 trên một đơn vị diện tích và được cố định. Tần số dao động riêng thấp nhất của nó là [31]:

$$\omega_1 = \frac{C_f}{2\pi} \left(\frac{Et^3}{m_1 R_t^4 (1-\nu^2)} \right)^{1/2} \quad (2.40)$$

trong đó, E là mô đun đàn hồi, ν là hệ số Poisson và C_f là hằng số. Nếu ở khối lượng không đổi, tấm được chuyển đổi thành vật liệu xốp với chiều dày tăng lên $(\rho_f/\rho_s)^{-1}$ và mô đun đàn hồi giảm đi $(\rho_f/\rho_s)^{-1}$ cho tỷ lệ mật độ càng thấp và tần số dao động riêng càng cao:

$$\frac{\omega_1}{\omega_{1,s}} = \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{-1/2} \quad (2.41)$$

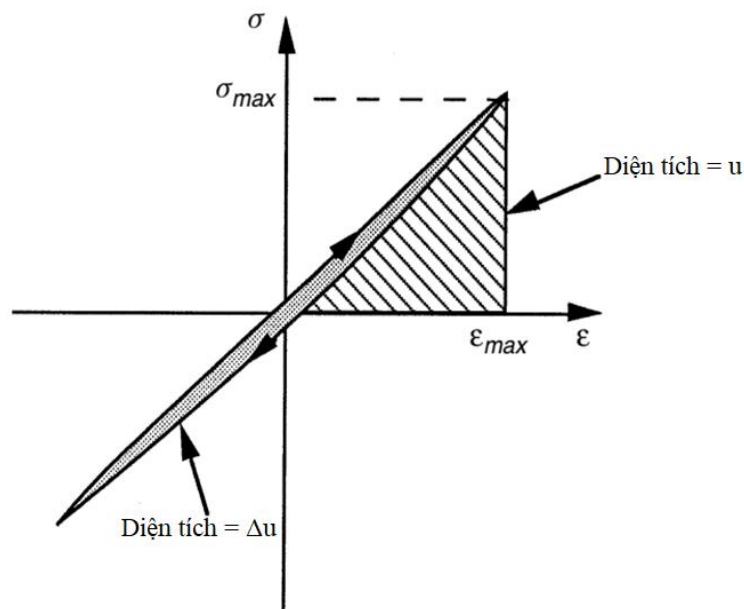
Sử dụng vật liệu xốp làm lõi của tấm dạng nhiều lớp (sandwich) thậm chí còn hiệu quả hơn vì độ cứng kháng uốn ở khối lượng không đổi tăng nhanh hơn khi mật độ của lõi giảm.

2.4.5. Giảm chấn của vật liệu xốp

Tất cả các vật liệu đều tiêu tán một số năng lượng theo quá trình biến dạng, thông qua độ trễ bên trong vật liệu. Cản trở nên quan trọng khi một thành phần phải chịu kích thích đầu vào ở gần hoặc tại tần số cộng hưởng của nó.

Có một số cách để mô tả đặc tính của giảm chấn vật liệu, ở đây sử dụng hệ số tổn thất η là một số không có thứ nguyên, được định nghĩa về tiêu hao năng lượng như sau: Nếu một vật liệu được tác động một tải đàn hồi đến một ứng suất σ_{\max} (xem Hình 2.36) thì nó sẽ tích trữ năng lượng biến dạng đàn hồi trên một đơn vị thể tích U , trong một chu kỳ tải hoàn chỉnh sẽ tiêu tán ΔU , được gạch chéo trong Hình 2.36 [31].

$$U = \int_0^{\sigma_{\max}} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\max}^2}{E} \quad \text{và} \quad \Delta U = \oint \sigma d\varepsilon \quad (2.42)$$



Hình 2.36. Hệ số tổn thất η đo lường năng lượng phân đoạn bị tiêu tán trong một chu kỳ ứng suất – biến dạng

Hệ số tổn thất là tổn thất năng lượng trên một radian chia cho năng lượng biến dạng đàn hồi cực đại (hoặc tổng năng lượng dao động):

$$\eta = \frac{\Delta U}{2\pi U} \quad (2.43)$$

Nói chung, giá trị của η phụ thuộc vào tần số, nhiệt độ và biên độ của ứng suất hoặc biến dạng.

Các thông số khác của giảm chấn bao gồm tỷ lệ tổn thất năng lượng trên mỗi chu kỳ $D = \Delta U/U$, hệ số cản ζ , lượng logarit χ , góc tổn thất ψ và hệ số chất lượng Q . Khi cản nhỏ ($\eta < 0.01$) và hệ thống là kích thích gần với sự cộng hưởng, các thông số này liên quan đến nhau thông qua biểu thức [31]:

$$\eta = \frac{D}{2\pi} = 2\zeta = \frac{\chi}{\pi} = \tan\psi = \frac{1}{Q} \quad (2.44)$$

Các thông số này không còn tương đương khi cản lớn.

2.5. Kết luận chương

Từ những kết quả trình bày trong chương nhận thấy:

Vật liệu xốp có khả năng cao trong việc hấp thụ năng lượng tác động, giảm rung và giảm chấn. Từ cơ chế ứng xử của vật liệu cho thấy vật liệu xốp có tính năng rất hữu ích là khả năng hấp thụ năng lượng tác động thông qua quá trình biến dạng cấu trúc bên trong của vật liệu. Đặc trưng bằng “đoạn bằng” trên đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng cho phép vật liệu có thể hấp thụ năng lượng ở một mức nhất định.

Tốc độ biến dạng của vật liệu xốp ảnh hưởng không nhiều đến ứng suất đoạn bằng, điều đó cho phép sử dụng đoạn bằng trong thí nghiệm nén tĩnh đơn trục để dự đoán và tính toán kết cấu bảo vệ chịu áp lực nổ phù hợp và thiên về an toàn do xu thế tăng của ứng suất đoạn bằng ở tốc độ tác động cao.

Thông qua nghiên cứu phương pháp sử dụng phần mềm LS-DYNA để mô hình vật liệu xốp, cho thấy phương pháp dựa trên phần tử khối kết hợp với đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng từ thí nghiệm và lựa chọn mô hình vật liệu phù hợp để mô phỏng vật liệu xốp cứng chịu nén là khả thi. Từ kết quả khảo sát cho thấy mô hình MAT_63 phù hợp và sát với kết quả thí nghiệm, các tham số mô hình cơ bản đòi hỏi đơn giản. Đề xuất sử dụng mô hình MAT_63 cho các nghiên cứu tiếp theo khi mô phỏng các loại xốp cứng không phục hồi.

Hiệu quả hấp thụ áp lực nổ của vật liệu xốp thông qua việc chuyển hóa xung lượng vụ nổ thành động năng của tấm dàn lực. Việc kết hợp giữa vật liệu xốp và tấm dàn lực cho phép chuyển xung lượng của áp lực nổ thành động năng của tấm giúp vật liệu xốp phát huy được khả năng hấp thụ và chống bị phá hoại cục bộ. Các công thức tính toán trong chương cho phép có cơ sở để tính toán kết cấu bảo vệ.

Chương 3

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG VÀ CHUẨN HÓA MÔ HÌNH MÔ PHỎNG SỐ

Mục tiêu của chương là chuẩn hóa mô hình mô phỏng số vụ nổ đầy đủ bao gồm các miền vật liệu khác nhau như thuốc nổ, không khí, bê tông, cốt thép, vật liệu xốp... Từ các kết quả mô phỏng số và xác minh chéo thông qua kết quả thử nghiệm hiện trường, cho phép xây dựng được bài toán mô phỏng số đủ tin cậy để và có thể thay thế cho thử nghiệm nổ hiện trường phức tạp, khó khăn mà khuôn khổ luận án chưa thực hiện được. Các kết quả nghiên cứu của chương là căn cứ cho các khảo sát bằng mô phỏng số cho chương tiếp sau.

3.1. Mô phỏng vụ nổ trong không khí

3.1.1. Phương pháp nghiên cứu

3.1.1.1. Phương pháp phân tích mô hình số

Phần mềm mô phỏng số LS-DYNA dựa trên FEM để phân tích sự hội tụ của lưới về ứng xử động của vụ nổ. FEM của phần mềm LS-DYNA được sử dụng trong phân tích số vì nó đồng thời cung cấp các phương pháp tích phân hiện (Explicit) và ẩn (Implicit), dựa trên sự kết hợp giữa mô hình số chất lỏng và rắn được phát triển bởi Lagrangian và Eulerian theo phương pháp tùy biến Lagrangian - Eulerian (Arbitrary Lagrangian - Eulerian, ALE). Phương pháp ALE kết hợp đồng thời của cả thuật toán Lagrangian và thuật toán Eulerian. Phương pháp này không chỉ khắc phục vấn đề kết thúc tính toán gây ra bởi sự biến dạng quá mức của lưới phần tử, mà còn kiểm soát và theo dõi hiệu quả ứng xử chuyển động của biên vật liệu. Phương pháp này cũng khắc phục những thiếu sót của thuật toán Lagrangian và thuật toán Eulerian, cho phép các nhà nghiên cứu giải quyết các vấn đề biến dạng lớn trong các bài toán va chạm và nổ với tốc độ cao [114-117].

a) Kiểu phần tử và tích phân theo thời gian

Phần mềm LS-DYNA cung cấp các kiểu phần tử đa dạng. Nó tính đến sự khác biệt giữa các loại phân tích và phương pháp tính toán và cho phép lựa chọn các kiểu phần tử. Nghiên cứu này chọn phương pháp ALE và kết hợp phần tử khối 3 chiều, 8 nút để tính toán phân tích. Đây là loại phần tử khối 3 chiều và các phần tử được xác định trong 8 nút, trong đó bậc tự do của mỗi nút được thay đổi theo các trục tọa độ X, Y và Z, bậc tự do của vận tốc và gia tốc cũng được đưa ra với tất cả có 9 bậc tự do cho mỗi nút. Khi chịu ứng suất nén

hoặc biến dạng lớn sẽ tránh được hiện tượng thể tích âm. Loại phần tử này được áp dụng phù hợp cho phép tích phân hiện giải quyết vấn đề ứng xử động tốc độ cao [93].

b) Kiểm soát bước thời gian trong tính toán

Trong phương pháp tích phân hiện, thời gian (Δt) phải nhỏ để đảm bảo ổn định nghiệm. Các bước thời gian Δt của các loại phần tử khác nhau đòi hỏi các phương pháp tính toán khác nhau, liên quan đến độ lớn phần tử và tốc độ truyền âm của vật liệu. Công thức (3.1) chọn bước thời gian Δt được sử dụng trong luận án. Khi tính toán thời gian T, chương trình sẽ tự động phân chia thành các chu kỳ $T/\Delta t$. Do đó, thời gian cần thiết để tính toán trong chương trình phụ thuộc rất nhiều vào số lượng bước thời gian Δt . Số lượng bước thời gian Δt phụ thuộc vào kích thước lưới phần tử, lưới phần tử càng mịn thời gian tính toán cần thiết càng dài và độ chính xác càng cao.

Công thức cho phần tử khối:

$$\Delta t_e = \frac{L_e}{\left[\left[Q + (Q^2 + c_m^2)^{1/2} \right] \right]} \quad (3.1)$$

$$Q_e = \begin{cases} c_1 c_m + c_0 L_e |\dot{\epsilon}_{kk}|, & \dot{\epsilon}_{kk} \leq 0 \\ 0, & \dot{\epsilon}_{kk} > 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Bước thời gian (Δt) trong phương pháp sai phân trung tâm phải nhỏ hơn giá trị ngưỡng, nếu nó lớn hơn giá trị ngưỡng, giá trị phương sai của sai phân trung tâm sẽ không ổn định. Các tiêu chí cho một Δt ổn định của phần tử khối 3 chiều, 8 nút trong LS-DYNA được mô tả dưới đây:

$$L_e = \frac{v_e}{A_{e \max}} \quad (3.3)$$

Tốc độ truyền âm của vật liệu đàn hồi thông thường là:

$$c_m = \left[\frac{4G}{3\rho_0} + \frac{\partial p}{\partial \rho} \right]_s^{1/2} \quad (3.4)$$

Đối với vật liệu đàn hồi có mô đun khối cố định, đó là:

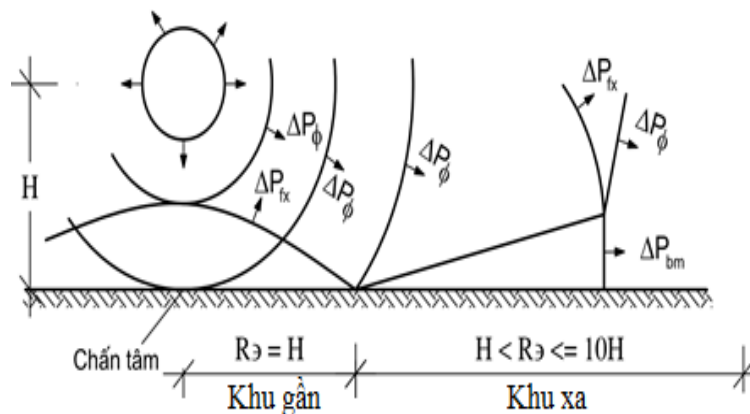
$$c_m = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (3.5)$$

trong đó, Q_e là hàm biểu diễn hệ số độ nhót theo thể tích của c_0 và c_1 ; L_e là độ dài đặc trưng phần tử; v_e là thể tích phần tử; $A_{e\max}$ là diện tích đo theo cạnh dài nhất; ε_{kk} là ten xơ tốc độ biến dạng; c_m là vận tốc truyền âm của vật liệu; ρ là khối lượng riêng; E là mô đun đàn hồi; G là mô đun trượt; ν là hệ số Poisson.

Kết quả là Δt được xác định bởi lưới phần tử nhỏ nhất. Mật độ của lưới phần tử xác định độ chính xác tính toán, độ ổn định và thời gian tính toán. Để ổn định, trong hướng dẫn sử dụng LS-DYNA gợi ý tỉ lệ bước thời gian TSSFAC mặc định 0.9, đối với mô phỏng vụ nổ khuyến cáo $TSSFAC \leq 0.67$ [93].

3.1.1.2. Thử nghiệm nổ hiện trường

Mục đích của thử nghiệm nổ là để thu được số liệu áp suất không khí khi thực hiện vụ nổ TNT để xác minh tính chính xác của mô phỏng số. Nghiên cứu này được thực hiện trong khu gần nhằm xác định được số liệu áp lực sóng tới không chịu ảnh hưởng của sóng phản xạ mặt đất đến áp lực sóng tới đến đầu đo. Kết quả thực nghiệm thu được để xác minh chéo giữa phân tích mô phỏng số và công thức thực nghiệm tiêu chuẩn.



Hình 3.1. Phân vùng khu khu gần và khu xa trong vụ nổ không khí [2]

Thử nghiệm nổ trong không khí 03 lần với lượng nổ 200g TNT, đặt cách mặt đất 120cm, đầu đo áp lực không khí cách tâm lượng nổ 100cm. Sử dụng khối thuốc nổ TNT đúc sẵn 200g nguyên dạng cùng kíp nổ điện, vị trí và sơ đồ thử nghiệm được minh họa trong Hình 3.2. Thiết bị đo áp lực nổ được sử dụng là PCB loại 137B21B, đặt trong khu gần để đo được áp lực sóng tới và không chịu ảnh hưởng của sóng phản xạ mặt đất. Một tín hiệu được tạo ra bởi điện áp và áp lực nổ tối đa có thể đo được là 6895 kPa. Việc ghi đo số liệu cho hệ thống đo bao gồm một máy đo đa kênh NCXI-1000DC và bộ card điều chỉnh tín hiệu đo. Tín hiệu được tạo ra bởi đầu đo áp lực nổ được gửi đến máy đo ghi thông qua hệ dây dẫn tín hiệu và bộ card điều chỉnh tín hiệu đo. Khi áp suất kích nổ

vượt quá 5 kPa, các tín hiệu áp lực không khí được ghi lại dưới dạng tín hiệu số.



Hình 3.2. Bố trí thí nghiệm đo áp lực nổ không khí hiện trường

3.1.2. Thiết lập mô hình mô phỏng số

Các kết quả từ mô phỏng số bị ảnh hưởng bởi hệ lưới chia của mô hình và bước thời gian (Δt). Xác minh chéo với kết quả thực nghiệm để có được mật độ lưới chia và bước thời gian tối ưu.

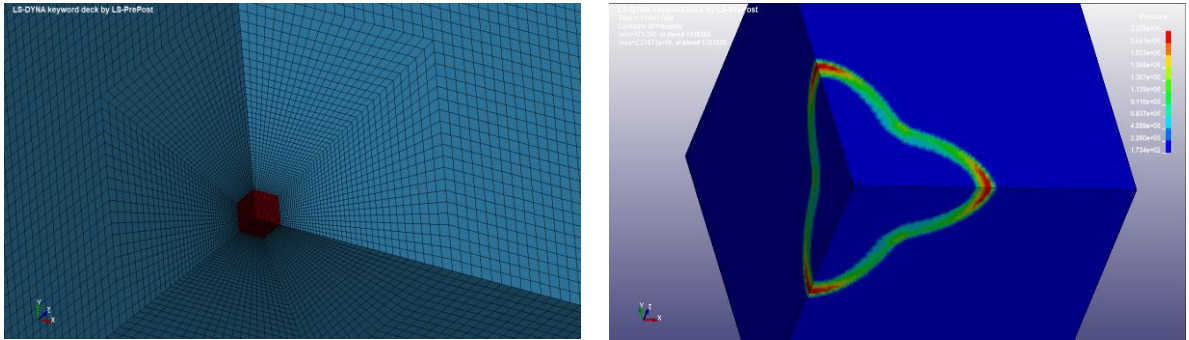
3.1.2.1. Thiết lập mô hình và điều kiện biên

Với các bài toán mô phỏng nổ thông thường, kích thước lượng nổ so với môi trường xung quanh và kết cấu là rất nhỏ nên việc chia lưới có thể gặp khó khăn khi chia nhỏ lưới chia cho lượng nổ. Để khắc phục hạn chế này và làm giảm số lượng phần tử, sử dụng phương án chia lưới có vùng chuyển tiếp của môi trường bằng cách chia nhỏ lưới khu vực môi trường gần lượng nổ và tỉ lệ lưới lớn dần khi ra xa lượng nổ.

Mô hình hình học được thiết lập với phần tử khối lập phương 8 nút. Sử dụng phương pháp ALE để tính toán mô phỏng số với đơn vị là kg - m - s. Kích thước miền không khí là $110 \times 110 \times 110$ (cm) và phần tử không khí trong trạng thái khí lý tưởng. Thuốc nổ TNT có hình chữ nhật, trọng lượng 200g, với khối lượng riêng 1600 kg/m^3 . Điểm phát nổ tại vị trí tâm của khối thuốc nổ TNT. Với tính đối xứng, sử dụng 1/8 mô hình để phân tích nhằm hạn chế thời gian tính toán.

Biên giữa thuốc nổ TNT và không khí được liên kết với nhau bằng nút chung, sử dụng phần tử khối 8 nút dạng chóp cắt để chuyển tiếp từ lưới chia thuốc nổ sang lưới chia môi trường không khí.

Tại các bề mặt đối xứng giới hạn chuyển vị thẳng vuông góc và chuyển vị xoay theo hai trục của bề mặt cho các nút trên biên. Đối với các nút trên biên là các nút tự do dạng biên thoát (Áp lực sóng nổ không phản xạ trên biên).



Hình 3.3. Mô hình số trên LS-DYNA

3.1.2.2. Mô hình vật liệu và các phương trình trạng thái

Ten xơ ứng suất và ten xơ biến dạng mô tả quy luật và ứng xử của vật liệu. Trong trạng thái tĩnh, các mô tả ứng suất và biến dạng là đủ để thể hiện các ứng xử của vật liệu bị ngoại lực tác động. Tuy nhiên, nếu sự biến dạng của vật liệu quá mức, việc áp dụng một phương trình trạng thái (EOS) vào ứng xử của vật liệu sẽ là cần thiết.

Phương trình trạng thái chủ yếu mô tả các mối quan hệ giữa áp suất, nhiệt độ, thể tích, mật độ và năng lượng bên trong của vật liệu. Nó cũng có thể mô tả mối quan hệ giữa những thay đổi về áp suất, năng lượng bên trong và mật độ, khối lượng vật liệu sau khi bị nổ hoặc va chạm. Đối với trạng thái vận tốc cao, nhiệt độ cao và áp suất cao từ vụ nổ, sử dụng EOS là cần thiết để mô tả ứng xử của vật liệu, liên quan đến thay đổi lớn về thể tích.

a) Mô hình không khí

Sử dụng thẻ vật liệu *MAT_NULL và phương trình trạng thái sử dụng thẻ *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL để mô tả ứng xử của vật liệu không khí thể hiện theo phương trình trạng thái trong công thức (3.6). Phương trình trạng thái (3.6) có thể được sử dụng để mô hình hóa không khí với phương trình trạng thái theo luật Gamma. Điều này có thể đạt được bằng cách thiết lập với $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ và $C_4 = C_5 = \gamma - 1$, viết lại như công thức (3.7) [93]:

$$P = C_0 + C_1 + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \quad (3.6)$$

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E_0 \quad (3.7)$$

trong đó, E_0 là nội năng của đơn vị thể tích; μ là hệ số nhớt động; $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ là các hệ số; G_0 là khối lượng tương đối; γ là hệ số nhiệt dung riêng của không khí ($\gamma = 1.4$ với không khí ở 20°C); ρ_0 là khối lượng riêng ban đầu không khí; ρ là khối lượng riêng của không khí. Các tham số không khí sử dụng trong mô phỏng là các tham số cơ bản được áp dụng nhiều trong các nghiên cứu đã công bố [92, 93, 118].

Bảng 3.1. Tham số mô hình vật liệu không khí

$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E_0(\text{J/m}^3)$	$G_0(\text{kg/m}^3)$	C_4	C_5
1.23	2.58xE5	1.0	0.4	0.4

b) Mô hình thuốc nổ TNT

Sử dụng thẻ vật liệu *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN và phương trình trạng thái sử dụng Jones-Wilkins-Lee (JWL) bằng thẻ *EOS_JWL để mô tả ứng xử của vật liệu TNT thể hiện theo phương trình trạng thái trong công thức (3.8) [119]:

$$P = A_{jwl} \left(1 - \frac{\omega_{jwl}}{R_1 V_N} \right) E_m^{-R_1 V_N} + B_{jwl} \left(1 - \frac{\omega_{jwl}}{R_2 V_N} \right) E_m^{-R_2 V_N} + \frac{\omega_{jwl} E_0}{V_N} \quad (3.8)$$

trong đó, $A_{jwl}, B_{jwl}, R_1, R_2$ và ω_{jwl} là các hằng số liên quan đến vật liệu; V_N là khối lượng tương đối; E_0 là nội năng của đơn vị thể tích; E_m là năng lượng bên trong vật liệu.

Trong Bảng 3.2 thể hiện các tham số cho mô hình chất nổ TNT với các tham số như: ρ là khối lượng riêng; v_n là tốc độ phát nổ và P_{CJ} là áp suất Chapman-Jouget.

Bảng 3.2. Tham số mô hình vật liệu TNT [120]

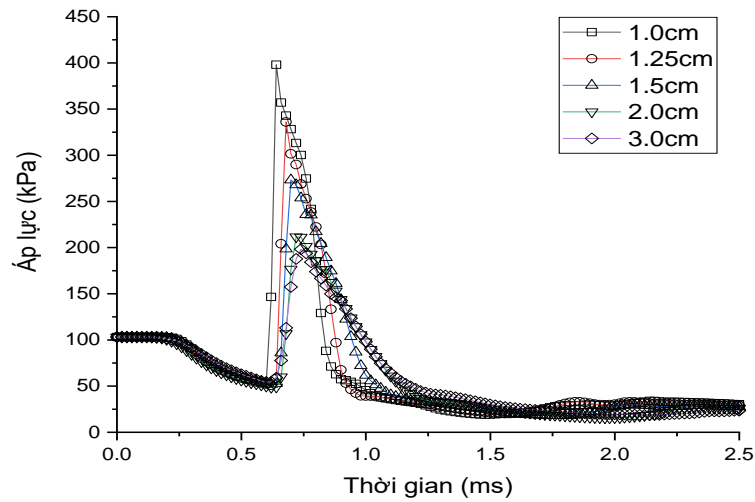
$\rho(\text{kg/m}^3)$	$v_n(\text{m/s})$	$P_{CJ}(\text{Pa})$	$A_{jwl}(\text{Pa})$	$B_{jwl}(\text{Pa})$
1600	9630	2.1xE10	3.738xE11	3.747xE9
R_1	R_2	ω_{jwl}	V_N	$E_0(\text{J/m}^3)$
4.15	0.9	0.35	1.0	6.0xE9

3.1.3. Kết quả mô phỏng số

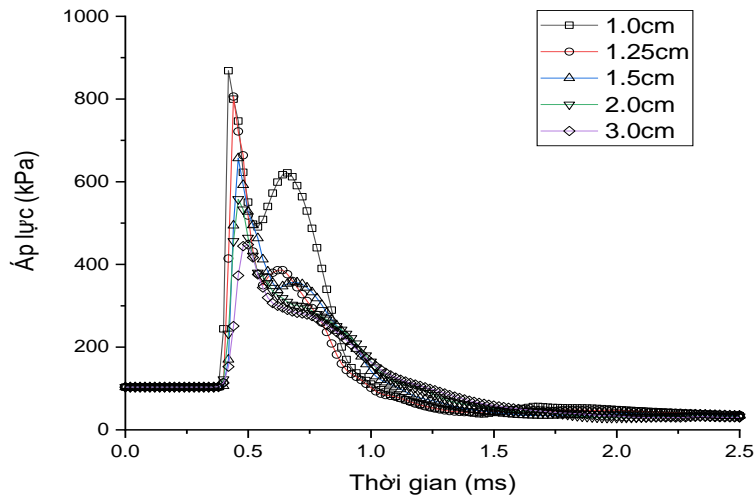
3.1.3.1. Ảnh hưởng kích thước chia lưới môi trường không khí

Để đánh giá ảnh hưởng của mật độ lưới chia đến kết quả mô phỏng trên LS-DYNA thực hiện mô phỏng các bài toán với thuốc nổ TNT lấy đối xứng 1/8 có kích thước $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{cm}$ được chia thành các phần tử khối lập phương

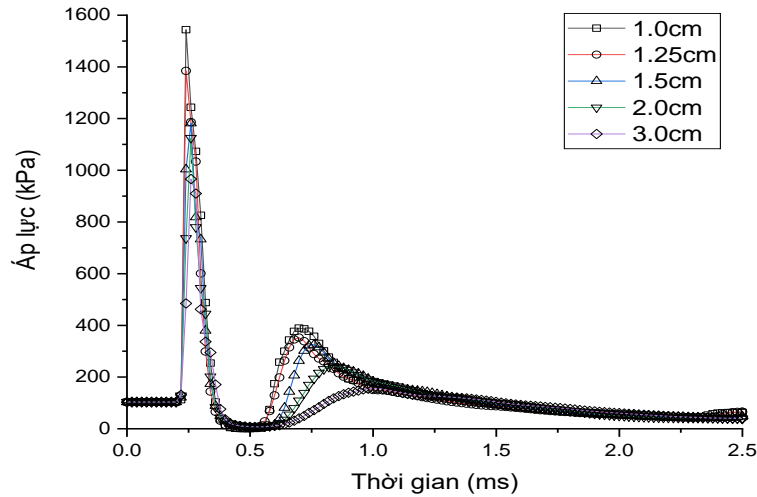
8 nút có kích thước cạnh 0.125cm. Kích thước lưới chia phần không khí được chia thành các phần tử khối lập phương 8 nút với các cạnh lần lượt bằng 1cm, 1.25cm, 1.5cm, 2cm và 3cm. Phần tiếp nối giữa mật độ chia lưới thuốc nổ TNT và không khí được chuyển tiếp bằng các phần tử khối 8 nút dạng chóp cụt có kích thước cạnh tăng dần. Các mô hình mô phỏng sử dụng hệ số TSSFAC = 0.6 để so sánh. Chênh lệch áp lực đỉnh của các bài toán lưới chia lớn được đánh giá dựa trên so sánh với bài toán lưới chia nhỏ nhất 1cm (lấy bằng 0.4 chiều dài cạnh lượng nổ TNT): $(\text{Lưới chia lớn} - \text{Lưới chia nhỏ nhất}) / \text{Lưới chia nhỏ nhất} \times 100\%$, kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình 3.7.



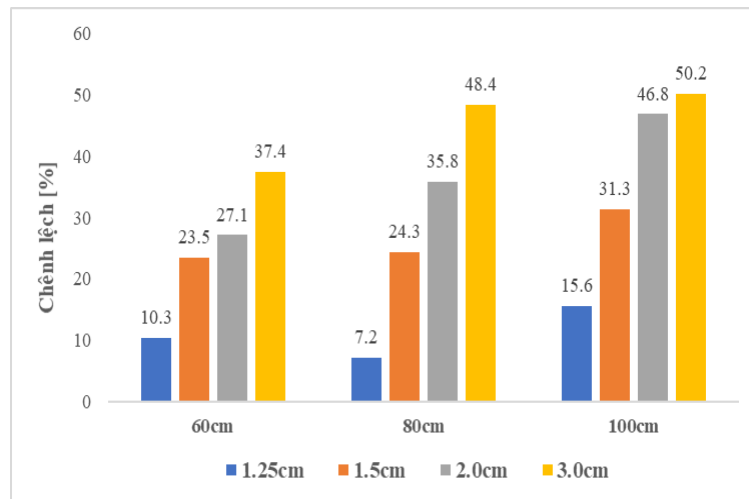
Hình 3.4. Điểm khảo sát cách tâm nổ 100cm



Hình 3.5. Điểm khảo sát cách tâm nổ 80cm



Hình 3.6. Điểm khảo sát cách tâm nổ 60cm



Hình 3.7. Chênh lệch đỉnh áp lực so với lưới 1cm

Kết quả mô phỏng số cho thấy tỉ lệ lưới chia ảnh hưởng lớn đến sự sai khác giữa các kết quả đỉnh áp lực đến 50.2% khi tăng kích thước lưới chia lên 3cm (1.2 lần chiều dài cạnh lượng nổ TNT). Từ kết quả khảo sát, tỉ lệ lưới chia ảnh hưởng lớn đến kết quả mô phỏng, với mô phỏng vụ nổ trong nghiên cứu cho thấy, lưới chia 1cm (0.4 lần cạnh lượng nổ TNT) và 1.25cm (0.5 lần cạnh lượng nổ TNT) cho kết quả áp lực đỉnh ổn định cũng như chênh lệch không quá lớn (từ 7.2 đến 15.6%) nên trong nghiên cứu này đề xuất tỉ lệ chia lưới không vượt quá 0.5 lần chiều dài cạnh lượng nổ TNT.

3.1.3.2. Ảnh hưởng yếu tố tỉ lệ bước thời gian

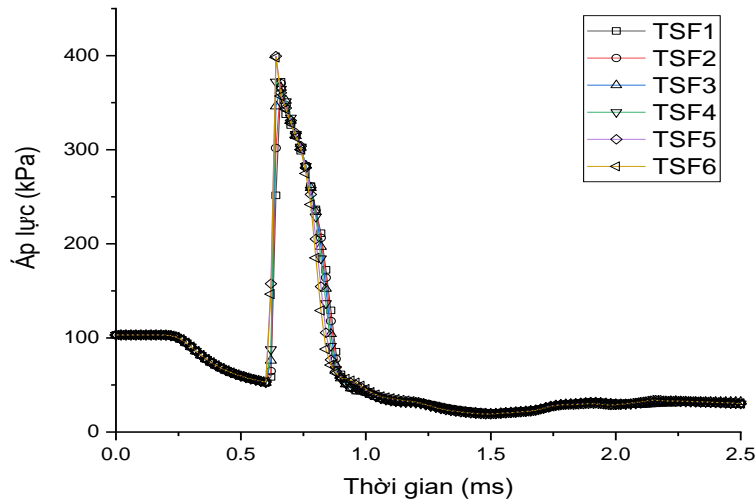
Bước thời gian bị ảnh hưởng bởi yếu tố tỉ lệ của nó (TSSFAC), được thể hiện trong biểu thức (3.9) [93]. Một hệ số tỉ lệ mặc định phổ biến được sử dụng để tính bước thời gian là 0.9. Tuy nhiên, hệ số tỉ lệ thường được hạ xuống 0.67 hoặc thấp hơn cho phân tích bài toán nổ hoặc để tăng tính ổn định tính toán.

Phân tích hệ số tỉ lệ bước thời gian sử dụng 6 mô hình với TSSFAC = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 và 0.6 (Tương ứng các mô hình TSF1, TSF2, TSF3, TSF4, TSF5 và TSF6) áp dụng vào mô hình lưới phần tử không khí 1cm. Áp lực nổ của từng mô hình được so sánh với TSF1 để xác định tham số tỉ lệ bước thời gian phù hợp cho nghiên cứu này. Biểu thức (3.9) thể hiện tham số tỉ lệ TSSFAC ảnh hưởng đến bước thời gian trong mô phỏng của LS-DYNA [92].

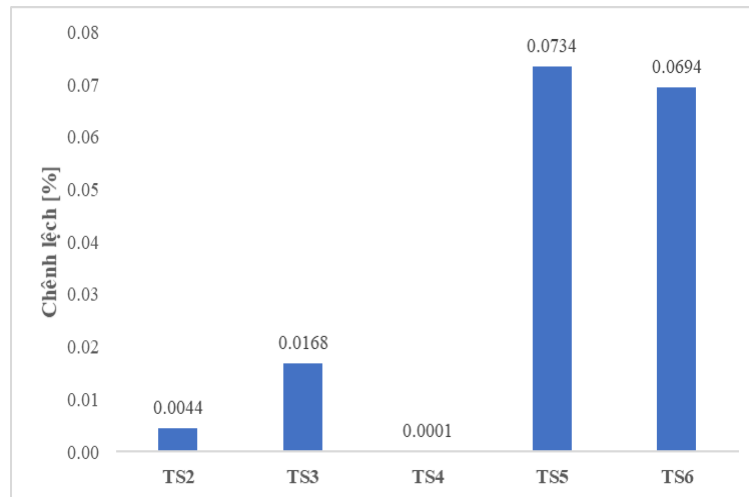
$$\Delta t = TSSFAC \left(l_{mesh} / C_l \right) \quad (3.9)$$

trong đó, TSSFAC là tỉ lệ bước thời gian; l_{mesh} là mật độ lưới chia nhỏ nhất; C_l là chiều dài bước sóng.

Chênh lệch áp lực đỉnh của các bài toán hệ số TSSFAC được đánh giá dựa trên so sánh với bài toán lưới có hệ số TSSFAC nhỏ nhất (0.1): $(TSSFAC \text{ lớn} - TSSFAC \text{ nhỏ nhất}) / TSSFAC \text{ nhỏ nhất} \times 100\%$, kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình 3.9.



Hình 3.8. Áp lực sóng xung kích cách tâm nổ 1m

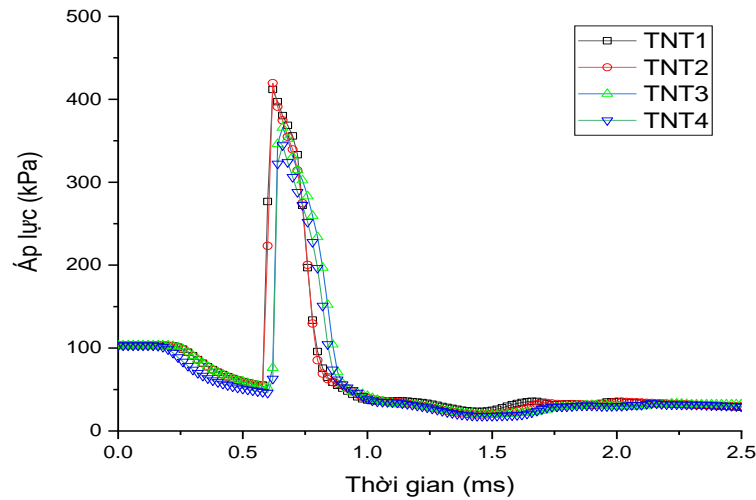


Hình 3.9. Chênh lệch áp lực đỉnh

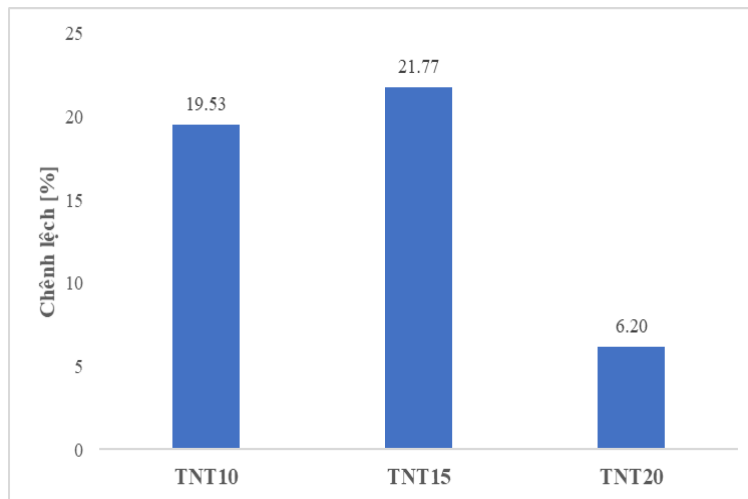
Từ kết quả khảo sát cho thấy các hệ số TSSFAC trong khoảng từ 0.1 đến 0.6 cho kết quả ổn định với bài toán mô phỏng tác động nổ của TNT. Tuy nhiên, khi hệ số TSSFAC nhỏ kéo theo thời gian tính toán tăng đáng kể từ 03 giờ 52 phút 18 giây cho trường hợp TSSFAC = 0.6 lên đến 20 giờ 23 phút 37 giây cho trường hợp TSSFAC = 0.1. Do đó, để đáp ứng yêu cầu về độ ổn định và giảm thời gian tính toán trong nghiên cứu này đề xuất hệ số TSSFAC = 0.3 cho bài toán so sánh với kết quả thực nghiệm do vừa đáp ứng được độ ổn định trong tính toán và thời gian tính toán phù hợp.

3.1.3.3. Ảnh hưởng của lưới chia lượng nổ TNT

Nghiên cứu ảnh hưởng của lưới chia lượng nổ TNT đến kết quả mô phỏng tiến hành trên các mô hình có cùng kích thước lưới chia môi trường không khí 1cm, hệ số tỉ lệ bước thời gian TSSFAC = 0.3 với các lưới chia lượng nổ TNT bằng 1/10, 1/15, 1/20 và 1/25 cạnh lượng nổ (Tương ứng các mô hình TNT1, TNT2, TNT3 và TNT4). Áp lực đỉnh của từng mô hình được so sánh với TNT4, chênh lệch áp lực đỉnh của các bài toán lưới chia TNT được đánh giá dựa trên so sánh với bài toán lưới có lưới chia TNT nhỏ nhất (1mm): (Lưới chia TNT lớn - Lưới chia TNT nhỏ nhất)/ Lưới chia TNT nhỏ nhất x 100%, kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình 3.11.



Hình 3.10. Áp lực sóng xung kích cách tâm nổ 1m



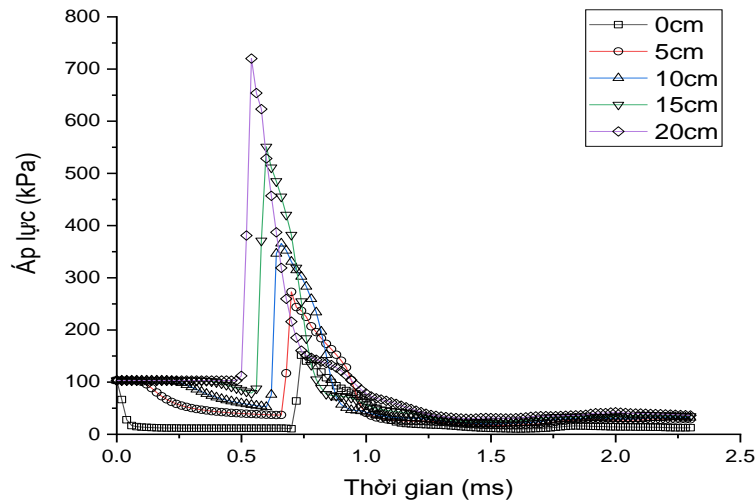
Hình 3.11. Chênh lệch áp lực đỉnh

Từ kết quả khảo sát cho thấy tỉ lệ lưới chia lượng nổ TNT ở hai mức 1/20 và 1/25 cho chênh lệch kết quả áp lực có độ ổn định trong phạm vi có thể chấp nhận được (6.2%). Tuy nhiên, khi lưới chia TNT nhỏ cũng làm tăng đáng kể thời gian tính toán từ 3 giờ 42 phút 6 giây cho mô hình 1/10 (TNT1) lên đến 9 giờ 36 phút 38 giây cho mô hình 1/25 (TNT4) nên trong nghiên cứu này đề xuất sử dụng lưới chia lượng nổ TNT bằng 1/20 chiều dài cạnh lượng nổ do vừa đáp ứng được độ ổn định kết quả tính toán và thời gian tính toán phù hợp.

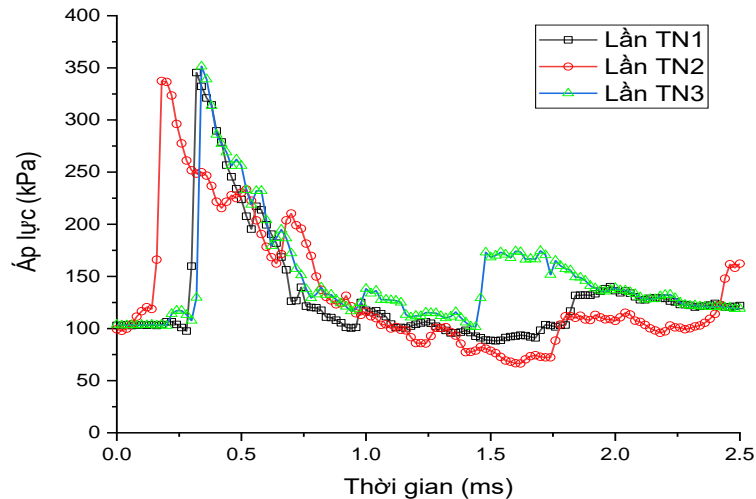
3.1.3.4. Ảnh hưởng bề rộng biên đến dạng của biểu đồ áp lực

Để nghiên cứu ảnh hưởng của bề rộng biên đến dạng của biểu đồ áp lực tiến hành xuất áp lực mô phỏng trên bài toán TSF3 tại các vị trí bắt đầu từ điểm nằm trên biên hướng vào tâm lượng nổ với các khoảng cách mỗi điểm khảo sát cách nhau lần lượt 5cm (khoảng cách từ điểm khảo sát đến tâm nổ lần lượt là

110cm, 105cm, 100cm, 95cm và 90cm và cách biên tương ứng là 0cm, 5cm, 10cm, 15cm và 20cm).



Hình 3.12. Áp lực sóng xung kích điểm khảo sát



Hình 3.13. Áp lực sóng xung kích thử nghiệm nổ cách tâm nổ 1m

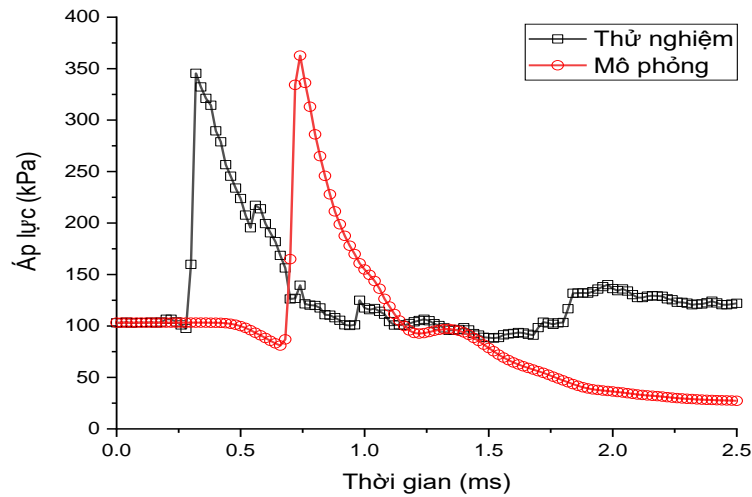
Từ kết quả khảo sát cho thấy, các điểm khảo sát cách biên từ 15 đến 20 lần kích thước lưới chia của chiều dài cạnh phần tử không khí cho kết quả dạng của biểu đồ áp lực phù hợp với dạng biểu đồ áp lực đo được từ 03 vụ nổ thực nghiệm tại hiện trường. Do vậy, trong nghiên cứu này khuyến cáo sử dụng bề rộng biên tối thiểu bằng 15 lần chiều dài cạnh phần tử không khí để có biểu đồ áp lực phù hợp với thực tế.

3.1.3.5. So sánh kết quả mô phỏng số với thử nghiệm nổ

Để đánh giá kết quả mô phỏng số tiến hành thử nghiệm nổ hiện trường 03 lần như mô tả trong mục 3.1.1.2, kết quả áp lực đỉnh sóng xung kích tại vị trí cách tâm nổ 100cm trung bình sau 03 lần thử là 345.45 kPa và sai khác với

công thức thực nghiệm của Sadovsky [2] (384.66 kPa) là 9.44%, cho thấy kết quả thử nghiệm nổ hiện trường đo được là phù hợp.

Từ các kết quả khảo sát ảnh hưởng của kích thước lưới phần tử môi trường không khí, hệ số tỉ lệ bước thời gian, kích thước lưới TNT, ảnh hưởng của bề rộng biên đến kết quả mô phỏng nổ và thời gian kết thúc tính toán, lựa chọn thông số cho bài toán mô phỏng: kích thước lưới chia lấy bằng 0.5 lần chiều dài cạnh lượng nổ TNT (1.25cm), hệ số tỉ lệ bước thời gian TSSFAC = 0.3, lưới chia lượng nổ TNT bằng 1/20 cạnh lượng nổ (1.25mm) và khoảng cách từ điểm khảo sát áp lực đến biên bằng 15 lần chiều dài phần tử lưới chia không khí (18.75cm). Kết quả áp lực đỉnh mô phỏng 362.64 kPa sai số so với thực nghiệm 4.98% và công thức thực nghiệm 5.72%.



Hình 3.14. Áp lực mô phỏng LS-DYNA và thực nghiệm nổ hiện trường

Mặc dù thực tế là các kết quả số và công thức thực nghiệm không hoàn toàn giống nhau do sự phức tạp của vụ nổ, các tham số của vật liệu và phương trình trạng thái thu được và tổng kết từ thử nghiệm không hoàn toàn nhất quán, kết quả từ mô phỏng về cơ bản phù hợp với thực tế thử nghiệm đo được. Do đó, có thể khẳng định rằng, khi mật độ lưới phần tử xấp xỉ bằng 0.5 lần chiều dài cạnh bên của lượng nổ, hệ số tỉ lệ bước thời gian được đặt ở TSSFAC = 0.3, lưới chia lượng nổ bằng 1/20 cạnh lượng nổ và bề rộng biên từ điểm khảo sát áp lực tối thiểu bằng 15 lần chiều dài phần tử cho phép một mô hình phân tích trên LS-DYNA đủ tin cậy để mô phỏng số của vụ nổ TNT trong môi trường không khí.

3.1.4. Đánh giá kết quả chuẩn hóa mô hình

Từ các kết quả thực nghiệm và phân tích mô phỏng trên mô hình số, rút ra một số đánh giá để áp dụng khi xây dựng mô hình mô phỏng vụ nổ TNT trong không khí, cụ thể như sau:

- So sánh giá trị áp lực đỉnh tại vị trí khảo sát khi thay đổi mật độ lưới phần tử cho thấy, khi tăng mật độ lưới phần tử thì giá trị áp lực đỉnh tại điểm khảo sát có xu hướng ổn định và tiến gần tới giá trị thực nghiệm (sai lệch ít nhất). Kết quả thử nghiệm số cũng cho thấy khi chiều dài cạnh lưới phần tử không vượt quá 0.5 lần chiều dài cạnh lượng nổ cho kết quả tốt hơn.

- Phân tích yếu tố tỉ lệ bước thời gian cho thấy, ảnh hưởng của bước thời gian là khá nhỏ. Khi thay đổi bước thời gian kết quả nhận được chỉ sai khác nhau khoảng 0.01% và các đường cong phân bố áp lực vụ nổ với các hệ số tỉ lệ khác nhau trong biểu đồ phân bố áp lực vụ nổ gần như trùng lặp với nhau. Xem xét thời gian tính toán và độ ổn định, TSSFAC = 0.3 được khuyến nghị làm hệ số áp dụng cho các nghiên cứu tiếp theo.

- Qua các thử nghiệm số đã khảo sát ở trên cho thấy trường hợp lưới chia lượng nổ bằng 1/20 chiều dài cạnh lượng nổ cho kết quả áp lực đỉnh tiến gần tới giá trị ổn định và kết quả mô phỏng cho giá trị áp lực đỉnh phù hợp với kết quả thực nghiệm nổ hiện trường.

- Đối với bề rộng biên của mô hình tính từ điểm khảo sát áp lực khi lấy tối thiểu bằng 15 lần chiều dài cạnh phần tử không khí cho kết quả dạng của biểu đồ áp lực phù hợp với kết quả thực nghiệm hiện trường đo được.

3.2. Mô phỏng số vật liệu bê tông cốt thép

Nội dung của mục này là lựa chọn mô hình mô phỏng số vật liệu BTCT chịu tác dụng của áp lực nổ bằng cách xác minh chéo kết quả mô phỏng với thực nghiệm hiện trường. Để thực hiện nội dung này tiến hành thí nghiệm trên hai loại mẫu thí nghiệm, là những tấm BTCT có hình dạng khác nhau, làm việc hai phương và một phương, sử dụng khối lượng thuốc nổ TNT 1.0kg đặt xa và 1.6kg đặt gần. Thí nghiệm sẽ cho phép đánh giá kết quả trên cả các yếu tố động học cũng như hình thái phá hủy của kết cấu tấm thí nghiệm.

3.2.1. Mô hình vật liệu bê tông

3.2.1.1. Một số mô hình bê tông điển hình

Phần mềm LS-DYNA cung cấp một thư viện tốt về các mô hình mô phỏng bê tông, chẳng hạn như Mat_Concrete_Damage_Rel3 (mô hình KCC hoặc MAT_072_R3 [121, 122]), Mat_Winfrith_Concrete (mô hình Winfrith hoặc MAT_084 [123]), Mat_CSCM_Concrete (mô hình CSC hoặc MAT_159 [124, 125]), và Mat_RHT (mô hình RHT hoặc MAT_272, [126]). Đầu vào cho các mô hình này tương đối đơn giản, là các thông số cơ bản của vật liệu và mỗi mô hình cung cấp một phiên bản tạo tham số tự động.

3.2.1.2. Bàn luận và lựa chọn mô hình

Từ những tìm hiểu ở trên cho thấy mô hình Winfrith có những đặc điểm nổi bật và những ưu thế nhất định về sự đơn giản trong dữ liệu đầu vào và khả năng biểu diễn vết nứt trên kết cấu, cho phép tối đa ba mặt phẳng vết nứt trực giao cho mỗi phần tử và các vết nứt có thể được xem xét thông qua LS-Prepost. Mặt khác, trong những năm gần đây đã có nhiều tác giả công bố các kết quả khả quan và đáng tin cậy trong việc sử dụng mô hình MAT_084 trong việc mô phỏng kết cấu BTCT chịu tác dụng của áp lực nổ, như Mousavi và Shafei, Sadraie và cộng sự, Thai và Kim, Epackachi và Whittaker [118, 127-129]. Do đó, trong nội dung luận án sẽ lựa chọn mô hình MAT_084 làm mô hình cho vật liệu bê tông trong nghiên cứu xây dựng mô hình thử nghiệm số tiếp sau.

3.2.1.3. Mô hình vật liệu bê tông Winfrith (MAT_084)

Bê tông là vật liệu chịu áp lực, do đó, dạng tổng quát của hàm chảy dẻo có thể được viết là:

$$Y(I_1, J_2, J_3) = 0 \quad (3.10)$$

trong đó, I_1 là bất biến thứ nhất của ten xơ ứng suất, đại diện cho các ứng xử thể tích; J_2 và J_3 là bất biến thứ 2 và thứ 3 của ten xơ ứng suất lệch và chúng giải thích cho các ứng xử lệch.

Mô hình bê tông Winfrith (MAT_084) được phát triển vào năm 1980, nhằm mục đích giải quyết các kết cấu BTCT chịu tải trọng va chạm và được triển khai vào LS-DYNA vào năm 1991. Tính phù hợp của mô hình đã được chứng minh bằng một loạt các dữ liệu thực nghiệm thu được từ các thử nghiệm va chạm và nổ [123]. Mô hình cũng phù hợp với tính toán tốc độ biến dạng cao của vật liệu và một tính năng hấp dẫn khác của mô hình này là nó cho phép tối

đa ba mặt phẳng vết nứt trục giao cho mỗi phần tử và các vết nứt có thể được xem xét thông qua LS-Prepost là hai đặc tính nổi bật của mô hình vật liệu với các thông số đầu vào tương đối đơn giản.

Mô hình cụ thể Winfrith dựa trên mô hình bốn tham số do Ottosen đề xuất [130]:

$$Y(I_1, J_2, J_3) = aJ_2 + \lambda\sqrt{J_2} + bI_1 - 1 \quad (3.11)$$

$$\lambda = \begin{cases} k_1 \cos \left[\frac{1}{3} \cos^{-1} (k_2 \cos(3\theta)) \right] & \cos(3\theta) \geq 0 \\ k_1 \cos \left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \cos^{-1} (-k_2 \cos(3\theta)) \right] & \cos(3\theta) \leq 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

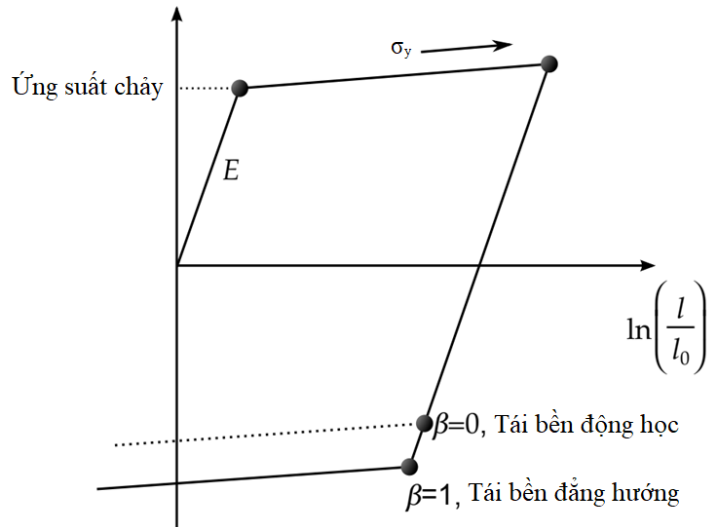
$$\cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (3.13)$$

trong đó a , b , k_1 và k_2 là bốn tham số của hàm tỷ số giữa ứng suất kéo và ứng suất nén (σ_t / σ_c) và chúng được xác định từ thí nghiệm.

3.2.2. Mô hình vật liệu cốt thép

Trong LS-DYNA cung cấp một số mô hình vật liệu phù hợp cho vật liệu thép, trong đó hai mô hình 003-PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003) và 024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MAT_024) được sử dụng phổ biến trong mô tả vật liệu cốt thép [118, 127-129]. Với hai mô hình này thì mô hình MAT_003 tương đối dễ sử dụng khi yêu cầu một số các thông số cơ bản của thép và phù hợp với vật liệu có tính dẻo.

Trong mô hình MAT_003 quá trình tái bền đẳng hướng (Isotropic hardening), tái bền động học (Kinematic hardening) hoặc kết hợp giữa tái bền đẳng hướng và động học có thể thu được bằng cách thay đổi một tham số β giữa hai giá trị 0 và 1. Với β bằng 0 và 1, thu được tương ứng là quá trình tái bền động học và tái bền đẳng hướng như trên Hình 3.15, Krieg và Key đã đề xuất mô hình này vào năm 1976 [131].



Hình 3.15. Ứng xử đàn hồi dẻo quá trình tái bền đẳng hướng và động học [92]

Trong quá trình tái bền đẳng hướng, tâm của bề mặt chảy là cố định nhưng bán kính là một hàm của biến dạng dẻo. Trong tái bền động học, bán kính của bề mặt chảy là cố định nhưng tâm tịnh tiến theo hướng của biến dạng dẻo.

Tốc độ biến dạng được tính toán bằng cách sử dụng mô hình Cowper-Symonds (Jones 1983 [132]), trong đó ứng suất chảy phụ thuộc tốc độ biến dạng:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{q}} \right] (\sigma_0 + \beta E_q \epsilon_{eff}^q) \quad (3.14)$$

trong đó, q và C là các hằng số đầu vào và $\dot{\epsilon}$ là tốc độ biến dạng được xác định thông qua biểu thức:

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (3.15)$$

Bán kính hiện tại của bề mặt chảy σ_y , là tổng của cường độ chảy ban đầu σ_0 cộng với cường độ tái bền $\beta E_q \epsilon_{eff}^q$, trong đó E_q là mô đun dẻo tái bền (Plastic hardening modulus):

$$E_q = \frac{E_t E}{E - E_t} \quad (3.16)$$

và ϵ_{eff}^q là biến dạng dẻo hữu hiệu:

$$\varepsilon_{eff}^q = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^q \dot{\varepsilon}_{ij}^q \right)^{1/2} dt \quad (3.17)$$

Tốc độ biến dạng dẻo là hiệu giữa tốc độ biến dạng tổng và đàn hồi:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^q = \dot{\varepsilon}_{ij}^s - \dot{\varepsilon}_{ij}^e \quad (3.18)$$

Trong quá trình thực hiện tính toán mô hình vật liệu này, các ứng suất lệch tâm được cập nhật lặp lại một cách đàn hồi:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij}^n + \mathbf{C}_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} \quad (3.19)$$

trong đó, σ'_{ij} là ten xơ ứng suất thử nghiệm, σ_{ij}^n là ten xơ ứng suất của bước trước đó, \mathbf{C}_{ijkl} là ma trận mô đun tiếp tuyến đàn hồi, $\Delta \varepsilon_{kl}$ là ten xơ biến dạng tăng dần.

Nếu hàm chảy dẻo được thỏa mãn sẽ không có bổ sung khác được thực hiện. Tuy nhiên, nếu hàm chảy dẻo bị vi phạm thì sự gia tăng biến dạng dẻo được tính toán, ứng suất được thu nhỏ trở lại bề mặt chảy và tâm bề mặt chảy được cập nhật.

3.2.3. Thí nghiệm hiện trường

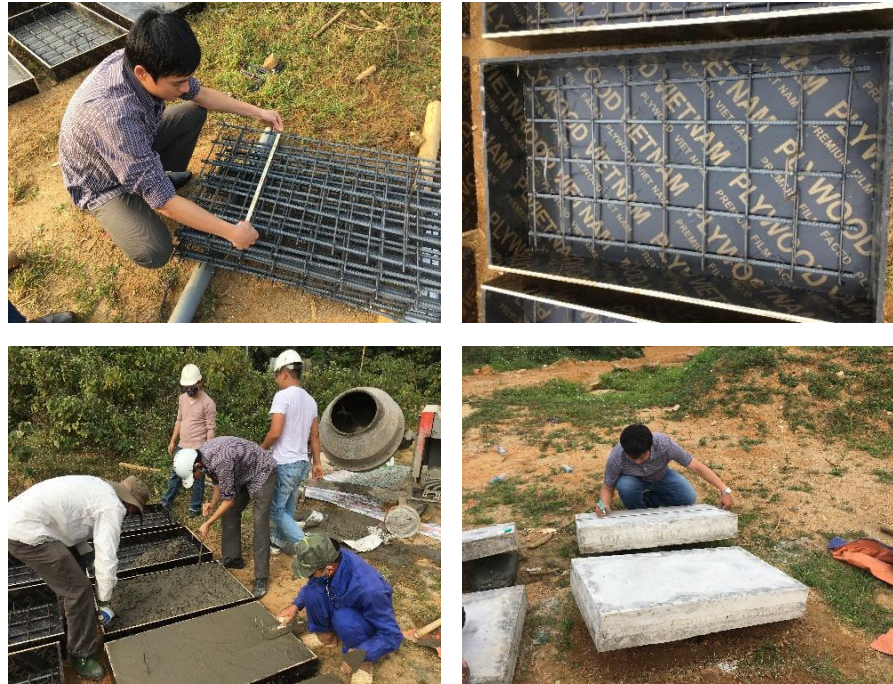
Để đánh giá tác động của áp lực nổ lên kết cấu BTCT, tiến hành các thí nghiệm hiện trường (chế tạo kết cấu và thực nghiệm vụ nổ), xác định các đặc trưng động học của kết cấu BTCT và các thí nghiệm trong phòng xác định đặc trưng vật liệu bê tông.

3.2.3.1. Chế tạo cấu kiện thí nghiệm hiện trường

Để tiến hành đánh giá bê tông chịu tác động từ vụ nổ đã chế tạo tám BTCT thí nghiệm gồm:

Tám BTCT loại 1, có kích thước 100x100x6cm với cốt thép $\phi 10$ một lớp đan lưới 150x150mm đặt trên khối đế cố định bằng BTCT.

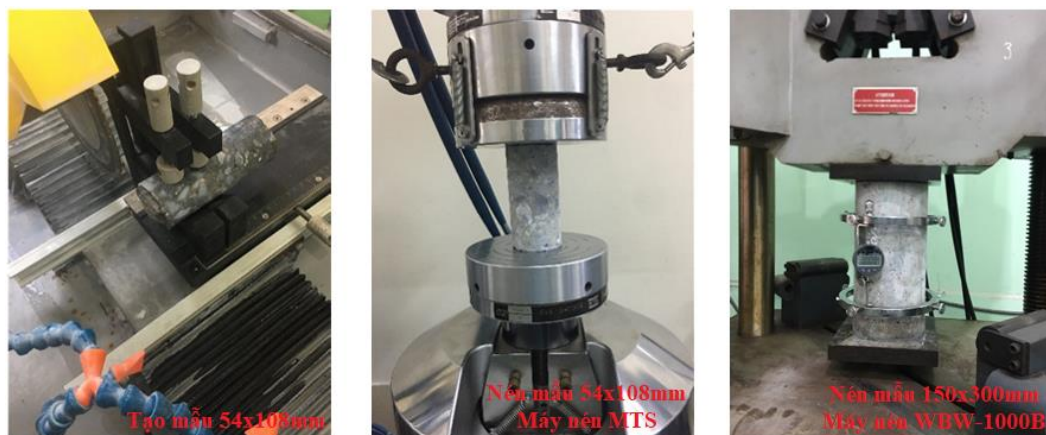
Tám BTCT loại 2, có kích thước 100x60x10cm với cốt thép theo phương chịu lực $\phi 10$ và phương ngang tám $\phi 6$, một lớp đan lưới 11.25x12.5cm (cốt thép $\phi 10$ đặt dưới cách nhau 11.25cm, cốt thép $\phi 6$ đặt trên cách nhau 12.5cm) đặt trên giá thép hình, giá thép hình liên kết chặt với nền bê tông.



Hình 3.16. Công tác chế tạo cấu kiện thí nghiệm hiện trường

3.2.3.2. Thí nghiệm trong phòng xác định tham số vật liệu kết cấu

Tiến hành thí nghiệm kết hợp nén mẫu bê tông hình trụ 54x108mm nén trên máy tạo lực đa năng MTS và mẫu kích thước 150x300mm trên máy kéo nén WEW-1000B để xác định các tham số vật liệu bê tông như mô đun tiếp tuyến và cường độ chịu nén của vật liệu bê tông. Cường độ chịu kéo của bê tông lấy bằng 10% cường độ chịu nén. Các kết quả thí nghiệm mẫu bê tông được trình bày trong Bảng 3.3, các tham số đầu vào của vật liệu thép lấy theo tiêu chuẩn hiện hành về thép xây dựng.



Hình 3.17. Thí nghiệm mẫu bê tông

Tiến hành thí nghiệm xác định tham số của mẫu thép đường kính 10mm trên máy kéo nén WEW-1000B, các tham số vật liệu cốt thép được trình bày trong Bảng 3.4.



Hình 3.18. Thí nghiệm mẫu cốt thép

3.2.3.3. Thí nghiệm nổ hiện trường

Để đo và ghi lại các kết quả thí nghiệm hiện trường sử dụng các thiết bị thí nghiệm: máy đo động đa kênh NI SCXI-1000DC, đầu đo chuyển vị không tiếp xúc Sharp GP2Y0A21YK0F và đầu đo gia tốc PCB 353M231. Các đầu đo được kết nối với máy đo NI SCXI-1000DC thông qua các card đo thích hợp, toàn bộ hệ thống đo được điều khiển trên máy tính bằng phần mềm LabVIEW SignalExpress 2015. Tiến hành 02 thí nghiệm nhằm xác định các đặc trưng động học tấm bê tông (TN_01) và thí nghiệm kết cấu chịu tác dụng của nổ gần (TN_02).

a) Thí nghiệm TN_01

Để xác định các đặc trưng động học chuyển vị và gia tốc của tấm BTCT, tiến hành thí nghiệm nổ tại hiện trường với đối tượng là tấm BTCT kích thước 100x100x6cm (tấm BTCT loại 1) được kê bốn cạnh lên khối đế cố định bằng BTCT. Thử nghiệm với lượng nổ TNT 1.0kg treo cách mặt tấm 100cm, các thông số đo để khảo sát gồm gia tốc và chuyển vị theo phương thẳng đứng của mặt dưới tấm thí nghiệm. Đầu đo gia tốc được gắn trực tiếp vào đối tượng thí nghiệm, đầu đo chuyển vị được gắn cố định trên nền của khối đế BTCT có kích thước lớn để kết quả thí nghiệm thu được không bị ảnh hưởng.



Hình 3.19. Thí nghiệm xác định đặc trưng động học tấm BTCT

b) Thí nghiệm TN_02

Để tiến hành đánh giá bê tông chịu tác động từ vụ nổ gần đã xây dựng mô hình thí nghiệm gồm: tấm BTCT có kích thước 100x60x10cm (tấm BTCT loại 2) đặt trên giá thép hình và được liên kết cố định hai cạnh vào giá thép hình, giá thép hình liên kết chặt với nền bê tông, sử dụng lượng nổ TNT 1.6kg (08 bánh TNT loại 200g) và treo cách bề mặt tấm 50cm. thông số đo để khảo sát là chuyển vị theo phương thẳng đứng của mặt dưới tấm thí nghiệm. Đầu đo chuyển vị được gắn cố định trên nền bê tông có kích thước lớn và tách biệt so với bộ giá thép hình để kết quả thí nghiệm thu được không bị ảnh hưởng.



Hình 3.20. Thí nghiệm kết cấu BTCT chịu tác dụng của nổ gần

3.2.4. Thử nghiệm mô phỏng số

3.2.4.1. Lựa chọn phương pháp mô hình hóa

Thiết lập mô phỏng nổ trong các phần mềm nói chung và LS-DYNA nói riêng đều có nhiều cách thức khác nhau như:

Phương pháp thuần túy Lagrangian cho kết cấu, còn với áp lực nổ sử dụng chức năng CONWEP với thẻ *LOAD_BLAST_ENHANCED, đây là phương pháp sử dụng các công thức thực nghiệm với tác động nổ chỉ phụ thuộc vào khối lượng thuốc nổ và khoảng cách đến bề mặt tiếp nhận của kết cấu. Do không phải mô hình hóa lượng nổ và không khí xung quanh nên việc tính toán

sẽ nhanh hơn và ít tiêu tốn phần cứng hơn. Tuy nhiên, phương pháp này không mô tả được đầy đủ các tác động của tải nổ trong mô hình kết cấu phức tạp.

Phương pháp tùy biến Lagrangian - Eulerianian (Arbitrary Lagrangian - Eulerianian, ALE) được kết hợp đồng thời của cả thuật toán Lagrangian và thuật toán Eulerian. Phương pháp này khắc phục những thiếu sót của thuật toán Lagrangian và thuật toán Eulerian, cho phép các nhà nghiên cứu giải quyết các vấn đề biến dạng lớn trong va chạm và nổ với tác động tốc độ cao. Tất cả các thành phần là lượng nổ, môi trường không khí và kết cấu đều được mô hình hóa đầy đủ và khắc phục những thiếu sót của phương pháp Lagrangian thuần túy. Trong mục này tiếp tục lựa chọn phương pháp ALE trong mô hình hóa thử nghiệm số.

3.2.4.2. Mô hình vật liệu

Để thực hiện quá trình mô phỏng bài toán trong phần này sẽ kế thừa các kết quả và thông số đầu vào của mục 3.1 cho mô hình vật liệu của thuốc nổ TNT và không khí.

a) Mô hình bê tông

Sử dụng mô hình MAT_084 với thẻ vật liệu *084/085-WINFRITH_CONCRETE để mô tả ứng xử của bê tông.

Bảng 3.3. Tham số mô hình vật liệu bê tông

$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E_t(\text{Pa})$	ν	$\sigma_c(\text{Pa})$	$\sigma_t(\text{Pa})$
2400	26.41xE6	0.2	30.01xE6	3.0xE6

b) Mô hình cốt thép trong bê tông

Sử dụng mô hình MAT_003 với thẻ vật liệu *003-PLASTIC_KINEMATIC để mô tả ứng xử của cốt thép trong bê tông.

Bảng 3.4. Tham số mô hình vật liệu cốt thép

$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E(\text{Pa})$	ν	$\sigma_{ch}(\text{Pa})$
7850	2.05xE11	0.3	2.4xE8

3.2.4.3. Xây dựng mô hình số

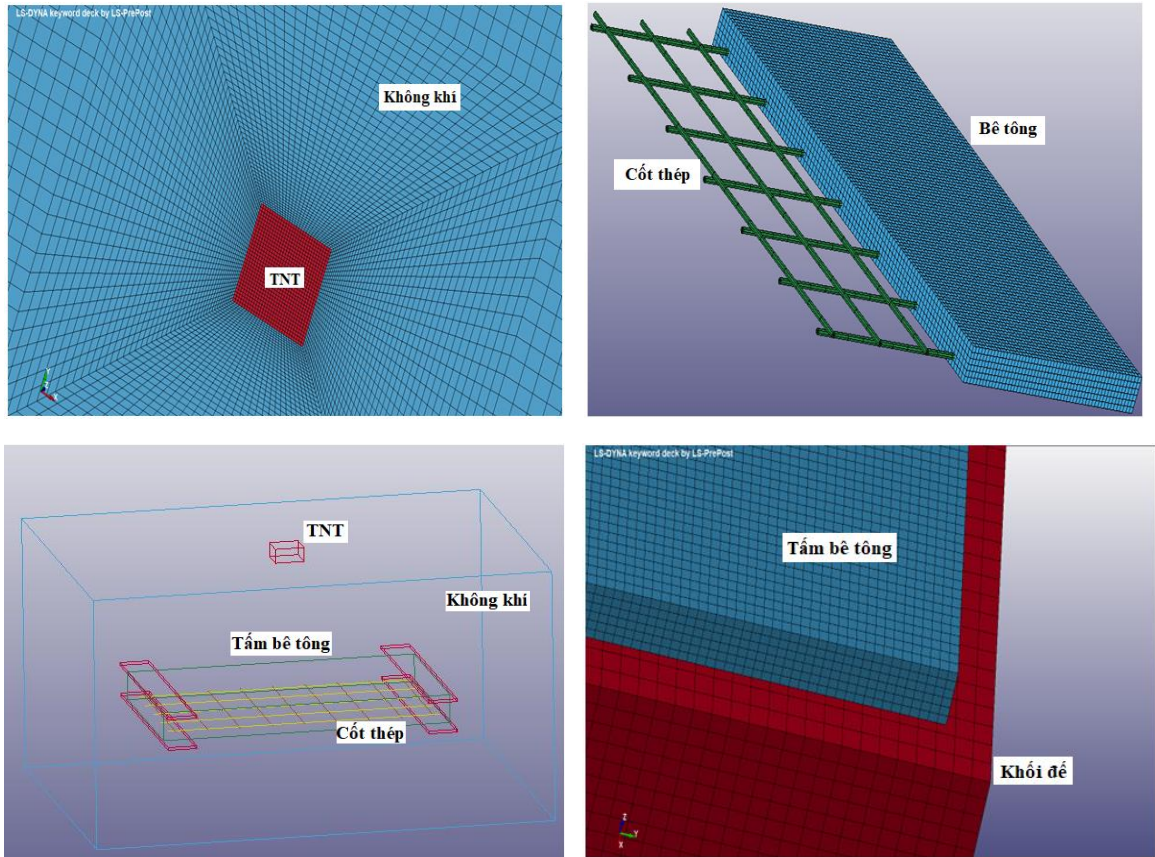
Để giảm số lượng phần tử cho bài toán sử dụng bài toán đối xứng nửa hệ khi mô phỏng cho thuốc nổ TNT và không khí. TNT, không khí và tấm bê tông sử dụng với phần tử khối lập phương 8 nút với lưới chia lượng nổ TNT bằng 1/30 chiều dài cạnh lượng nổ theo khuyến cáo trong mục 3.1.3. Để mô tả quá

trình truyền áp lực giữa TNT và môi trường không khí sử dụng thẻ *ALE-MULTI-MATERIAL_GROUP_PART và các nút giữa hai miền vật liệu được liên kết với nhau. Sử dụng thẻ *CONSTRAINED-LAGRANGE_IN_SOLID để mô tả ghép nối giữa không khí và tấm bê tông (được xây dựng độc lập với không khí) với CTYPE lấy bằng 4.

Có nhiều phương pháp khác nhau để mô tả cốt thép trong bê tông như phương pháp vệt cốt thép với việc coi cốt thép như một phần thể tích trong bê tông, phần thể tích này được mô hình hóa như một lớp các phần tử trong cấu trúc tấm bê tông. Phương pháp này tốt cho các biến dạng nhỏ mà cốt thép vẫn đàn hồi. Phương pháp thứ hai là phương pháp chia nút, khi đó các thanh thép được mô hình hóa bằng các các phần tử dầm và được kết nối với bê tông bằng cách ghép các nút lưới chung. Nó yêu cầu các nút của lưới thép và lưới bê tông phải trùng nhau. Điều này có thể dễ dàng khi xử lý các lớp thép chịu lực, nhưng khi mô tả cốt đai rất khó khăn. Trong nghiên cứu sẽ sử dụng phương pháp nhúng lưới cốt thép trong bê tông và hệ lưới cốt thép được mô tả độc lập với tấm bê tông và sử dụng thẻ *CONSTRAINED-LAGRANGE_IN_SOLID để mô tả ghép nối giữa lưới cốt thép và tấm bê tông với CTYPE lấy bằng 2. Để mô tả thanh cốt thép sử dụng thẻ *SECTION_BEAM với các tham số ELFORM = 1 (dầm Hughes-Liu) và QR = 2, CST = 1 cho tiết diện tròn.

Sử dụng các khuyến cáo về lưới chia, mật độ chia lưới không khí và TNT, bề rộng biên và hệ số tỉ lệ bước thời gian như khuyến cáo đã đưa ra trong mục 3.1.3. Đối với kết cấu tấm bê tông cốt thép sử dụng lưới chia 10x10x10mm, cốt thép sử dụng phần tử thanh 30mm, khối đế và bộ gá sử dụng phần tử kích thước 20x20x20mm.

Về điều kiện biên miền không khí lấy theo mục 3.1.2.1, tiếp xúc giữa bộ gá - tấm bê tông và khối đế - tấm bê tông sử dụng mô tả tiếp xúc hai chiều (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE).

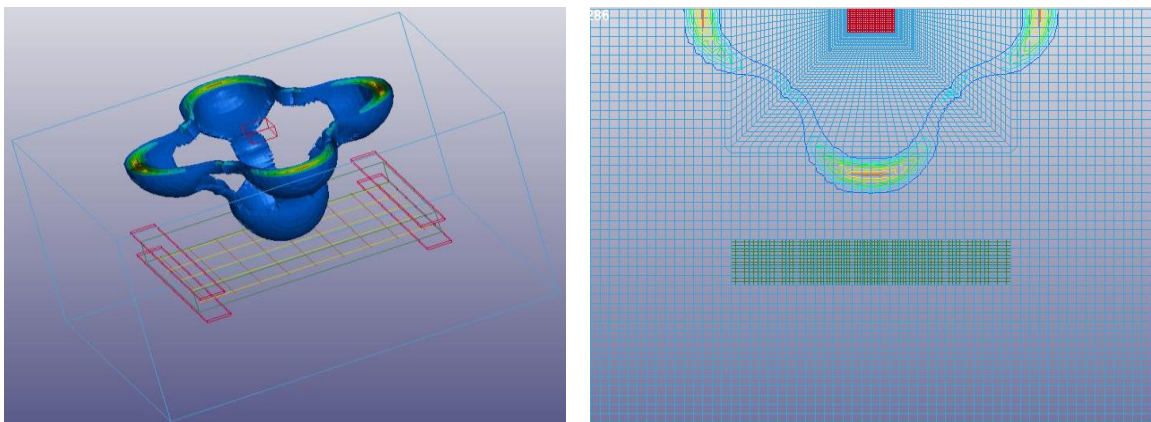


Hình 3.21. Xây dựng mô hình hình học cho mô phỏng số

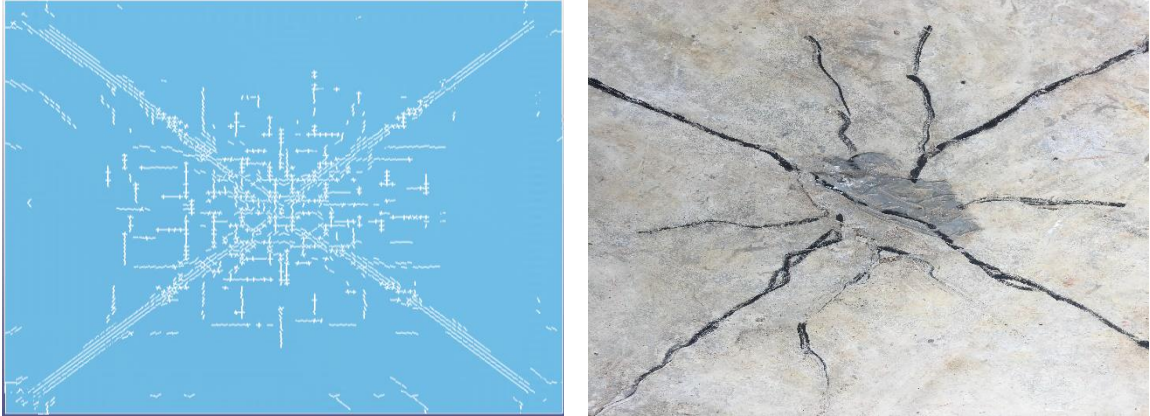
3.2.5. Kết quả mô phỏng số

3.2.5.1. Kết quả

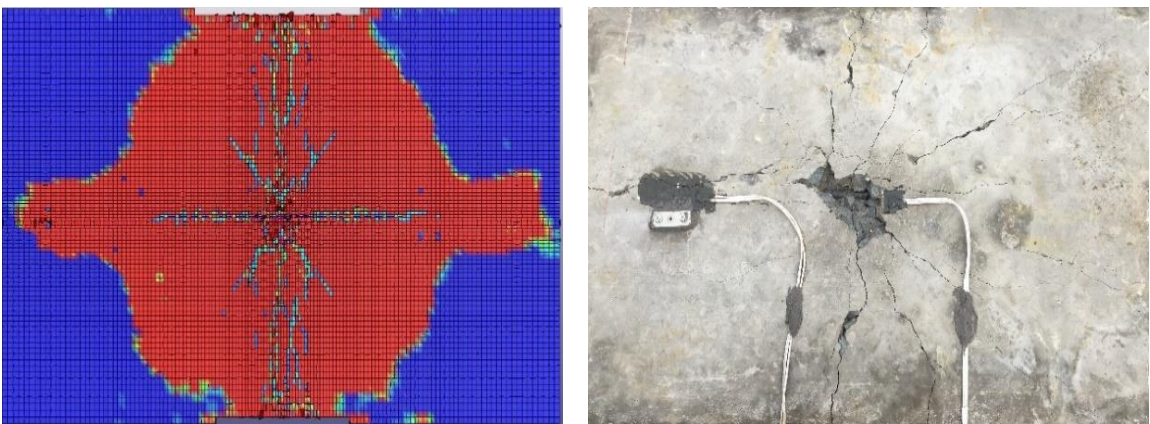
Tiến hành mô phỏng trên LS-DYNA cho kết quả trực quan cả về sự thay đổi nội lực trên kết cấu cũng như mô tả được quá trình tấm BTCT bị nứt vỡ. Bên cạnh đó giá trị chuyển vị tại vị trí giữa tấm của mô phỏng và thí nghiệm cũng cho kết quả tốt cả về dạng biểu đồ và giá trị chuyển vị lớn nhất.



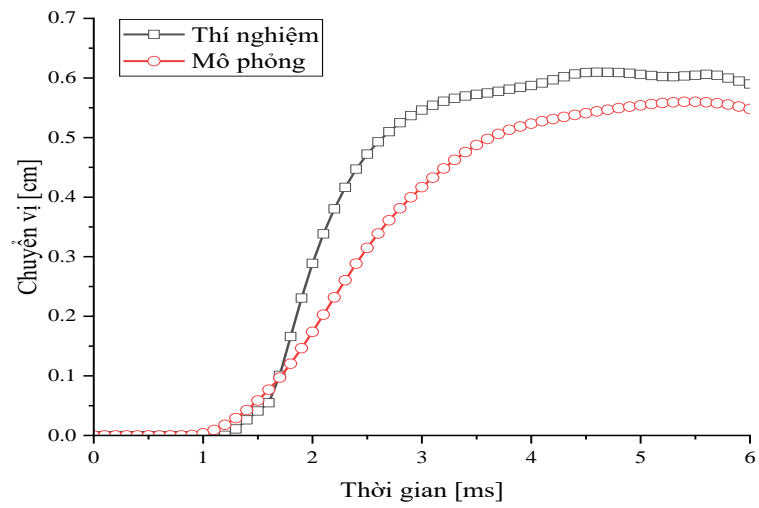
Hình 3.22. Quá trình lan truyền sóng nổ trong không khí



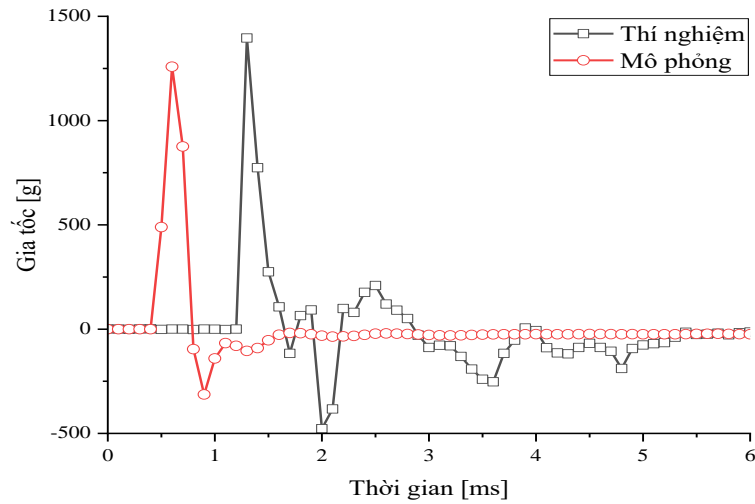
Hình 3.23. Hình thành vết nứt mặt dưới tấm BTCT (TN_01)



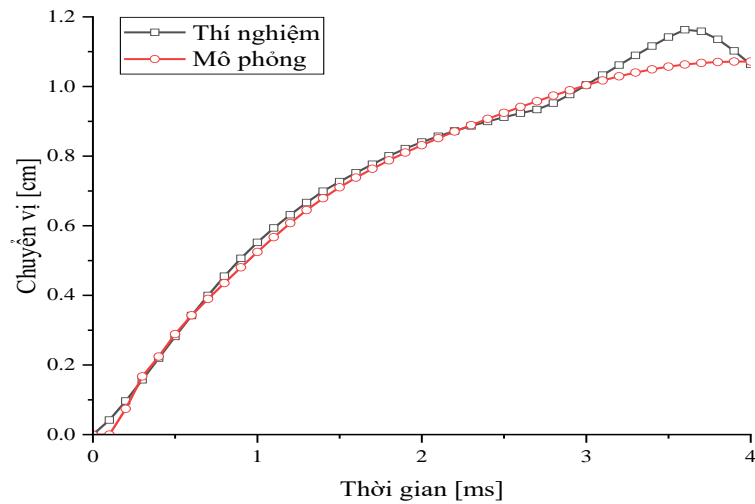
Hình 3.24. Phá hoại mặt dưới tấm BTCT (TN_02)



Hình 3.25. Chuyển vị tấm BTCT (TN_01)



Hình 3.26. Gia tốc tấm BTCT (TN_01)



Hình 3.27. Chuyển vị tấm (TN_02)

Bảng 3.5. Bảng tổng hợp kết quả

Nội dung	Tham số	Đơn vị	Thí nghiệm	Mô phỏng	Chênh lệch (%)
TN_01	Chuyển vị	cm	0.61	0.56	8.15
	Gia tốc	g	1395.77	1258.21	9.86
TN_02	Chuyển vị	cm	1.16	1.07	7.93

3.2.5.2. Nhận xét

Từ số liệu các tham số động học khảo sát (chuyển vị và gia tốc) tại vị trí giữa tấm của kết quả đo thí nghiệm và mô phỏng số cho thấy dạng biểu đồ khá tương đồng với chênh lệch giá trị đỉnh dưới 10% là kết quả chấp nhận được.

Thông qua các công thức thực nghiệm của Sadovsky [2], thực hiện tính toán tải trọng, sử dụng phần mềm Sap 2000 tính toán cho kết quả chuyển vị

giữa tấm (TN_01) có giá trị 0.69cm cho thấy kết quả thực nghiệm và mô phỏng là đáng tin cậy.

Từ kết quả mô phỏng cả về hình thái phá hoại trên tấm bê tông cũng như dạng biểu đồ và giá trị chuyển vị giữa tấm cho thấy bằng cách sử dụng các mô hình vật liệu phù hợp với những thông số đầu vào tối thiểu của mô hình bê tông MAT_084 là đáng tin cậy khi mô phỏng vật liệu bê tông chịu tác dụng từ vụ nổ.

3.2.6. Đánh giá kết quả chuẩn hóa mô hình

Từ các kết quả thực nghiệm và phân tích mô phỏng trên mô hình số, rút ra một số đánh giá để áp dụng khi xây dựng mô hình mô phỏng cho vật liệu bê tông chịu tác dụng nổ, cụ thể như sau:

Với dữ liệu đầu vào là các thông số cơ bản của vật liệu bê tông, có thể dễ dàng sử dụng thí nghiệm cơ bản trong phòng để xác định, mô hình cho phép biểu diễn vết nứt trên kết cấu là những ưu thế tốt của mô hình vật liệu MAT_084 sử dụng cho bê tông và đã được nhiều tác giả sử dụng trong các nghiên cứu ứng xử kết cấu BTCT rất gần đây. Tương tự như mô hình vật liệu cho bê tông thì mô hình MAT_003 cũng có đòi hỏi tham số đầu vào đơn giản hơn và phù hợp mô tả vật liệu có độ dẻo. So sánh hình thái phá hoại cũng như dạng biểu đồ, giá trị đỉnh các tham số động học của tấm bê tông mô phỏng và kết quả thí nghiệm cho thấy khi sử dụng mô hình vật liệu MAT_084 cho bê tông, MAT_003 cho cốt thép cũng như cách tiếp cận phương pháp xây dựng mô hình để mô phỏng trong LS-DYNA ứng dụng kết cấu chịu áp lực nổ là khả thi.

Từ kết quả khảo sát cho thấy việc sử dụng phương pháp mô hình hóa với mô hình vật liệu bê tông (MAT_084), mô hình vật liệu cốt thép (MAT_003) và các giằng buộc giữa bê tông với không khí, bê tông với cốt thép, điều kiện biên cho kết quả tốt, khuyến cáo sử dụng cho những bài toán mô phỏng tiếp sau.

3.3. Mô phỏng số vật liệu xốp cứng không phục hồi chịu áp lực nổ

Do những hạn chế về nguồn vật liệu xốp trên thị trường hiện nay nên trong nội dung này chỉ sử dụng vật liệu xốp cứng không phục hồi XPS (do công ty Phú Vương sản xuất) để tiến hành thí nghiệm và đánh giá. Sử dụng mô hình MAT_63 trong mục 2.3 của Chương 2 để thực hiện mô phỏng số.

3.3.1. Thực nghiệm nổ hiện trường

Để tiến hành đánh giá tác động của áp lực nổ lên kết cấu xốp cứng XPS, tiến hành thí nghiệm nổ tại hiện trường với đối tượng là tấm bê tông cốt GFRP (dạng thanh đường kính 10mm) mác 300 có kích thước 100x100x6cm được kê bốn cạnh lên khối đế cố định bằng BTCT. Tấm xốp XPS dày 50mm, có sử dụng tấm thép dàn lực dày 2mm ở phía trên làm lớp dàn lực. Lớp xốp liên kết với tấm bê tông và tấm thép dàn lực bằng hệ keo dán (phủ keo dán lên các bề mặt tiếp xúc, đặt các bề mặt cố định nên nhau, sử dụng tấm gỗ đè cố định lên phía trên và thí nghiệm được tiến hành sau khi keo đã khô).

Tiến hành thử nghiệm với lượng nổ TNT 0.4kg treo cách mặt tấm 1m, các thông số đo để khảo sát thí nghiệm gồm gia tốc và chuyển vị theo phương thẳng đứng của mặt dưới tấm thí nghiệm. Các thiết bị đo tham số động học của tấm thí nghiệm tương tự như trong TN_01 trong mục 3.2.3.



Hình 3.28. Công tác thí nghiệm hiện trường

3.3.2. Mô phỏng thí nghiệm số bằng LS-DYNA

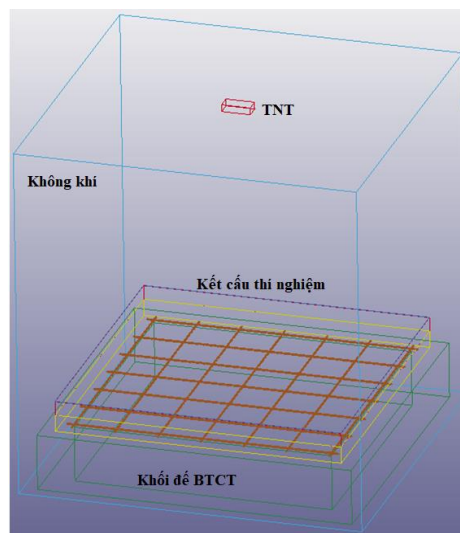
Đối với mô hình dùng cho không khí, thuốc nổ TNT, bê tông, xốp XPS và thép sử dụng lại các thông số đã được nghiên cứu trong những nghiên cứu trong các mục trên. Sử dụng thẻ vật liệu *003-PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003) để mô tả ứng xử của cốt GFRP trong bê tông, cốt GFRP có độ dẻo cao nên hoàn toàn phù hợp với với mô hình vật liệu MAT_003.

Bảng 3.6. Tham số mô hình vật liệu GFRP [133]

Vật liệu	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E(\text{Pa})$	ν	$\sigma_{ch}(\text{Pa})$
Cốt GFRP	1940	0.46×10^{11}	0.33	0.9×10^9

Phương pháp xây dựng mô hình và lựa chọn loại phần tử sử dụng, phương pháp chia lưới, các điều kiện giằng buộc,... giống như mục 3.2.4.3. Đối với tấm thép dãn lực phía trên có chiều dày mỏng sử dụng phần tử vỏ được tích hợp đầy đủ bằng cách sử dụng thẻ *SECTION_SHELL với tham số ELFORM lấy bằng 16 (phần tử vỏ tích hợp đầy đủ).

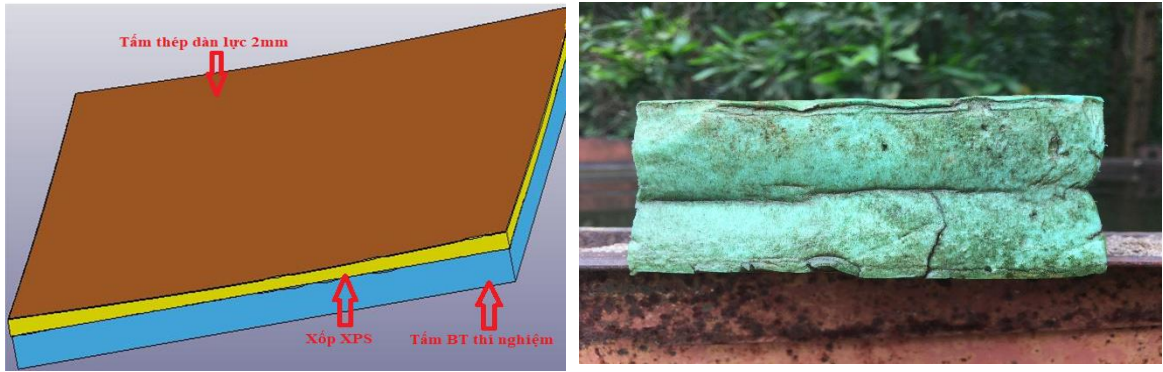
Điều kiện biên với vùng không khí lấy giống như mục 3.1.2.1, tiếp xúc khối đế - tấm bê tông, tấm bê tông - xốp XPS và xốp XPS - tấm thép dãn lực, sử dụng mô tả tiếp xúc hai chiều (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE). Trong đó, tiếp xúc giữa tấm bê tông - xốp XPS và xốp XPS - tấm thép dãn lực sử dụng keo dán nên sử dụng các hệ số FS và FD bằng 0.2 [93].



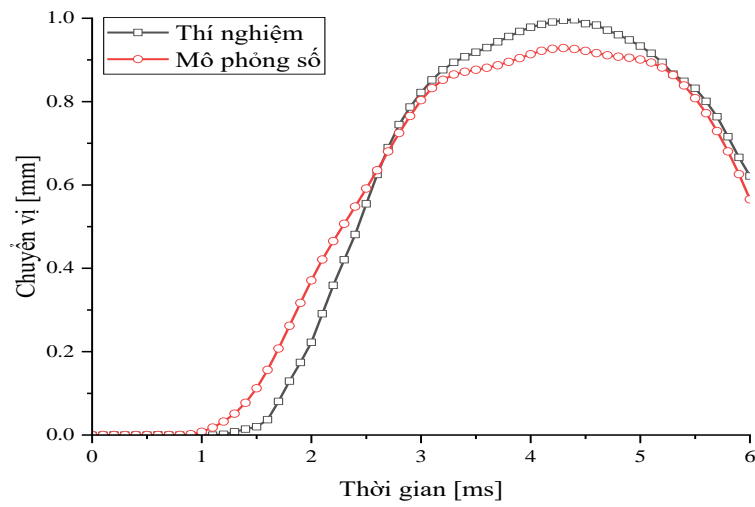
Hình 3.29. Mô hình mô phỏng số thí nghiệm

3.3.3. Kết quả mô phỏng số

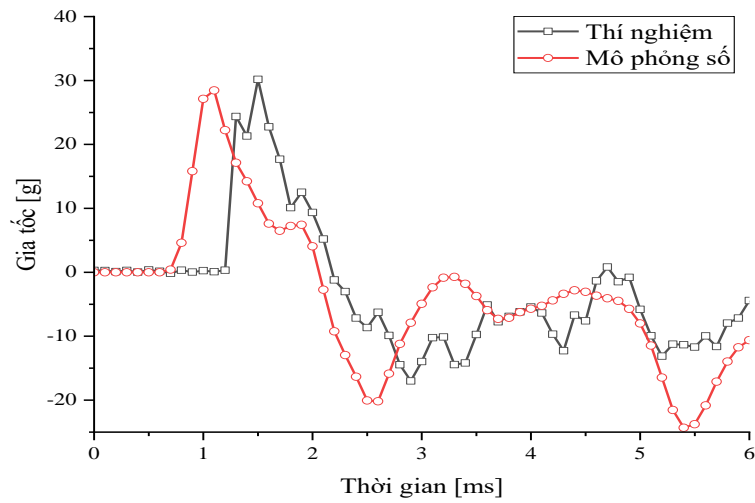
Để đánh giá hiệu quả của mô hình MAT_63 sử dụng cho vật liệu xốp XPS trong mô phỏng vụ nổ tiến hành so sánh các kết quả giữa thí nghiệm hiện trường và mô phỏng số trong LS-DYNA, thông qua so sánh dạng của biểu đồ và giá trị lớn nhất của các đại lượng khảo sát là chuyển vị và gia tốc mặt dưới tại giữa tấm theo phương đứng.



Hình 3.30. Xốp XPS bị xẹp khi chịu áp lực nổ



Hình 3.31. Chuyển vị của tấm thí nghiệm



Hình 3.32. Gia tốc của tấm thí nghiệm

Bảng 3.7. Bảng tổng hợp kết quả

Nội dung	Tham số	Đơn vị	Thí nghiệm	Mô phỏng số	Sai lệch (%)
Tham số động học tấm thí nghiệm	Chuyển vị	mm	0.97	0.93	6.82
	Gia tốc	g	30.17	28.44	5.73

Từ các kết quả thu được, so sánh giữa thí nghiệm với mô phỏng số cho thấy hình dạng biểu đồ các tham số động học được khảo sát tương đối tương đồng về hình dạng, các giá trị cực đại của chuyển vị và gia tốc sai lệch nhau nhỏ hơn 10%. Các kết quả khảo sát cho thấy việc mô phỏng số cho kết quả khả quan với các mô hình vật liệu đã lựa chọn trong nghiên cứu.

3.3.4. Đánh giá kết quả chuẩn hóa mô hình

Từ các kết quả thực nghiệm và phân tích mô phỏng trên mô hình số, rút ra một số đánh giá để áp dụng khi xây dựng mô hình mô phỏng cho vật liệu xốp cứng không phục hồi chịu áp lực nổ, cụ thể như sau:

Thực hiện mô phỏng và so sánh với thí nghiệm nổ hiện trường thông qua các tham số động học của tấm bê tông thí nghiệm, cho thấy hình dạng các biểu đồ đại lượng khảo sát tương đồng về hình dạng. Các kết quả cực đại của chuyển vị và gia tốc sai lệch tương đối nhỏ cho thấy việc mô phỏng số bằng LS-DYNA có thể đáp ứng được các thí nghiệm nổ trên mô hình số.

Từ kết quả khảo sát cho thấy mô hình MAT_63 phù hợp và sát với kết quả thí nghiệm, các tham số mô hình cơ bản đòi hỏi khá đơn giản. Việc sử dụng biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng bằng thí nghiệm nén đơn trục áp dụng vào mô hình vật liệu trong mô phỏng nổ cho kết quả khả quan. Đề xuất sử dụng mô hình MAT_63 cho các nghiên cứu tiếp theo, khi mô phỏng các loại xốp cứng không phục hồi chịu tác dụng của áp lực nổ với đầu vào là biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng từ thí nghiệm nén đơn trục và các tham số cơ bản của vật liệu.

3.4. Bàn luận chung về kết quả chuẩn hóa mô hình

Từ các kết quả so sánh giữa mô phỏng số và thực nghiệm nhận thấy:

Xét về mặt định tính của kết quả, cho thấy hình dạng của các biểu đồ đặc trưng động học cũng như xu thế phá hoại giữa mô phỏng và thí nghiệm là phù hợp và khẳng định được tính đúng đắn của phương pháp xây dựng mô hình mô

phỏng, lựa chọn mô hình vật liệu và xử lý tiếp xúc giữa các miền vật liệu nhất là giữa vật liệu mềm và cứng.

Xét về mặt định lượng của kết quả, có thể thấy rằng sai lệch giá trị đỉnh của các đặc trưng động học từ 5 đến dưới 10%, là một kết quả sát và có sai lệch nhỏ.

Một số yếu tố có thể dẫn đến sự sai khác giữa kết quả mô phỏng và thí nghiệm:

Sự sai lệch có thể xảy ra do liên kết trên kết cấu thí nghiệm khó là các liên kết lý tưởng như mô phỏng, quá trình chịu lực có sự sắp xếp lại liên kết ở một mức độ nhỏ.

Sự không đồng nhất của vật liệu kết cấu cũng có ảnh hưởng đến kết quả khi thí nghiệm.

Sự sai lệch nhỏ của kích thước kết cấu giữa mô phỏng và thí nghiệm.

Kết quả so sánh giữa mô phỏng số với thí nghiệm cho thấy kết quả mô phỏng có xu hướng thấp hơn thí nghiệm với giá trị đỉnh dưới 10%. Để đảm bảo tính an toàn và tăng độ tin cậy cho kết quả mô phỏng kết cấu, có thể xem xét đưa vào kết quả mô phỏng hệ số toàn từ 1.1 đến 1.15 tùy vào cấp công trình.

3.5. Kết luận chương

Từ những nghiên cứu của chương cho thấy kết quả mô phỏng số khá tương đồng với kết quả thí nghiệm, cho thấy có thể sử dụng mô phỏng số khảo sát thực nghiệm vụ nổ. Thông qua kết quả nghiên cứu rút ra những khuyến cáo cụ thể như sau:

Mô phỏng vụ nổ trong không khí đề xuất sử dụng lưới lưới chia miền không khí không vượt quá 0.5 lần chiều dài cạnh lượng nổ; lưới chia lượng nổ bằng 1/20 chiều dài cạnh lượng nổ; độ rộng biên miền không khí tối thiểu bằng 15 lần chiều dài phần tử và hệ số tỉ lệ bước thời gian TSSFAC lấy bằng 0.3.

Sử dụng mô hình vật liệu Winfrith (MAT_084) cho vật liệu bê tông, mô hình 003-PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003) cho vật liệu cốt thép để mô phỏng kết cấu BTCT chịu tác dụng nổ.

Sử dụng mô hình MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_63), kết hợp với các thông số cơ bản của vật liệu và đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng

thu được từ thí nghiệm nén đơn trục tĩnh để mô phỏng xốp cứng không phục hồi chịu áp lực nổ.

Ngoài ra phương pháp xây dựng mô hình mô phỏng, lựa chọn các mô hình vật liệu và xác định tham số cho mô hình vật liệu, phương pháp mô hình hóa cốt thép trong bê tông, tiếp xúc giữa các miền vật liệu,... đã trình bày trong chương sẽ được sử dụng cho nghiên cứu trên mô hình số trong nội dung tiếp theo.

Các kết quả nghiên cứu trong nội dung của chương sẽ được ứng dụng trong bài toán nghiên cứu tổng thể ở chương tiếp theo bao gồm vụ nổ trong không khí, kết cấu bảo vệ, kết cấu được bảo vệ và hệ thống giá thí nghiệm.

Chương 4

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG KẾT CẤU BẢO VỆ BẰNG VẬT LIỆU XÓP GIẢM TÁC ĐỘNG CỦA ÁP LỰC NỔ

Trong chương này dựa trên các kiến thức về vật liệu xốp và kỹ thuật mô phỏng số, tiến hành nghiên cứu cấu tạo hợp lý cho kết cấu bảo vệ nhằm giảm thiểu tác động của áp nổ lên kết cấu công trình. Từ kết quả khảo sát lựa chọn cấu trúc hợp lý cho kết cấu bảo vệ sử dụng vật liệu xốp, ứng dụng bảo vệ cho cấu kiện BTCT thực tế chịu áp lực nổ lớn.

4.1. Tính toán kết cấu bảo vệ cơ bản

Trong mục 3.3 của Chương 3 đã sử dụng mô phỏng số và thí nghiệm để đánh giá khả năng đáng ứng của mô hình MAT_63 cho vật liệu xốp cứng không phục hồi (XPS) chịu tác dụng của áp lực nổ, với cách tiếp cận đang dừng trong phạm vi nhấn mạnh đánh giá khả năng đáp ứng của mô hình vật liệu xốp chịu áp lực nổ. Trong nội dung nghiên cứu này tiếp tục sử dụng thí nghiệm nổ nêu trên với cách tiếp cận cụ thể hơn từ việc tính toán lựa chọn kết cấu bảo vệ, thí nghiệm hiện trường đánh giá hiệu quả phương án chọn, chuẩn hóa mô hình mô phỏng số làm mô hình chuẩn cho các khảo sát số tiếp theo. Từ đó, khảo sát các giải pháp kết cấu bảo vệ khác nhau để tìm ra được giải pháp hữu ích nhất, cũng như có tính khả thi trong thực tế sản xuất và lắp dựng.

4.1.1. Tính toán kết cấu bảo vệ sử dụng vật liệu xốp

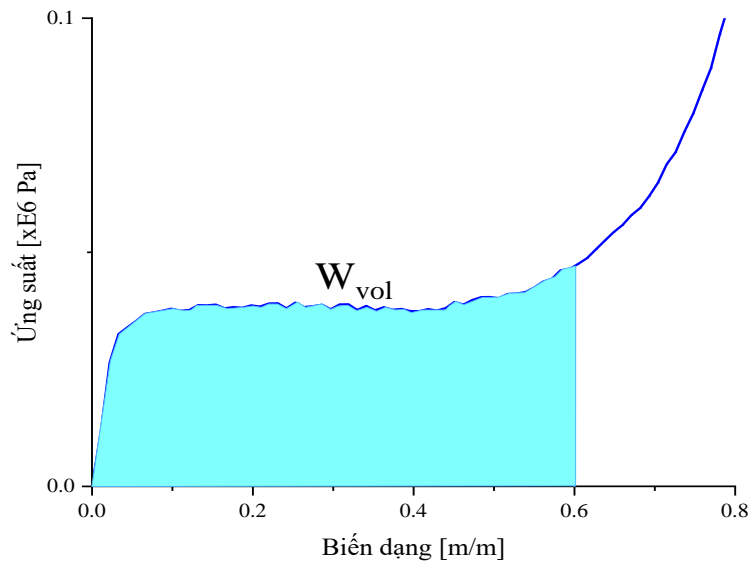
4.1.1.1. Tính toán hệ kết cấu bảo vệ

Đặt bài toán với kết cấu tấm bê tông cốt GFRP kích thước 100x100x6cm kê bốn cạnh tự do trên khối đế bằng BTCT, thuốc nổ TNT có khối lượng 0.4kg treo cách mặt trên tấm bê tông 100cm.

Thực tế sản xuất hiện nay trên thị trường thường có các loại xốp XPS có chiều dày nhất định từ nhà sản xuất. Để phù hợp với sản phẩm thông dụng trên thị trường trong nghiên cứu lựa chọn tấm xốp cứng XPS dày 50mm. Do tấm xốp được lựa chọn trước chiều dày nên tấm dàn lực phía trên sẽ được tính toán dựa trên loại vật liệu lựa chọn. Lựa chọn vật liệu thép cho tấm dàn lực, vì đây là loại vật liệu thông dụng và có cường độ cao phía trên đặt tấm thép dàn lực. Công thức xác định chiều dày tấm dàn lực được suy ra từ công thức (2.32):

$$\delta_{td} = \frac{J_s^2}{2h_{blast}\rho_{td}W_{vol}} \quad (4.1)$$

Thực hiện tính toán xung lượng vụ nổ (J_s) theo công thức (2.28). Trong đó, năng lượng hấp thụ của vật liệu xốp (W_{vol}) được xác định thông qua tích phân số trên đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng từ thực nghiệm nén đơn trục mẫu xốp đã trình bày trong Chương 3, với ứng suất lấy đơn vị là (Pa) và trong khoảng biến dạng đến 60%.



Hình 4.1. Năng lượng hấp thụ của vật liệu xốp (W_{vol})

Bảng 4.1. Bảng kết quả tính kết cấu bảo vệ

Thông số	J_s Nsm^{-2}	W_{vol} J/m^3	h_{blast} m	ρ_{td} kg/m^3	δ_{td} m	δ_{td} (chọn)
Kết quả	191.725	2.291E4	0.05	7850	2.044E-3	2.0E-3

4.1.2. Thí nghiệm hiện trường đánh giá giải pháp kết cấu bảo vệ

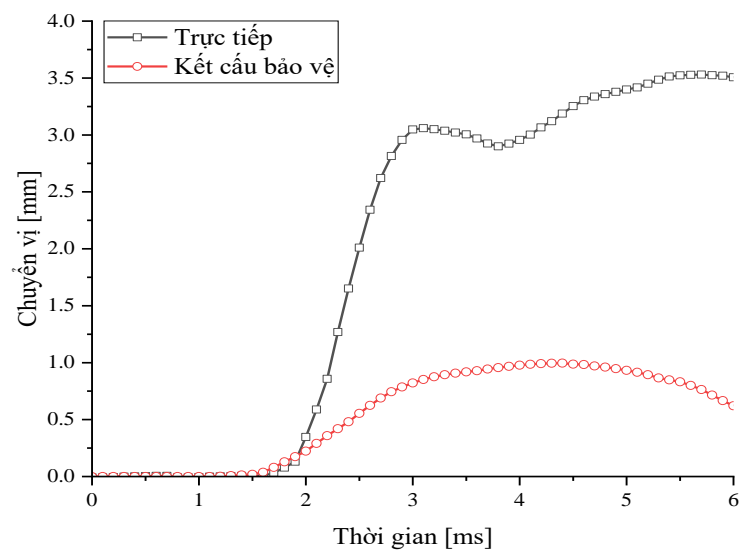
4.1.2.1. Thí nghiệm hiện trường

Để tiến hành đánh giá khả năng hấp thụ và làm giảm tác dụng áp lực nổ lên kết cấu của xốp cứng XPS, tiến hành thí nghiệm nổ tại hiện trường với đối tượng là tấm bê tông cốt GFRP (dạng thanh đường kính 10mm) mác 300 có kích thước 100x100x6cm được kê bốn cạnh lên khối đế cố định bằng BTCT. Thí nghiệm cho hai trường hợp: tấm bê tông cốt GFRP chịu tác dụng trực tiếp của nổ và tấm bê tông cốt GFRP có kết cấu bảo vệ đặt phía trên (lớp xốp XPS dày 50mm và tấm thép dãn lực dày 2mm). Lượng nổ TNT 0.4kg treo giữa tâm tấm và cách mặt tấm 100cm. Đo các tham số động học gồm gia tốc và chuyển vị theo phương thẳng đứng tại tâm của mặt dưới tấm thí nghiệm.

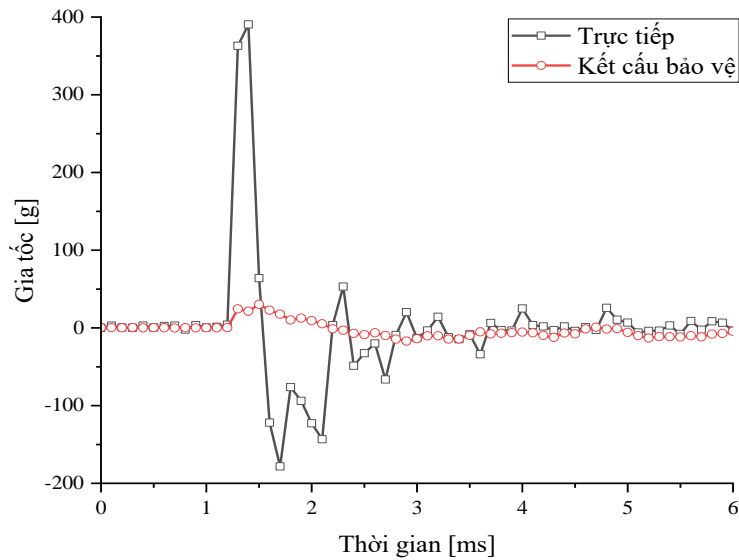


Hình 4.2. Kết cấu thí nghiệm hiện trường

4.1.2.2. Kết quả thí nghiệm hiện trường



Hình 4.3. Chuyển vị tấm bê tông cốt GFRP thí nghiệm



Hình 4.4. Gia tốc tấm bê tông cốt GFRP thí nghiệm

Bảng 4.2. Bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm

Nội dung	Tham số	Đơn vị	Trực tiếp	Kết cấu bảo vệ	Chênh lệch (%)
Tham số động học tấm thí nghiệm	Chuyển vị	mm	3.53	0.97	71.78
	Gia tốc	g	390.54	30.17	92.27

4.1.3. Xây dựng mô hình số trong LS-DYNA

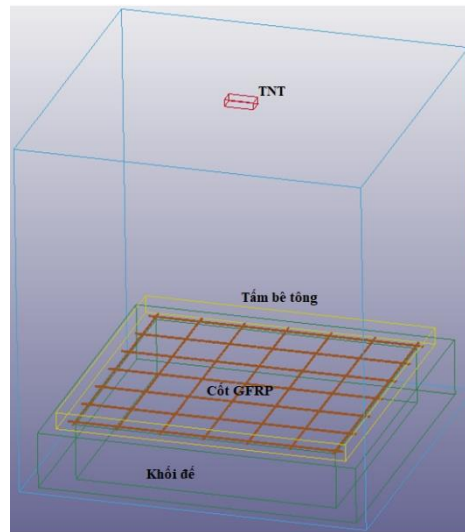
Dựa trên các kết quả nghiên cứu thành phần bao gồm mô hình cho xốp cứng không phục hồi ở Chương 2, hệ quả của vụ nổ trong không khí tác động vào kết cấu bảo vệ, các hệ quả ứng xử của kết cấu bảo vệ tác động lên kết cấu được bảo vệ và cuối cùng là các hệ quả ứng xử của kết cấu được bảo vệ ở Chương 3. Các kết quả này sẽ được ứng dụng để xây dựng quá trình cùng làm việc (ứng xử) của cả hệ thống, bao gồm: vụ nổ trong không khí, kết cấu bảo vệ, kết cấu được bảo vệ và hệ thống giá thí nghiệm trong nội dung xây dựng mô hình số sau đây.

4.1.3.1. Mô hình vật liệu

Đối với mô hình dùng cho không khí, thuốc nổ TNT, bê tông, cốt GFRP trong tấm bê tông, xốp XPS, các điều kiện biên, tiếp xúc giữa các miền vật liệu,... sử dụng giống như các thông số và phương pháp mô phỏng đã được nghiên cứu trong Chương 3. Liên kết giữa tấm xốp, tấm thép dàn lực và tấm bê tông sử dụng hệ keo dán và sử dụng phương án xử lý tiếp xúc bề mặt các lớp vật liệu như mục 3.3.2.

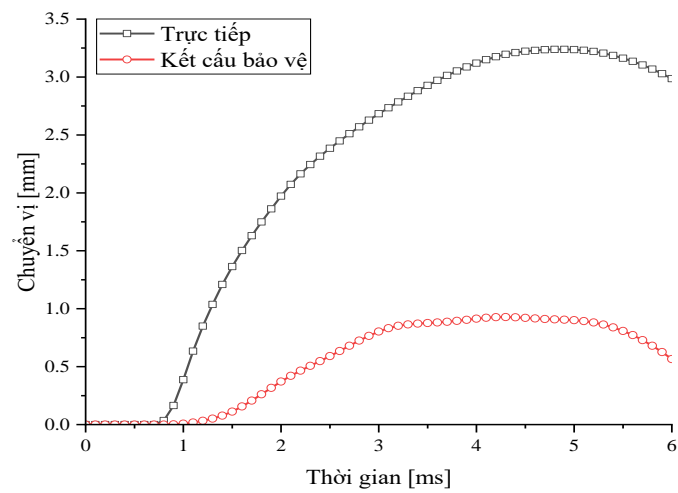
4.1.3.2. Xây dựng mô hình số

Sử dụng các kết mô phỏng trong mục 3.3 của Chương 3, bổ sung thêm mô phỏng số cho trường hợp tấm bê tông cốt GFRP chịu tác dụng trực tiếp vụ nổ.

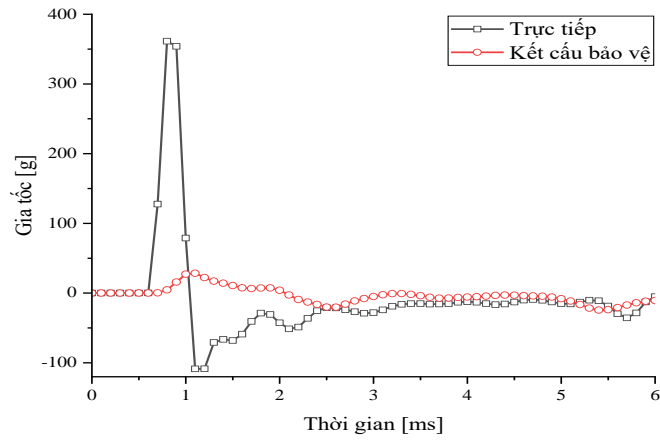


Hình 4.5. Mô hình mô phỏng số thí nghiệm tấm cốt GFRP chịu nổ trực tiếp

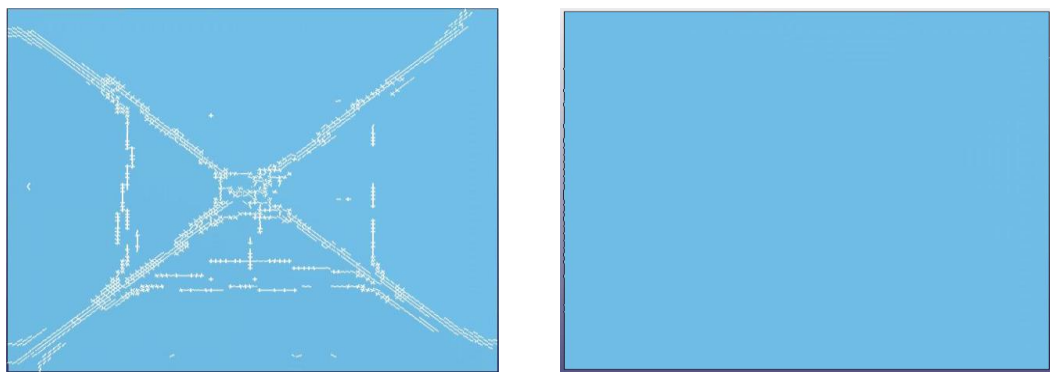
4.1.3.3. Kết quả mô phỏng số



Hình 4.6. Chuyển vị tấm bê tông cốt GFRP mô phỏng



Hình 4.7. Gia tốc tâm tâm bê tông cốt GFRP mô phỏng



Trực tiếp - Hình thành vết nứt

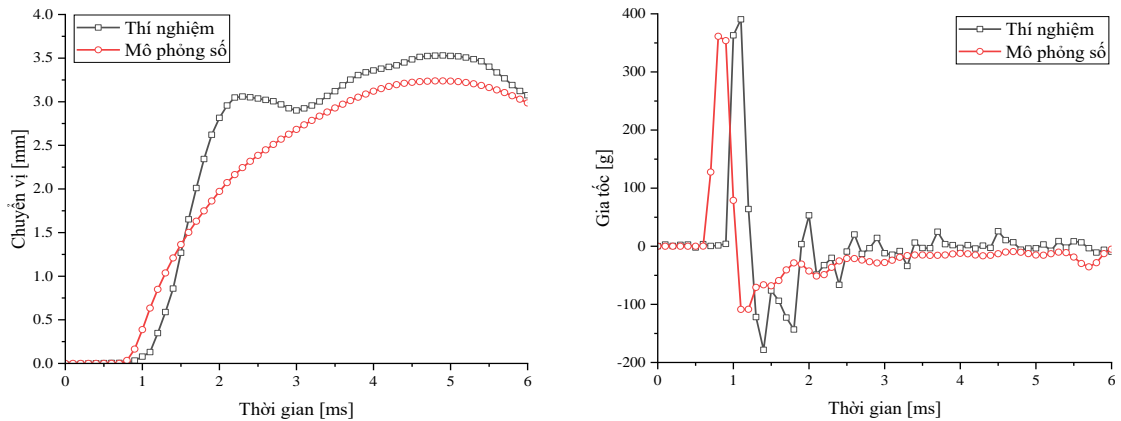
Có kết cấu bảo vệ - Không nứt

Hình 4.8. Hình ảnh mặt dưới tấm bê tông mô phỏng tại $t=6ms$

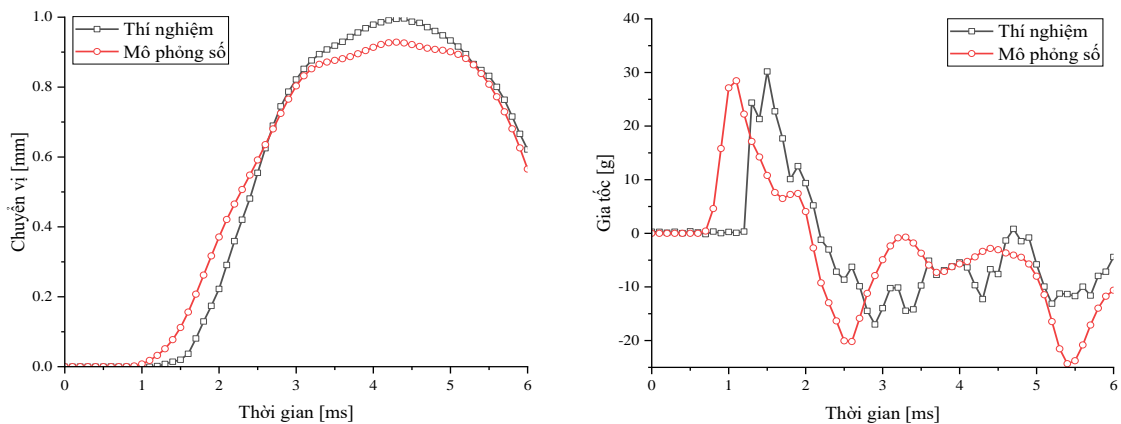
Bảng 4.3. Bảng đánh giá hiệu quả (mô phỏng)

Nội dung	Tham số	Đơn vị	Trực tiếp	Kết cấu bảo vệ	Chênh lệch (%)
Tham số động học tâm mô phỏng	Chuyển vị	mm	3.24	0.93	71.34
	Gia tốc	g	361.29	28.44	92.12

4.1.4. So sánh kết quả thí nghiệm và mô phỏng số



Hình 4.9. Tấm bê tông chịu áp lực nổ trực tiếp



Hình 4.10. Tấm bê tông có kết cấu bảo vệ

Bảng 4.4. Bảng tổng hợp kết quả so sánh giữa thí nghiệm và mô phỏng

Nội dung	Tham số	Đơn vị	Thí nghiệm	Mô phỏng số	Chênh lệch (%)
Trực tiếp	Chuyển vị	mm	3.53	3.24	8.22
	Gia tốc	g	390.54	361.29	7.49
Có kết cấu bảo vệ	Chuyển vị	mm	0.97	0.93	6.82
	Gia tốc	g	30.17	28.44	5.73

4.1.5. Bàn luận kết quả

Từ kết quả đo thực nghiệm cho thấy việc tính toán và lựa chọn giải pháp kết cấu bảo vệ bằng vật liệu xốp kết hợp với tấm thép dàn lực phía trên là khả thi và đem lại hiệu quả cao. Làm giảm mạnh chuyển vị trên 70%, gia tốc trên 90% và giảm thiểu được việc phá hoại kết cấu trước tác động của áp lực nổ, kết cấu không bị nứt.

So sánh kết quả thu được giữa thí nghiệm với mô phỏng cho thấy hình dạng biểu đồ các tham số động học được khảo sát tương đối tương đồng về hình dạng, các giá trị cực đại của chuyển vị và gia tốc sai lệch nhau tương đối nhỏ. Các kết quả này cho thấy việc mô phỏng số cho kết quả khả quan với các mô hình vật liệu, phương pháp mô phỏng đã lựa chọn trong nghiên cứu. Từ đó có thể sử dụng mô phỏng số để khảo sát các cấu trúc khác nhau của kết cấu bảo vệ, cũng như các khảo sát số trên cấu kiện lớn mà không có đủ điều kiện để thực hiện tất cả các thí nghiệm. Ngoài ra, những kết quả nêu trên đã khẳng định cho việc nghiên cứu giải pháp tạo ra kết cấu bảo vệ từ vật liệu xốp nói chung và vật liệu xốp cứng không phục hồi tạo thành kết cấu bảo vệ công trình trước các tác động của áp lực nổ gây ra là khả thi.

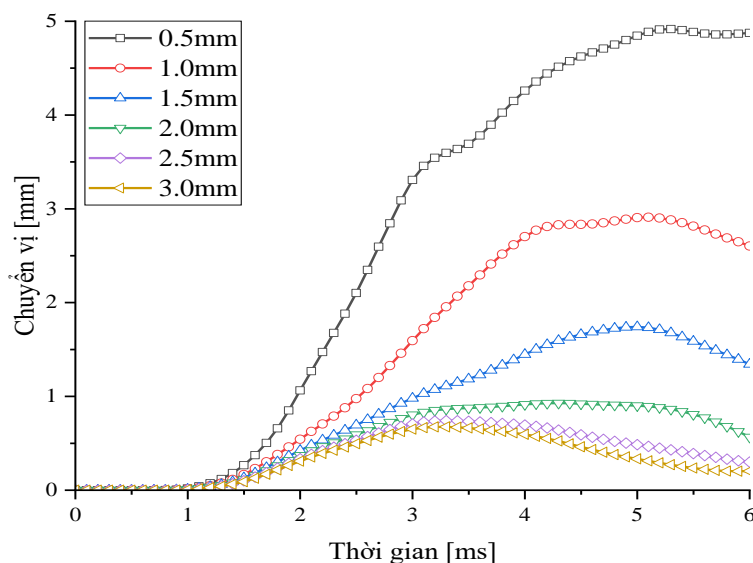
Trong các nội dung tiếp theo sẽ tiếp tục sử dụng mô hình số đã được xác minh này để khảo sát các dạng cấu tạo khác nhau của kết cấu bảo vệ.

4.2. Nghiên cứu khảo sát cấu tạo cho kết cấu bảo vệ

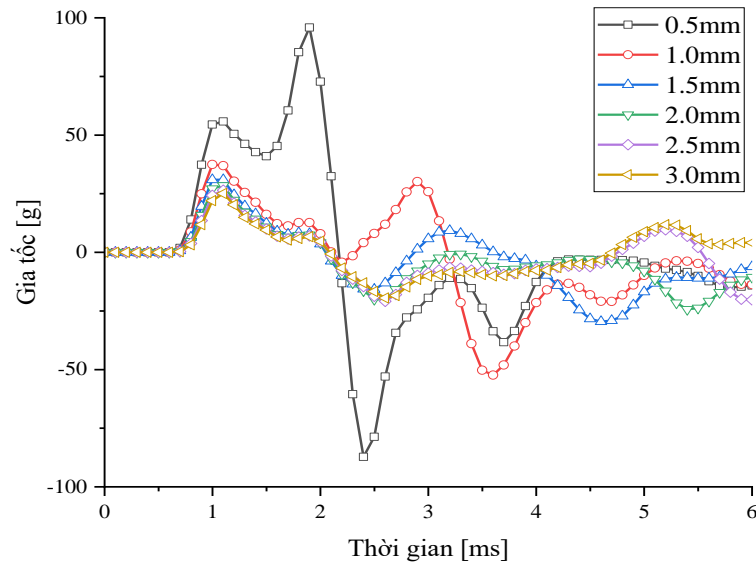
4.2.1. Khảo sát chiều dày tấm thép dàn lực

Khảo sát tấm thép dàn lực với các độ dày khác nhau, để đánh giá kết quả tính toán và lựa chọn thông qua khảo sát thí nghiệm số chỉ có sự thay đổi chiều dày tấm dàn lực từ 0.5 đến 3mm, các yếu tố khác của mô hình không thay đổi.

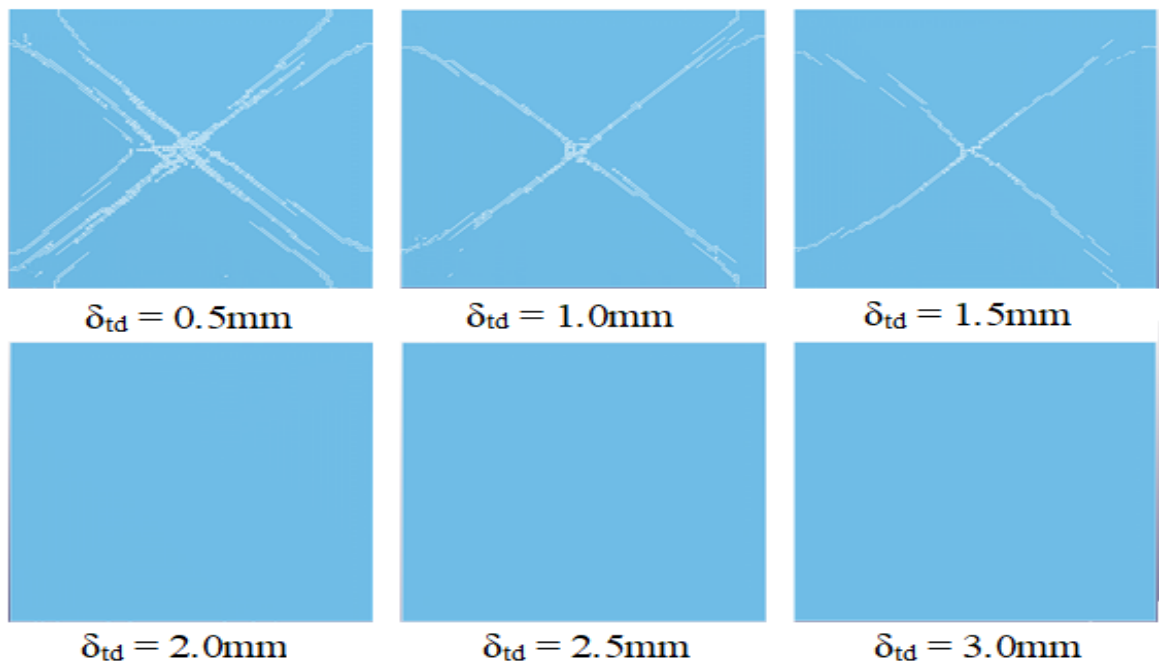
Tiến hành khảo sát hai yếu tố động học của kết cấu tấm thí nghiệm là chuyển vị và gia tốc giữa tấm, các kết quả khảo sát được thể hiện trong các hình từ Hình 4.11 đến Hình 4.13.



Hình 4.11. Chuyển vị tấm bê tông khảo sát



Hình 4.12. Gia tốc tấm bê tông khảo sát



Hình 4.13. Hình ảnh mặt dưới tấm bê tông khảo sát tại $t=6\text{ms}$

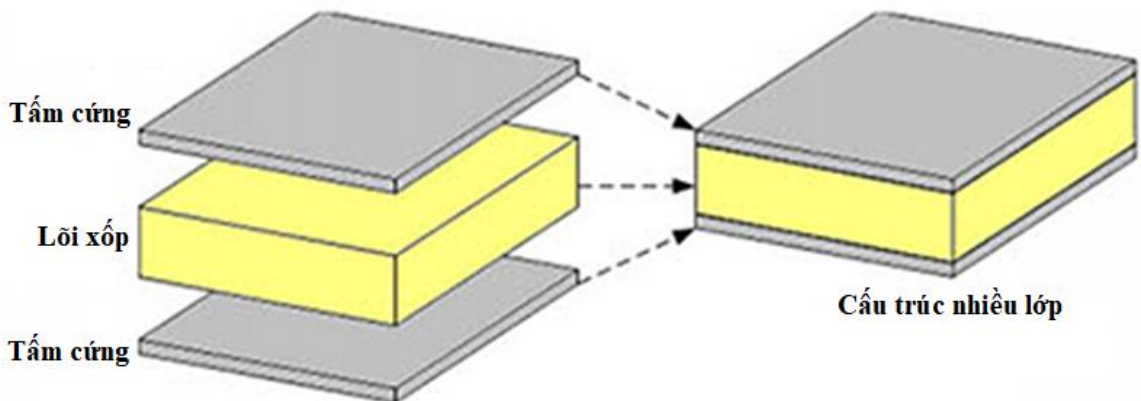
Từ kết quả khảo sát cho thấy chiều dày tính toán và lựa chọn của tấm thép dàn lực với $\delta_{td} = 2\text{mm}$ đem lại hiệu quả giảm tác động từ vụ nổ xem xét là đủ tốt. Khi tăng chiều dày tấm thép dàn lực thêm ($\delta_{td} = 2.5\text{mm}$ và $\delta_{td} = 3.0\text{mm}$) cho thấy hiệu quả vẫn có xu thế tăng nhẹ và không quá rõ rệt. Điều này cho thấy các tính toán cơ bản cho bộ hấp thụ năng lượng từ áp lực nổ đề cập trong luận án là hướng tiếp cận đúng đắn và phù hợp.

Để đánh giá hiệu quả giảm tác động từ vụ nổ cần nghiên cứu các cách cấu tạo khác như cấu trúc nhiều lớp, sẽ được đề xuất trong các nội dung tiếp sau.

4.2.2. Khảo sát kết cấu bảo vệ dạng nhiều lớp

4.2.2.1. Cấu trúc nhiều lớp

Nói chung, cấu trúc tấm nhiều lớp bao gồm hai mặt cứng bên ngoài và các tấm lõi là vật liệu có mật độ thấp được liên kết với nhau, sơ đồ cấu trúc nhiều lớp được thể hiện trong Hình 4.14. Đối với vật liệu của mặt cứng nó chỉ đơn giản được chia thành dạng hỗn hợp (chẳng hạn như CFRP, GFRP, composite,...) và không phức hợp (chẳng hạn như nhôm, kim loại, nhựa...). Thiết kế lõi của cấu trúc nhiều lớp với lõi xốp tạo ra vật liệu có đặc tính tốt như làm gia tăng độ cứng cho vật liệu xốp bởi các tấm cứng bao bọc bên ngoài, các tấm cứng này có thể thiết kế thành tấm đệm để tăng khả năng hấp thụ năng lượng của xung lực do va chạm hay áp lực nổ. Các nghiên cứu gần đây cho thấy hiệu quả của cấu trúc nhiều lớp với lõi vật liệu xốp trong ứng dụng hấp thụ áp lực nổ, là gợi ý quan trọng cho vấn đề nghiên cứu khảo sát về cấu trúc nhiều lớp của luận án [134-138].

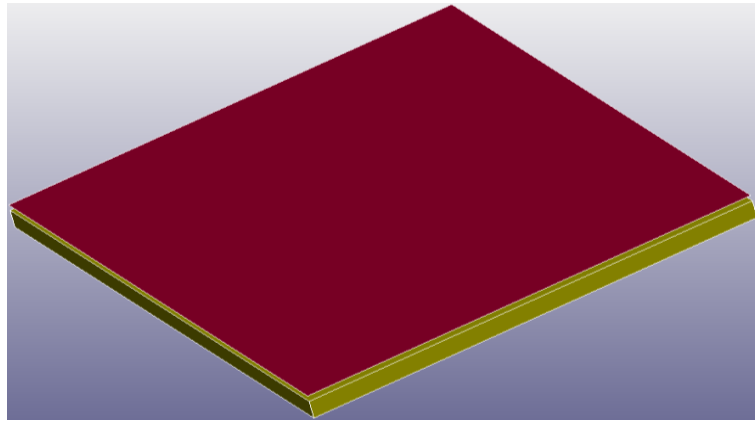


Hình 4.14. Hình ảnh sơ đồ cơ bản của cấu trúc nhiều lớp điển hình

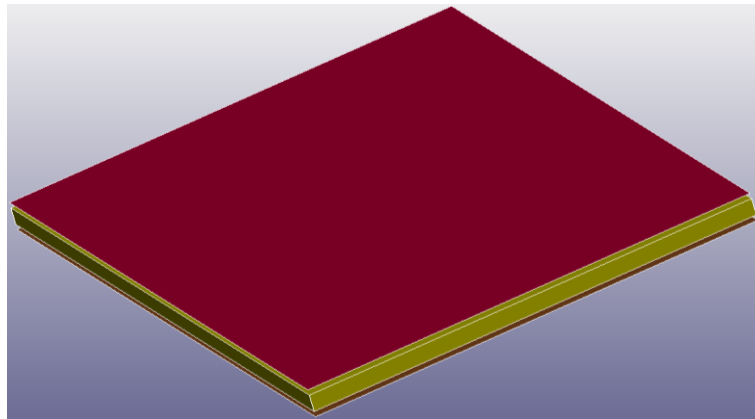
Tiếp tục sử dụng các vật liệu đã khảo sát trong thí nghiệm nói trên, tiến hành khảo sát trên mô hình số các cấu trúc nhiều lớp khác nhau để đánh giá hiệu quả so với cấu trúc cơ bản ban đầu.

Trong khảo sát và đánh giá hiệu quả của giải pháp cấu trúc nhiều lớp của kết cấu bảo vệ, sử dụng xốp XPS loại dày 50mm cho cấu trúc cơ bản (thép - xốp) và cấu trúc nhiều lớp loại 1 (thép-xốp-thép). Sử dụng xốp XPS dày 25mm cho mỗi lớp xốp (tổng chiều dày xốp 50mm bằng cấu trúc cơ bản), cho cấu trúc nhiều lớp loại 2 (thép-xốp-thép-xốp) và cấu trúc nhiều lớp loại 3 (thép-xốp-thép-xốp-thép). Các lớp xốp này được kết hợp với các tấm thép 2mm để cấu tạo thành các cấu trúc nhiều lớp nhằm đánh giá sự gia tăng hiệu quả bảo vệ so với cấu trúc cơ bản như đã nghiên cứu phía trên. Liên kết giữa tấm xốp, tấm

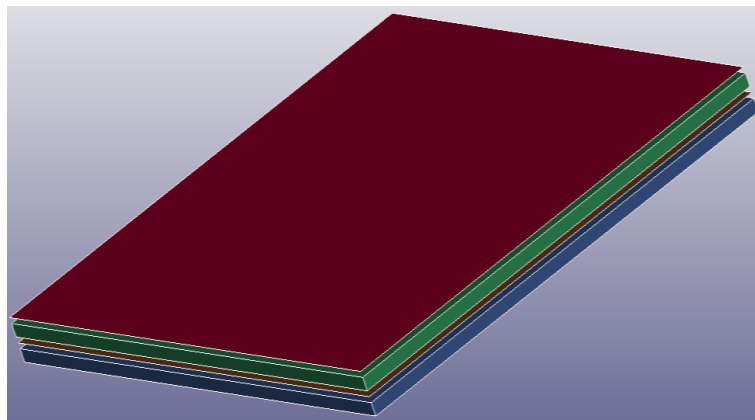
thép dàn lực và tấm bê tông sử dụng hệ keo dán và sử dụng phương án xử lý tiếp xúc bề mặt các lớp vật liệu như mục 3.3.2. Các cấu trúc cơ bản và nhiều lớp được thể hiện trong các hình từ Hình 4.15 đến Hình 4.18.



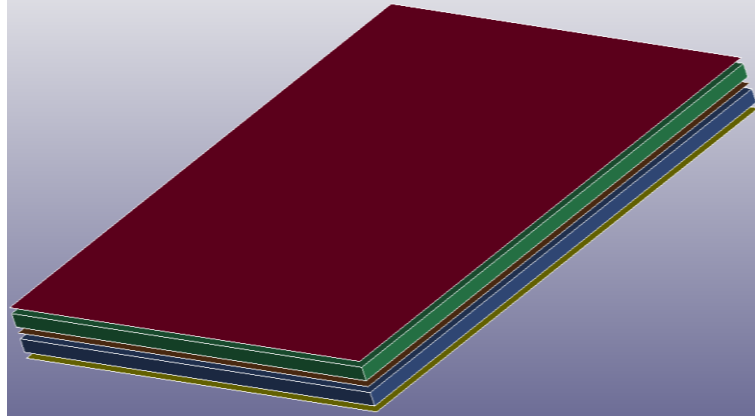
Hình 4.15. Cấu trúc cơ bản: thép - xốp



Hình 4.16. Cấu trúc nhiều lớp loại 1 (thép-xốp-thép)



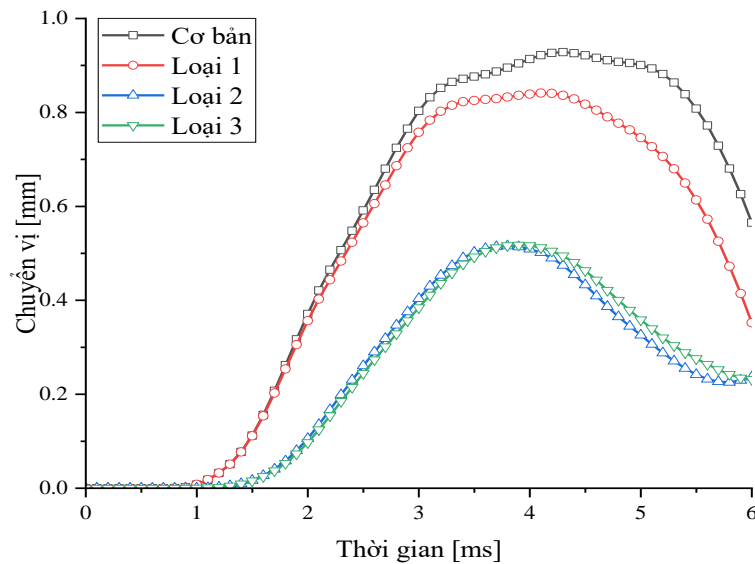
Hình 4.17. Cấu trúc nhiều lớp loại 2 (thép-xốp-thép-xốp)



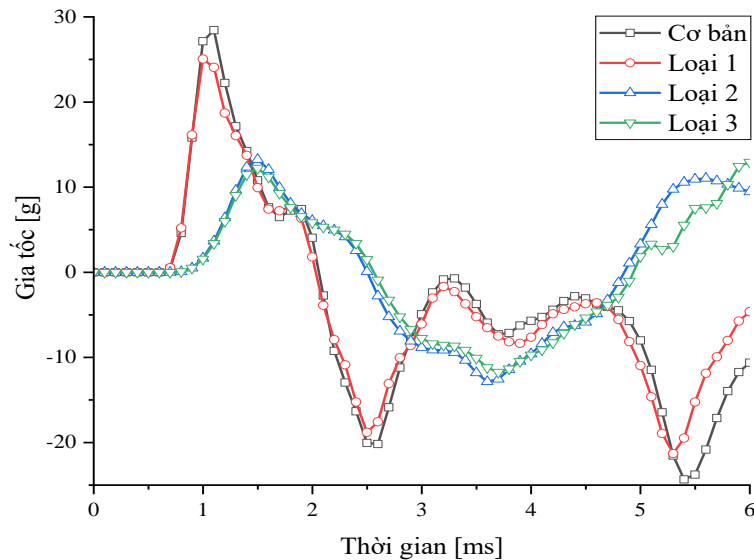
Hình 4.18. Cấu trúc nhiều lớp loại 3 (thép-xốp-thép-xốp-thép)

4.2.2.2. Kết quả khảo sát

Tiến hành khảo sát hai yếu tố động học của kết cấu tấm thí nghiệm là chuyển vị và gia tốc giữa tấm, các kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình 4.19 và Hình 4.20.



Hình 4.19. Kết quả chuyển vị tấm mô phỏng



Hình 4.20. Kết quả gia tốc tằm mô phỏng

Bảng 4.5. Bảng tổng hợp hiệu quả so với cấu trúc cơ bản

Tham số	Cấu trúc	Đơn vị	Kết quả	Chênh lệch (%)
Chuyển vị	Cơ bản	mm	0.93	-
	Loại 1		0.84	9.38
	Loại 2		0.52	44.43
	Loại 3		0.52	44.43
Gia tốc	Cơ bản	g	28.44	-
	Loại 1		25.05	11.91
	Loại 2		13.25	53.40
	Loại 3		12.23	56.99

Thông qua kết quả khảo sát các cấu trúc nhiều lớp khác nhau với cùng một điều kiện mô phỏng cho thấy việc chia lớp và tăng cường lớp dần lực vào lõi cấu trúc tạo ra các hiệu quả vượt trội so với cấu trúc cơ bản cũng như cấu trúc một lõi xốp. Kết quả khảo sát cũng cho thấy cấu trúc loại 2 và loại 3 cho hiệu quả bảo vệ khá tương đồng với chuyển vị cùng giảm 44.43%, gia tốc giảm 53.40% và 56.99%. Tuy nhiên, cấu trúc loại 2 phải liên kết trực tiếp lớp xốp lên bề mặt kết cấu công trình sẽ khó khăn hơn nhiều so với loại 3. Vì vậy, trong các nội dung tiếp theo sẽ sử dụng cấu trúc loại 3 để tiếp tục nghiên cứu.

Từ kết quả này dẫn đến những gợi ý để tiếp tục các nghiên cứu và khảo sát sâu hơn về cấu trúc bảo vệ nhiều lớp với những sự thay đổi đặc tính vật liệu lớp dần lực nhằm nâng cao hiệu quả cho kết cấu bảo vệ.

4.2.3. Khảo sát đặc tính vật liệu dàn lực

4.2.3.1. Vật liệu lõi dàn lực

Từ kết quả khảo sát ở trên cho thấy kết cấu bảo vệ dạng cấu trúc nhiều lớp có hiệu quả tốt trong việc hấp thụ và làm giảm tác động của áp lực nổ lên kết cấu. Một vấn đề đặt ra là tấm đệm càng dày và nặng thì động năng mà vật liệu hấp thụ phải tiêu tán càng thấp [31]. Tuy nhiên, việc tăng chiều dày tấm đệm dàn lực cũng phát sinh nhiều vấn đề như gia tăng chi phí và khó chế tạo nên cần có giải pháp phù hợp hơn để phát huy khả năng hấp thụ áp lực nổ của cấu trúc dạng nhiều lớp.

Vật liệu chì có khối lượng riêng vượt trội so với vật liệu thép (11430 kg/m^3 so với 7850 kg/m^3), với cùng kích thước (chiều dày) vật liệu chì sẽ cho phép khối lượng của tấm tăng lên đáng kể so với vật liệu thép. Tuy nhiên, độ bền của chì thấp hơn nhiều so với thép nên không thể thay thế làm tấm dàn lực phía trước để tiếp nhận trực tiếp áp lực nổ. Với ý tưởng này đề xuất giải pháp thay thế lõi thép giữa hai lớp xốp bằng lõi chì với cùng chiều dày.

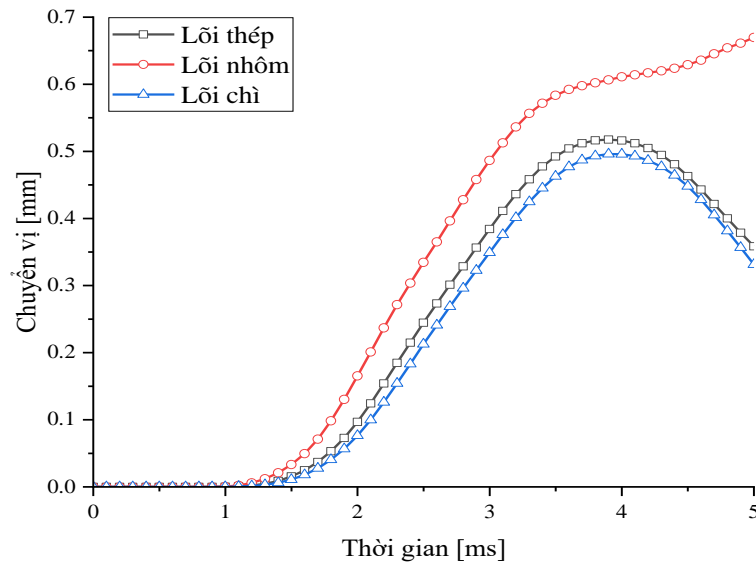
Trong nội dung khảo sát này thực hiện khảo sát các bài toán với cấu trúc nhiều lớp loại 3 (xem mục 4.2.2) bằng cách sử dụng lõi thép giữa hai lớp xốp bằng lớp nhôm (trọng lượng nhẹ hơn thép) và lớp chì. Liên kết giữa tấm xốp, tấm thép dàn lực, lớp chì và tấm bê tông sử dụng hệ keo dán và sử dụng phương án xử lý tiếp xúc bề mặt các lớp vật liệu như mục 3.3.2.

Bảng 4.6. Tham số mô hình vật liệu chì và nhôm [139]

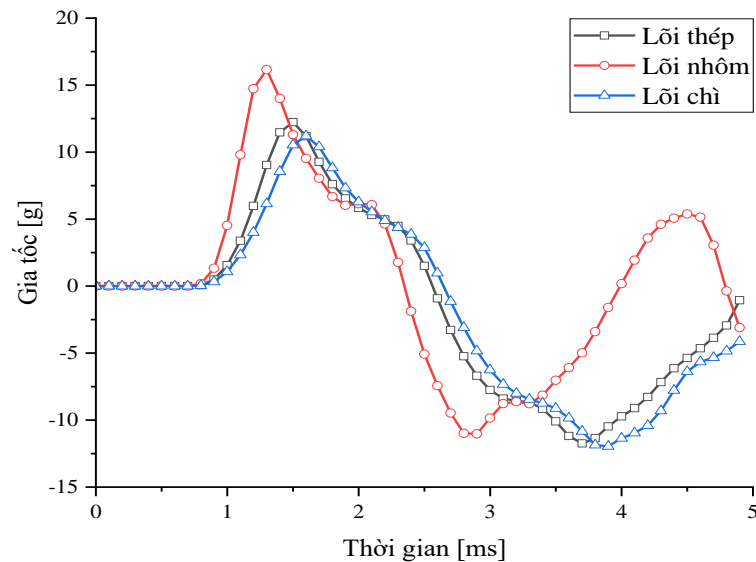
Vật liệu	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E(\text{Pa})$	ν	$\sigma_{\text{ch}}(\text{Pa})$
Chì	11430	0.14×10^{11}	0.42	5.5×10^6
Nhôm	2700	0.68×10^{11}	0.36	2.76×10^8

4.2.3.2. Kết quả khảo sát

Tiến hành khảo sát hai yếu tố động học của kết cấu tấm thí nghiệm là chuyển vị và gia tốc giữa tấm, các kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình 4.21 và Hình 4.22.



Hình 4.21. Kết quả chuyển vị tâm mô phỏng



Hình 4.22. Kết quả gia tốc tâm mô phỏng

Bảng 4.7. Bảng tổng hợp hiệu quả so với cấu trúc lõi thép

Tham số	Cấu trúc	Đơn vị	Kết quả	Chênh lệch (%)
Chuyển vị	Lõi thép	mm	0.52	-
	Lõi nhôm		0.67	+ 29.38
	Lõi chì		0.50	- 8.41
Gia tốc	Lõi thép	g	12.23	-
	Lõi nhôm		16.16	+ 32.07
	Lõi chì		11.20	- 8.41

Từ kết quả khảo sát cho thấy, trọng lượng tâm lõi có ảnh hưởng khá lớn đến hiệu suất của cấu trúc bảo vệ nhiều lớp trước tác dụng của vụ nổ. Vì vậy,

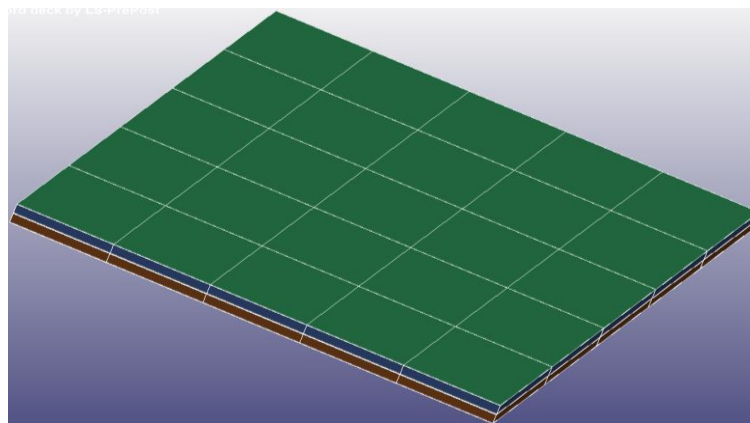
khi cấu tạo kết cấu bảo vệ thì ngoài đặc tính bền cần đặc biệt lưu ý đến trọng lượng riêng của vật liệu chế tạo làm tấm dàn lực phía trước tiếp nhận trực tiếp áp lực nổ hoặc lõi trong cấu trúc nhiều lớp.

4.2.4. Phân nhỏ kết cấu bảo vệ

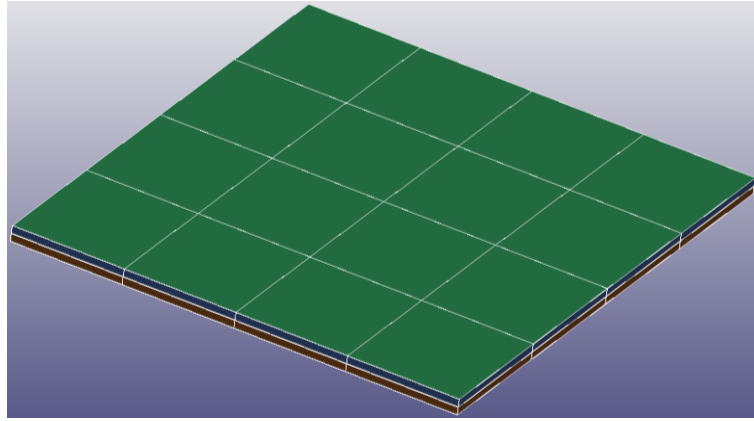
Một vấn đề khác được đặt ra trong nghiên cứu đó là khi các kết cấu công trình cần bảo vệ có kích thước lớn, việc chế tạo kết cấu bảo vệ đủ lớn để bao phủ toàn bộ bề mặt kết cấu là hoàn toàn không khả thi trong thực tế. Do đó, trong nội dung này sẽ nghiên cứu việc chia nhỏ kết cấu bảo vệ (kết cấu bảo vệ hiện tại 100x100cm) thành các tấm nhỏ ghép lại với nhau và sử dụng cấu trúc nhiều lớp loại 3 với lõi giữa hai lớp xốp bằng vật liệu chì (xem mục 4.2.2 và 4.2.3). Liên kết giữa tấm xốp, tấm thép dàn lực và tấm bê tông sử dụng hệ keo dán và sử dụng phương án xử lý tiếp xúc bề mặt các lớp vật liệu như mục 3.3.2. Sử dụng liên hệ CONTACT-AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE với các hệ số FS và FD bằng 0, cho tương tác giữa mặt tiếp giáp của các tấm phân đoạn với nhau.

4.2.4.1. Phân đoạn kết cấu bảo vệ

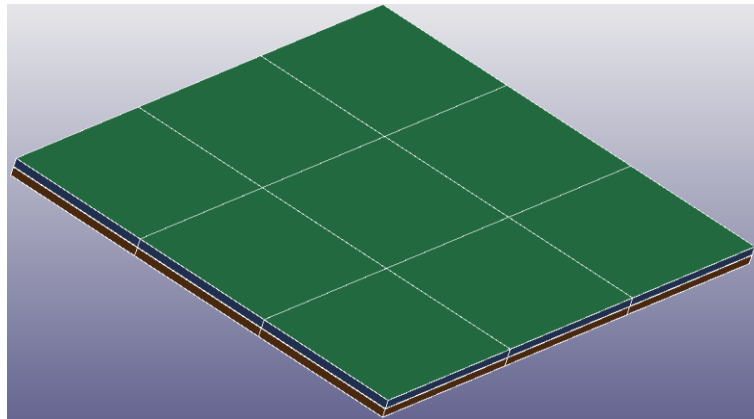
Để đánh giá ảnh hưởng của việc chia nhỏ kết cấu bảo vệ so với kích thước nguyên khối ban đầu, tiến hành chia nhỏ kết cấu bảo vệ thành các phân đoạn nhỏ với các kích thước khác nhau: 20x20cm, 25x25cm, 33x33cm và 50x50cm, Được thể hiện trong các hình từ Hình 4.23 đến Hình 4.26.



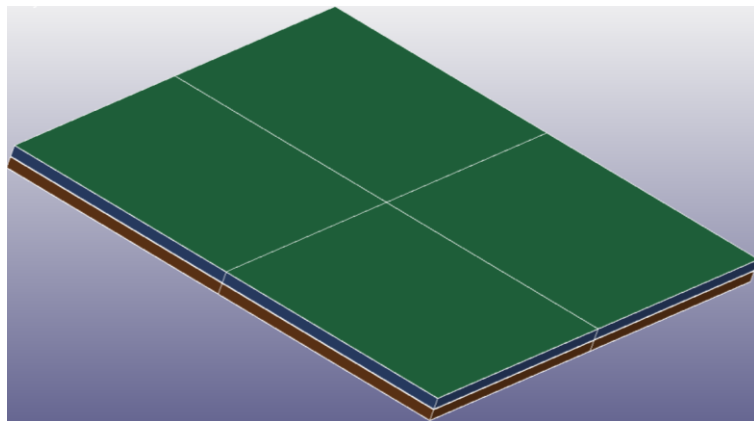
Hình 4.23. Phân đoạn kết cấu bảo vệ 20x20cm



Hình 4.24. Phân đoạn kết cấu bảo vệ 25x25cm



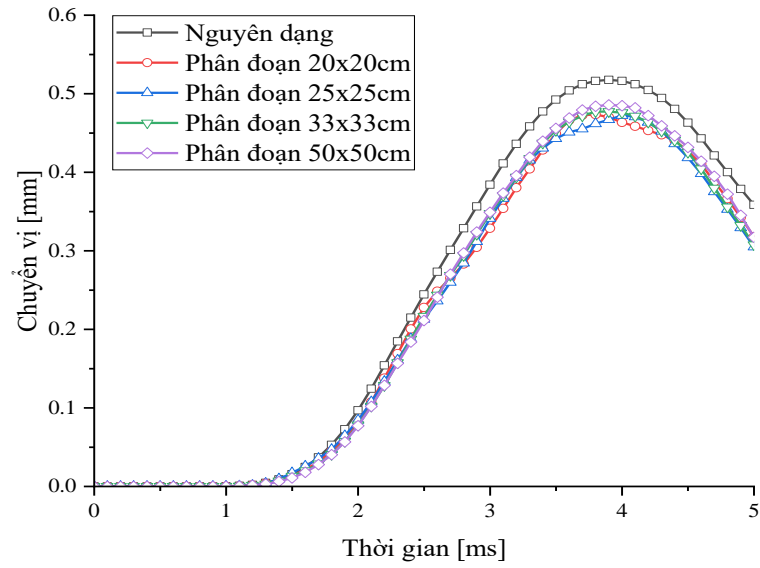
Hình 4.25. Phân đoạn kết cấu bảo vệ 33x33cm



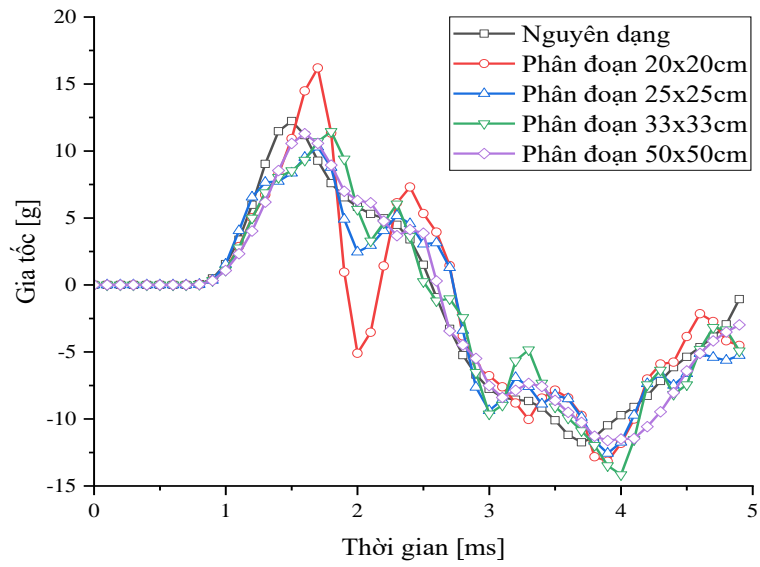
Hình 4.26. Phân đoạn kết cấu bảo vệ 50x50cm

4.2.4.2. Kết quả khảo sát

Tiến hành khảo sát hai yếu tố động học của kết cấu tấm thí nghiệm là chuyển vị và gia tốc giữa tấm, các kết quả khảo sát được thể hiện trong Hình 4.27 và Hình 4.28.



Hình 4.27. Chuyển vị tâm mô phỏng



Hình 4.28. Gia tốc tâm mô phỏng

Bảng 4.8. Bảng tổng hợp hiệu quả phân đoạn kết cấu bảo vệ

Tham số	Cấu trúc	Đơn vị	Kết quả	Chênh lệch (%)
Chuyển vị	Nguyên dạng		0.518	-
	20x20cm		0.474	-8.52
	25x25cm	mm	0.472	-8.76
	33x33cm		0.477	-7.80
	50x50cm		0.486	-6.18
Gia tốc	Nguyên dạng		12.23	-
	20x20cm		16.19	+32.38
	25x25cm	g	10.29	-15.88
	33x33cm		11.45	-6.39
	50x50cm		11.29	-7.67

Thông qua kết quả khảo sát cho thấy khi phân đoạn hợp lý vẫn cho thấy được hiệu quả của kết cấu bảo vệ mà có thể khắc phục được những nhược điểm của kết cấu bảo vệ nguyên dạng cả trong chế tạo và lắp đặt. Do đó, khi tính toán và cấu tạo kết cấu bảo vệ có thể chia nhỏ kết cấu để phù hợp với việc chế tạo và thi công ngoài thực tế.

4.2.5. Bàn luận kết quả khảo sát

Từ kết quả khảo sát mô phỏng các trường hợp cấu tạo kết cấu bảo vệ cho thấy:

Việc sử dụng các công thức trong mục 2.4.2 của Chương 2, để tính toán kết cấu bảo vệ cơ bản (tấm dàn lực - xốp) cho thấy các kết quả tính toán là phù hợp và đem lại hiệu quả tốt bảo vệ kết cấu trước tác động của áp lực nổ. Dựa trên cấu trúc cơ bản này làm căn cứ để phát triển các cấu trúc nhiều lớp khác và chia nhỏ kết cấu bảo vệ nhằm nâng cao hiệu quả bảo vệ cũng như phù hợp với thực tế chế tạo và lắp dựng.

Cấu trúc dạng nhiều lớp cho thấy hiệu quả giảm tải gia tăng đáng kể (chuyển vị trên 40% và gia tốc trên 50%) so với kết cấu cơ bản được cấu tạo chỉ gồm lớp xốp và tấm dàn lực ở phía trên. Bên cạnh đó việc bổ sung lõi chì thay cho lõi thép giữa các lớp xốp sẽ làm gia tăng hiệu quả bảo vệ tốt hơn (chuyển vị và gia tốc khoảng 8%).

Kết quả khảo sát cũng cho thấy việc chia nhỏ kết cấu bảo vệ hợp lý và phù hợp với thực tế kết cấu công trình cần bảo vệ để đảm bảo tốt hơn việc chế tạo

và thi công vẫn cho hiệu quả bảo vệ tốt (xu hướng tiếp tục giảm khoảng 6 - 8%).

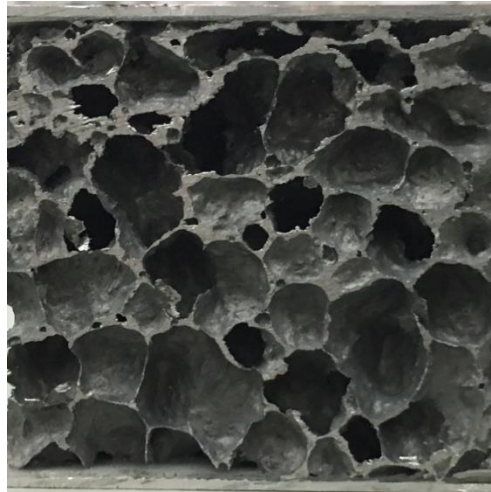
Từ kết quả khảo sát khuyến cáo cấu tạo kết cấu bảo vệ: tính toán cơ bản bộ hấp thụ theo công thức (2.32), sử dụng kết cấu nhiều lớp loại 3 chia đôi chiều dày lớp xốp, sử dụng vật liệu có trọng lượng riêng lớn cho lớp đàn lực giữa hai lớp xốp, phân nhỏ kết cấu bảo vệ phù hợp.

4.3. Cấu tạo kết cấu bảo vệ giảm tác dụng của áp lực nổ lên kết cấu công trình

Từ kết quả thử nghiệm nổ hiện trường và mô phỏng số cho thấy hiệu quả của vật liệu xốp trong việc cấu tạo thành kết cấu bảo vệ cho kết cấu công trình. Trong nội dung này sử dụng vật liệu xốp là nhôm bọt với ứng suất đoạn bằng cao hơn (được sử dụng nhiều trong các nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn trên thế giới), để bảo vệ cho kết cấu công trình chịu tác dụng từ vụ nổ có khối lượng nổ tương đối lớn thông qua khảo sát bằng mô phỏng số. Đối với vật liệu nhôm bọt, sử dụng mẫu nhôm thực tế trên thị trường để xác định các tham số của vật liệu thông qua các thí nghiệm cơ bản.

4.3.1. Vật liệu nhôm bọt

Mỗi loại vật liệu xốp có một khả năng hấp thụ năng lượng khác nhau tùy thuộc vào thêm biến dạng dài của vật liệu. Khi chịu xung lượng nổ lớn những loại vật liệu xốp thông thường gốc polimer rất khó đảm bảo khả năng hấp thụ năng lượng, do chiều dày sẽ rất lớn nên rất khó khăn cho việc cấu tạo kết cấu bảo vệ. Vật liệu xốp với vật liệu nền kim loại đặc biệt là nhôm bọt vừa có khả năng hấp thụ năng lượng lớn vừa có khối lượng nhẹ nên được quan tâm và sử dụng nhiều trong các ứng dụng hấp thụ áp lực nổ.



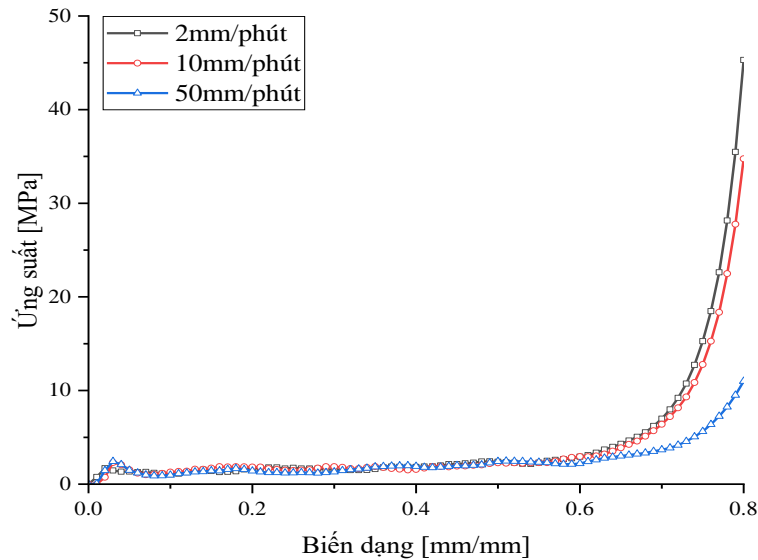
Hình 4.29. Mẫu nhôm bọt lỗ rỗng kín thực tế sử dụng trong nghiên cứu

Trong nội dung nghiên cứu này sẽ sử dụng kết quả nén mẫu nhôm bọt làm vật liệu đầu vào để cấu tạo kết cấu bảo vệ các cấu kiện dễ bị tổn thương có ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu lực của công trình.

Tiến hành thí nghiệm nén mẫu nhôm bọt kích thước 50x50x50mm trên máy kéo nén đa năng MTS với tốc độ nén khác nhau.



Hình 4.30. Thí nghiệm nén đơn trục mẫu nhôm bọt



Hình 4.31. Quan hệ ứng suất - biến dạng nén đơn trục mẫu nhôm bột

Kết quả quan hệ ứng suất - biến dạng ở các tốc độ nén khác nhau cho thấy năng lượng hấp thụ hiệu dụng (trong khoảng biến dạng đến 60%) gần như không thay đổi. Điều này cho thấy việc sử dụng đoạn năng lượng hấp thụ hiệu dụng từ thí nghiệm nén đơn trục vào tính toán kết cấu bảo vệ vụ nổ có thể chấp nhận được. Các thông số vật liệu của nhôm bột được thể hiện trong Bảng 4.9, hệ số Poisson lựa chọn bằng 0 như đã đề cập trong mục 2.3.3.

Bảng 4.9. Tham số vật liệu nhôm bột

$\rho(\text{kg/m}^3)$	E(Pa)	ν_f
350	90.63xE6	0.0

4.3.2. Tính toán và lựa chọn kết cấu bảo vệ

4.3.2.1. Đặt bài toán

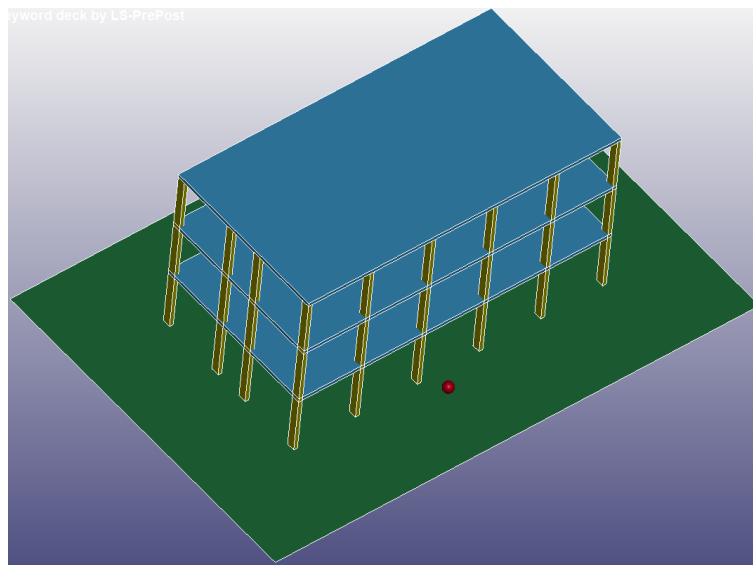
Thực tế hiện nay các vụ nổ có chủ đích là một mối đe dọa lớn đến an ninh, an toàn dân sinh và ảnh hưởng rất lớn đến các công trình xây dựng, cũng như gây ra những thiệt hại nặng nề.



Hình 4.32. Vụ tấn công khủng bố ngày 19.4.1995 nhằm vào Tòa nhà Liên bang Murrah tại thành phố Oklahoma, Mỹ

Sau những sự kiện này việc thiết kế và xây dựng các tòa nhà, đặc biệt là các tòa nhà công quyền đang nhận được sự quan tâm lớn từ các kỹ sư kết cấu [11]. Tuy nhiên, có rất nhiều công trình đã được xây dựng mà chưa được tính toán thiết kế với tác động của vụ nổ cần phải được áp dụng các phương thức khác để bảo vệ chúng trước tác động của áp lực từ vụ nổ.

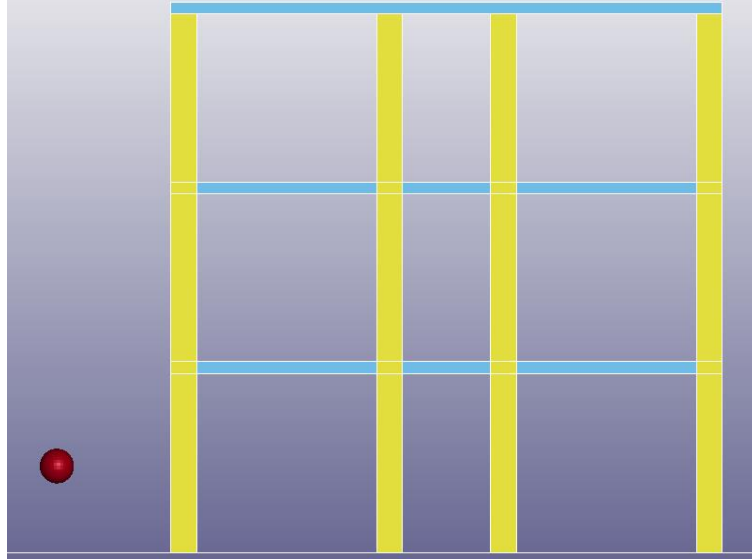
Trong nội dung nghiên cứu sử dụng mẫu nhà điển hình 3 tầng thường dùng cho thiết kế cơ sở hành chính, với các tải trọng thiết kế thông thường lấy theo tiêu chuẩn (TCVN 5574:2012).



Hình 4.33. Công trình 3 tầng dạng điển hình

Với kết cấu công trình dạng khung chịu lực thì cấu kiện cột khi bị tổn thương sẽ nguy hại rất lớn đến khả năng chịu lực và ổn định của công trình. Do

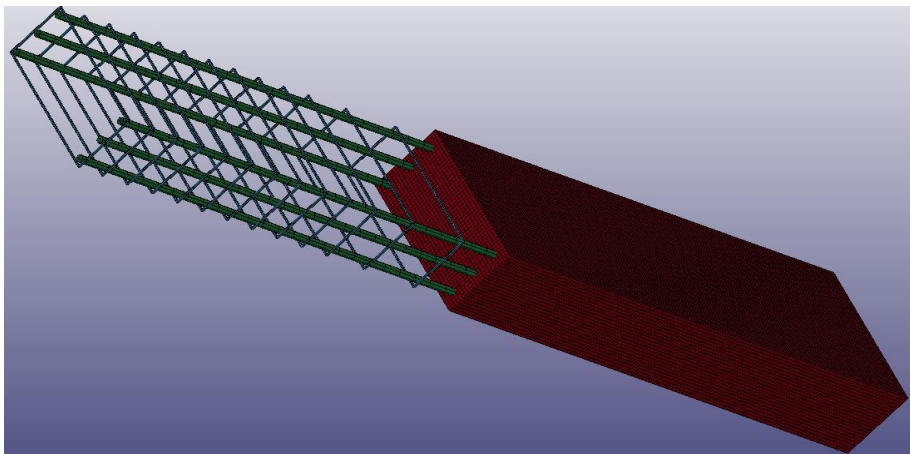
đó, để nghiên cứu giải pháp giảm tác động của áp lực nổ lên kết cấu công trình, thực hiện nghiên cứu tác động của áp lực nổ lên cấu kiện cột tầng 1. Giả thiết vụ nổ cách vị trí cột tầng 1 với khoảng cách 2m và cách mặt đất 1.55m (vị trí giữa cột), trọng lượng thuốc nổ là 50kg (TNT).



Hình 4.34. Vị trí và đối tượng nghiên cứu

4.3.2.2. Cấu kiện cột nghiên cứu

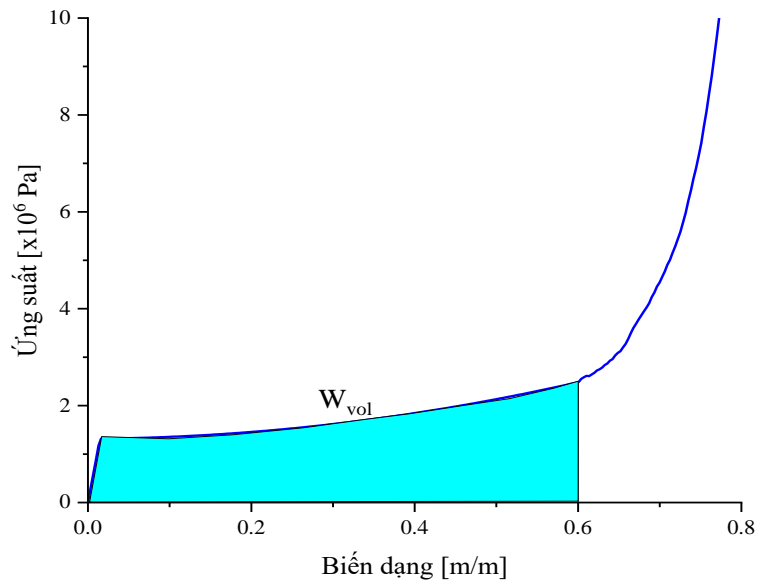
Để đơn giản hóa bài toán đã đặt ra cũng như để có thể đáp ứng được yêu cầu mô phỏng do những hạn chế về phần cứng máy tính tiến hành tách kết cấu cột tầng 1 với giả thiết chân và đỉnh cột liên kết ngàm và tiến hành nghiên cứu mô phỏng số. Cấu tạo cột nghiên cứu với chiều cao 3.1m, kích thước tiết diện cột 22x45cm, sử dụng 6 thanh thép $\phi 20$ bố trí làm việc 1 phương theo phương chịu lực chính của công trình, sử dụng thép đai $\phi 6$ khoảng cách 100mm cho 1/3 về phía chân và đỉnh cột còn lại giữa cột khoảng cách là 200mm giữa các đai.



Hình 4.35. Cấu tạo cột nghiên cứu

4.3.2.3. Tính toán kết cấu bảo vệ

Lựa chọn tấm nhôm bọt dày 10cm, phía trên đặt tấm thép dãn lực. Thực hiện tính toán xung lượng vụ nổ (J_s) theo công thức (2.28), chiều dày tấm thép dãn lực xác định theo công thức (4.1). Năng lượng hấp thụ của vật liệu xốp (W_{vol}) được xác định thông qua tích phân số trên đường cong quan hệ ứng suất – biến dạng từ thực nghiệm nén đơn trục mẫu nhôm bọt, với ứng suất lấy đơn vị là (Pa) và trong khoảng biến dạng đến 60%.



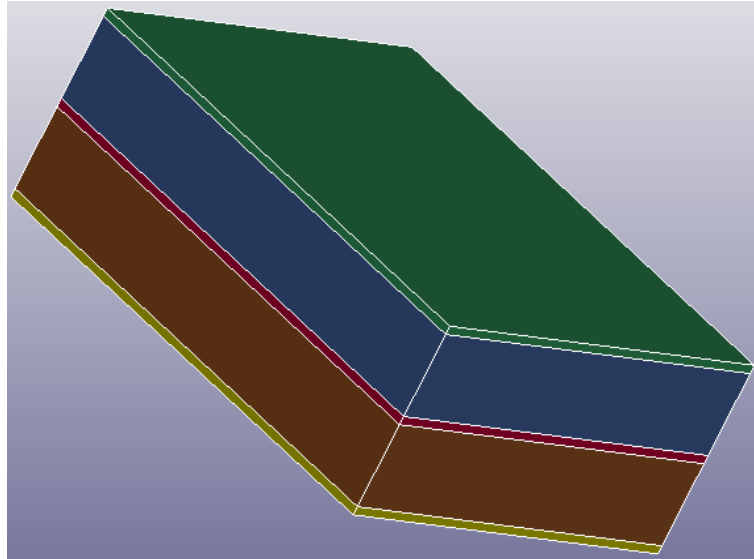
Hình 4.36. Năng lượng hấp thụ của vật liệu nhôm bọt (W_{vol})

Bảng 4.10. Bảng kết quả tính kết cấu bảo vệ

Thông số	J_s Nsm^{-2}	W_{vol} J/m^3	h_{blast} m	ρ_b kg/m^3	δ_{td} mm	δ_{td} (chọn) mm
Kết quả	2715.65	1.022×10^6	0.1	7850	4.60	5.0

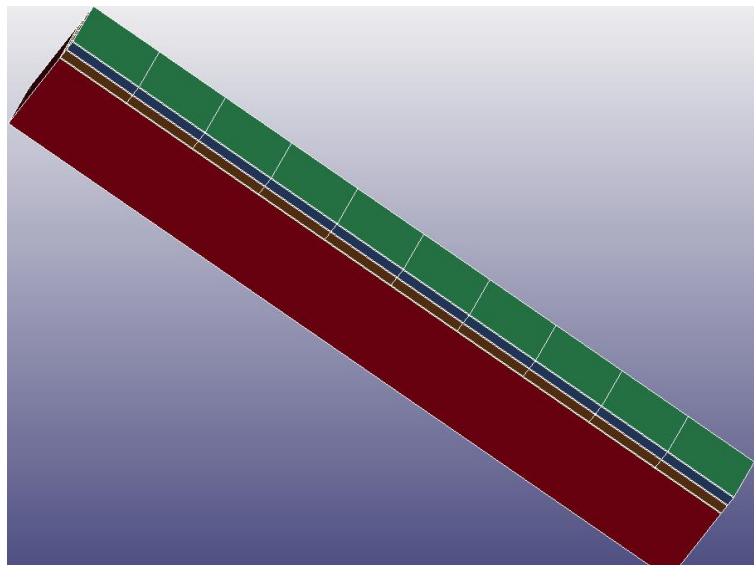
4.3.2.4. Lựa chọn cấu tạo kết cấu bảo vệ

Từ các kết quả khảo sát về cấu trúc hợp lý cấu tạo kết cấu bảo vệ như đã khảo sát ở mục 4.2, lựa chọn kết cấu bảo vệ với cấu trúc nhiều lớp và lớp chì dày 5mm đặt giữa hai lớp nhôm bọt dày 50mm.



Hình 4.37. Cấu trúc nhiều lớp cho kết cấu bảo vệ

Sử dụng phương án phân nhỏ kết cấu bảo vệ thành các phân đoạn dài 310mm đặt phía trước cột để tiếp nhận tác động trực tiếp của áp lực nổ.



Hình 4.38. Phân đoạn kết cấu bảo vệ cột khảo sát

4.3.2.5. Phương thức liên kết kết cấu bảo vệ

Đối với cấu trúc bảo vệ sử dụng liên kết keo dán giữa các bề mặt lớp vật liệu, đặc tính này được mô hình hóa trong mô phỏng số bằng cách sử dụng mô tả tiếp xúc hai chiều (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE) với các hệ số FS và FD bằng 0.2.

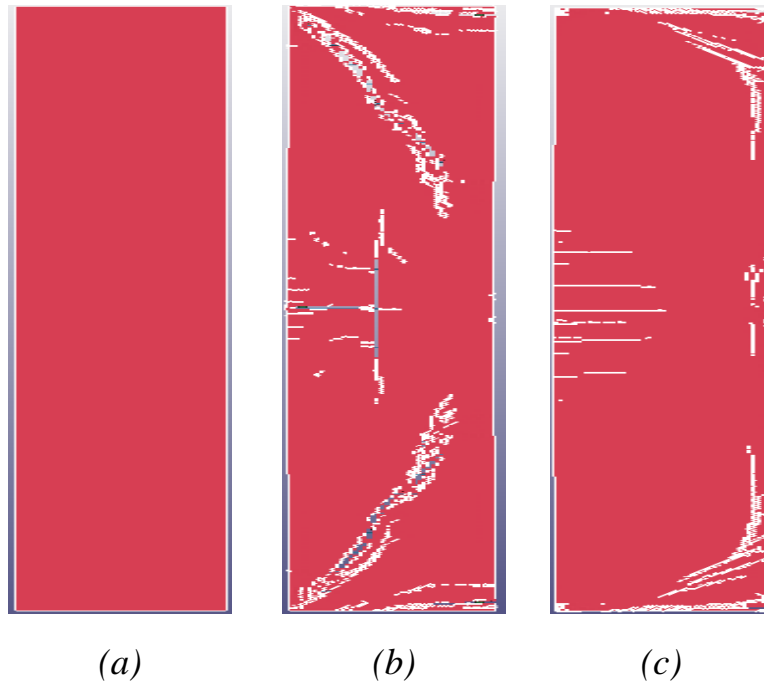
Đối với liên kết giữa các khối kết cấu bảo vệ với cấu kiện cột BTCT, sử dụng liên kết chốt giữ tại bốn góc của một phân đoạn kết cấu bảo vệ với cột

BTCT. Liên kết dạng này được mô hình hóa thông qua việc gắn các nút trên bề mặt của hai cấu trúc (trong phạm vi 04 phần tử, 9 nút chung). Phần còn lại của tiếp xúc bề mặt giữa kết cấu bảo vệ và mặt của cột BTCT sử dụng mô tả tiếp xúc hai chiều (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE) với các hệ số FS và FD bằng 0.

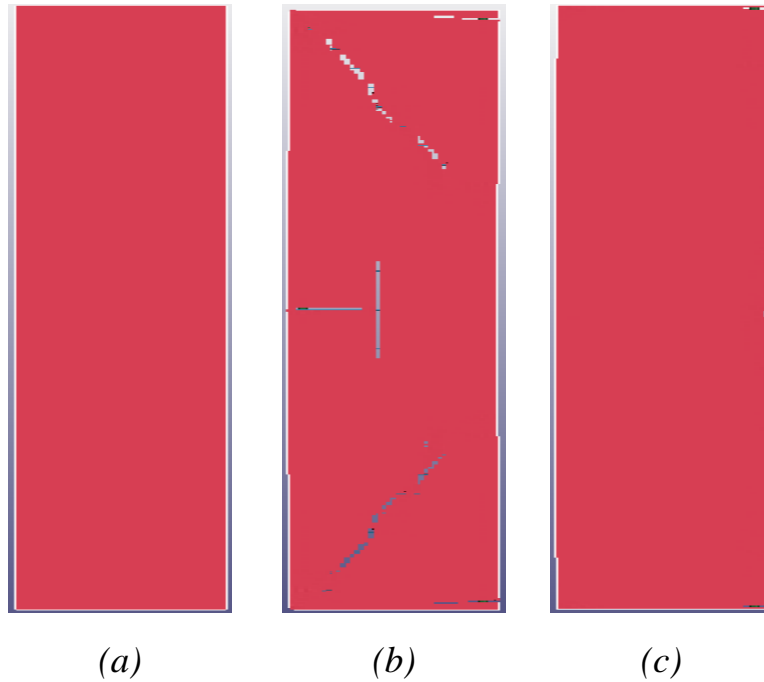
Phần tiếp xúc mặt giữa các khối kết cấu bảo vệ sử dụng mô tả tiếp xúc hai chiều (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE) với các hệ số FS và FD bằng 0.

4.3.2.6. Kết quả khảo sát bằng mô phỏng số

Nhằm đánh giá hiệu quả của kết cấu bảo vệ được tính toán lựa chọn như trên, tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng số với các phương pháp mô phỏng và lựa chọn mô hình đã được kiểm chứng trong Chương 3, mục 4.1 và 4.2.

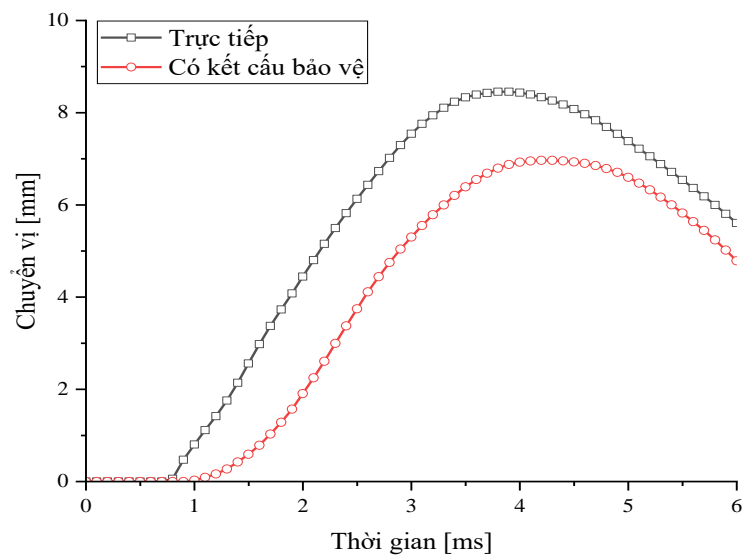


Hình 4.39. Hình ảnh vết nứt trên cột: (a) ban đầu, (b) trực tiếp, (c) bảo vệ

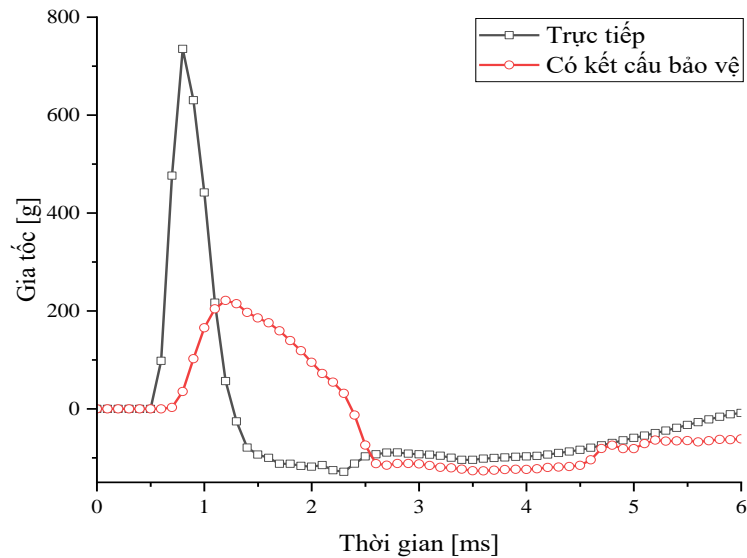


Hình 4.40. Hình ảnh phá hủy cột: (a) ban đầu, (b) trực tiếp, (c) bảo vệ

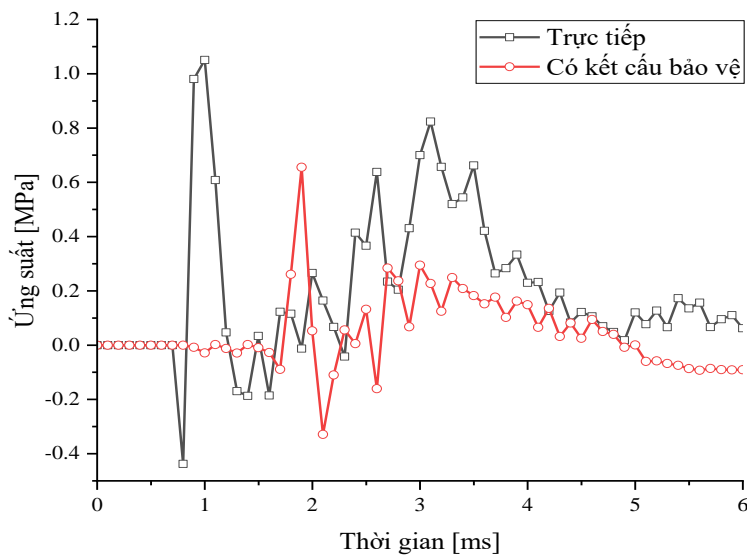
Các kết quả so sánh chuyển vị, gia tốc và ứng suất được xác định tại vị trí giữa cột ở mặt sau so với vị trí lưng nở.



Hình 4.41. Chuyển vị cột mô phỏng



Hình 4.42. Gia tốc cột mô phỏng



Hình 4.43. Ứng suất theo phương chịu lực chính

Bảng 4.11. Bảng tổng hợp kết quả

Tham số	Đơn vị	Trực tiếp	Kết cấu bảo vệ	Chênh lệch (%)
Chuyển vị	mm	8.46	6.97	17.60
Gia tốc	g	735.34	221.47	69.88
Ứng suất	MPa	1.05	0.66	37.63

4.3.2.7. Bàn luận kết quả

Thông qua kết quả mô phỏng cho thấy, vật liệu xốp khi được cấu tạo phù hợp để tạo thành kết cấu bảo vệ có khả năng làm giảm mạnh mẽ tác động của áp lực nổ lên kết cấu công trình đem lại hiệu quả bảo vệ tốt. Khi thiết kế kết cấu bảo vệ cần luôn lưu ý đến khối lượng của lượng nổ, khoảng cách từ tâm nổ

đến kết cấu và khả năng hấp thụ xung lượng nổ của vật liệu để có những lựa chọn phù hợp nhất.

4.4. Kết luận chương

Nội dung của chương đã nghiên cứu giải pháp sử dụng kết cấu bảo vệ bằng vật liệu xốp cứng không phục hồi để giảm tác động của áp lực nổ lên kết cấu công trình, bao gồm các nội dung tính toán và lựa chọn kết cấu bảo vệ. Các kết quả tính toán, lựa chọn kết cấu bảo vệ được kiểm chứng thông qua thực nghiệm hiện trường và cho kết quả khả quan. Điều này cho thấy các kết quả tính toán lý thuyết được dẫn luận trong luận án có thể áp dụng được cho tính toán và thiết kế thực tế bộ hấp thụ năng lượng bằng vật liệu xốp.

Các nội dung khảo sát thông qua thử nghiệm số dựa trên mô hình được chuẩn hóa đã đưa ra được các giải pháp cụ thể như sử dụng cấu trúc nhiều lớp, kết hợp lõi vật liệu nặng và phân nhỏ kết cấu bảo vệ để vừa tăng khả năng bảo vệ, cũng như phù hợp hơn với công tác chế tạo, thi công lắp đặt ngoài thực tế. Các nội dung khảo sát cho thấy hiệu quả bảo vệ gia tăng tốt, làm giảm trên 40% chuyển vị đỉnh và trên 50% gia tốc đỉnh.

Kết quả áp dụng giải pháp kết cấu bảo vệ nhiều lớp với lõi nhôm bọt ứng dụng bảo vệ cấu kiện cột BTCT chịu áp lực vụ nổ lớn cho thấy hiệu quả rõ rệt. Chuyển vị đỉnh giữa cột giảm hơn 17%, gia tốc đỉnh giữa cột giảm gần 70% và ứng suất đỉnh giữa cột giảm hơn 37%.

Từ những kết quả nghiên cứu trong chương cho thấy hiệu quả tốt khi sử dụng vật liệu xốp cấu tạo thành kết cấu bảo vệ với cấu trúc phù hợp để tiếp nhận, giảm áp lực nổ gây ra. Việc dự tính áp lực nổ là hết sức quan trọng để có thể thiết kế được kết cấu bảo vệ phù hợp cho kết cấu công trình cần được bảo vệ. Với kết cấu bảo vệ có cấu trúc nhiều lớp thì ngoài lõi là vật liệu xốp, việc lựa chọn và cấu tạo tấm dàn lực cũng hết sức quan trọng.

Đối với mỗi công trình cụ thể nên kết hợp với những giải pháp khác như đẩy xa tâm nổ ra khỏi công trình, tăng cường độ cứng kết cấu thông qua gia cường bằng tấm cốt sợi, phun sơn polyurea,... Điều này giúp giảm áp lực nổ đến kết cấu, tăng độ cứng cho công trình và từ đó tăng thêm hiệu quả bảo vệ.

Các kết quả nghiên cứu là những gợi ý hữu ích cho giải pháp bảo vệ kết cấu công trình trước tác động của áp lực từ vụ nổ.

KẾT LUẬN CHUNG

1. Những kết quả chính và đóng góp của luận án

1.1. Những kết quả chính của luận án

Từ những yêu cầu đặt ra của thực tế khi kết cấu các công trình dễ bị tổn thương bởi tác động của áp lực nổ nhất là những công trình không được tính toán thiết kế cho loại tải trọng đặc biệt này. Luận án đã trình bày những kết quả nghiên cứu tương đối đầy đủ về cơ chế ứng xử, khả năng ứng dụng, phương pháp mô hình hóa của vật liệu,... từ các hiểu biết này đã thực hiện các thí nghiệm và mô phỏng để đưa ra được giải pháp kết cấu bảo vệ sử dụng vật liệu xếp phù hợp để giảm tác động của áp lực nổ lên kết cấu công trình.

Những kết quả chính đạt được như sau:

Tổng quan được vấn đề cần nghiên cứu từ đó nêu bật được những nội dung khoa học cần nghiên cứu trong luận án.

Làm rõ được cơ chế ứng xử, khả năng ứng dụng của vật liệu xếp khi chịu áp lực nổ. Xác định và lựa chọn được phương pháp tính toán vật liệu xếp kích thước lớn dựa trên mô phỏng số.

Xây dựng và chuẩn hóa được mô hình mô phỏng số trên phần mềm LS-DYNA thông qua việc xác minh chéo kết quả mô phỏng với kết quả thí nghiệm.

Nghiên cứu, đề xuất giải pháp cấu tạo kết cấu bảo vệ sử dụng vật liệu xếp giảm áp lực nổ cho kết cấu công trình.

1.2. Những đóng góp của luận án

Xác định được tính chất cơ học của vật liệu xếp, khả năng hấp thụ năng lượng của áp lực sóng nổ, giảm rung và giảm chấn của vật liệu.

Bằng thực nghiệm kết hợp với mô phỏng số trong LS-DYNA đã chỉ ra được phương thức mô phỏng, các khuyến cáo cho việc sử dụng mô hình vật liệu và xử lý tiếp xúc.

Đề xuất được giải pháp kết cấu bảo vệ kết cấu công trình bằng sử dụng vật liệu xếp cứng không phục hồi, kết cấu nhiều lớp và phân nhỏ kết cấu bảo vệ.

2. Hạn chế của luận án và hướng nghiên cứu tiếp theo

Chưa nghiên cứu ảnh hưởng của cấu trúc vi mô vật liệu xếp đến hiệu quả hấp thụ năng lượng áp lực nổ.

Mới đề cập đến vật liệu xốp cứng không phục hồi, cần tiếp tục nghiên cứu các loại vật liệu đàn hồi và vật liệu tự nhiên khác.

Mới nghiên cứu trường hợp áp lực nổ do sóng xung kích trong không khí, cần tiếp tục nghiên cứu cấu trúc bảo vệ cho các trường hợp nổ gần, nổ trong các môi trường khác.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN ĐÃ CÔNG BỐ

1. Lê Anh Tuấn, Nguyễn Công Nghị, Tạ Đức Tuấn (2017). *Thí nghiệm khả năng giảm áp lực nổ lên kết cấu dầm trong môi trường đất bằng vật liệu đàn hồi*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng - Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng (IBST), ISSN 1859-1566, số 3/2017.
2. Nguyễn Công Nghị, Lê Anh Tuấn, Trần Trung Đức (2018). *Nghiên cứu cơ chế giảm tác dụng nổ của vật liệu xốp*. Hội nghị Cơ học toàn quốc lần X, ISBN: 978-604-913-722-8, Tập III - Cơ học Vật rắn - Quyển 2, Hà Nội, 08-09/12/2017.
3. Nguyễn Công Nghị, Lê Anh Tuấn, Tạ Đức Tuấn, Đinh Quang Trung (2020). *Nghiên cứu ảnh hưởng kích thước lưới mô hình phần tử hữu hạn với hội tụ kết quả thông qua xác minh chéo với kết quả thực nghiệm vụ nổ trong không khí*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng - Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng (IBST), ISSN 1859-1566, số 4/2020.
4. Nguyễn Công Nghị, Lê Anh Tuấn, Đinh Quang Trung (2021). *Nghiên cứu mô hình vật liệu trong LS-DYNA của xốp cứng không phục hồi chịu tải trọng nổ thông qua dữ liệu thực nghiệm*. Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học Cán bộ trẻ lần thứ XVI - Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng (IBST), ISBN: 978-604-82-6534-2, 11/2021.
5. Nguyễn Công Nghị, Lê Anh Tuấn, Đinh Quang Trung (2022). *Nghiên cứu đánh giá mô hình vật liệu xốp XPS trong LS-DYNA thông qua dữ liệu thực nghiệm*. Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng - Đại học Xây dựng Hà Nội, ISSN 2615-9058, Tập 16 số 2V, 5/2022.
[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(2V\)-13](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(2V)-13).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N.Q. Trung, L.H. Đức, V.T. Tùng (1998). *Giáo trình Công tác nổ - Tập I*. Học viện kỹ thuật quân sự.
- [2] N.T. Tá, V.Đ. Lợi, Đ.V. Đích (2008). *Giáo trình công sự - tập I*. Học viện Kỹ thuật Quân sự.
- [3] H.S. Giao, Đ.T. Thắng, L.V. Quyền, H.T. Chung (2010). *Nổ hóa học, lý thuyết và thực tiễn*. Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật.
- [4] Đ.T. Thắng, B.X. Nam, T.Q. Hiếu (2015). *Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình*. Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ.
- [5] C. Naito, K. Wheaton (2006). *Blast assessment of load-bearing reinforced concrete shear walls*. Practice periodical on Structural design and Construction. 11, 112-121.
- [6] M.M. Alhadid, A.M. Soliman, M.L. Nehdi, M.A. Youssef (2014). *Critical overview of blast resistance of different concrete types*. Magazine of concrete research. 66, 72-81.
- [7] J.L. Hudson, D. Darwin (2005). *Evaluation and repair of blast damaged reinforced concrete beams*. University of Kansas Center for Research, Inc.
- [8] A. Ibrahim, H. Salim, I. Flood (2011). *Damage Size Prediction of Reinforced Concrete Slabs under Blast Loads Using Artificial Neural Networks*. Structures Congress 2011, pp. 1530-1537.
- [9] M. Barakat, J. Hetherington, AUTODYN (1999). *Architectural approach to reducing blast effects on structures*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings. 134, 333-343.
- [10] W.B. Sun, Y. Jiang, W.Z. He (2011). *An overview on the blast loading and blast effects on the RC structures*. Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ, pp. 77-80.
- [11] C. Wu, D. Oehlers, M. Rebstrost, J. Leach, A. Whittaker (2009). *Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs*. Engineering structures. 31, 2060-2069.
- [12] E. Hinman (2003). *Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks*. Risk management series FEMA. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [13] U. DoD (2005). *Guidelines, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03*. Department of Defence (DoD).
- [14] Đ.V. Đích, V.Đ. Lợi (2010). *Giáo trình công sự tập 2*. Nhà xuất bản Quân đội nhân dân.

- [15] V.Đ. Lợi, N.T. Tá (2004). *Giáo trình công sự tập 3*. Học viện kỹ thuật quân sự.
- [16] A. Bentur, S. Mindess (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. Crc Press.
- [17] A.M. Brandt (2008). *Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering*. Composite structures. 86, 3-9.
- [18] J.S. Nam, G.Y. Kim, H. Miyauchi, Y.S. Jeon, H.K. Hwang (2011). *Evaluation on the blast resistance of fiber reinforced concrete*. Advanced Materials Research, Trans Tech Publ, pp. 1588-1593.
- [19] J. Chu-jie, S. Wei, G. Pei-zheng (2008). *Study on steel fiber reinforced high strength concrete subject to blast loading*. 工程力学. 25, 0-166.
- [20] M. Yamaguchi, K. Murakami, K. Takeda, Y. Mitsui (2011). *Blast resistance of polyethylene fiber reinforced concrete to contact detonation*. Journal of Advanced Concrete Technology. 9, 63-71.
- [21] M. Maalej, S.T. Quek, J. Zhang (2005). *Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact*. Journal of Materials in Civil Engineering. 17, 143-152.
- [22] Q. Song, A. Heidarpour, X. Zhao, L. Han (2012). *FE modeling of flexible I-beam to square hollow section column connections subjected to earthquake and subsequent fire*. Proceedings of the 14th International Symposium on Tubular Structures, London, UK.
- [23] S. Millard, T. Molyneaux, S. Barnett, X. Gao (2010). *Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading*. International Journal of Impact Engineering. 37, 405-413.
- [24] N.-H. Yi, J.-H.J. Kim, T.-S. Han, Y.-G. Cho, J.H. Lee (2012). *Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete*. Construction and Building Materials. 28, 694-707.
- [25] V.Đ. Lợi, N.N. Thủy (2019). *Nghiên cứu ứng dụng vật liệu mới trong xây dựng công trình quốc phòng và nâng cấp kháng lực công trình quốc phòng đã có trên quần đảo Trường Sa*.
- [26] L.C. Muszynski, M.R. Purcell (2003). *Composite reinforcement to strengthen existing concrete structures against air blast*. Journal of Composites for Construction. 7, 93-97.
- [27] A.G. Razaqpur, A. Tolba, E. Contestabile (2007). *Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates*. Composites Part B: Engineering. 38, 535-546.

- [28] J.-H. Ha, N.-H. Yi, J.-K. Choi, J.-H.J. Kim (2011). *Experimental study on hybrid CFRP-PU strengthening effect on RC panels under blast loading*. Composite Structures. 93, 2070-2082.
- [29] K. Ohkubo, M. Beppu, T. Ohno, K. Satoh (2008). *Experimental study on the effectiveness of fiber sheet reinforcement on the explosive-resistant performance of concrete plates*. International Journal of Impact Engineering. 35, 1702-1708.
- [30] M. Carriere, P. Heffernan, R. Wight, A. Braimah (2009). *Behaviour of steel reinforced polymer (SRP) strengthened RC members under blast load*. Canadian Journal of Civil Engineering. 36, 1356-1365.
- [31] M.F. Ashby, T. Evans, N.A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley, L. Gibson (2000). *Metal foams: a design guide*. Elsevier.
- [32] T. Mukai, H. Kanahashi, K. Higashi, T. Miyoshi, M. Mabuchi, T. Nieh (1999). *Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading*. Scripta materialia. 40.
- [33] B. Skews, M. Atkins, M. Seitz (1992). *Gas dynamic and physical behaviour of compressible porous foams struck by a weak shock wave*. shock waves. Springer, pp. 511-516.
- [34] A. Hanssen, L. Enstock, M. Langseth (2002). *Close-range blast loading of aluminium foam panels*. International journal of impact engineering. 27, 593-618.
- [35] C. Wu, L. Huang, D.J. Oehlers (2011). *Blast testing of aluminum foam-protected reinforced concrete slabs*. Journal of Performance of Constructed Facilities. 25, 464-474.
- [36] H. Bornstein, K. Ackland (2013). *Evaluation of energy absorbing materials under blast loading*. WIT Transactions on Engineering Sciences. 77, 125-136.
- [37] A. Schenker, I. Anteby, E. Gal, Y. Kivity, E. Nizri, O. Sadot, R. Michaelis, O. Levintant, G. Ben-Dor (2008). *Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads*. International Journal of Impact Engineering. 35, 184-198.
- [38] G. Ma, Z. Ye (2007). *Analysis of foam claddings for blast alleviation*. International Journal of Impact Engineering. 34, 60-70.
- [39] R. Montanini (2005). *Measurement of strain rate sensitivity of aluminium foams for energy dissipation*. International Journal of Mechanical Sciences. 47, 26-42.
- [40] D. Karagiozova, G. Nurick, G. Langdon, S.C.K. Yuen, Y. Chi, S. Bartle (2009). *Response of flexible sandwich-type panels to blast loading*. Composites Science and Technology. 69, 754-763.

- [41] F. Zhu (2008). *Impulsive loading of sandwich panels with cellular cores*. Swinburne University of Technology, Faculty of Engineering and Industrial
- [42] A. Schenker, I. Anteby, E. Nizri, B. Ostraich, Y. Kivity, O. Sadot, O. Haham, R. Michaelis, E. Gal, G. Ben-Dor (2005). *Foam-protected reinforced concrete structures under impact: experimental and numerical studies*. Journal of structural Engineering. 131, 1233-1242.
- [43] T.-T.N. Nguyen, W.G. Proud (2017). *An investigation of a reticulated foam-perforated steel sheet combination as a blast mitigation structure*. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, pp. 120008.
- [44] H. Ousji, B. Belkassam, M. Louar, B. Reymen, J. Martino, D. Lecompte, L. Pyl, J. Vantomme (2017). *Air-blast response of sacrificial cladding using low density foams: Experimental and analytical approach*. International Journal of Mechanical Sciences. 128, 459-474.
- [45] S.P. Santosa, F. Arifurrahman, M.H. Izzudin, D. Widagdo, L. Gunawan (2017). *Response analysis of blast impact loading of metal-foam sandwich panels*. Procedia engineering. 173, 495-502.
- [46] Y. Xia, C. Wu, T. Bennett (2017). *An analytical model of linear density foam-protected structure under blast loading*. International Journal of Protective Structures. 8, 454-472.
- [47] M.S. Hoo Fatt, M. Alkhtany, D. Sirivolu (2018). *Blast mitigation effects of foam-core, composite sandwich structures*. Blast Mitigation Strategies in Marine Composite and Sandwich Structures. Springer, pp. 265-280.
- [48] I.S. Sandhu, M.B. Kala, M. Thangadurai, M. Singh, P.S. Alegaonkar, D. Saroha (2018). *Experimental study of blast wave mitigation in open cell foams*. Materials Today: Proceedings. 5, 28170-28179.
- [49] J. Xu, J. Liu, W. Gu, X. Liu, T. Cao (2018). *Shock wave attenuation characteristics of aluminum foam sandwich panels subjected to blast loading*. Shock and Vibration. 2018.
- [50] H. Andami, H. Toopchi-Nezhad (2020). *Performance assessment of rigid polyurethane foam core sandwich panels under blast loading*. International Journal of Protective Structures. 11, 109-130.
- [51] C. Dey, M. Thorat, S.N. Sahu, K. Akella, A.A. Gokhale (2022). *Evaluation of optimum foam density for effective design of blast absorbers*. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 29, 400-407.
- [52] M.F. Ashby, L.J. Gibson (1997). *Cellular solids: structure and properties*. Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK. 175-231.
- [53] A. Dementjev, O. Tarakanov (1970). *Influence of the cellular structure of foams on their mechanical properties*. Mech Polym. 4, 594-602.

- [54] R. Renz, E. GW (1982). *Calculation of deformation of cellular plastics by applying the finite element method.*
- [55] R. Lakes, P. Rosakis, A. Ruina (1993). *Microbuckling instability in elastomeric cellular solids.* Journal of materials science. 28, 4667-4672.
- [56] H. Zhu, J. Knott, N. Mills (1997). *Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells.* Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 45, 319-343.
- [57] W. Ko (1965). *Deformations of foamed elastomers.* Journal of Cellular Plastics. 1, 45-50.
- [58] J. Lederman (1971). *The prediction of the tensile properties of flexible foams.* Journal of Applied Polymer Science. 15, 693-703.
- [59] A. Cunningham (1981). *Modulus anisotropy of low-density cellular plastics: an aggregate model.* Polymer. 22, 882-885.
- [60] A. Cunningham (1984). *The mechanical anisotropy of low-density cellular plastics.* Cellular polymers. 3, 133-143.
- [61] W. Warren, A. Kraynik (1988). *The linear elastic properties of open-cell foams.*
- [62] G. Gioumouisis (1963). *Shapes of cells in polymer foams.* Journal of Applied Polymer Science. 7, 947-957.
- [63] W. Warren, A. Kraynik (1987). *Foam mechanics: the linear elastic response of two-dimensional spatially periodic cellular materials.* Mechanics of Materials. 6, 27-37.
- [64] R. Hall (1993). *Effective moduli of cellular materials.* Journal of reinforced plastics and composites. 12, 186-197.
- [65] S.D. Papka, S. Kyriakides (1994). *In-plane compressive response and crushing of honeycomb.* Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 42, 1499-1532.
- [66] E.B. Matzke (1946). *The three-dimensional shape of bubbles in foam—an analysis of the role of surface forces in three-dimensional cell shape determination.* American journal of Botany. 33, 58-80.
- [67] V. Valuyskikh (1990). *Computer simulation of structure and calculation of physico-mechanical characteristics of foamed plastics. II, Study of elastic foamed plastics.* Cellular polymers. 9, 12-24.
- [68] A. Gent, A. Thomas (1963). *Mechanics of foamed elastic materials.* Rubber Chemistry and Technology. 36, 597-610.
- [69] G. Voronoi (1908). *Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les*

paralléloèdres primitifs. Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal). 1908, 198-287.

[70] D. Weaire, M. Fortes (1994). *Stress and strain in liquid and solid foams*. Advances in Physics. 43, 685-738.

[71] B. Boots (1982). *The arrangement of cells in "random" networks*. Metallography. 15, 53-62.

[72] H.S. Abdullahi, Y. Liang, S. Gao (2019). *Predicting the elastic properties of closed-cell aluminum foams: a mesoscopic geometric modeling approach*. SN Applied Sciences. 1, 380.

[73] N. Mills (2007). *Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide*. Elsevier.

[74] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, J. Ramsay (2007). *Blast loading and blast effects on structures—an overview*. Electronic Journal of Structural Engineering. 7, 76-91.

[75] N.H. Yi, S.B. Kim, J.-H.J. Kim, J.K. Choi (2009). *Behavior analysis of concrete structure under blast loading:(I) experiment procedures*. Journal of the Korean Society of Civil Engineers. 29, 557-564.

[76] S. Ouellet, D. Cronin, D. Doman, D. Bourget, M. Worswick (2004). *Parametric study of an anti-trauma layer to reduce BABT*. Proceedings of Personal Armor System Symposium, The Hague, The Netherlands, pp. 129-138.

[77] S. Ouellet, D. Cronin, M. Worswick (2006). *Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions*. Polymer testing. 25, 731-743.

[78] L.J. Gibson (1988). *Cellular solids*. Microelectronic Engineering. 41, 1.

[79] J. McArthur, C. Salisbury, D. Cronin, M. Worswick, K. Williams (2003). *High strain rate characterization of shock absorbing materials for landmine protection concepts*. Shock and Vibration. 10, 179-186.

[80] J.G. Nerenberg (2000). *Blast wave loading of polymeric foams*.

[81] V. Deshpande, N. Fleck (2000). *High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams*. International Journal of Impact Engineering. 24, 277-298.

[82] L. Kenny (1996). *Mechanical properties of particle stabilized aluminum foam*. Materials Science Forum, Trans Tech Publ, pp. 1883-1890.

[83] J. Lankford, K. Dannemann (1998). *Strain rate effects in porous materials*. MRS Online Proceedings Library (OPL). 521.

- [84] J. Shen, G. Lu, D. Ruan (2010). *Compressive behaviour of closed-cell aluminium foams at high strain rates*. Composites Part B: Engineering. 41, 678-685.
- [85] D. Townsend, S. Parry, N. Bourne, P. Withers, D. Wood, G. Appleby-Thomas, A. Hameed (2017). *On the compression of aluminium foam structures under shock*. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, pp. 110010.
- [86] N. Novak, M. Vesenjok, I. Duarte, S. Tanaka, K. Hokamoto, L. Krstulović-Opara, B. Guo, P. Chen, Z. Ren (2019). *Compressive behaviour of closed-cell aluminium foam at different strain rates*. Materials. 12, 4108.
- [87] B. Sambamoorthy, T. Halder (2001). *Characterization and component level correlation of energy absorbing (EA) polyurethane foams (PU) using LS-DYNA material models*. Proceedings of the third LS_DYNA European conference.
- [88] B. Croop, H. Lobo, N. DatapointLabs (2009). *Selecting material models for the simulation of foams in LS-DYNA*. 7th European LS-Dyna Conference, pp. 1-6.
- [89] Q.H. Shah, A. Topa (2014). *Modeling large deformation and failure of expanded polystyrene crushable foam using LS-DYNA*. Modelling and Simulation in Engineering. 2014.
- [90] K. Ramaswamy, B. Patham, V. Savic, B. Tripathy (2017). *Stable and Accurate LS-DYNA Simulations with Foam Material Models: Optimization of Finite Element Model Parameters*. SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 10, 226-233.
- [91] Công-ty-CPĐT-Phú-Vương (2022). *Thông số kỹ thuật xốp XPS*. <http://phuvuongcorp.com/e-catalogue/>.
- [92] LSTC (2019). *LS-Dyna Theory Manual*. <https://www.lstc.com/download/manuals>.
- [93] LSTC (2021). *LS-Dyna Version R12.0 Keyword User's Manual*. <https://www.lstc.com/download/manuals>.
- [94] A. Hirth, P. DuBois, K. Weimar (1998). *CADFEM Users's Meeting*. 2-40.
- [95] J. Kováčik, L. Marsavina, E. Linul (2018). *Poisson's ratio of closed-cell aluminium foams*. Materials. 11, 1904.
- [96] C. Thom (2009). *Soft materials under air blast loading and their effect on primary blast injury*. University of Waterloo.
- [97] Y. Masso-Moreu, N. Mills (2003). *Impact compression of polystyrene foam pyramids*. International journal of impact engineering. 28, 653-676.

- [98] C.-J. Zhang, F. Yi, X.-b. Zhang (2010). *Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 20, 1380-1386.
- [99] S. Vavilala, P. Shirbhate, J. Mandal, M.D. Goel (2020). *Blast mitigation of RC column using polymeric foam*. Materials Today: Proceedings. 26, 1347-1351.
- [100] N. Uddin (2010). *Blast protection of civil infrastructures and vehicles using composites*. Elsevier.
- [101] A.A. Nassr (2012). *Experimental and analytical study of the dynamic response of steel beams and columns to blast loading*.
- [102] M. Larcher (2008). *Pressure-time functions for the description of air blast waves*. JRC technical note. 46829.
- [103] J.M.K. Chock (1999). *Review of methods for calculating pressure profiles of explosive air blast and its sample application*. Virginia Tech.
- [104] K. Kangarlou (2013). *Mechanics of blast loading on the head models in the study of traumatic brain injury*. Nationalpark-Forschung In Der Schweiz (Switzerland Research Park Journal). 102.
- [105] A. Kadid, B. Nezzar, D. Yahiaoui (2012). *Nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete slabs subjected to blast loading*.
- [106] F. Beshara (1994). *Modelling of blast loading on aboveground structures—I. General phenomenology and external blast*. Computers & Structures. 51, 585-596.
- [107] G.F. Kinney, K.J. Graham (2013). *Explosive shocks in air*. Springer Science & Business Media.
- [108] J. Henrych, R. Major (1979). *The dynamics of explosion and its use*. Elsevier Amsterdam.
- [109] R. Jeremić, Z. Bajić (2006). *An approach to determining the TNT equivalent of high explosives*. Sci. Tech. Rev. 56, 58-62.
- [110] D.B. Chang, C.S. Young (2010). *Probabilistic estimates of vulnerability to explosive overpressures and impulses*. Journal of physical security. 4, 10-29.
- [111] M. Sadovsky (2004). *Mechanical effects of air shockwaves from explosions according to experiments*. Geophysics and Physics of Explosion (ed. MA Sadovsky), Nauka Press, Moscow.
- [112] P. Saska, E. Krzystała, A. Mężyk (2011). *An analysis of an explosive shock wave impact onto military vehicles of contemporary warfare*. Journal of KONES. 18, 515-524.

- [113] P. Smith, J. Hetherington (1994). *Blast and ballistic loading of structures*. Butterworth. Heinemann Ltd Oxford.
- [114] D.J. Benson (1992). *Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes*. Computer methods in Applied mechanics and Engineering. 99, 235-394.
- [115] J. Donea (1983). *Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element analysis*. Computational methods for transient analysis. 474-516.
- [116] M.A. Puso, J. Sanders, R. Settigast, B. Liu (2012). *An embedded mesh method in a multiple material ALE*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 245, 273-289.
- [117] Y.-T. Wang, J.-Z. Zhang (2011). *An improved ALE and CBS-based finite element algorithm for analyzing flows around forced oscillating bodies*. Finite Elements in Analysis and Design. 47, 1058-1065.
- [118] D.-K. Thai, S.-E. Kim (2018). *Numerical investigation of the damage of RC members subjected to blast loading*. Engineering Failure Analysis. 92, 350-367.
- [119] B.M. Dobratz (1981). *LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosives and explosive simulants*. Lawrence Livermore National Lab., CA (USA).
- [120] L.E. Schwer (2016). *Jones-Wilkens-Lee (JWL) equation of state with afterburning*. the 14th International LS-DYNA Users Conference, Rotal Dearbone Hotel & Convention Center, Detroit, pp. 1-38.
- [121] J. Crawford, J. Magallanes, S. Lan, Y. Wu (2011). *User's manual and documentation for release III of the K&C concrete material model in LS-DYNA*. Technical Rep. TR-11-36. 1.
- [122] L.J. Malvar, J.E. Crawford, J.W. Wesevich, D. Simons (1997). *A plasticity concrete material model for DYNA3D*. International journal of impact engineering. 19, 847-873.
- [123] B. Broadhouse (1995). *The Winfrith concrete model in LS-DYNA3D*. Report: SPD/D (95). 363, 794.
- [124] Y.D. Murray (2007). *Users manual for LS-DYNA concrete material model 159*. United States. Federal Highway Administration. Office of Research
- [125] L.E. Schwer, Y.D. Murray (1994). *A three-invariant smooth cap model with mixed hardening*. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics. 18, 657-688.
- [126] W. Riedel, K. Thoma, S. Hiermaier, E. Schmolinske (1999). *Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new*

macroscopic concrete model for hydrocodes. Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg Germany.

[127] T. Mousavi, E. Shafei (2019). *Impact response of hybrid FRP-steel reinforced concrete slabs*. Structures, Elsevier, pp. 436-448.

[128] H. Sadraie, A. Khaloo, H. Soltani (2019). *Dynamic performance of concrete slabs reinforced with steel and GFRP bars under impact loading*. Engineering Structures. 191, 62-81.

[129] S. Epackachi, A.S. Whittaker (2018). *A validated numerical model for predicting the in-plane seismic response of lightly reinforced, low-aspect ratio reinforced concrete shear walls*. Engineering Structures. 168, 589-611.

[130] N.S. Ottosen (1975). *Failure and elasticity of concrete*. Danish Atomic Energy Commission.

[131] R. Krieg, S. Key (1976). *Implementation of a time independent plasticity theory into structural computer programs*. Constitutive equations in viscoplasticity: Computational and engineering aspects. 125-137.

[132] N. Jones, T. Wierzbicki (1983). *Structural crashworthiness*. Butterworths London.

[133] <http://theppolyme.vn/tin-tuc/gioi-thieu-thanh-polyme-cot-soi-thuy-tinh.html>.

[134] O. Frago-Medina, F. Velázquez-Villegas (2021). *Aluminum foam to improve crash safety performance: a numerical simulation approach for the automotive industry*. Mechanics Based Design of Structures and Machines. 1-15.

[135] Y. Wang, X. Zhi, X. Zhai, J. Yan, R. Zhang (2022). *Innovations in Impact and Blast Protections: Foam-Filled Energy Absorbers and Steel-Concrete-Steel Sandwich Structures*. Springer Nature.

[136] E. Wang, Q. Li, G. Sun (2020). *Computational analysis and optimization of sandwich panels with homogeneous and graded foam cores for blast resistance*. Thin-Walled Structures. 147, 106494.

[137] X. Zhou, L. Jing (2020). *Deflection analysis of clamped square sandwich panels with layered-gradient foam cores under blast loading*. Thin-Walled Structures. 157, 107141.

[138] G. Chen, P. Zhang, J. Liu, Y. Cheng, H. Wang (2019). *Experimental and numerical analyses on the dynamic response of aluminum foam core sandwich panels subjected to localized air blast loading*. Marine Structures. 65, 343-361.

[139] MatWeb (2022). *Material property data*. <https://www.matweb.com/>.