

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**



CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU KHOA HỌC CẤP TRƯỜNG

**NGHIÊN CỨU LẬP MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM
BÊ TÔNG CHỊU NÉN DƯỚI TẢI TRỌNG
TỐC ĐỘ CAO**

MÃ SỐ: T2019-77TĐ



Tp. Hồ Chí Minh, tháng 04/2020

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI KH&CN CẤP TRƯỜNG TRỌNG ĐIỂM**

**NGHIÊN CỨU LẬP MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM
BÊ TÔNG CHỊU NÉN DƯỚI TẢI TRỌNG TỐC ĐỘ CAO**

Mã số: T2019-77TĐ

Chủ nhiệm đề tài: TS. Trần Tuấn Kiệt

TP. HCM, Tháng 4, Năm 2020

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

KHOA XÂY DỰNG

BÁO CÁO TỔNG KẾT

ĐỀ TÀI KH&CN CẤP TRƯỜNG TRỌNG ĐIỂM

**NGHIÊN CỨU LẬP MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM
BÊ TÔNG CHỊU NÉN DƯỚI TẢI TRỌNG TỐC ĐỘ CAO**

Mã số: T2019-77TD

Chủ nhiệm đề tài: TS. Trần Tuấn Kiệt

TP. HCM, Tháng 4, Năm 2020

Mục lục

MỞ ĐẦU	1
A. CÁC NGHIÊN CỨU TRONG NƯỚC.....	4
B. CÁC NGHIÊN CỨU NGOÀI NƯỚC.....	4
C. TÍNH CẤP THIẾT CỦA VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	7
D. MỤC TIÊU	8
E. CÁCH TIẾP CẬN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....	8
F. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU.....	8
NỘI DUNG	9
CHƯƠNG I	10
GIỚI THIỆU	10
1.1. Lý do thực hiện đề tài.....	10
1.2. Ý nghĩa của nghiên cứu.....	10
CHƯƠNG 2	12
CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA THIẾT BỊ HOPKINSON	12
2.1. Giới thiệu.....	12
2.2. Dao động dọc trục trong thanh.....	13
2.3. Sự lan truyền sóng trong thanh.....	16
2.4. Tính toán ứng suất, biến dạng và tốc độ biến dạng trong mẫu thử.....	20
CHƯƠNG 3	26
MÔ PHÒNG THIẾT BỊ HOPKINSON VỚI ABAQUS	26
3.1 GIỚI THIỆU ABAQUS [12].....	26
3.2. Mô phỏng thiết bị Hopkinson với Abaqus.....	27
3.3. Kết quả phân tích.....	33

3.4. Kết luận chương	38
CHƯƠNG 4	39
MÔ PHÒNG THIẾT BỊ HOPKINSON VỚI LS-DYNA	39
4.1. Giới thiệu LS-DYNA [15].....	39
4.2. Ứng dụng LS-DYNA mô phỏng thiết bị Hopkinson:	40
4.3. Kết quả phân tích [18]:	46
4.4. Kết luận chương:	49
CHƯƠNG 5	50
KẾT LUẬN & KIẾN NGHỊ.....	50
5.1 Kết luận	50
5.2 Kiến nghị	50

DANH MỤC BẢNG

Bảng 3.1: Kích thước các bộ phận thiết bị.....	27
Bảng 3.2. Thông tin vật liệu và tham số của mô hình.	28
Bảng 4.1. Tóm tắt kết quả mô phỏng cho thiết bị Hopkinson của Ross ($\mu = 0.3$).....	46
Bảng 4.2. Ảnh hưởng của ma sát đến cường độ vật liệu và đến DIF	48

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 0.1. Thiết bị Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) đường kính 75 mm.....	1
Hình 0.2. Sơ đồ làm việc của thiết bị Hopkinson.....	2
Hình 0.3. Thiết bị của John Hopkinson [7, 8]	5
Hình 0.4. Thiết bị của Bertram Hopkinson [8].....	5
Hình 0.4. Thiết bị của Davies [8]	6
Hình 0.5. Thiết bị Hopkinson (SHPB) hay còn gọi là thiết bị Kolsky [8]	7
Hình 0.6. Khủng bố ở Mỹ ngày 11/9/2001.....	7
Hình 2.1. Các bộ phận của thiết bị Hopkinson [8]	12
Hình 2.2. Quá trình truyền sóng trong thiết bị Hopkinson [8]	13
Hình 2.3. Thanh chịu sóng nén và phân tử trước khi biến dạng [8]	14
Hình 2.4. Phân tử chịu nén	14
Hình 2.5. Các lực kháng nén trong phân tử	15
Hình 2.6. Sự thay đổi diện tích tiết diện và vật liệu	17
Hình 2.7. Sơ đồ mẫu thử hình trụ	20
Hình 3.1. Mô phỏng số thiết bị Hopkinson	27
Hình 3.2. Xung tải trọng	29
Hình 3.3. Chia lưới phân tử	30
Hình 3.4. Quá trình truyền sóng trong thiết bị Hopkinson.....	34
Hình 3.5. Sự kiện xảy ra trong 5×10^{-4} giây	35

Hình 3.6. Ứng suất theo thời gian trong mẫu thử.....	36
Hình 3.7. Biến dạng theo thời gian trong mẫu thử	36
Hình 3.8. Vật liệu nhạy với tốc độ biến dạng.....	38
Hình 4.1. Tổng thể thiết bị Hopkinson	41
Hình 4.2. Mô phỏng số thiết bị Hopkinson	41
Hình 4.3. Quá trình truyền sóng trong thiết bị Hopkinson.....	42
Hình 4.4. Quan hệ DIF-strain rate cho thí nghiệm của Ross.....	47
Hình 4.5. Quan hệ DIF-strain rate cho thí nghiệm của Grote	47
Hình 4.6. Ảnh hưởng của ma sát đến sự gia tăng cường độ.....	48

KHOA XÂY DỰNG

Tp. HCM, ngày 10 tháng 4 năm 2020

THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

1. Thông tin chung:

- Tên đề tài: **Nghiên cứu lập mô hình thí nghiệm bê tông chịu nén dưới tải trọng tốc độ cao**
- Mã số: **T2019 – 77TD**
- Chủ nhiệm: TS. Trần Tuấn Kiệt
- Cơ quan chủ trì: Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
- Thời gian thực hiện: 12 tháng

2. Mục tiêu:

- Tìm hiểu cơ sở lý thuyết về thí nghiệm vật liệu dưới tải tốc độ cao.
- Bằng Abaqus/LS-Dyna, mô phỏng thiết bị thí nghiệm bê tông dưới tải tốc độ cao.

3. Tính mới và sáng tạo:

Để tìm hiểu ứng xử của vật liệu dưới tác động của tải trọng tốc độ cao cần phải có thiết bị để thí nghiệm. Tuy nhiên thiết bị này lại rất đắt và chiếm một diện tích lớn. Đề tài này đề xuất dùng Abaqus/LS-Dyna để mô phỏng lại thiết bị thí nghiệm này, và thông qua đó tìm hiểu ứng xử của vật liệu dưới tải trọng tốc độ cao.

4. Kết quả nghiên cứu:

Mô hình mô phỏng bằng Abaqus/LS-Dyna cho thiết bị Hopkinson, có thể nghiên cứu ứng xử nén của vật liệu dưới tải trọng tốc độ cao.

5. Sản phẩm:

- Trần Tuấn Kiệt, Trần Minh Anh, Nguyễn Thị Thanh Hương (2020), “Ứng dụng Abaqus để mô phỏng thiết bị thí nghiệm vật liệu chịu tải nén tốc độ cao”, Tạp chí Xây Dựng tháng 4/2020.
- Một học viên thạc sĩ đang chờ bảo vệ

6. Hiệu quả, phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu và khả năng áp dụng:

- Tạp chí trong nước.

Trưởng Đơn vị

(ký, họ và tên, đóng dấu)

Chủ nhiệm đề tài

(ký, họ và tên)

INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

1. General information:

Project title: **Study on building up a testing model for concrete under high loading rate**

Code number: **T2019 – 77TĐ**

Coordinator: Dr. Tran, Tuan Kiet

Implementing institution: University of Technical Education HCM City

Duration: 12 months

2. Objective(s):

- Studying the base theory of Hopkinson device.
- Using Abaqus/LS-Dyna to simulate Hopkinson device for testing of concrete under high rate loading.

3. Creativeness and innovativeness:

In order to investigate the behavior of material under high rate loading, the device for this testing must be have. However, this device is very expensive and it usually occupy a huge room space. This study proposes using Abaqus/LS-Dyna to simulate this testing device, then the behavior of material under high rate loading could be investigated.

4. Research results:

Mô hình mô phỏng bằng Abaqus/LS-Dyna cho thiết bị Hopkinson, có thể nghiên cứu ứng xử nén của vật liệu dưới tải trọng tốc độ cao.

Numerical simulating models by using Abaqus/LS-Dyna for Hopkinson device were obtained. The models could be used to investigate the behavior of material under high rate loading.

5. Products:

- Tuan-Kiet Tran, Minh-Anh Tran, Thanh-Huong Nguyen (2020), "Abaqus simulation of SHPB test to investigate the compressive behavior of material under high speed loading", Journal of Construction, April 2020.
- A master student is waiting for defense.

6. Effects, transfer alternatives of research results and applicability:

- 01 national journal.

MỞ ĐẦU

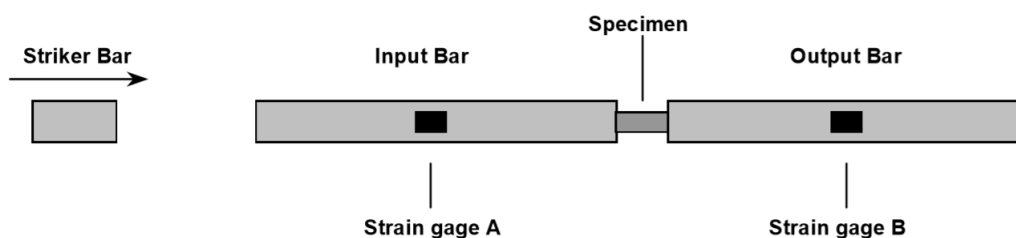
Thiết kế kết cấu chủ yếu là sử dụng các thông tin của vật liệu dưới dạng quan hệ ứng suất-biến dạng. Để thiết kế được tối ưu, các thông tin này càng phải chính xác. Hiện nay, các thông tin này thường được thu thập bằng các thí nghiệm mẫu thử với tốc độ gia tải rất chậm. Theo Shigley và Mitchell [1], “tốc độ gia tải trung bình được sử dụng để có được biểu đồ ứng suất-biến dạng bé hơn 10^{-3} s^{-1} . Khi tốc độ gia tải càng tăng, chẳng hạn tải va chạm, thì vật liệu sẽ có cường độ cao hơn. Công trình dưới tải va chạm sẽ có ứng xử thế nào, mô hình vật liệu của nó ra sao, vì thế, đã gây được nhiều hứng thú cho nhiều kỹ sư thiết kế cũng như cho các nhà nghiên cứu.

Thí nghiệm với thiết bị Hopkinson là phương pháp thông dụng nhất hiện nay để xác định tính chất của vật liệu với tải trọng tốc độ cao vì kỹ thuật này cho kết quả chính xác và độ tin cậy cao. Thiết bị này có thể gây ra tải trọng với tốc độ biến dạng 10^4 s^{-1} một cách dễ dàng [2].



Hình 0.1. Thiết bị Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) đường kính 75 mm

Trong thí nghiệm này, mẫu thử trụ tròn được kẹp giữa 2 thanh dài, như trong Hình 0.2. Các thanh này thường được làm từ thép cường độ cao với đường kính từ 20mm và chiều dài từ 2m tùy theo kích thước mẫu thí nghiệm.



Hình 0.2. Sơ đồ làm việc của thiết bị Hopkinson

Các đầu thanh và mẫu thử được mài phẳng và được kẹp giữa như mô tả. Một *thanh strike* (striker bar) được phóng vào đầu *thanh incident* (incident bar) làm phát sinh một xung ứng suất nén. Ngay sau va chạm, xung này sẽ chạy dọc thanh truyền đến mặt tiếp giáp giữa thanh incident và mẫu thử, và rồi một phần xung này phản xạ chạy ngược trở lại trong thanh incident, một phần khác truyền qua mẫu thử đi vào *thanh transmitted* (transmitted bar). Theo nguyên tắc truyền sóng, xung phản xạ trong thanh incident là xung kéo, còn xung truyền vào thanh transmitted là xung nén. Các *lịch sử biến dạng* (strain histories) trong 2 thanh nhập và xuất được ghi lại bằng hai cảm biến A và B.

Quan hệ ứng suất-biến dạng, tốc độ biến dạng của mẫu thử sẽ được tính toán trên cơ sở dữ liệu của cảm biến A và B miễn là các thanh incident và transmitted được đảm bảo làm việc trong giai đoạn đàn hồi. Chỉ cần ghi nhận hai xung quan trọng, một là xung phản xạ và hai là xung truyền qua mẫu thử, Kolsky [4] đã tìm được ứng suất trong mẫu thử qua quan hệ sau đây:

$$\sigma_s(t) = E \frac{A_o}{A} \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

trong đó E và A_o là mô đun đàn hồi và tiết diện của các thanh, A là tiết diện ngang của mẫu thử, $\varepsilon_T(t)$ là lịch sử biến dạng truyền (transmitted strain history).

Tốc độ biến dạng của mẫu thử có thể được tính từ:

$$\frac{d\varepsilon_s(t)}{dt} = -\frac{2C_o}{L}\varepsilon_R(t) \quad (2)$$

trong đó $\varepsilon_R(t)$ là lịch sử biến dạng phản xạ trong thanh nhập, L là chiều dài ban đầu của mẫu thử, và C_o là vận tốc sóng (wave velocity) trong thanh nhập được cho bởi:

$$C_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

với E và ρ là mô đun đàn hồi và mật độ của các thanh.

Phương trình (1.2) có thể được tích phân để có biến dạng của mẫu thử:

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2C_o}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (4)$$

Mặc dù các phương trình này được phát triển từ khoảng thập niên 40, nhưng chúng chỉ được phổ biến rộng rãi vào các thập kỷ cuối của thế kỷ trước vì chỉ khi ấy các kỹ thuật xử lý dữ liệu mới có thể xử lý được nhờ vào các máy tính tốc độ cao [2].

Sự phức tạp của bài thí nghiệm này nằm ở chỗ lý thuyết truyền sóng và kỹ thuật xử lý số liệu. Như đã trình bày ở phần trước, các xung phản xạ và xung truyền xuất hiện trong thí nghiệm là các xung phụ thuộc theo thời gian. Đối với mẫu đồng chất, độ lớn (*amplitude*) của 2 xung này tỷ lệ tương ứng với tốc độ biến dạng và ứng suất trong mẫu thử. Vì biến dạng của mẫu thử được tính bằng cách tích phân tốc độ biến dạng, nên dễ dàng tìm được các biểu đồ ứng suất-thời gian và biến dạng-thời gian. Tuy thế, chúng không hữu dụng và quen thuộc lắm so với biểu đồ ứng suất-biến dạng động lực (*dynamic stress-strain diagram*), chính là sự kết hợp của 2 biểu đồ trên. Cách đơn giản là dóng 2 biểu đồ đó theo một điểm khởi đầu tạm nào đó. Vốn dĩ sự kiện va chạm là một sự kiện xảy ra với vài mili giây (*ms*), nên thật khó có thể có 2 điểm dóng đầu tiên chính xác được như mong muốn. Đây chính là điểm khó khăn đầu tiên của bài thí nghiệm này.

Điểm khó khăn thứ hai chính là sự phân tán của sóng truyền trong thanh, làm ảnh hưởng đến kết quả thí nghiệm. Hầu hết các nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp của Bancroft [3] để có thể dự đoán và hiệu chỉnh được mức độ phân tán của các sóng này.

A. CÁC NGHIÊN CỨU TRONG NƯỚC

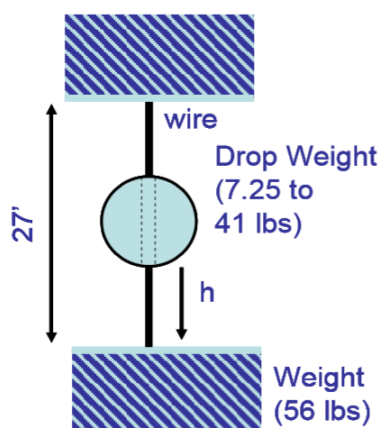
Trong nước, lĩnh vực nghiên cứu này vẫn còn tương đối mới mẻ, vì thế số lượng nghiên cứu không nhiều.

Tìm trên mạng, chỉ thấy hai công trình có liên quan xa gần đến lĩnh vực này. Công trình đầu tiên là luận án tiến sĩ kỹ thuật của Đặng Văn Kiên [5], “nghiên cứu ảnh hưởng của chấn động nổ mìn khi thi công đường hầm đến kết cấu công trình ngầm lân cận”. Luận án đã thực hiện thí nghiệm động SHPB và mô phỏng số để xác định các thông số của khối đá và vỏ chống; tìm ra các mối quan hệ giữa ứng suất, biến dạng, tốc độ biến dạng theo thời gian của kết cấu chống giữ dưới tác dụng của tải trọng động giống như áp lực nổ mìn trên thực tế.

Công trình thứ hai là của nhóm tác giả Lê Bá Danh và nhóm cộng sự [6], công bố trên Tạp chí Khoa học Công Nghệ Xây Dựng năm 2019. Bài báo trình bày “nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tác động tải trọng nổ của vật liệu bê tông chất lượng siêu cao (UHPC)”. Tải trọng nổ sử dụng là thuốc nổ nhũ tương. Sự hư hại và phá hủy ở mặt trên, mặt dưới của các mẫu thí nghiệm và thành phần hạt của các mảnh vỡ bắn ra dưới tác động của tải trọng nổ được phân tích và so sánh giữa bê tông UHPC và bê tông thường.

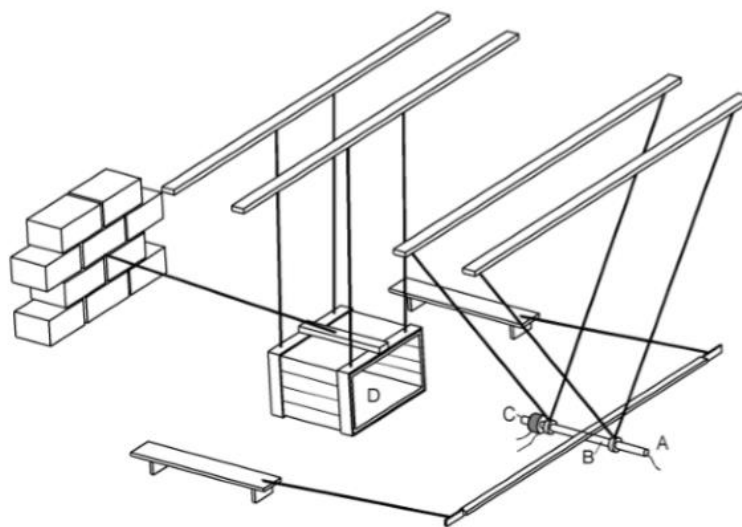
B. CÁC NGHIÊN CỨU NGOÀI NƯỚC

Nghiên cứu về ứng xử của vật liệu dưới tác động của tải trọng tốc độ cao xuất hiện từ rất sớm trên thế giới. Thiết bị đầu tiên (Hình 0.3) rất nổi tiếng để thí nghiệm ứng xử kéo của vật liệu là do John Hopkinson [7] đề xuất năm 1872 và sau đó, năm 1914, con ông ta Bertram Hopkinson đã giới thiệu một kỹ thuật khác (Hình 0.4) để xác định quan hệ lực nén-thời gian do một va chạm phát ra từ một viên đạn hoặc từ một vụ nổ.



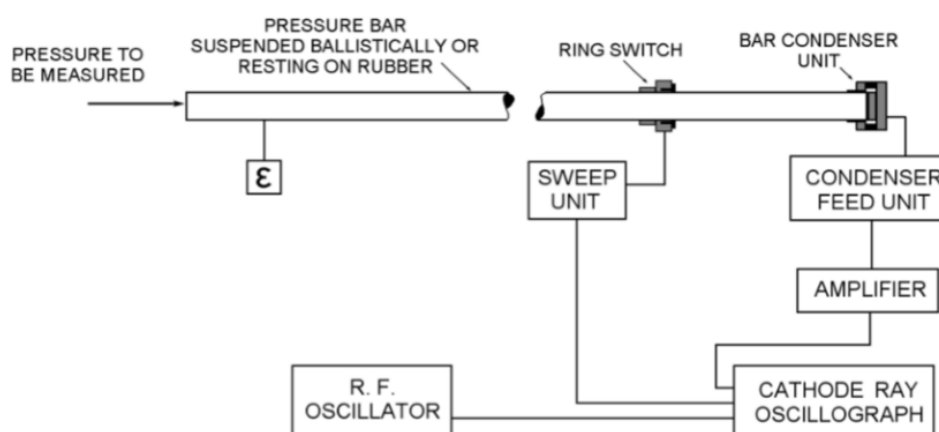
Hình 0.3. Thiết bị của John Hopkinson [7, 8]

Đến năm 1941, Dennison Bancroft [3] giải phương trình tần số của Pochhammer và Love để tìm vận tốc sóng trong các thanh trụ tròn. Bancroft biểu diễn vận tốc sóng dưới dạng chiều dài sóng, hệ số Poisson, và tỷ số của đường kính thanh với chiều dài sóng. Lợi ích của nghiên cứu này – như được đưa vào ứng dụng trong kỹ thuật Hopkinson – đã không được nhận thức đầy đủ cho đến khi công cụ xử lý dữ liệu nhờ máy tính phát triển mạnh mẽ. Công trình của Bancroft đã thúc đẩy mảng nghiên cứu về hiệu chỉnh sự phân tán sóng truyền.



Hình 0.4. Thiết bị của Bertram Hopkinson [8]

Bảy năm sau, năm 1948, Davies đã phát triển kỹ thuật sử dụng các cảm biến để đo các biến dạng trong các thanh nén (Hình 0.4). Các dữ liệu xuất ra từ cảm biến sẽ tỷ lệ với quan hệ chuyển vị-thời gian và cũng tỷ lệ với quan hệ ứng suất-thời gian. Dùng các cảm biến để đo biến dạng là một cái tiến quan trọng để đạt được độ chính xác so với thiết bị gốc của Hopkinson, vốn dựa vào sự đo đạc về động lượng của viên bi thép bay chạm vào đầu thanh nén.

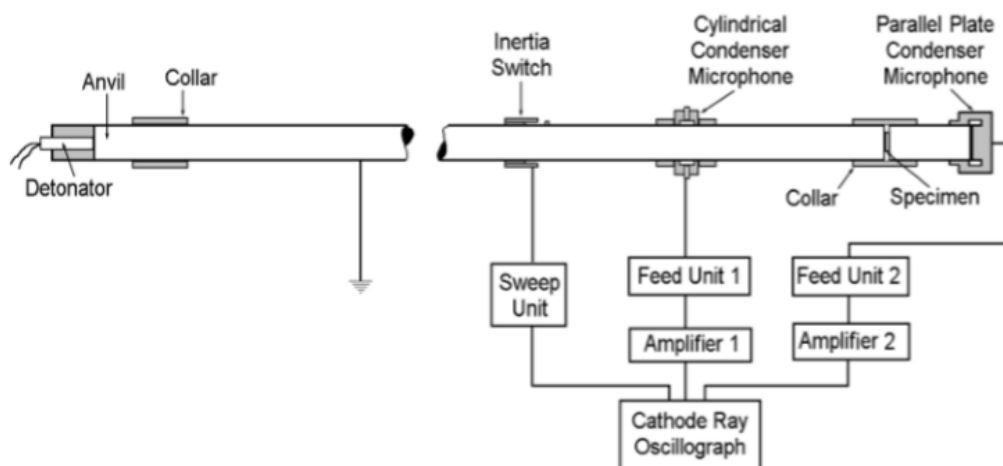


Hình 0.4. Thiết bị của Davies [8]

Sau đó 1 năm, năm 1949, Kolsky thêm vào 1 thanh nén thứ 2 vào thiết bị gốc của Hopkinson, vì vậy có tên là thanh chia Hopkinson (*Split Hopkinson bar*). Thay vì gắn mẫu vào đầu xa của thanh, Kolsky đã kẹp mẫu vào giữa 2 thanh (Hình 0.5). Ông đã giới thiệu các biểu thức để tính toán tính chất của mẫu dựa trên các lịch sử biến dạng trong thanh. Các biến dạng được đo bằng các kỹ thuật tương tự như của Davies. Dĩ nhiên thiết bị 2 thanh mới đòi hỏi các đo đạc cho cả 2 thanh. Kỹ thuật 2 thanh này trở nên kỹ thuật sử dụng rộng rãi nhất cho tới hôm nay. Trong một số tài liệu, Thanh Hopkinson cũng được gọi là thanh Kolsky.

Kể từ đó, thiết bị Hopkinson đã nhanh chóng trở thành một thiết bị được sử dụng rộng rãi để thí nghiệm các vật liệu dưới tải trọng tốc độ cao [8].

Mục đích của nghiên cứu này là 1) tìm hiểu chi tiết về thiết bị này, rồi 2) tiến hành dùng Abaqus để mô phỏng thiết bị, để từ đó 3) đưa ra một vài thông tin về ứng xử của bê tông dưới tải trọng nén tốc độ cao.



Hình 0.5. Thiết bị Hopkinson (SHPB) hay còn gọi là thiết bị Kolsky [8]

C. TÍNH CẤP THIẾT CỦA VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU



Hình 0.6. Khủng bố ở Mỹ ngày 11/9/2001

Thế giới ngày nay đang đối diện với nạn khủng bố, nhất là sau sự kiện 11/9, giới xây dựng luôn đau đầu về giải pháp tìm kiếm vật liệu thích hợp để có thể chịu được các tải trọng va chạm tốc độ cao. Trong khi ấy, bê tông là một vật liệu xây dựng được sử dụng

phổ biến nhất hiện nay vì những ưu điểm vượt trội của nó: dễ tạo hình, độ bền cao, chịu lửa tốt, giá thành thấp và nhất là khả năng kết hợp với cốt thép để chịu tải trọng lớn. Câu hỏi đặt ra là bê tông dưới tác dụng của tải trọng tốc độ cao này làm việc thế nào, và thiết bị nào có thể thí nghiệm chỉ tiêu vật liệu này? Đề tài này sẽ giải quyết phần nào vấn đề cấp thiết đó.

D. MỤC TIÊU

- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết của thiết bị thí nghiệm tải trọng tốc độ cao.
- Nghiên cứu các phần mềm số và áp dụng để mô phỏng thiết bị này, từ đó chỉ ra ứng xử của vật liệu dưới tải tốc độ cao.

E. CÁCH TIẾP CẬN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

- Cách tiếp cận
 - + Tìm hiểu phương pháp thí nghiệm vật liệu với tải trọng tốc độ cao
 - + Tìm giải pháp thí nghiệm cho vật liệu bê tông với tải tốc độ cao
- Phương pháp nghiên cứu
 - + Nghiên cứu lý thuyết
 - + Mô phỏng số

F. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU

- Đối tượng nghiên cứu: Bê tông chịu nén với tải tốc độ cao.
- Phạm vi nghiên cứu: Nghiên cứu mô phỏng thiết bị thí nghiệm vật liệu với tải nén tốc độ cao.

NỘI DUNG

CHƯƠNG I

GIỚI THIỆU

1.1. Lý do thực hiện đề tài

Hiện tại vẫn chưa có một phương pháp tiêu chuẩn nào để nghiên cứu ứng xử của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng tốc độ cao, mặc dù thiết bị thí nghiệm chịu kéo với tải trọng tác động bằng vật rơi tự do (*drop-weight tensile test*) đã được John Hopkinson đề xuất đầu tiên vào năm 1872 [7]. Từ hệ thống đầu tiên này, cho tới nay có 4 cách để có thể tạo ra tải tốc độ cao: 1) Hệ thống dựa vào thế năng (như vật rơi tự do) có thể tạo được một tốc độ biến dạng $10^0 - 10^1 \text{ s}^{-1}$ [9]; 2) Hệ thống dựa trên động năng (như loại súng bắn đặc biệt), có thể tạo ra tải tốc độ biến dạng rất cao, khoảng 10^4 s^{-1} [10]; 3) Hệ thống tận dụng máy thủy lực, tạo tải tốc độ khá thấp, chỉ từ $10^{-1} - 10^0 \text{ s}^{-1}$; 4) Hệ dựa trên nguyên lý lan truyền sóng ứng suất (SWP), có thể tạo được tải tốc độ từ $10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$ [8].

Trong các phương pháp này, thiết bị nói chung rất đắt tiền mặc dù kích thước thiết bị nhỏ chỉ đủ để thí nghiệm cho vật liệu thép. Để có thể thí nghiệm cho vật liệu bê tông chúng ta phải đối diện với 2 vấn đề mang tính chất xung đột: 1) Mẫu thí nghiệm bê tông phải đủ lớn và lớn hơn mẫu thép nhiều do đó thiết bị thí nghiệm phải lớn, dẫn đến 2) Chi phí chế tạo thiết bị đắt thêm.

Để tìm ra giải pháp có thể giải quyết hai vấn đề trên, bước đầu chúng ta cần phải tìm hiểu cơ sở lý thuyết của lĩnh vực này, và từ đó thông qua mô phỏng thiết bị, tìm hiểu ứng xử của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng tốc độ cao.

1.2. Ý nghĩa của nghiên cứu

1.2.1. Ý nghĩa khoa học

- Hiểu được ứng xử của vật liệu dưới tác động của tải trọng động đất, tải trọng va chạm và tải trọng cháy nổ là yêu cầu bắt buộc đối với các kỹ sư thiết kế công trình, đặc biệt là khi thiết kế các công trình quân sự. Đã có nhiều thiết bị thí nghiệm va chạm (*impact testing*) khác nhau để đo phản ứng của vật liệu dưới tải trọng tốc độ cao như tải động đất, tải trọng bom napan, cháy nổ... Trong số đó, thiết bị được sử dụng phổ biến nhất hiện nay là thiết bị Hopkinson. Tuy nhiên, như đã bàn ở phần 1, thiết bị này thường rất lớn và đắt tiền.
- Nghiên cứu này đề xuất một cách tiếp cận khác là áp dụng mô phỏng số toàn thiết bị, từ đó có thể tìm hiểu được ứng xử của vật liệu dưới tải trọng tốc độ cao.

1.2.2. Ý nghĩa thực tiễn

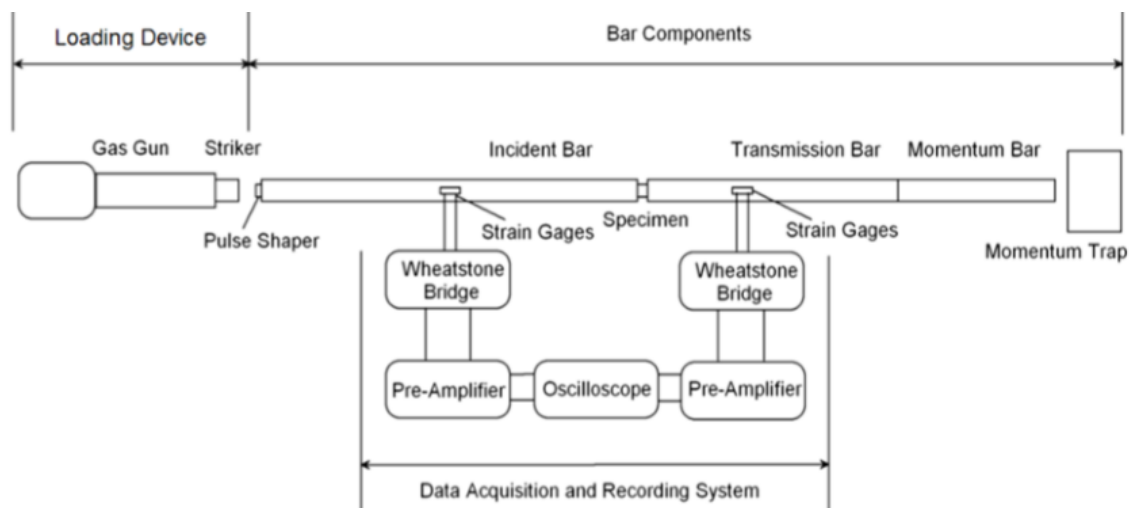
- Mô phỏng số toàn bộ thiết bị thí nghiệm SHPB bằng Abaqus/LS-Dyna.
- Thấy được đặc tính động lực của vật liệu khi tốc độ tải trọng thay đổi.

CHƯƠNG 2

CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA THIẾT BỊ HOPKINSON

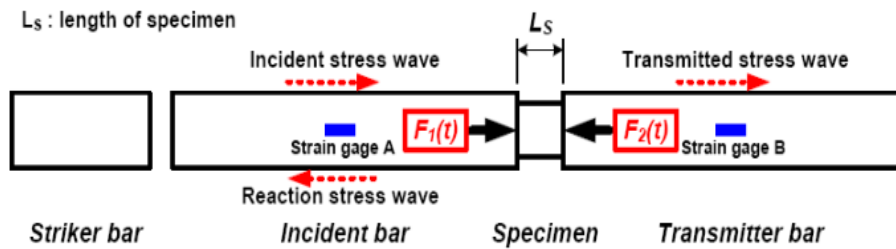
2.1. Giới thiệu

Thiết bị Hopkinson gồm 3 bộ phận chính: 1) bộ phận gia tải (*striker bar*), 2) các thanh nén thành phần (*incident bar* và *transmitted bar*) để kẹp mẫu thử ở giữa, và 3) hệ thống đọc thu dữ liệu từ 2 cảm biến gắn trên các thanh (Hình 2.1).



Hình 2.1. Các bộ phận của thiết bị Hopkinson [8]

Cách thức hoạt động của thiết bị này như sau: Khi mở van bình ga, sẽ có một lực truyền vào thanh striker, đẩy thanh striker gõ vào thanh incident và tạo ra một xung nén. Sóng xung nén này di chuyển đến cuối thanh incident và truyền qua mẫu rồi sau đó sẽ truyền vào thanh transmitted; đồng thời, một phần sóng sẽ được phản xạ trở lại (sóng phản xạ) đi ngược vào thanh incident (Hình 2.2). Tất cả ba sóng trên được thu lại bởi 2 cảm biến được đặt trên các thanh incident và thanh transmitted.



Hình 2.2. Quá trình truyền sóng trong thiết bị Hopkinson [8]

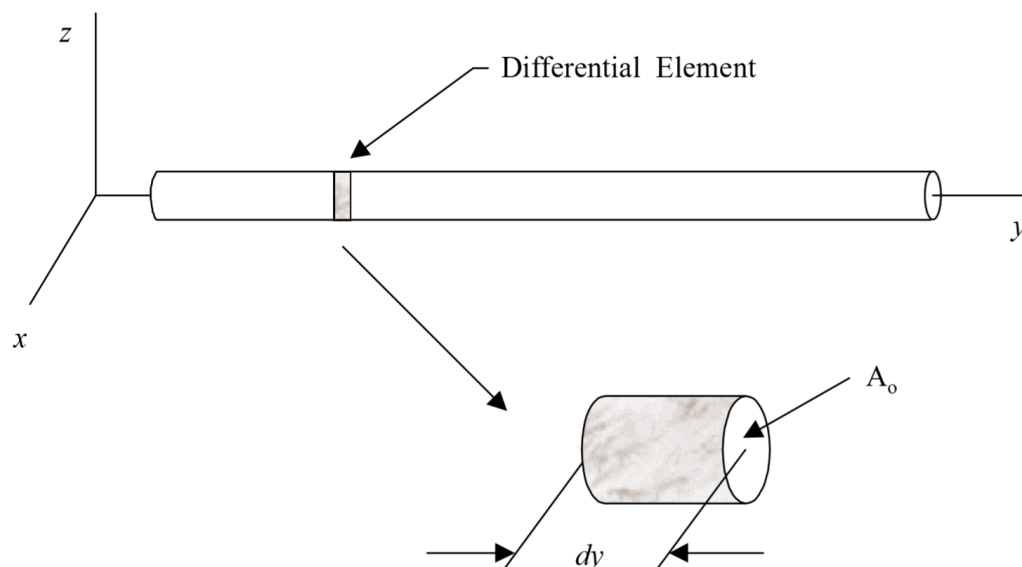
Nếu 2 thanh incident và transmitted được đảm bảo làm việc trong giai đoạn đàn hồi thì quan hệ ứng suất-biến dạng và tốc độ biến dạng của mẫu thử sẽ được tính toán dựa trên cơ sở dữ liệu thu được từ 2 cảm biến A và B trên 2 thanh đó. Chỉ cần ghi nhận thông tin của 2 xung quan trọng, một là xung phản xạ và hai là xung truyền qua mẫu thử, Kolsky [4] đã tìm được ứng suất, biến dạng và tốc độ biến dạng trong mẫu thử qua các phương trình (1), (2), (3) tương ứng.

Chương này sẽ trình bày về cơ sở lý thuyết áp dụng trong thiết bị Hopkinson [2]. Đầu tiên là bàn về phương trình chuyển động cho một thanh chịu dao động dọc trục, sau đó là đến lý thuyết về truyền sóng dọc (*longitudinal wave propagation*). Các phương trình dạng hoàn chỉnh và rút gọn để tính toán ứng suất, biến dạng, tốc độ biến dạng của mẫu thử sẽ được rút ra một cách chi tiết. Hiện tượng phân tán sóng cũng được đề cập sơ qua.

2.2. Dao động dọc trục trong thanh

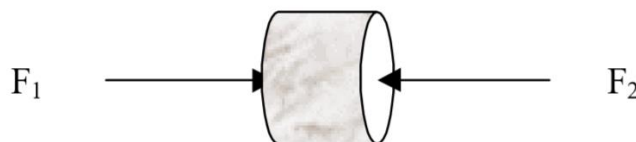
Thiết bị Hopkinson bao gồm 2 thanh nén (*pressure bar*) có tiết diện A_0 , mô đun đàn hồi E , mật độ ρ . Vì 2 thanh là như nhau, nên chỉ cần xét một thanh khi phát triển phương trình không chế chuyển động của dao động dọc trục trong thanh. Tỷ lệ chiều dài/đường kính của thiết bị Hopkinson là 8 hoặc hơn.

Đã có nhiều tài liệu trình bày về cách thức rút ra các phương trình chuyển động cho thanh đồng chất chịu dao động dọc trục. Tất cả đều bắt đầu bằng cách xét một vi phân tiết diện thanh trước lúc biến dạng, và rồi sau đó cho nó biến dạng để khai triển tiếp. Hình 2.3 mô tả việc ấy.



Hình 2.3. Thanh chịu sóng nén và phân tử trước khi biến dạng [8]

Phân tử đang xét có chiều dài dy và tiết diện ngang A_o . Trước khi va chạm, thanh ở trạng thái cân bằng tĩnh. Ngay sau va chạm, các phần tử trong phân bố bị nén do các lực F_1 và F_2 , như được chỉ ra trong Hình 2.4:

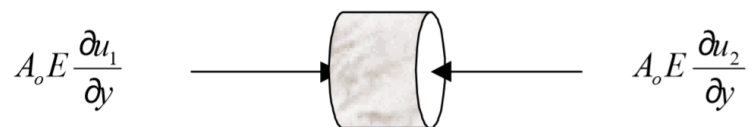


Hình 2.4. Phân tử chịu nén

Những lực này sẽ gây ra ứng suất nén trên tiết diện ngang của phân tử. Khi vật liệu làm việc ở giai đoạn đàn hồi, theo định luật Hooke, các ứng suất này liên hệ với biến dạng thông qua mô đun đàn hồi của thanh. Hơn nữa, các biến dạng này lại có thể biểu diễn dưới dạng chuyển vị trong phân tử. Vì thế, lực gây nén trong phân tử có thể được biểu diễn dưới dạng chuyển vị của phân tử, u , như sau:

$$F_y = A_o E \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5)$$

Độ lớn của lực dọc này tác dụng vuông góc với hai mặt của phân tố như trong Hình 2.5:



Hình 2.5. Các lực kháng nén trong phân tố

Dựa vào định luật hai Newton, tổng các lực tác dụng vào phân tố là $F = my''$, ta rút ra được phương trình mô tả chuyển động của xung nén:

$$A_o E \frac{\partial u_1}{\partial y} - A_o E \frac{\partial u_2}{\partial y} = A_o dy \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (6)$$

Phương trình này giả định rằng gia tốc trong các phần tử trong phân tố là hằng số. Đơn giản phương trình trên, ta có phương trình chuyển động trong thanh:

$$C_o^2 \left[\frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial u_2}{\partial y} \right] = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} dy \quad (7)$$

Trong phương trình (7), C_o là vận tốc sóng, được tính từ:

$$C_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

trong đó E và ρ tương ứng là mô đun đàn hồi và mật độ của thanh.

Nhiều nhà nghiên cứu đã đơn giản phương trình chuyển động bằng cách viết chuyển vị ở một mặt phân tố theo chuyển vị của mặt bên kia:

$$u_2 = u_1 + \frac{\partial u_1}{\partial y} dy \quad (9)$$

Điều này giả thiết rằng tốc độ thay đổi chuyển vị giữa 2 mặt phân tố là như nhau, mà vì là một phân tố nên nó hợp lý. Đạo hàm phương trình này, được:

$$\frac{\partial u_2}{\partial y} = \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} dy \quad (10)$$

Bằng cách thay thế phương trình trên vào phương trình (7), phương trình chuyển động của thanh trở thành:

$$C_o^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (11)$$

Phương trình chuyển động này tuy không được áp dụng trong việc phân tích thiết bị Hopkinson, nhưng sẽ được sử dụng sau này để tính biến dạng và tốc độ biến dạng của mẫu thí nghiệm.

2.3. Sự lan truyền sóng trong thanh

Sự không liên tục trong các thanh sẽ ảnh hưởng đáng kể đến quá trình truyền sóng. Sự không liên tục này có thể là sự thay đổi đường kính tiết diện hay sự thay đổi về vật liệu. Đối với hầu hết các thiết bị Hopkinson, sự thay đổi chủ yếu là về tiết diện ngang ngay chỗ tiếp giáp giữa thanh nén và mẫu thử. Phần tiếp theo sẽ trình bày cách phân tích khi có sự thay đổi này.

a) Sóng phản xạ từ một đầu tự do (free end):

Rõ ràng không có thanh nào dài vô tận được, mà các đầu thanh luôn tồn tại ở các dạng: đầu ngàm, đầu tự do hoặc đầu được đầu nối với 1 thanh khác. Như tên được gọi: đầu ngàm là đầu được ngàm chặt với một vật khác, đầu tự do đơn giản là không gắn vào đầu cả. Vì các thanh nén của thiết bị Hopkinson có đầu tự do nên ở đây sẽ bàn về cách truyền sóng đối với dạng thanh này.

Khi một sóng truyền đến cuối thanh, nó sẽ phản xạ ngược lại với đặc tính liên quan đến điều kiện biên của điểm cuối thanh này. Nếu là đầu tự do, hai kết quả quan trọng sau đây được rút ra: 1) Tại đầu tự do của thanh, nơi xảy ra phản xạ, chuyển vị sẽ có giá trị gấp đôi, vì thế bất kỳ đo đạc nào về biến dạng trên thanh nén, nên đặt cách xa đầu tự do này; 2) Sóng phản xạ sẽ có dấu ngược với sóng truyền. Do đó, sóng nén ban đầu truyền trong

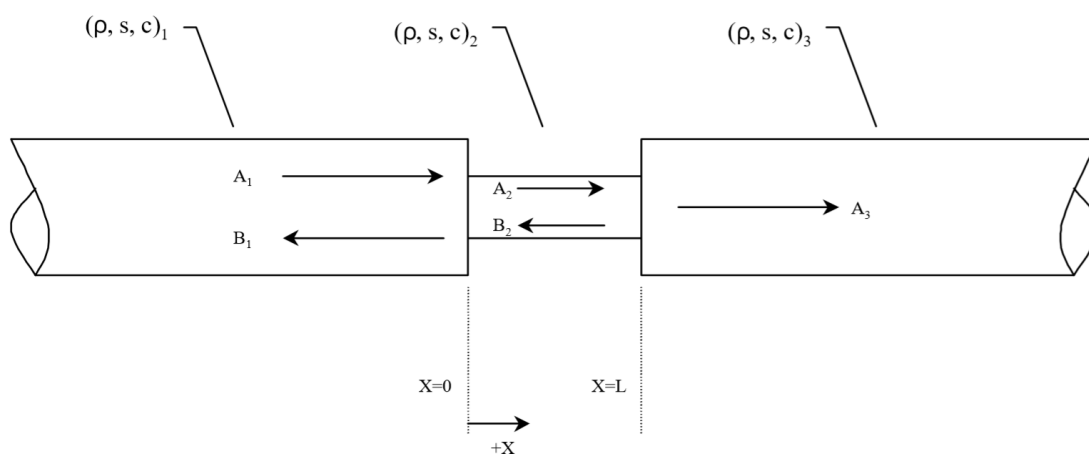
thanh sẽ phản xạ trở thành sóng kéo. Thông tin thêm về vấn đề này, có thể đọc thêm trong [11].

b) Sự thay đổi tiết diện ngang và trở kháng (impedance)

Phần này sẽ mô tả ứng xử của sóng truyền trong môi trường không liên tục. Sự không liên tục thường gặp nhất trong thiết bị Hopkinson là sự thay đổi giạt cấp về tiết diện ngang và về tính chất của vật liệu. Các sóng khi gặp phải sự không liên tục này, thường được xem xét qua đại lượng trở kháng (*impedance*). Trở kháng được định nghĩa là tỷ số giữa lực tác dụng với vận tốc tại một điểm trong kết cấu (thanh nén trong trường hợp này). Phương trình (12) biểu diễn trở kháng cơ học của các thanh sử dụng trong thiết bị Hopkinson:

$$Z = \frac{F}{V} = s\rho C_o \quad (12)$$

Các biến ρ , s , C_o lần lượt là mật độ, diện tích mặt cắt ngang và vận tốc sóng dọc. Tích số ρC_o là hằng số đối với từng loại vật liệu, nên để thuận tiện, thường chúng được nhóm lại thành một đại lượng. Chú ý rằng, tất cả các biến trở kháng đều mang tính chất vật lý và vì thế sự kiện va chạm không ảnh hưởng đến trở kháng của thanh. Thêm một chú ý nữa là, với một vật liệu thanh đã cho, sự thay đổi trở kháng chỉ xảy ra nếu có sự thay đổi về tiết diện ngang của thanh.



Hình 2.6. Sự thay đổi diện tích tiết diện và vật liệu

Sự không liên tục tiêu biểu xảy ra tại các mặt tiếp giáp giữa thanh nén và mẫu thử. Do có thể nghiên cứu với miền vật liệu rất rộng, nên việc quan trọng là phải hiểu sóng lan truyền sẽ đáp ứng thế nào khi có sự thay đổi của môi trường truyền. Xét bài toán truyền sóng giữa các loại vật liệu khác nhau cụ thể như trong Hình 2.6.

Các biến ρ , s và C_0 là các biến giống như trong phương trình (12). Các đại lượng A_1 - A_3 , B_1 - B_2 là độ lớn của các sóng ứng suất truyền qua phải và qua trái tương ứng. Tại bề mặt 1 ($X = 0$), sóng A_1 một phần bị phản xạ thành sóng B_1 và một phần truyền tới là sóng A_2 . Tại bề mặt A_2 , sóng A_2 này một phần bị phản xạ lại thành sóng B_2 và một phần truyền tới là sóng A_3 . Mức độ phản xạ và truyền tới là bao lớn sẽ phụ thuộc vào sự khác biệt về trở kháng khác biệt ở mặt tiếp xúc.

Tại mỗi mặt tiếp giáp giữa thanh nén – mẫu thử, vận tốc trong mỗi vật liệu từ phía trái qua phía phải mặt tiếp xúc phải bằng nhau. Các lực ở phía trái và phía phải mặt tiếp giáp cũng phải bằng với nhau để thỏa điều kiện cân bằng. Với các điều kiện này, các phương trình mô tả ảnh hưởng của mặt tiếp xúc đến quá trình truyền sóng có thể viết được như (13) và (14):

Interface 1 ($X=0$)
<p>Continuity of Velocity</p> $\frac{A_1 - B_1}{(\rho c)_1} = \frac{A_2}{(\rho c)_2}$
<p>Force Balance</p> $s_1(A_1 + B_1) = s_2(A_2)$

(13)

Interface 2 (X=L)
Continuity of Velocity $\frac{A_2 - B_2}{(\rho c)_2} = \frac{A_3}{(\rho c)_3}$
Force Balance $s_2(A_2 + B_2) = s_3(A_3)$

(14)

Chú ý rằng, trong 4 biểu thức tồn tại 5 biến ứng suất A_1, A_2, A_3, B_1 và B_2 . Để giải được 5 biến này, cần phải có thêm một biểu thức chứa các biến ứng suất nữa. Vì không tồn tại một biểu thức như vậy nên tới đây, cần định nghĩa thêm một hệ số truyền, α , thay đổi từ 0 đến 1, diễn tả mức độ ứng suất được truyền qua một biên nào đó: nếu là 0, tức phản xạ hoàn toàn và, nếu là 1, tức truyền đi hoàn toàn (không phản xạ). Hệ số này được cho bởi:

$$\alpha = \frac{A_t}{A_i} \quad (15)$$

trong đó, các chỉ số t biểu diễn cho sóng truyền (transmitted stress) và i biểu diễn cho sóng tới (incident stress). Cần chú ý, phương trình (15) chỉ xem xét giá trị tuyệt đối của biên độ sóng mà thôi.

Dựa trên nguyên lý bảo toàn năng lượng, phần phản xạ có thể biểu diễn qua hệ số phản xạ:

$$\beta = 1 - \alpha \quad (16)$$

Với cách định nghĩa các hệ số này, các biểu thức mô tả sự truyền sóng có thể được giải cho mỗi điều kiện biên. Các biểu thức sau diễn tả phản sóng vào và ra khỏi mẫu trong Hình 2.6 tương ứng:

$$\alpha_{12} = \frac{2s_1(\rho c)_2}{s_1(\rho c)_1 + s_2(\rho c)_2} \quad (17)$$

$$\alpha_{23} = \frac{2s_2(\rho c)_3}{s_2(\rho c)_2 + s_3(\rho c)_3} \quad (18)$$

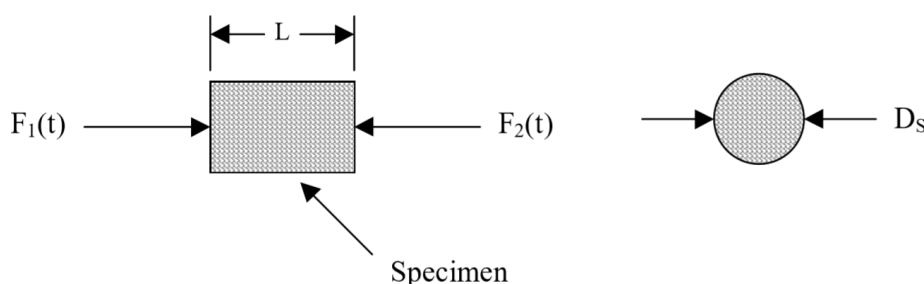
Bằng cách thay đổi các giá trị tiết diện ngang và ρc trong các phương trình (17) và (18), ta có thể tìm được các giá trị hệ số truyền.

2.4. Tính toán ứng suất, biến dạng và tốc độ biến dạng trong mẫu thử

Phần tiếp theo đây sẽ rút ra các biểu thức để tính ứng suất, biến dạng và tốc độ biến dạng trong mẫu thử. Vì quá trình tính toán rất dài nên sẽ có phần tóm tắt kết quả ở cuối mục. Trong đoạn tóm tắt này, các giả thiết tính toán trong lý thuyết này cũng được bàn đến.

a) Ứng suất trong mẫu thử:

Ứng suất trung bình trong mẫu thử có thể được biểu diễn qua các lực dọc tác dụng trên bề mặt phân tử. Hình 2.7 thể hiện sơ đồ lực tác dụng cho mẫu thử hình trụ tròn đường kính D_s bất kỳ:



Hình 2.7. Sơ đồ mẫu thử hình trụ

Lực trung bình tác động lên mẫu thử cho bởi:

$$F_{AVG}(t) = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2} \quad (19)$$

Và vì vậy, ứng suất trung bình trong mẫu là:

$$\sigma_{AVG}(t) = \frac{F_{AVG}(t)}{\frac{\pi D_S^2}{4}} \quad (20)$$

Các lực $F_1(t)$ và $F_2(t)$ tác dụng trên hai mặt mẫu thử là do các thanh bị nén. Khi mẫu thử trong trạng thái cân bằng động lực, các lực tại các đầu của các thanh nén có thể được biểu diễn thông qua biến dạng trong các thanh nén khi sóng truyền tới và truyền phản xạ:

$$F_1(t) = E[\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t)] \frac{\pi D_{BAR}^2}{4} \quad (21)$$

$$F_2(t) = E\varepsilon_T(t) \frac{\pi D_{BAR}^2}{4} \quad (22)$$

trong đó D_{BAR} là đường kính của các thanh nén. Thay thế các phương trình (19), (21) và (22) vào phương trình (20), ta được biểu thức quan hệ giữa ứng suất trung bình của mẫu thử và các biến dạng trong thanh nén:

$$\sigma_{AVG}(t) = \frac{ED_{BAR}^2}{2D_S^2} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (23)$$

Nếu mẫu thử biến dạng đều, các biến dạng trong thanh incident sẽ bằng với biến dạng trong thanh transmitted:

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (24)$$

Và biểu thức ứng suất trung bình trong mẫu thử có thể rút lại thành:

$$\sigma_{AVG}(t) = \frac{ED_{BAR}^2}{D_S^2} \varepsilon_T(t) \quad (25)$$

Phương trình này chỉ ra rằng ứng suất trong mẫu thử sẽ tỷ lệ với độ lớn của biến dạng được truyền qua mẫu thử vào trong thanh truyền.

b) Tốc độ biến dạng và biến dạng của mẫu thử

Tốc độ biến dạng được định nghĩa là biến dạng trung bình chia cho thời gian mà biến dạng xảy ra. Vì biến dạng được tính theo chuyển vị, nên nếu chia cho thời gian thì sẽ biểu thị vận tốc. Do đó, tốc độ biến dạng của mẫu thử có thể được tính từ các vận tốc bề mặt tiếp giáp giữa thanh nén và mẫu thử. Các vận tốc bề mặt này có thể tính được từ các biến dạng trong các thanh nén. Để rút ra các biểu thức cho tốc độ biến dạng và biến dạng của mẫu thử theo các biến dạng trong thanh nén, cần sử dụng phương trình chuyển động trong thanh nén, được nhắc lại ở đây cho tiện:

$$C_o^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (11)$$

Để ý rằng, đối với sóng điều hòa thì $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ sẽ bằng $\frac{\partial v}{\partial t}$, với v là vận tốc phân tử (*particle velocity*), và $E \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial y}$, với p là ứng suất trên tiết diện ngang, Phương trình chuyển động có thể được viết lại theo ứng suất nén và vận tốc:

$$-\frac{\partial p(y,t)}{\partial y} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (26)$$

Từ phương trình (26), để giải được vận tốc trong thanh, cần phải biết được ứng suất trong thanh. Nếu chúng ta giả thiết sóng điều hòa dương có dạng:

$$p(y,t) = P e^{i(\omega t - ky)} \quad (27)$$

trong đó P là biên độ sóng nén, ω là tần số, t là thời gian, k được định nghĩa $k = \frac{\omega}{c_o}$, và y là vị trí không gian của sóng. Đạo hàm theo y , rút ra:

$$\frac{\partial p(y,t)}{\partial y} = -ikPe^{i(\omega t - ky)} \quad (28)$$

Thay đạo hàm này vào phương trình (27) và kết hợp với (11), được:

$$ikPe^{i(\omega t - ky)} = \rho i \omega v(y,t) \quad (29)$$

Và từ đó có thể tìm được vận tốc phần tử, được cho bởi:

$$v(y,t) = \frac{k}{\rho \omega} Pe^{i(\omega t - ky)} \quad (30)$$

Thay k và $p(y,t)$ vào trở lại, được:

$$v(y,t) = \frac{1}{\rho C_o} p(y,t) \quad (31)$$

trong đó p là ứng suất trong tiết diện ngang. Đối với trạng thái ứng suất dọc trục, ứng suất này bằng với ứng suất trên tiết diện ngang của thanh nén. Do đó, $p(y,t)$ có thể được viết theo biến dạng thành:

$$p(y,t) = \varepsilon(y,t)E \quad (32)$$

Thay (32) vào (31), ta có biểu thức vận tốc phần tử tính theo biến dạng:

$$v(y,t) = C_o \varepsilon(y,t) \quad (33)$$

Đối với một sóng mang dấu âm, vận tốc phần tử được biểu diễn bởi:

$$v(y,t) = -C_o \varepsilon(y,t) \quad (34)$$

Với các biểu thức vận tốc phần tử được biểu diễn theo các biến dạng trong thanh nén, tốc độ biến dạng trong mẫu thử có thể tính được khá đơn giản. Tốc độ biến dạng tại một thời điểm bất kỳ được cho bởi:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v_{interface2} - v_{interface1}}{L} \quad (35)$$

Vận tốc tại mặt tiếp xúc 1 là tổng của thành phần tới (sóng dương) và thành phần phản xạ (sóng âm):

$$v_{interface1} = C_o \varepsilon_I - C_o \varepsilon_R = C_o (\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (36)$$

Để tính vận tốc tại mặt tiếp xúc thứ 2, chỉ cần biết biến dạng truyền trong thanh nén. Vì sóng truyền theo hướng dương, vận tốc mặt tiếp xúc 2 cũng mang dấu dương:

$$v_{interface2} = C_o \varepsilon_T \quad (37)$$

Thay thế các vận tốc này vào biểu thức tính tốc độ biến dạng, ta tìm được biểu thức liên hệ giữa tốc độ biến dạng và các biến dạng trong thanh:

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{C_o (\varepsilon_T - \varepsilon_I + \varepsilon_R)}{L} \quad (38)$$

trong đó, dấu âm biểu thị cho nén. Nếu mẫu biến dạng đều thì:

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (39)$$

Biểu thức tốc độ biến dạng có thể được rút gọn thành:

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{2C_o}{L} \varepsilon_{reflected} \quad (40)$$

mà có thể tích phân để tìm được biến dạng trong mẫu thử:

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2C_o}{L} \int \varepsilon_R(t) dt \quad (41)$$

Mặc dù quá trình rút ra tương đối dài, các phương trình để tính các đặc tính của mẫu thử lại khá đơn giản trong sử dụng thực tế. Các phương trình này sẽ được tóm tắt trong phần tiếp sau đây.

c) *Tóm tắt các phương trình tính ứng suất, biến dạng và tốc độ biến dạng trong mẫu thử:*

Đối với một mẫu thử biến dạng đều, các biểu thức quan hệ giữa các biến dạng trong thanh nén và tính chất mẫu thử đã được rút ra ở dạng rất đơn giản.

Sau khi thanh striker va chạm vào thanh incident, một sóng nén được phát sinh lan truyền hướng đến mẫu thử. Khi chạm đến mẫu, một phần sóng phản xạ lại, phần còn lại truyền xuyên qua mẫu và đi vào thanh transmitted. Bằng cách gắn các cảm biến đo biến dạng trên bề mặt các thanh nén, các sóng truyền và sóng phản xạ có thể thu lại để sử dụng trong các phương trình (42):

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_s(t)}{dt} &= -\frac{2C_o}{L} \varepsilon_R(t) \\ \varepsilon_s(t) &= -\frac{2C_o}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \\ \sigma_s(t) &= E \frac{A_o}{A} \varepsilon_T(t) \end{aligned} \quad (42)$$

Có nhiều yếu tố ảnh hưởng rất lớn đến việc áp dụng các phương trình (42). Như đã đề cập trước đây, các sóng có thể bị phân tán làm ảnh hưởng đến hình dáng của sóng. Muốn đảm bảo giả thiết cơ bản cho bài toán này, mẫu phải biến dạng đều, bề mặt tiếp giáp giữa thanh nén và mẫu phải được bôi trơn, đồng thời kích thước mẫu thử phải được lựa chọn thích hợp. Giải quyết được các yêu cầu này, quan hệ động lực ứng suất-biến dạng của hàng loạt vật liệu có thể tìm được bằng các phương trình (42).

CHƯƠNG 3

MÔ PHỎNG THIẾT BỊ HOPKINSON VỚI ABAQUS

3.1 GIỚI THIỆU ABAQUS [12]

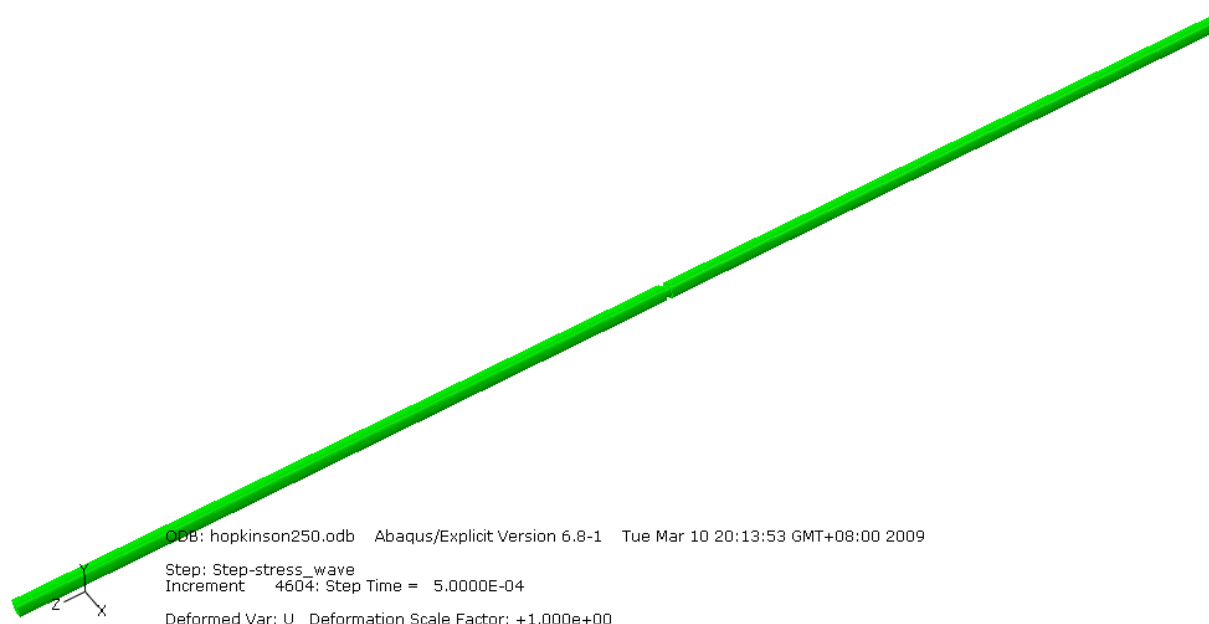
Abaqus là một trong các phần mềm thương mại nổi tiếng hiện nay dùng để mô phỏng các bài toán từ đơn giản đến phức tạp, từ tuyến tính đến phi tuyến, từ tĩnh đến động. Abaqus có một kho phần tử vô cùng phong phú để có thể mô phỏng bất cứ hình dạng nào; đồng thời, nó cũng có một kho mô hình vật liệu hết sức đồ sộ có thể giúp mô phỏng đại đa số các vật liệu hiện nay bao gồm kim loại, cao su, cao su phân tử, vật liệu phức hợp, bê tông cốt thép... Abaqus không chỉ giải quyết vấn đề phân tích kết cấu (ứng suất, chuyển vị), mà còn có khả năng mô phỏng và nghiên cứu các vấn đề trong các lĩnh vực khác nhau như truyền dẫn nhiệt, phân tích âm thanh, điện tử, truyền sóng...

Abaqus có hai khối phân tích chủ yếu: ABAQUS/Standard và ABAQUS/Explicit. Ngoài ra vẫn còn hai khối phân tích phụ có công dụng đặc biệt: ABAQUS/Aqua và ABAQUS/Design. ABAQUS/CAE (Complete ABAQUS Environment) là khối giao tiếp với người dùng, làm công tác tiền xử lý như thiết lập mô hình, gán đặc tính và điều kiện biên, phân chia mạng lưới.... ABAQUS/Viewer dùng để tiến hành phân tích và sử lý kết quả.

Trong bài toán mô phỏng này, mô hình Johnson-Cook [13] của ABAQUS/Explicit với 5 thông số A, B, n, C, m rút ra từ thực nghiệm [14] được sử dụng:

$$\sigma = \left(A + B\varepsilon^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (43)$$

3.2. Mô phỏng thiết bị Hopkinson với Abaqus



Hình 3.1. Mô phỏng số thiết bị Hopkinson

Trước tiên, mô hình thiết bị Hopkinson gồm thanh incident, thanh transmitted và mẫu thử được thiết lập với kích thước như Bảng 3.1 sau:

Bảng 3.1: Kích thước các bộ phận của thiết bị

Mô hình	Thanh Incident	Mẫu thử	Thanh Transmitted
Kích thước (mm) $\phi \times L$	25 × 2040	18 × 22	25 × 2040

Đối với tham số vật liệu, thanh incident và thanh transmitted sử dụng vật liệu đàn hồi tuyến tính với mô đun đàn hồi 200 GPa, hệ số Poisson 0,3 và mật độ là 7.85×10^3 KG/m³. Riêng mẫu thử sử dụng các tham số như Bảng 3.2 sau:

Bảng 3.2. Thông tin vật liệu và tham số của mô hình

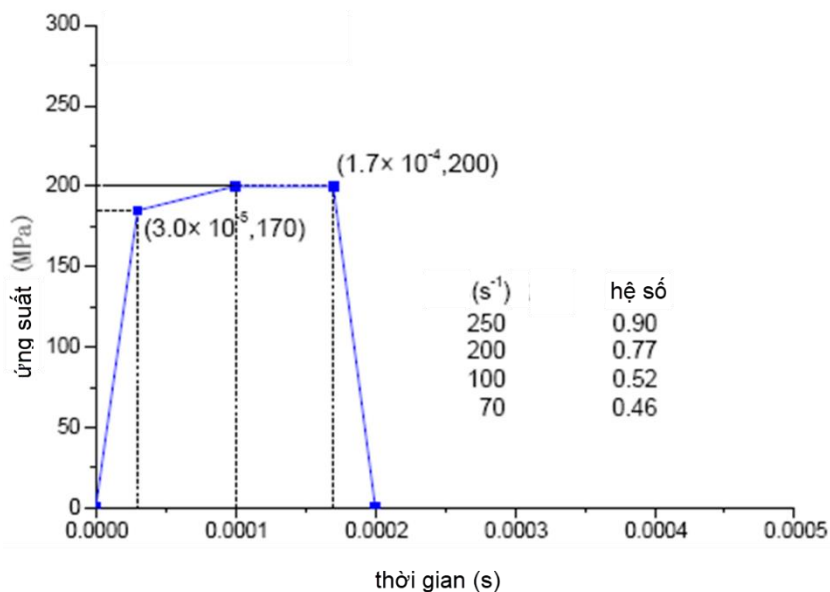
Tính chất	Mật độ [Kg/m ³]	Mô đun đàn hồi [MPa]	Hệ số Poisson	5 tham số của mô hình Johnson-Cook				
				A[MPa]	B[MPa]	n	C	M
Giá trị	2.7 × 10 ³	68.0 × 10 ³	0.33	66.562	108.853	0.238	0.029	0.5

Cách thức khai báo các thông số vật liệu trong Abaqus có thể tham khảo trong file input như sau:

```

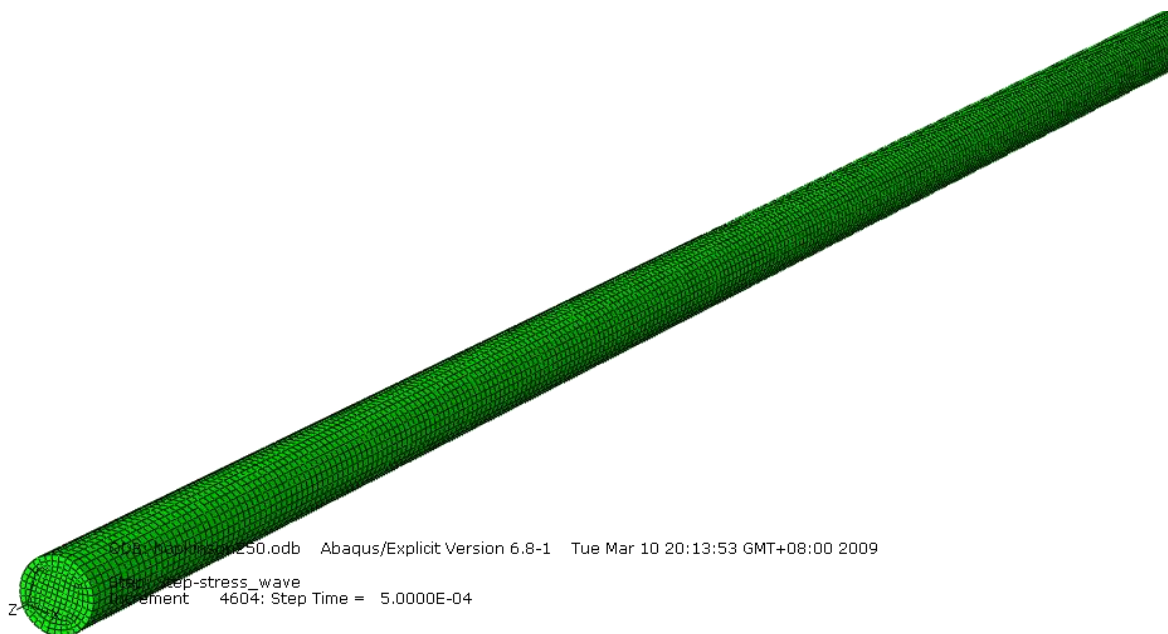
** MATERIALS
**
*Material, name=Material-bar
*Density
7850.,
*Elastic
2e+11, 0.3
*Material, name=Material-speciman
*Density
2700.,
*Elastic
6.8e+10, 0.33
*Plastic, hardening=JOHNSON COOK
6.6562e+07, 1.08853e+08, 0.238, 0.5, 1790., 230.
*Rate Dependent, type=JOHNSON COOK
0.029, 0.1
**
    
```

Do đây là bài toán mô phỏng động gồm nhiều bộ phận tác động lên nhau nên cần phải thiết lập hiệu ứng tiếp xúc giữa các bộ phận bao gồm phần tiếp xúc giữa thanh incident với mẫu thử và phần tiếp xúc giữa mẫu thử với thanh transmitted.

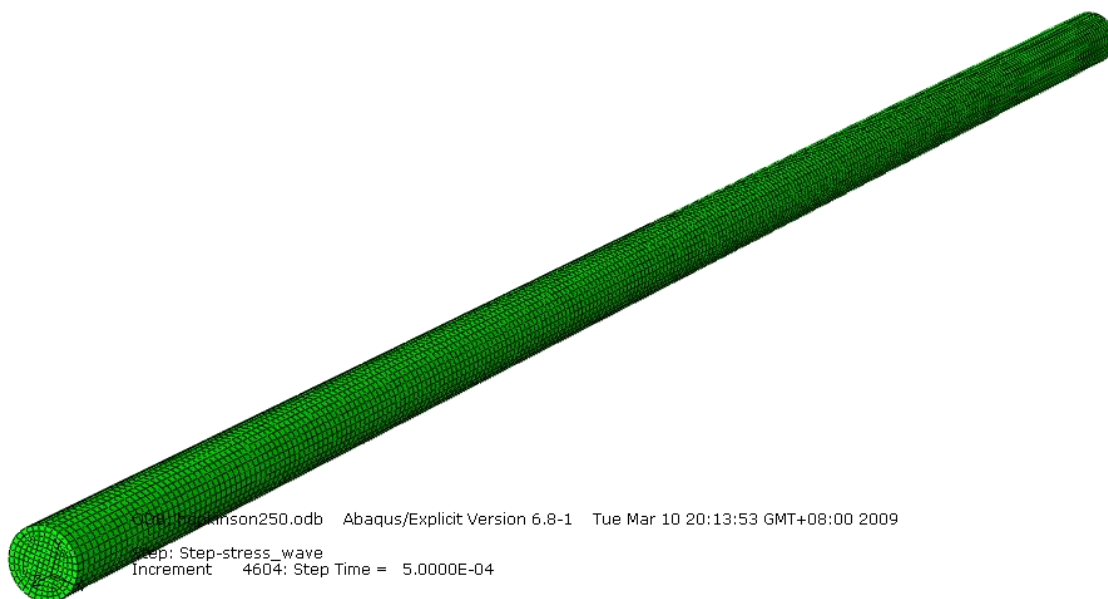


Hình 3.2. Xung tải trọng

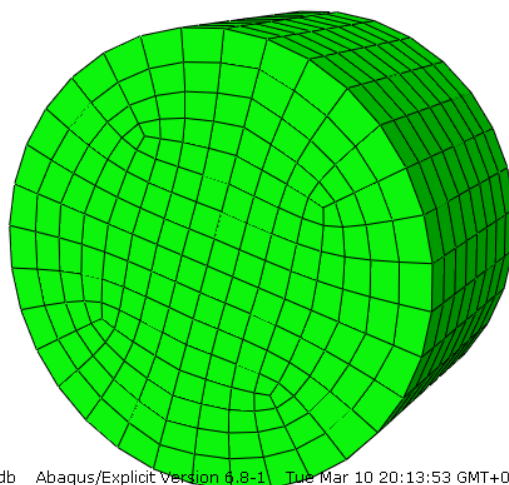
Xung tải trọng tác động vào đầu thanh incident được lấy theo Hình 3.2, trong đó các hệ số được điều chỉnh để có tốc độ biến dạng tương ứng. Sử dụng phần tử 3 chiều 8 nút C3D8 để mô phỏng. Tổng cộng có tất cả có 17160 phần tử như Hình 3.3.



a) Thanh Incident



b) Thanh Transmitted



c) Mẫu thử

Hình 3.3. Chia lưới phần tử

Đoạn code cho file input của mô hình này có dạng như sau:

```

*Heading
** Job name: hopkinson100 Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE Version 6.8-1
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=bar-1|
*Node
    1, 0.0125000002,      0.,      0.
    2,      0.,          0.,      0.
    3,      0., 0.0125000002,      0.
    4,      0.,          0.,      1.
    5, 0.0125000002,      0.,      1.
    6,      0., 0.0125000002,      1.
    7, -0.0125000002,      0.,      0.
    8,      0., -0.0125000002,      0.

...

    50798, 0.00539754098, -0.00756370416, 0.503496528
    50799, 0.00605347054, -0.00885700621, 0.503496528
*Element, type=C3D8
    1, 3280, 3281, 19186, 16899, 14, 15, 1541, 1540
    2, 3281, 3282, 19187, 19186, 15, 16, 1542, 1541
    3, 3282, 3283, 19188, 19187, 16, 17, 1543, 1542
    4, 3283, 308, 1570, 19188, 17, 1, 18, 1543
    5, 16899, 19186, 19189, 16900, 1540, 1541, 1545, 1544
    6, 19186, 19187, 19190, 19189, 1541, 1542, 1546, 1545

...

45759, 43697, 43694, 42400, 42399, 50798, 50799, 44835, 44834
45760, 43694, 15573, 15146, 42400, 50799, 16569, 16143, 44835
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
    1, 50799, 1
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
    1, 45760, 1
** Section: Section-bar
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material=Material-bar

*End Part
**
*Part, name=speciman
*Node
    1, 0.00899999961,      0.,      0.
    2,      0.,          0.,      0.
    3,      0., 0.00899999961,      0.
    4,      0.,          0., 0.0109999999

```

```

1880, 0.00385611062, -0.00557482988, 0.00687500043
1881, 0.00435455423, -0.00643698918, 0.00687500043
*Element, type=C3D8
  1, 244, 245, 943, 871, 14, 15, 159, 158
  2, 245, 246, 944, 943, 15, 16, 160, 159
  3, 246, 247, 945, 944, 16, 17, 161, 160
  4, 247, 31, 195, 945, 17, 1, 18, 161

1535, 1687, 1684, 1635, 1634, 1880, 1881, 1719, 1718
1536, 1684, 785, 775, 1635, 1881, 808, 799, 1719
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
  1, 1881, 1
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
  1, 1536, 1
** Section: Section-speciman
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material=Material-speciman

*End Part
**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=bar-1-1, part=bar-1
*End Instance
**
*Instance, name=speciman-1, part=speciman
      0.,      0.,      -0.011
*End Instance
**

** LOADS
**
** Name: Load-stress-wave   Type: Pressure
*Dload, amplitude=Amp-stress-wave
Surf-bar2-right, P, 0.52
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-8
**
*Output, history
*Element Output, elset=Set-element-spe
LE33, S33
**

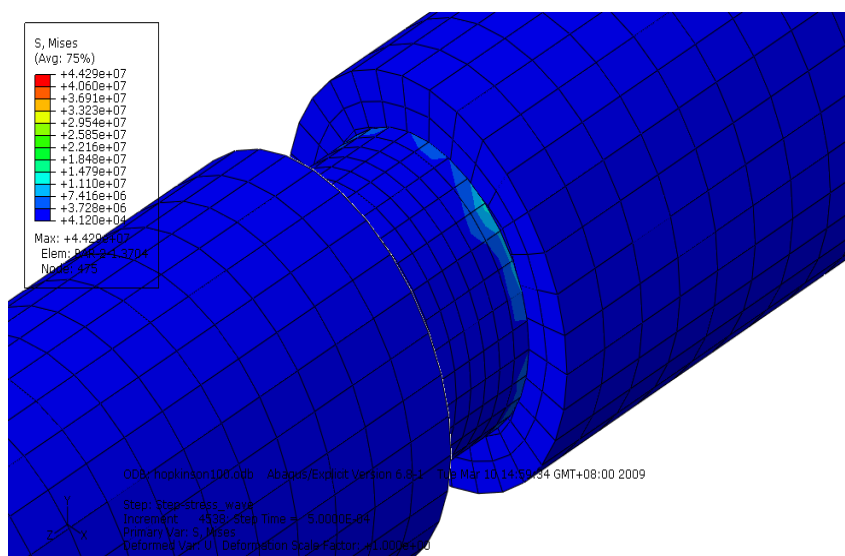
```

```

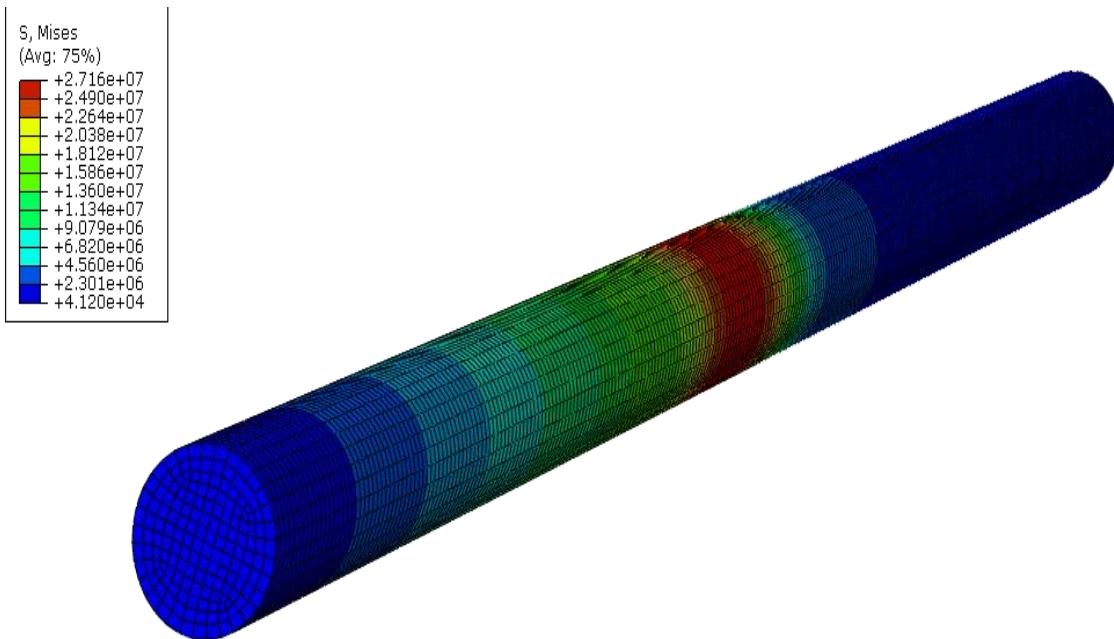
** HISTORY OUTPUT: H-Output-5
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-6
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-7
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-3
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-4
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step
    
```

3.3. Kết quả phân tích

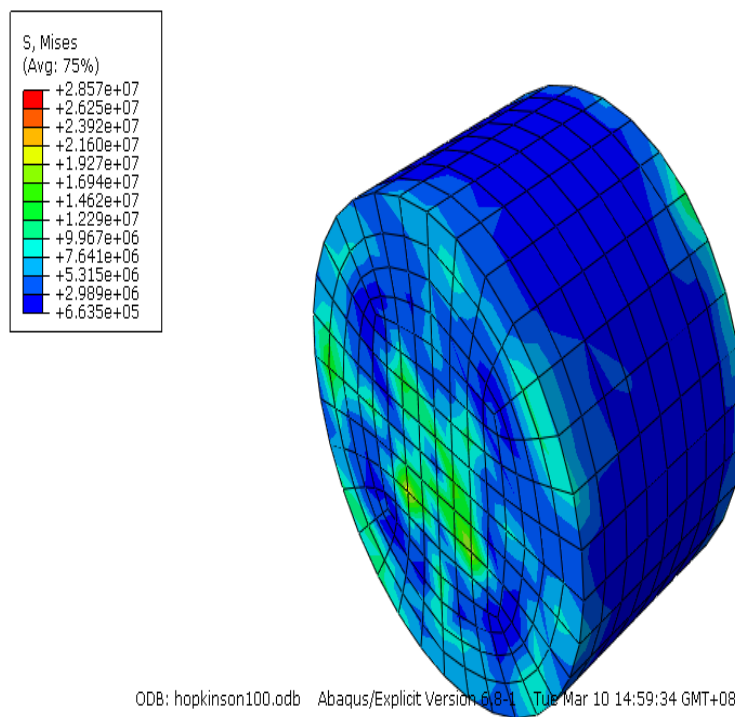
Trong mô hình phân tích này, sự truyền sóng theo thời gian có thể quan sát như thể hiện trên Hình 3.4. Sự kiện phá vỡ mẫu này chỉ xảy ra trong thời gian rất bé, chỉ 5×10^{-4} giây như Hình 3.5.



a)

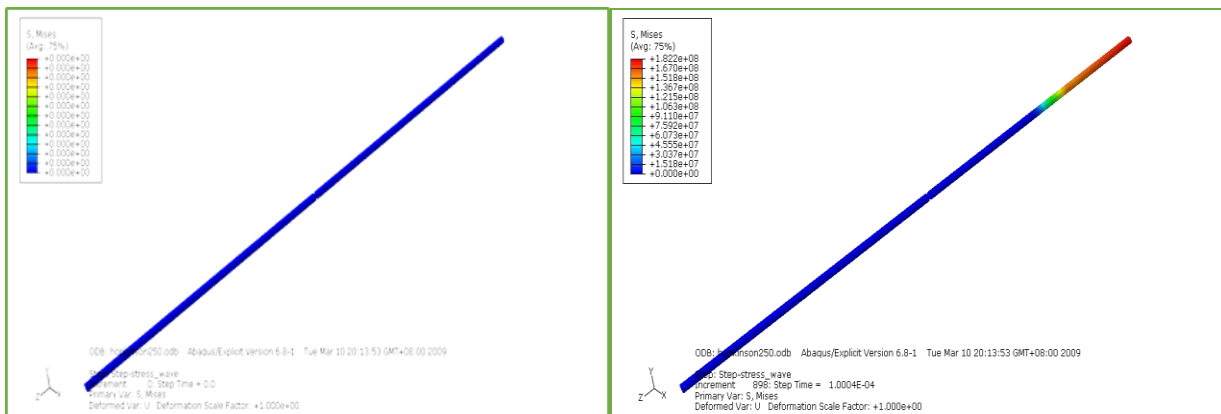


b)



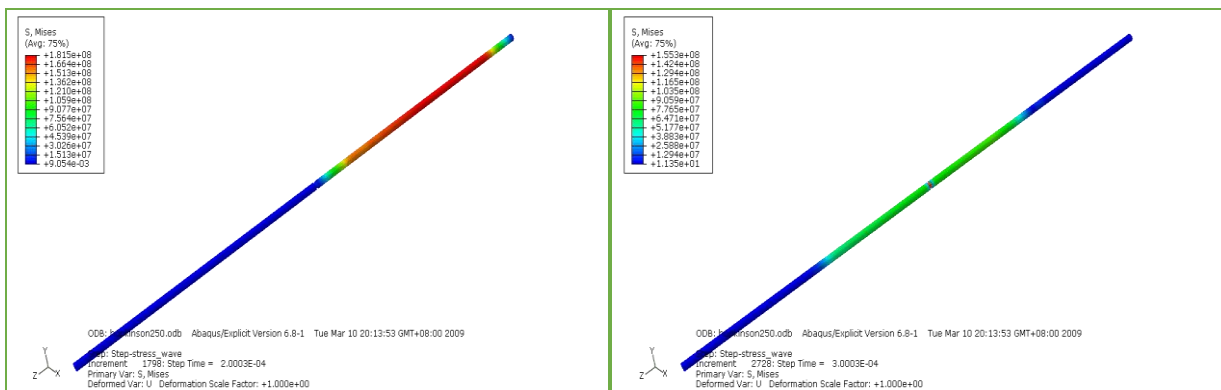
c)

Hình 3.4. Quá trình truyền sóng trong thiết bị Hopkinson



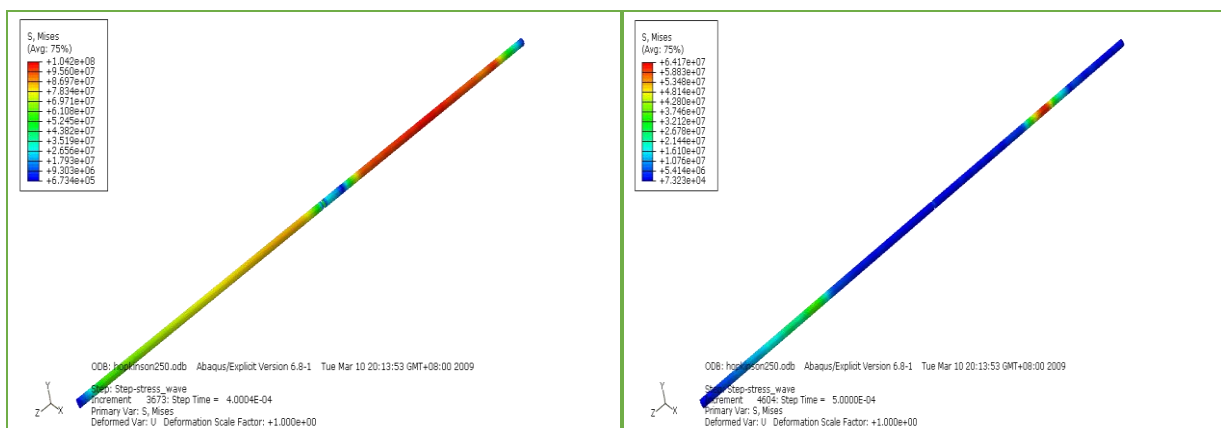
0 s

1e⁻⁴ s



2e⁻⁴ s

3e⁻⁴ s

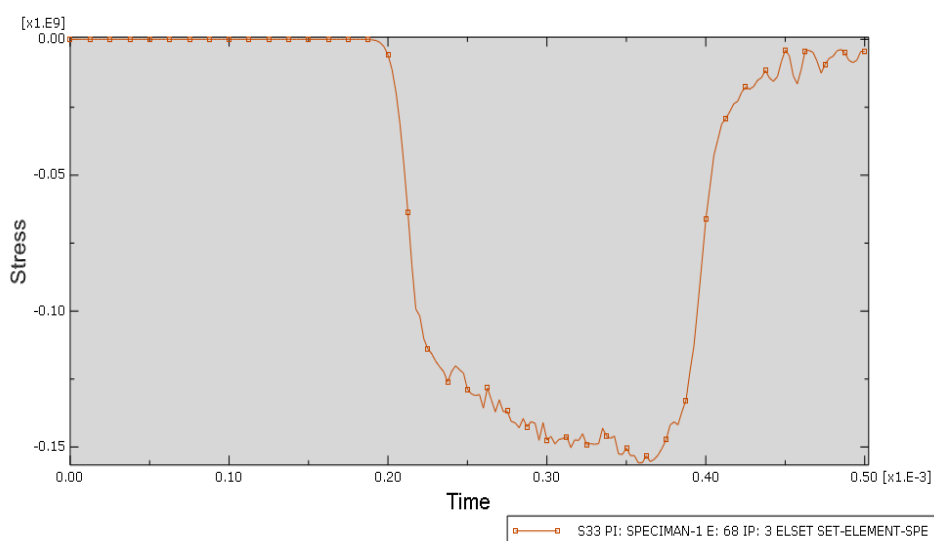


4e⁻⁴ s

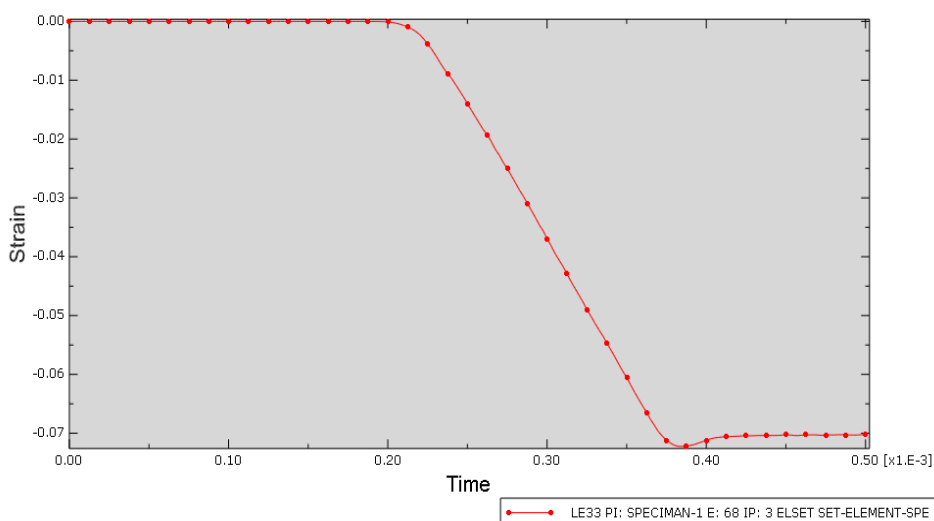
5e⁻⁴ s

Hình 3.5. Sự kiện xảy ra trong 5×10^{-4} giây

Từ hình 3.6 có thể thấy, lúc sóng ứng suất vẫn chưa truyền đến mẫu thử, ứng suất trên mẫu thử vẫn là 0. Khi sóng bắt đầu truyền vào mẫu thử, ứng suất sẽ từ từ tăng dần lên, cho đến phần cuối sóng, hiện tượng rung chấn xuất hiện là do sóng bị nhiễu khi truyền đến cuối mẫu thử rồi qua mặt tiếp xúc tiếp tục truyền vào thanh transmitted. Hình 3.7 thể hiện biến dạng theo thời gian của mẫu thử. Kết hợp 2 đường ứng suất theo thời gian và biến dạng theo thời gian lại với nhau, ta sẽ có đường cong quan hệ ứng suất và biến dạng của mẫu thử.

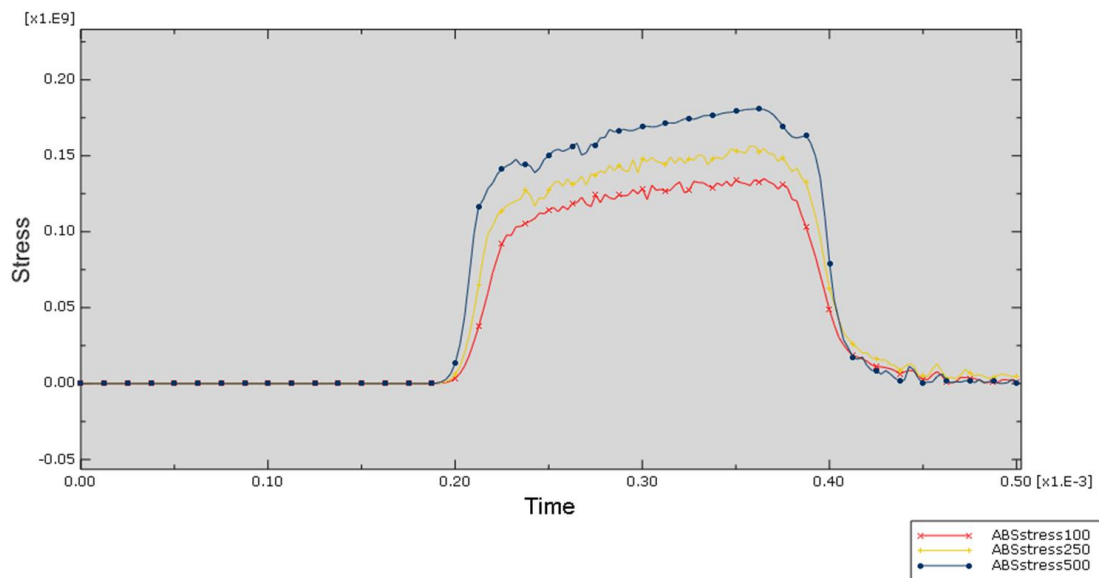


Hình 3.6. Ứng suất theo thời gian trong mẫu thử

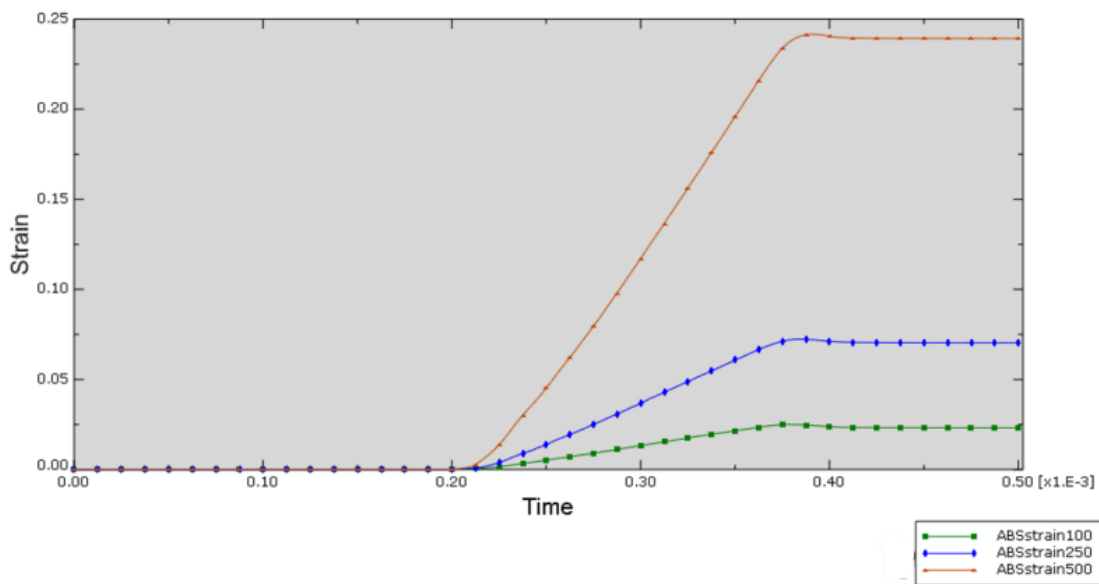


Hình 3.7. Biến dạng theo thời gian trong mẫu thử

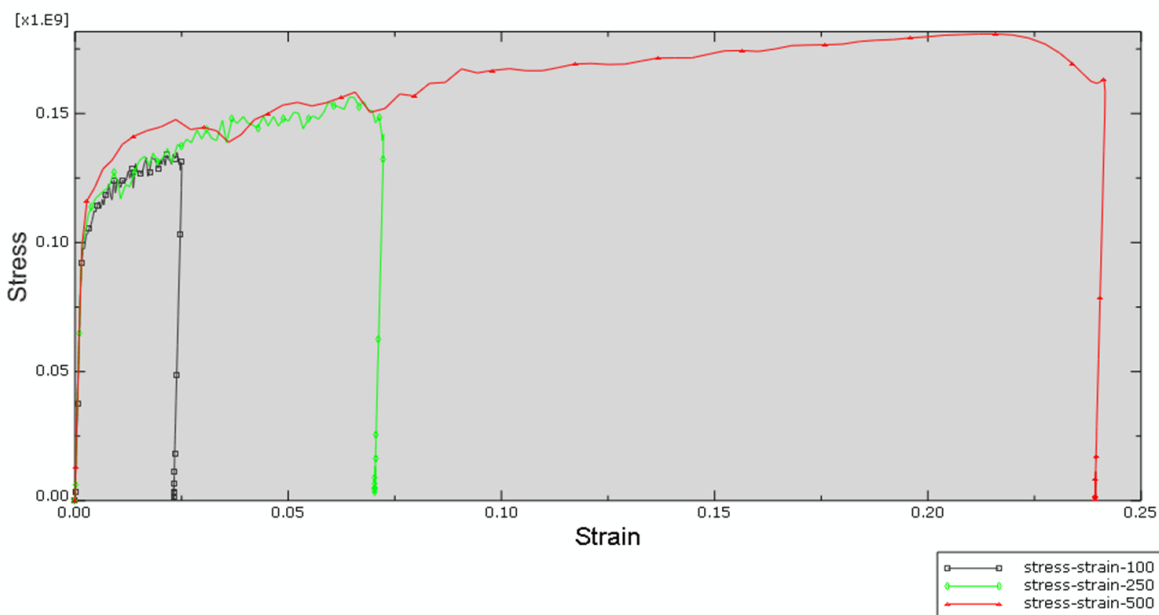
Lần lượt gia tải với 3 tốc độ biến dạng khác nhau, kết quả ứng suất theo thời gian, ứng suất biến dạng theo thời gian và quan hệ ứng suất-biến dạng được cho trong hình 3.8.



a) Ứng suất theo thời gian



b) Biến dạng theo thời gian



c) Ứng suất – biến dạng

Hình 3.8. Vật liệu nhạy với tốc độ biến dạng

Từ Hình 3.8, có thể thấy rõ một điều: vật liệu nhạy với tốc độ biến dạng, nghĩa là khi tốc độ biến dạng thay đổi, quan hệ ứng suất và biến dạng cũng thay đổi. Cụ thể, khi tốc độ biến dạng gia tăng, mẫu thử sẽ có biến dạng gia tăng và khả năng chịu lực cũng gia tăng.

3.4. Kết luận chương

Chương này đã trình bày mô phỏng thiết bị Hopkinson bằng Abaqus để tìm ứng xử của vật liệu dưới tác động của tải trọng nén tốc độ cao. Thông qua mô phỏng, một trong những đặc tính động lực quan trọng của vật liệu đã được chỉ ra: vật liệu nhạy với tốc độ gia tải.

Chương sau sẽ trình bày thêm cách sử dụng một phần mềm mô phỏng chuyên dụng khác, LS-Dyna, để mô phỏng thiết bị này và một vài kết quả liên quan tới vật liệu bê tông cũng sẽ được bàn đến.

CHƯƠNG 4

MÔ PHỎNG THIẾT BỊ HOPKINSON VỚI LS-DYNA

4.1. Giới thiệu LS-DYNA [15]

Phần mềm 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, LsDyna 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 Dr. 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 nổ bom, mìn 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 vật rắn cũng như các tính năng mô phỏng mới như tiếp xúc bề mặt, giảm chấn (dampers)... Tính đến năm 1988, Dr. Hallquist đã tư vấn cho gần 60 công ty và tổ chức về việc sử dụng phần mềm DYNA3D. Cuối năm 1988, Livermore Software

Technology Corporation (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. Đối với các vấn đề liên quan đến kết cấu công trình cầu, hầm, LS-DYNA được sử dụng trong một số bài toán như: - Mô phỏng tương tác giữa chuyển động của ô tô và kết cấu cầu (vehicle – bridge interaction). - Mô phỏng bài toán va chạm giữa ô tô, tàu hỏa, xà lan với lan can, trụ cầu (impact analysis). - Mô phỏng tác động của vụ nổ với kết cấu...

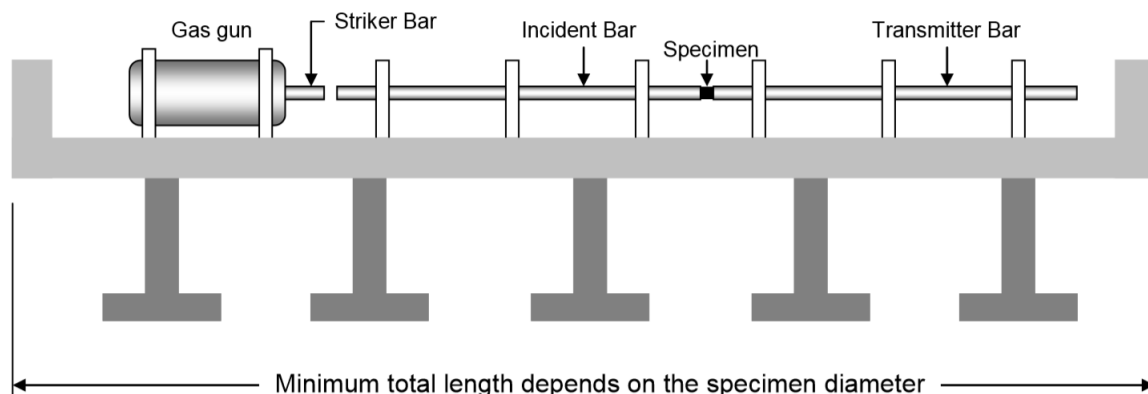
4.2. Ứng dụng LS-DYNA mô phỏng thiết bị Hopkinson:

Thiết bị Hopkinson làm việc dựa trên các giả thuyết sau:

- Lý thuyết truyền sóng một chiều được áp dụng
- Ứng suất và biến dạng trong mẫu là đều theo phương dọc trục
- Bỏ qua ảnh hưởng ma sát và quán tính của mẫu thử.

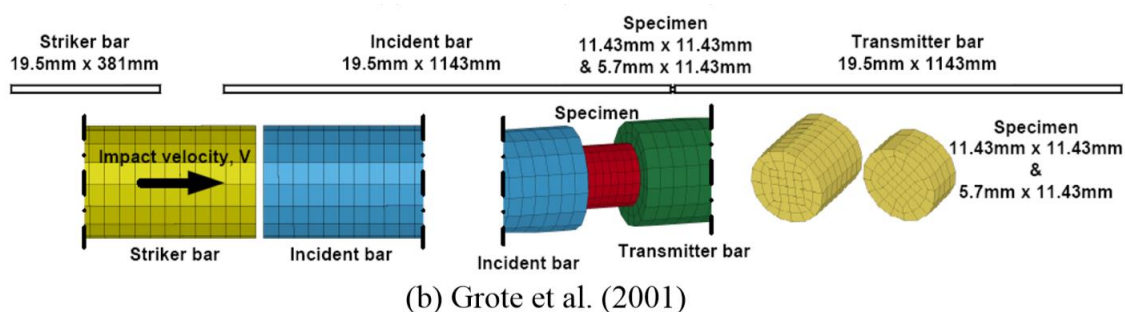
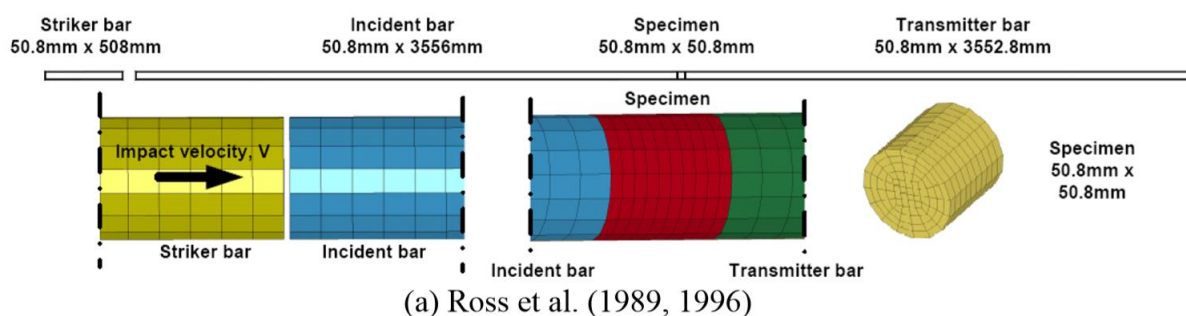
Để có thể dùng thiết bị Hopkinson cho vật liệu bê tông, mẫu thử phải có kích thước đủ lớn so với cốt liệu để đảm bảo tính đồng đều của vật liệu. Mặt khác, đối với thiết bị Hopkinson, đường kính mẫu thử phải càng bé càng có lợi vì nó làm giảm kích thước tổng thể của thiết bị và quan trọng hơn là nó làm giảm độ phân tán sóng dọc khi lan truyền trong các thanh của thiết bị, gây ảnh hưởng đến kết quả thí nghiệm. Mẫu thử có kích thước lớn như vậy cũng sẽ xung đột với giả thuyết 3 ở trên, và cũng làm ảnh hưởng đến kết quả thí nghiệm.

Hai đòi hỏi trái ngược lẫn nhau như thế này: mẫu phải càng lớn càng tốt và thiết bị thí nghiệm càng bé càng có lợi, đưa đến bài toán thực tế cần phải giải quyết của thiết bị Hopkinson khi thí nghiệm với mẫu bê tông. Chẳng hạn, đối với mẫu trụ đường kính 75mm, thiết bị Hopkinson phải dài 10-12m. Hơn nữa, để đảm bảo ảnh hưởng quán tính trong mẫu nhỏ nhất, thông thường phải chọn chiều dày mẫu bằng với đường kính. Điều này lại dẫn đến một hiệu ứng khác tác động đến kết quả, đó là hiệu ứng *confining* do ma sát ở 2 đầu mẫu thử bị kẹp chặt bởi thiết bị. Mục đích của việc mô phỏng thiết bị là để tìm hiểu những hiện tượng này.



Hình 4.1. Tổng thể thiết bị Hopkinson

Hình 4.1 mô tả tổng thể thiết bị, còn hình 4.2 mô tả kích thước chi tiết của thiết bị tương ứng với 2 thiết bị thí nghiệm được dùng bởi Ross *et al.* [16, 17] và bởi Grote *et al.* [10] tương ứng.



Hình 4.2. Mô phỏng số thiết bị Hopkinson

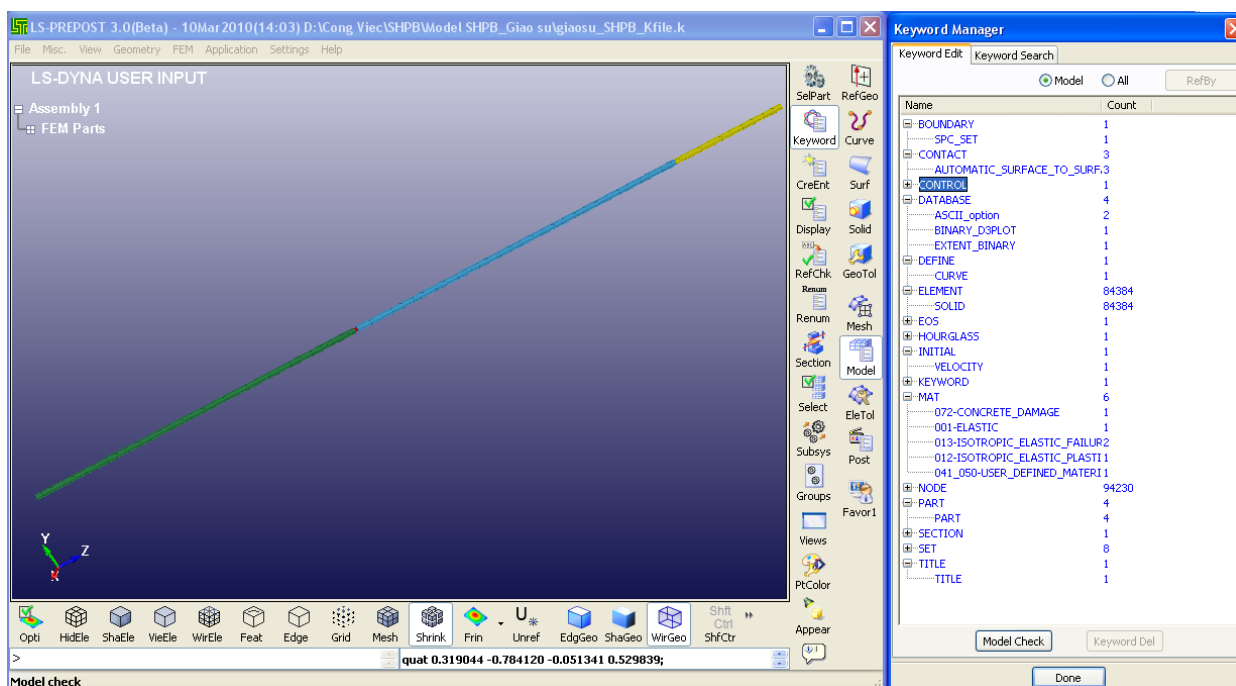
Sử dụng phần tử solid 8 nút để mô phỏng tất cả các bộ phận của thiết bị bao gồm thanh striker, thanh incident, thanh transmitted và mẫu thử. Hai mô hình vật liệu J_2 và *Drucker-Prager* (D-P) [15] được sử dụng cho mẫu thử. Lưu ý sử dụng phần tử contact tại các mặt tiếp xúc giữa các thanh striker và thanh incident, giữa thanh incident và mẫu thử, giữa mẫu thử và thanh transmitted.

Ba hệ số ma sát $\mu = 0,1$; $\mu = 0,2$; $\mu = 0,3$ được sử dụng cho 2 mặt tiếp xúc của mẫu thử với thiết bị. Bài toán mô phỏng được áp dụng với nhiều cấp vận tốc cho thanh striker từ 2.54 m/s đến 33.02 m/s.

Trong khi Grote *et al.* [10] sử dụng (40) để tính tốc độ biến dạng thì Ross *et al.* [16, 17] lại tính trực tiếp từ tốc độ ứng suất:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} / E_s \quad (44)$$

Hình 4.3 cho thấy mô hình tổng thể được mô phỏng nhờ LS-Prepost trước khi đưa vào LS-Dyna để xử lý.



Hình 4.3. Quá trình truyền sóng trong thiết bị Hopkinson

Một phần file input được cho sau đây:

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PREPOST 3.0 (Beta) -
10Apr2010 (22:39)
$# Created on Apr-05-2010 (20:33:50)
*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_TERMINATION
$#   endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
      0.002000      0      0.000      0.000      0.000
*DATABASE_NCFORC
$#   dt      binary      lcur      iopt
      1.0000E-6      0      0      1
*DATABASE_NODFOR
$#   dt      binary      lcur      iopt
      0.000      0      0      1
*DATABASE_NODOUT
$#   dt      binary      lcur      iopt      dthf      binhf
      0.000      0      0      1      0.000      0
*DATABASE_SPCFORC
$#   dt      binary      lcur      iopt
      1.0000E-6      0      0      1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#   dt      lcdt      beam      npltc      psetid

*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#   dt      lcdt      beam      npltc      psetid
      1.0000E-6      0      0      0      0
$#   iopt
      0
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#   neiph      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg
      rltflg      engflg
      28      3      3      0      1      1
      1      1
$#   cmpflg      ieverp      beamip      dcomp      shge      stssz
      n3thdt      ialemat
      0      0      0      1      1      1
      2      1
$#   nintsld      pkp_sen      sclp      unused      msscl      therm
      iniout      iniout
      0      0      1.000000      0      0
OSTRESS      STRESS

...

```

```

*BOUNDARY_SPC_SET
      1      0      1      1      1      0
0      0
*SET_NODE_LIST_TITLE
NODESET(SPC) 1
      1      0.000      0.000      0.000      0.000MECH
      20609      20614      20613      20608      20682      20687
20686      20681
      20641      20636      20635      20640      20642      20637
20643      20638
      20644      20639      20646      20645      20647      20648
20649      20651
      20650      20652      20653      20654      20661      20655
20662      20657
      20663      20658      20664      20659      20666      20667
20668      20669
      20671      20672      20673      20674      20680      20675
20676      20677
      20678      20683      20685      20688      20690      20691
20692      20693
      20701      20696      20702      20665      20703      20697
20706      20707
      20698      20705      20700      20694      20684      20689
20679      20656
      20670      20695      20660      20704      20699      0
-      -
20679      20656
      20670      20695      20660      20704      20699      0
0      0
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid
title
      1Strike_Incident Contact
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid
spr      mpr
      1      2      0      0      0      0
0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk
bt      dt
      0.500000      0.500000      0.000      0.000      0.000      0

```

...


```

*SECTION_SOLID_TITLE
Section Solid
$#   secid   elform       aet
      1       1           0
*MAT_ELASTIC_TITLE
Material for Bars
$#   mid     ro           e       pr       da       db   not
used
      1 8.8290E-9 2.0000E+5 0.280000 0.000 0.000
0
*PART
$# title
Incident Bar
$#   pid     secid       mid     eosid     hgid     grav
adpopt   tmid
      2       1           1         0         0         0
0
*PART
$# title
Specimen
$#   pid     secid       mid     eosid     hgid     grav
adpopt   tmid
      3       1           2         0         0         0
0
*MAT_ISOTROPIC_ELASTIC_FAILURE_TITLE
Material for Specimen
$#   mid     ro           g       sigy     etan     bulk
      2 8.8290E-9 80800.000 526.00000 0.000 1.7500E+5
$#   epf     prf         rem     trem
      0.200000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
Transmitter Bar
$#   pid     secid       mid     eosid     hgid     grav
adpopt   tmid
      4       1           1         0         0         0
0
*HOURLASS
$#   hgid     ihq         qm       ibq         q1         q2
      20707    15.2980967          0.000 2679.4301758 0
0
*END
*COMPONENT
      1 0.769000 0.004000 0.110000 0.000 0
0
Part 1
*COMPONENT_PART
      1       1
      2       1
      3       1
      4       1
*COMPONENT_END

```

4.3. Kết quả phân tích [18]:

Bảng 4.1 là tổng hợp kết quả của tốc độ biến dạng và DIF (*Dynamic Impact Factor*) cho cả hai mô hình D-P và J₂ đối với thiết bị Hopkinson của Ross *et al.*[16]. Ngoài tốc độ biến dạng tìm được tính trực tiếp từ mô phỏng, bảng này còn trình bày kết quả tính từ phương trình (40) và (44) như đã đề cập ở phần trên.

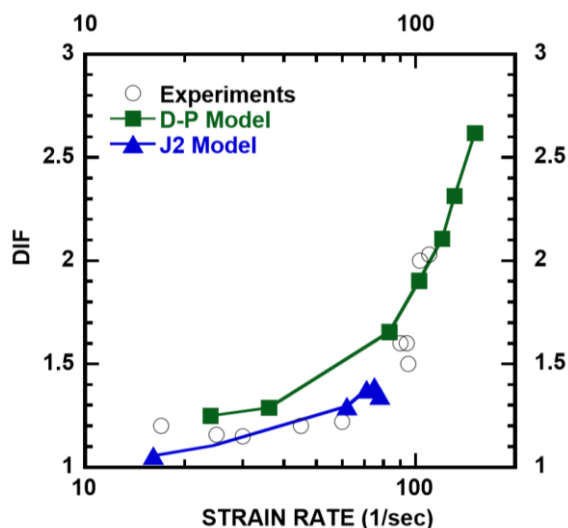
Bảng 4.1. Tóm tắt kết quả mô phỏng cho thiết bị Hopkinson của Ross ($\mu = 0.3$)

Assigned Material Model	Vel. (m/s)	Incident Bar	Transmitted Bar	$\dot{\epsilon}$ (1/s)			DIF
		σ_I (MPa)	σ_T (MPa)	Eqn. 40	Eqn. 44	From Simulation	$\frac{\sigma_T}{\sigma_S}$
D-P Model	Static	-	46.300	0.0001			1
	3.81	88.9	56.587	31	24	69	1.249
	5.08	118.3	58.325	84	36	92	1.288
	10.16	236.9	74.980	187	83	188	1.655
	15.24	355.7	86.237	265	102	286	1.904
	20.32	474.6	95.385	357	120	381	2.106
	25.40	594.0	104.795	460	131	487	2.313
	33.02	772.8	118.589	617	150	626	2.613
J2 Model	Static	-	46.000	0.0001			1
	3.81	89.4	48.565	50	16	72	1.056
	5.08	119.3	50.849	75	24	91	1.105
	10.16	238.7	59.582	167	62	185	1.295
	15.24	358.4	63.395	268	71	293	1.378
	20.32	478.3	63.985	392	75	394	1.391
	25.40	598.4	63.632	471	77	490	1.383
	33.02	778.9	61.901	625	78	646	1.346

σ_I : Peak stress value in the Incident stress history
 σ_T : Peak stress value in the Transmitted stress history

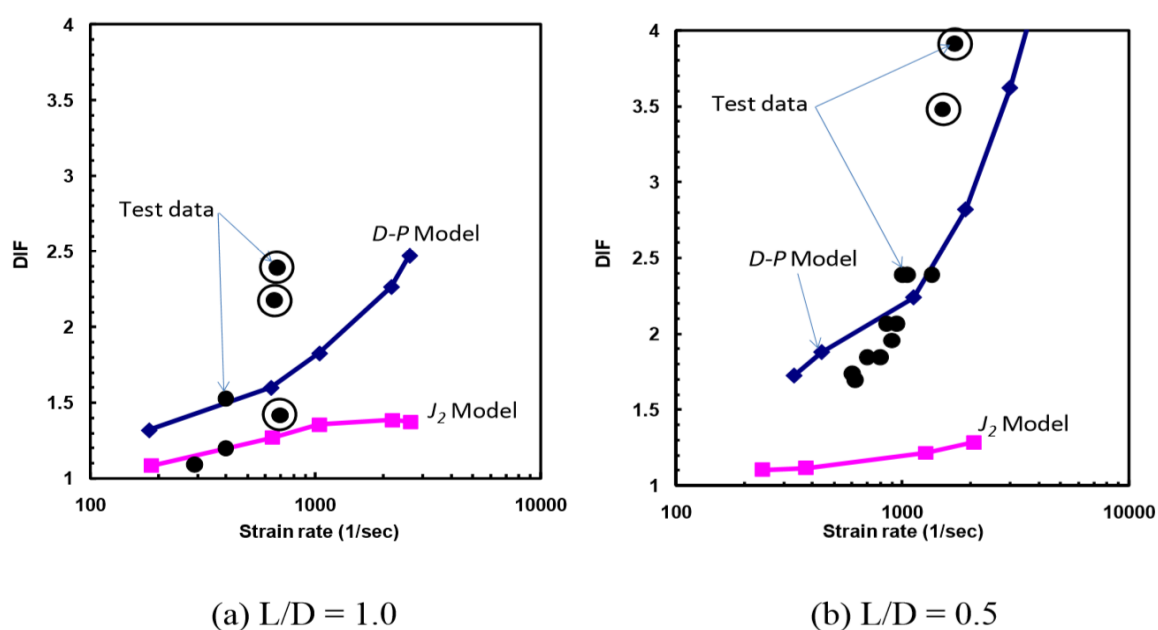
Quan sát bảng này, ta có thể thấy được hai tính chất: 1) tốc độ biến dạng sẽ tăng khi tốc độ thanh striker tăng, và 2) DIF sẽ tăng khi tốc độ biến dạng tăng. Hơn nữa, cách tính theo 2 phương trình (40) và (44), cho cả hai mô hình D-P và J₂, cho kết quả khác biệt khá nhiều, chứng tỏ cách tính của Ross *et al.* dường như thấp hơn so với thực tế. Kết quả mô phỏng gần xấp xỉ với (40) chứng tỏ số liệu từ mô phỏng là đáng tin cậy.

Cũng từ bảng 4.1 ta thấy với các mẫu sử dụng mô hình J_2 , DIF trong miền tốc độ biến dạng bé hơn 646 s^{-1} chỉ thay đổi từ 1.06 đến 1.39, nghĩa là độ gia tăng về cường độ khi tốc độ biến dạng gia tăng là nhỏ. Trong khi đó, đối với mô hình $D-P$, độ gia tăng này mạnh hơn nhiều, DIF lên tận đến 2.6 (Hình 4.4).



Hình 4.4. Quan hệ DIF-strain rate cho thí nghiệm của Ross

Đối với thiết bị của Grote, kết quả mô phỏng cho hai loại mẫu thử L/D lần lượt là 1 và 0.5 được cho trong Hình 4.5a và Hình 4.5b tương ứng.



Hình 4.5. Quan hệ DIF-strain rate cho thí nghiệm của Grote

Từ Hình 4.4 và Hình 4.5b, rõ ràng so với mô hình $D-P$, mô hình J_2 không đi theo luồng dữ liệu. Đặc biệt, độ gia tăng cường độ (DIF) rất thấp khi tốc độ biến dạng gia tăng, tức là mô hình J_2 cho kết quả DIF theo tốc độ biến dạng thấp hơn thực tế rất nhiều.

Bảng 4.2. Ảnh hưởng của ma sát đến cường độ vật liệu và DIF (từ kết quả mô phỏng thiết bị Hopkinson của Grote)

Velocity	$\mu=0.3$		$\mu=0.2$		$\mu=0.1$	
	Strength	DIF	Strength	DIF	Strength	DIF
Static	46.30	1.00	46.30	1.00	46.26	1.00
2.54	86.98	1.88	72.14	1.56	56.57	1.22
7.62	103.70	2.24	91.67	1.98	76.90	1.66
12.70	130.57	2.82	111.15	2.40	93.24	2.02
17.78	167.71	3.62	133.49	2.88	108.09	2.34
25.40	206.43	4.46	164.33	3.55	132.29	2.86

Ảnh hưởng của hệ số ma sát (μ) đối với DIF được cho trong bảng 4.2 và trong Hình 4.6. Mô hình mô phỏng thiết bị Hopkinson của Grote được dùng để xuất ra bộ dữ liệu này. Kết quả cho thấy, khi tốc độ gia tải bé, hệ số ma sát dường như không có ảnh hưởng gì. Nó chỉ có ảnh hưởng mạnh khi tốc độ biến dạng tăng cao.

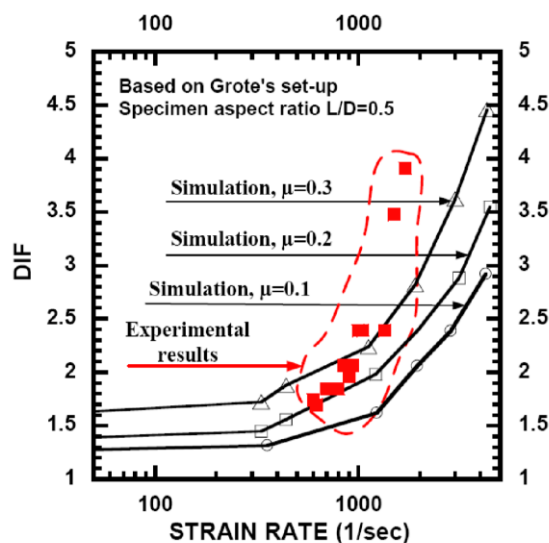


Fig. 8.12- Effect of friction on dynamic strength enhancement

Hình 4.6. Ảnh hưởng của ma sát đến sự gia tăng cường độ

4.4. Kết luận chương:

Chương này đã trình bày cách mô phỏng thiết bị Hopkinson bằng LS-Dyna để tìm ứng xử của bê tông dưới tác động của tải trọng nén tốc độ cao. Hai mô hình $D-P$ và J_2 , cùng 3 hệ số ma sát khác nhau được để tìm hiểu các đặc tính động lực của vật liệu bê tông. Hai kết quả sau được rút ra:

- So với mô hình $D-P$, model J_2 không đi theo xu hướng của thực nghiệm, đặc biệt khi tốc độ gia tải tăng cao, mô hình này cho kết quả thấp hơn hẳn.
- Ma sát có ảnh hưởng mạnh đến độ gia tăng cường độ động lực (DIF).

Các kết quả và phân tích sâu hơn, có thể tham khảo thêm ở [18]

CHƯƠNG 5

KẾT LUẬN & KIẾN NGHỊ

5.1 Kết luận

Nghiên cứu này trình bày ba vấn đề:

- Cơ sở lý thuyết của thiết bị Hopkinson, một thiết bị để thí nghiệm vật liệu dưới tải trọng nén tốc độ cao.
- Bằng Abaqus và mô hình Johnson-cook, mô phỏng toàn bộ thiết bị Hopkinson cho vật liệu bê tông. Tính chất động lực của vật liệu đã được chỉ ra: vật liệu nhạy với tốc độ biến dạng.
- Bằng LS-Dyna, tiến hành mô phỏng thiết bị Hopkinson cho vật liệu bê tông với hai mô hình $D-P$ và J_2 . Kết quả cho thấy: 1) mô hình J_2 không phù hợp và 2) Ma sát giữa mẫu thử và các thanh nén có ảnh hưởng đến độ gia tăng động lực (DIF) của vật liệu.

5.2 Kiến nghị

Từ nghiên cứu này, một vài vấn đề sau có thể được kiến nghị để phát triển thêm trong tương lai:

- Nghiên cứu này chỉ mới là bước đầu trong lĩnh vực nghiên cứu ứng xử của vật liệu chịu tải trọng nén tốc độ cao. Vật liệu, đơn giản nhất là thép. Nghiên cứu này đã cố gắng tham khảo các tài liệu để trình bày bài toán mô phỏng cho vật liệu bê tông: Là *Johnson-Cook* đối với Abaqus, là J_2 hay $D-P$ đối với bê tông. Cần nghiên cứu chi tiết hơn các mô hình này, so sánh ưu khuyết điểm từng

phần mềm để có thể áp dụng cho lớp vật liệu đang phát triển rất mạnh hiện nay: bê tông sợi.

- Đối với lớp vật liệu bê tông sợi, một trong ưu điểm của nó so với bê tông thường là cường độ chịu kéo của nó tăng lên rất nhiều và vì thế, trong thiết kế ta không còn bỏ qua nữa. Vậy thì ứng xử kéo của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng tốc độ cao như thế nào ? Thiết bị nào có thể thí nghiệm được đây ? Bài toán mô phỏng cho thiết bị kéo này ra sao ? Các mô hình vật liệu nào có thể sử dụng được ? Các mô hình có sẵn trong các phần mềm đã tích hợp tính năng “nhảy với tốc độ biến dạng” chưa, hay cần phải viết bổ sung thêm cho nó (UMAT) ?
- Có thể từ bài toán mô phỏng, tìm hiểu nguyên nhân nào làm gia tăng cường độ động lực khi nén cũng như khi kéo ?

Đây là các hướng có thể được phát triển thêm về sau.

Tài liệu tham khảo

- [1] Shigley, J.E. and Mitchell, L.D., (1993). “Mechanical Engineering Design”, 4th ed., McGraw-Hill, New York, p.177.
- [2] Kaiser, M.A., (1998). “Advancements in the Split Hopkinson Bar Test”, Master thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [3] Bancroft, D., (1941). “The velocity of Longitudinal Waves in Cylindrical Bars”, Physical Review, V.59 No.59, 588-593.
- [4] Kolsky, H., (1949). “An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading.” Proc. Phys. Soc. London B62, 676-700
- [5] Đặng, V.K., (2018), “Nghiên cứu ảnh hưởng của chấn động nổ mìn khi thi công đường hầm đến kết cấu công trình ngầm lân cận”, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Trường Đại Học Mỏ Địa Chất, Hà Nội.
- [6] Lê, B.D., et al., (2019), “Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tác động tải trọng nổ của vật liệu bê tông chất lượng siêu cao (UHPC)”, Tạp chí Khoa học Công Nghệ Xây Dựng NUCE, 13 (3V), 12-21.
- [7] Hopkinson, J., (1901). “Further experiments on the rupture of iron wire.” Original Papers by the late John Hopkinson: Vol. 2. B. Hopkinson. Cambridge, Cambridge University Press, 321-324.
- [8] Chen, W. W. and Song, B., (2011). “Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications.” Springer.
- [9] Bischoff, P. H. and Perry, S. H., (1995). “Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression,” Journal of engineering mechanics, V. 121, No. 6, 685-693

- [10] Grote, D. L., Park, S. W. and Zhou, M., (2001). “Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: 1. experimental characterization,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, 869-886.
- [11] Graff, K.F., (1991). “Wave Motion in Elastic Solids”, Dover, New York, 80-82.
- [12] ABAQUS/Standard User’s Manual V6.2 (Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. USA, 2001)
- [13] Johnson, G. R. and Cook, W. H., (1983). “A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures.” *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, vol.21, 541–547.
- [14] Lu, J.F., Zhuang, Z., Shimamura, K., et al., (2003). “Application of numerical simulation to SHPB test to investigate the dynamic compressive behavior of material with failure.” *Key Engineering Materials*, 243: 433-438.
- [15] Hallquist, J. O., (2007). “LS-DYNA keyword user’s manual,” Livermore software Technology Corporation.
- [16] Ross, C. A., Thomson, P. Y. and Tedesco, J. W., (1989). “Split-Hopkinson Pressure-Bar test on Concrete and Mortar in Tension and Compression,” *ACI Materials Journal*, V. 86, No. 5, 475-481.
- [17] Ross, C. A., Jerome, D. M., Tedesco, J. W. and Hughes, M. L., (1996). “Moisture and Strain rate effects on Concrete strength,” *ACI Materials Journal*, V. 93, No. 3, 293-300.
- [18] Kim, D.J., (2009). “Strain rate effect on high performance fiber reinforced cementitious composites using slip hardening high strength deformed steel fibers”, PhD dissertation, The University of Michigan.

PHỤ LỤC

