

MÔ PHỎNG ỨNG XỬ CỦA BÊ TÔNG DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG KÉO VỚI TỐC ĐỘ CAO

Lê Trường Giang¹, Nguyễn Tấn Khoa², Trần Tuấn Kiệt³

¹ Học viên cao học, Khoa Xây Dựng, Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM.

² Giảng viên Trường Đại Học Duy Tân

³ Giảng viên Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM

Nhận ngày 11/9/2020, chỉnh sửa ngày 21/12/2020, chấp nhận đăng 02/03/2021

Tóm tắt

Mặc dù thiết bị Hopkinson (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) đã được sử dụng rộng rãi để xác định các đặc trưng động lực học về nén của vật liệu, thiết bị thí nghiệm kéo động vẫn chưa được chuẩn hóa vì kích thước thiết bị, kích thước mẫu cũng như tốc độ gia tải đều ảnh hưởng đến kết quả thí nghiệm. Bài báo này sẽ nghiên cứu về một trong các thiết bị kéo ấy là SHTB (Split Hopkinson Tension Bar). Phương pháp nghiên cứu là mô phỏng với phần mềm Abaqus. Tính ổn định và kết quả mô phỏng được trình bày qua các tham số ảnh hưởng như vận tốc gia tải, kích thước của mẫu thử.

Abstract

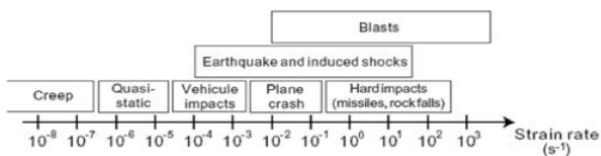
Although the compression bar (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) has been widely used to determine the dynamics properties of a material, but dynamic tensile testing equipment has not been standardized because equipment size, sample size as well as loading speed all affect the test results. This paper will study one of the dynamics tensile devices is SHTB (Split Hopkinson Tension Bar). The research method is simulation with Abaqus software. Stability and results of simulation are presented through influencing parameters such as loading speed, specimen size.

I. Thiết bị Hopkinson (Split Hopkinson Pressure Bar – SHPB)

Thiết kế công trình dưới tác dụng của tải trọng tốc độ cao như động đất, va chạm, cháy nổ... đang là vấn đề bức thiết hiện nay. Để có thể thiết kế hiệu quả, cần phải hiểu ứng xử của vật liệu dưới miền tải trọng này (Hình 1), tức là phải tìm ra quan hệ ứng suất – biến dạng của nó và đánh giá sự sai khác so với miền tải tĩnh như thế nào thông qua hệ số gia tăng động lực của vật liệu DIF (Dynamic Increase Factor). Malvar và Ross (1998) [1] đã chỉ ra được độ bền nén của bê tông tăng khi tốc độ biến dạng tăng nghĩa là:

$$DIF = \frac{f_{cd}}{f_{cs}} > 1 \quad (1)$$

trong đó, f_{cd} là cường độ nén động và f_{cs} là cường độ nén tĩnh của mẫu.



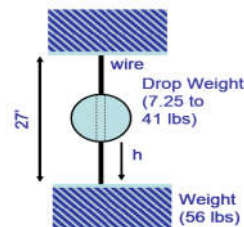
Hình 1. Tốc độ biến dạng của vật liệu tương ứng với vùng chịu tải.

Thiết bị đầu tiên để thí nghiệm kéo mẫu dưới tác dụng của tải trọng tốc độ cao do John Hopkinson [2] tiến hành vào năm 1872 (Hình 2).

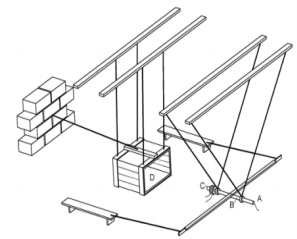
Đến năm 1914 Bertram Hopkinson tiếp nối công trình nghiên cứu của cha ông, John Hopkinson, hiệu chỉnh thành thiết bị nén như Hình 3.

Nối tiếp thành tựu đó, năm 1948 Davis [3] và năm 1949 Kolsky [4] đã nâng cấp trở thành thiết bị hoàn chỉnh đến ngày nay dùng để thí nghiệm nén mẫu với tải trọng cao và đặt tên là thiết

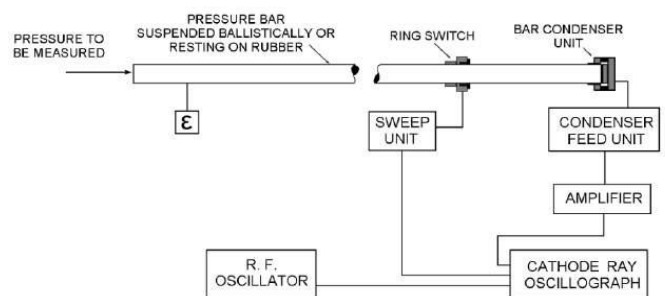
bị Hopkinson (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB), hay còn gọi là thiết bị Kolsky (Hình 4 và Hình 5).



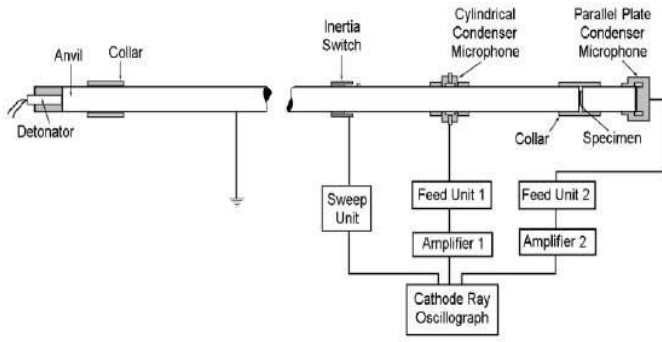
Hình 2. Thí nghiệm John Hopkinson.



Hình 3. Thí nghiệm Bertram Hopkinson.

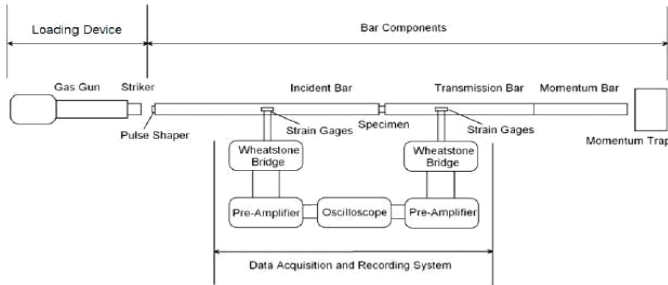


Hình 4. Thiết bị của Davies



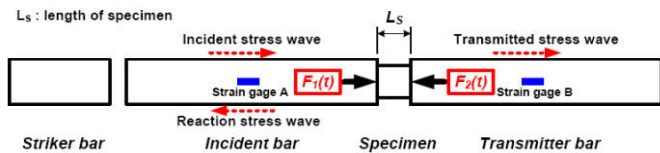
Hình 5. Thiết bị Hopkinson (SHPB) hay còn gọi là thiết bị Kolsky.

Thiết bị SHPB gồm có một thanh striker được kết nối với bình ga gây áp suất, một thanh incident, một thanh transmitted và các strain gage để thu lại dữ liệu khi thí nghiệm (Hình 6).



Hình 6. Các bộ phận của thiết bị Hopkinson.

Khi mở van bình ga, sẽ có một lực truyền vào thanh striker. Sau đó, thanh striker tác động vào thanh incident làm phát sinh một xung nén lan truyền đến cuối thanh incident, rồi truyền qua mẫu bê tông và sau đó sẽ truyền vào thanh transmitted. Đồng thời, một phần sóng sẽ được phản xạ trở lại (sóng phản xạ) vào thanh incident. Tất cả ba sóng trên được thu lại bởi 2 cảm biến dán trên thanh incident và thanh transmitted (Hình 7).



Hình 7. Sự truyền sóng trong Thiết bị Hopkinson.

Từ đó, Kolsky [4] đã tìm được ứng suất, biến dạng và tốc độ biến dạng trong mẫu thử như sau:

$$\sigma_s(t) = E \frac{A_o}{A} \epsilon_T(t) \tag{2}$$

$$\epsilon_s(t) = -\frac{2C_o}{L} \int_0^t \epsilon_R(t) dt \tag{3}$$

$$\frac{d\epsilon_s(t)}{dt} = -\frac{2C_o}{L} \epsilon_R(t) \tag{4}$$

trong đó E và A_o là mô đun đàn hồi và tiết diện của các thanh, A là tiết diện của mẫu thử, $\epsilon_T(t)$ là lịch sử biến dạng truyền (transmitted strain history), $\epsilon_R(t)$ là lịch sử biến dạng phản xạ (reflected strain history) trong thanh incident, L là chiều dài ban đầu của mẫu thử, và C_o là vận tốc truyền sóng (wave velocity) trong thanh incident được cho bởi:

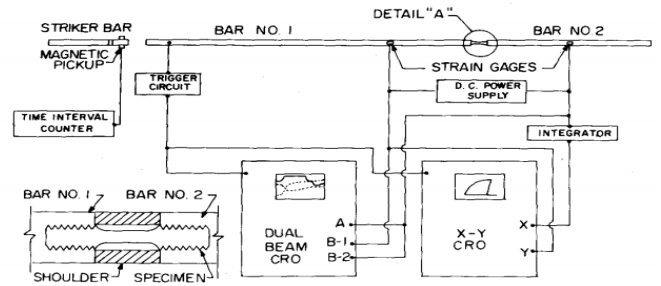
$$C_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{5}$$

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

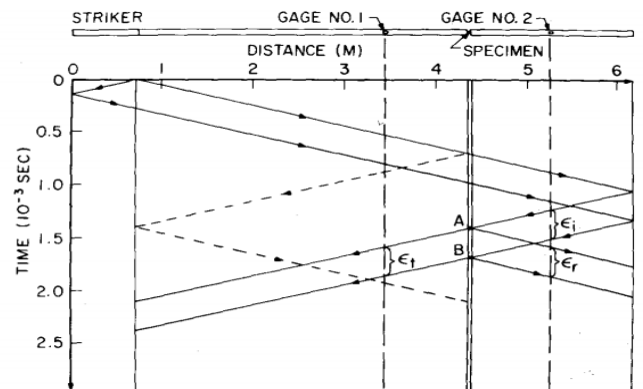
II. Thiết bị Split Hopkinson Tensile Bar (SHTB)

Suốt một thời gian dài, SHPB là thiết bị dùng để thí nghiệm nén tải trọng tốc độ cao [6]. Và kể từ đó, nhiều tác giả đã cố gắng hiệu chỉnh thiết bị SHPB này để có thể thí nghiệm cho mẫu chịu kéo, như Harding và cộng sự năm 1960 [5], Hauser năm 1966 [7], Lindhom and Yeakley năm 1968 [8], Albertini và Montagnani năm 1976 [9], Nicholas năm 1981 [10]. Trong các thiết bị ấy, thiết bị của Nicholas được giới nghiên cứu quan tâm nhiều vì tính đơn giản và hiệu quả của nó.

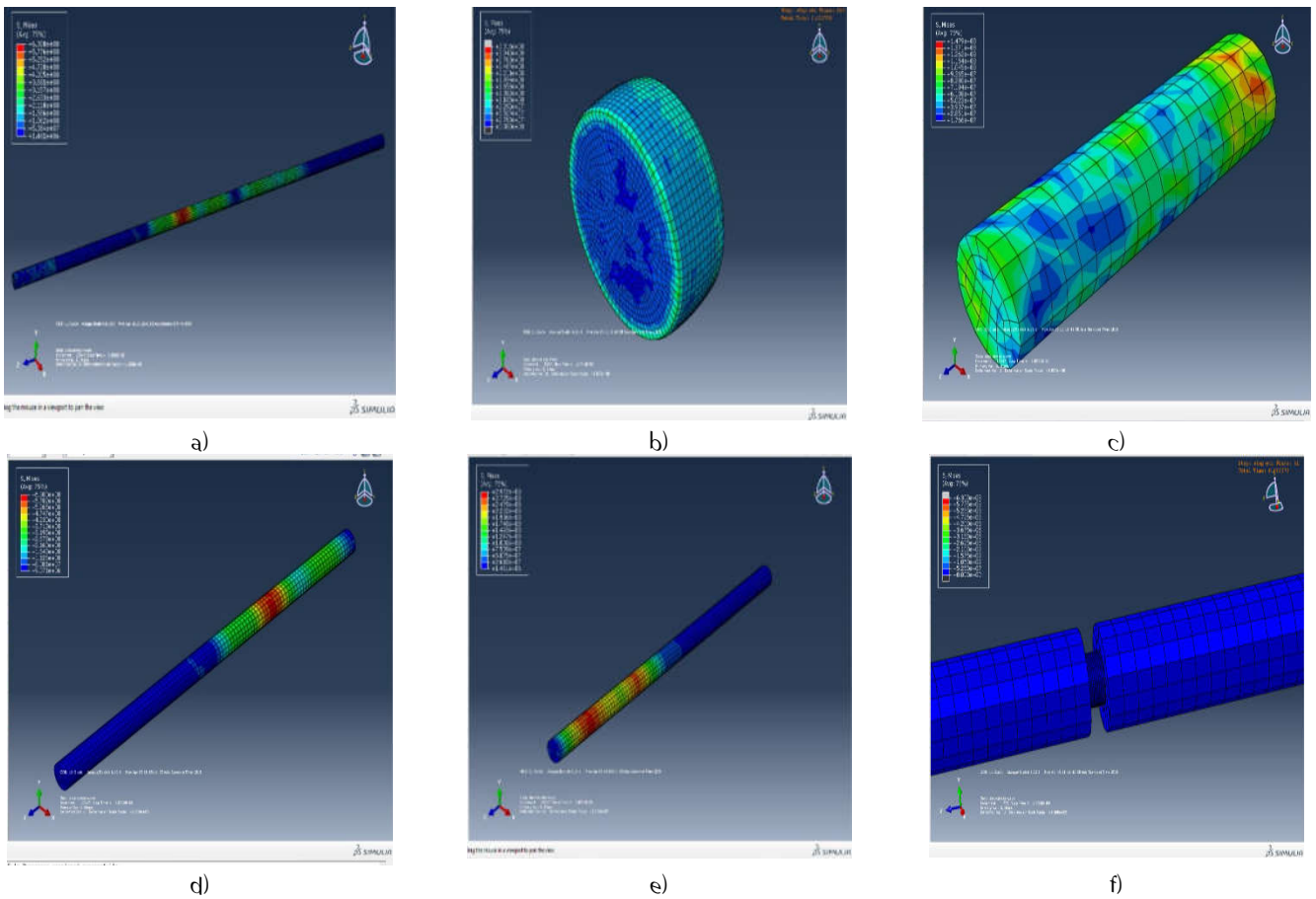
Về cơ bản, thiết bị SHTB này của Nicholas không khác mấy thiết bị SHPB. Vẫn là thanh striker, rồi 2 thanh incident (thanh số 1) và thanh transmitted (thanh số 2) kẹp mẫu thử ở giữa. Điểm khác biệt là có thêm một vòng xuyên nửa bao quanh mẫu thử (Hình 8). Khi thanh đầu vào tác động một ứng suất đẩy cho thanh 1 truyền sóng nén đầu vào được truyền sóng xung thông qua mẫu vật đến thanh số 2. Khi thanh striker gõ vào thanh 1, trong thanh 1 sẽ xuất hiện một xung nén truyền đến cuối thanh, rồi qua vòng xuyên đi vào thanh 2. Trong thanh 2, xung này vẫn là nén, nhưng chạy đến cuối thanh, vì là đầu tự do nên phản xạ thành xung kéo (Hình 9). Chính xung kéo này gây ra lực kéo cho mẫu thử. Lúc này, vòng xuyên đã rời ra nên không thể duy trì bất kỳ tải trọng kéo nào. Việc tính toán ứng suất và biến dạng trong mẫu được thực hiện giống như trong thiết bị SHPB thông thường.



Hình 8. Sơ đồ đấu nối các thiết bị thí nghiệm.



Hình 9. Sơ đồ truyền sóng trong thiết bị SHTB



Hình 10. Mô phỏng thiết bị SHPB với Abaqus.

III. Mô phỏng thiết bị Hopkinson với Abaqus

1. Mô phỏng thiết bị Split Hopkinson Pressure Bar (SHBP):

Abaqus là một phần mềm mô phỏng có kho phần tử phong phú, đồng thời có thể mô hình các loại vật liệu từ đơn giản đến phức tạp như kim loại, bê tông, nhựa... ABAQUS có hai khối phân tích: 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 Evironment) 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 xử lý kết quả.

Trong bài toán mô phỏng bằng phần mềm Abaqus dưới đây, mô hình Johnson-Cook [11] với 5 thông số rút từ thực nghiệm [12] được sử dụng:

$$\sigma = (A + B \epsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \tag{6}$$

Bảng 1: Thông tin kích thước mô hình.

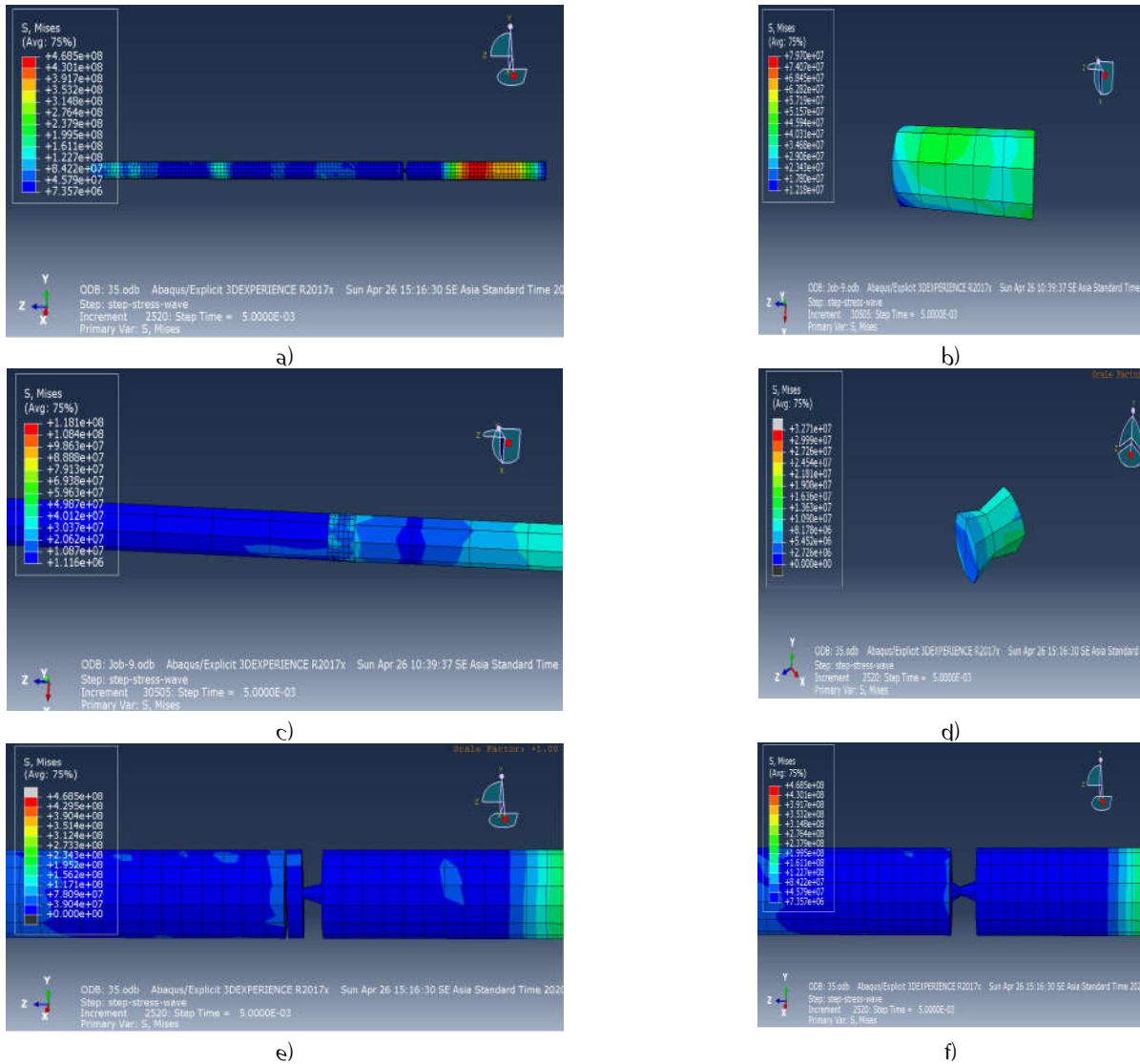
Kích thước	Striker Bar	Incident Bar	Mẫu Bê tông	Transmitted Bar
Kích thước(mm) $\phi \times L$	100x800	100x4000	50x100	100x4000

Bảng 2: Thông số bê tông được hiển thị trong.

Đặc tính	Mật độ (kg/m ³)	Modul (MPa)	Hệ số Poisson	Các thông số trong mô hình Johnson-Cook				
				A (MPa)	B (MPa)	n	C	M
Thông số bê tông	2.7x10 ³	68x10 ³	0,33	66,562	108,853	0,238	0,029	0,5

Kích thước thiết bị, thông tin mẫu thử và các thông số thực nghiệm của mô hình lần lượt được lấy theo Bảng 1 và Bảng 2. Thiết bị dùng thép có mô đun đàn hồi $E = 200$ GPa, hệ số Poisson

là 0,3 và mật độ $\rho = 7.85 \times 10^3$ kg/m³. Chi tiết chia lưới phần tử và kết quả mô phỏng được thể hiện trong Hình 10.



Hình 12. Mô phỏng thiết bị SHTB.

Bảng 3: Thông số vật liệu.

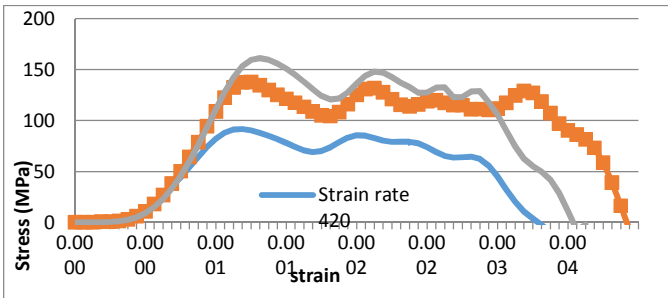
Striker bar	$L = 0,76\text{m}$ (760mm)	$D = 200\text{mm}$
Bar No.1	$L = 3,65\text{m}$ (3650mm)	$D = 200\text{mm}$
Bar No.2	$L = 1,83\text{m}$ (1830mm)	$D = 200\text{mm}$
$D_{\text{outer}} = 12.7\text{mm}$	$D_{\text{inner}} = 6.4\text{mm}$	
$A_{\text{shoulder}} = 12 A_{\text{specimen}}$	$A_{\text{shoulder}} = 0.75 A_{\text{bar}}$	
Mẫu thí nghiệm	$D = 50\text{mm}$	
Trường hợp 1: $L/D = 0,5$	Trường hợp 2: $L/D = 0,75$	Trường hợp 3: $L/D = 0,8$
Vận tốc		
$v_1 = 20\text{m/s}$	$v_2 = 35\text{m/s}$	$v_3 = 50\text{m/s}$

Bảng 4: Thông số của mẫu thí nghiệm và các thông số của mô hình Johnson-Cook.

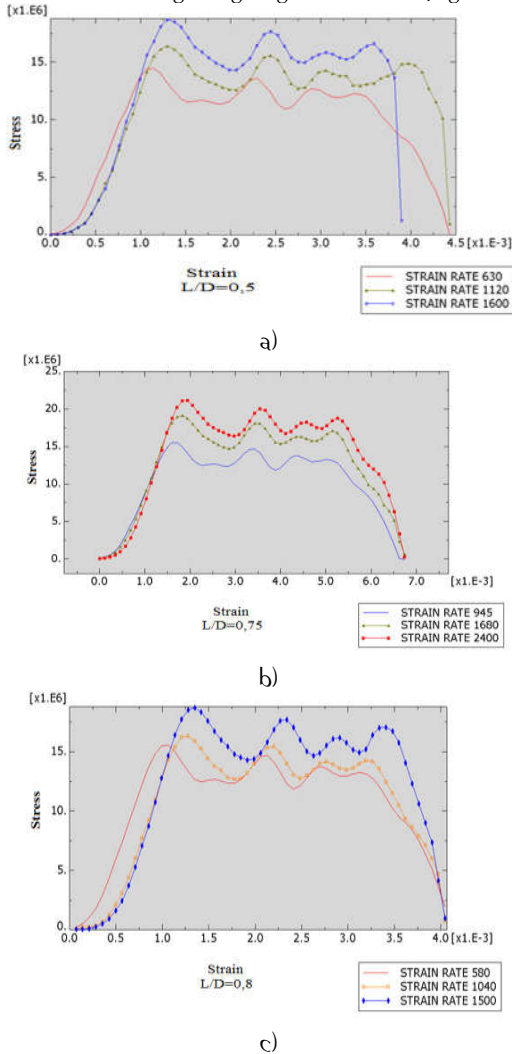
Đặc tính	Mật độ (kg/m^3)	Modul (MPa)	Hệ số Poisson	Các thông số trong mô hình Johnson-Cook				
				A (MPa)	B (MPa)	n	C	M
Thông số bê tông	2.7×10^3	60×10^3	0,33	54,410	967,100	0,238	0,029	0,5

Khi vận tốc thanh striker tương ứng là 20 m/s, 30 m/s và 35 m/s, tốc độ biến dạng của mẫu Strain Rate 420, Strain Rate 685, Strain

Rate 805. Đường cong ứng suất – biến dạng của mẫu thu được cho ba tốc độ tải trọng này như Hình 11.



Hình 11. Biểu đồ đường cong ứng suất - biến dạng của mẫu thử.



Hình 13. Quan hệ ứng suất - biến dạng của mẫu.

Kết quả mô phỏng cho thấy, khi tốc độ gia tải khác nhau, quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu sẽ khác nhau, tức là vật liệu nhạy với tốc độ gia tải. Đặc biệt, ứng suất thay đổi rất lớn khi tốc độ biến dạng thay đổi. Ở tốc độ biến dạng cao hơn, vật liệu sẽ có khả năng chịu đựng lớn hơn. Kết quả mô phỏng này phù hợp với thực nghiệm, do đó có thể tin cậy.

2. Mô phỏng thiết bị Split Hopkinson Tensile Bar (Mẫu Bê tông):

Phần tiếp theo là mô phỏng thiết bị SHTB và qua đó tìm hiểu và đánh giá ứng xử của bê tông dưới tác dụng của tải trọng kéo tốc độ cao. Các thông số của thiết bị được cho trong Bảng 3. Trong bảng này cũng giới thiệu các thông tin về 3 loại mẫu bê tông

(tương ứng với tỷ số L/D khác nhau) cũng như 3 vận tốc của strike khác nhau. Thông tin của vật liệu mẫu và thông số thực nghiệm của mô hình Johnson-Cook cho bài toán kéo được cho trong Bảng 4.

Hình 12 diễn tả kết quả của mô phỏng, trong đó hình a, b, c và d cho thấy quá trình sóng lan truyền trong các thanh số 1, thanh số 2, vòng xuyên và mẫu thử; hình e và f cho thấy vòng xuyên bị rời ra và mẫu thử bị kéo.

Tương ứng với 3 vận tốc của strike, mẫu sẽ có tốc độ biến dạng tương ứng. Đường cong ứng suất biến dạng của mẫu thử theo 3 tốc độ và tương ứng với 3 loại kích thước mẫu được cho trong các Hình 13, 14 và 15.

Các kết quả này cho thấy vật liệu khi chịu kéo cũng nhạy với tốc độ biến dạng. Tốc độ biến dạng càng tăng, cường độ chịu kéo càng tăng. Xu hướng tăng này phù hợp với các kết quả thực nghiệm chứng tỏ kết quả mô phỏng ở đây có thể tin cậy. Hơn nữa, các đồ thị này cũng cho thấy hệ số tăng cường độ chịu kéo do tải trọng động (DIF) của bê tông cũng phụ thuộc vào chiều dài của mẫu thí nghiệm. Khi mẫu thí nghiệm có chiều dài càng tăng thì cường độ chịu kéo càng tăng nhưng đến một giá trị giới hạn L/D = 0,75 thì cường độ chịu kéo của bê tông bắt đầu tăng ít đi.

IV. Kết Luận

Bài báo mô tả kỹ thuật sử dụng thiết bị Hopkinson nhằm xác định ứng xử về nén và kéo của vật liệu dưới tải trọng tốc độ cao. Phương pháp nghiên cứu là mô phỏng bằng phần mềm Abaqus. Các tham số ảnh hưởng được nghiên cứu là vận tốc gia tải và kích thước của mẫu thí nghiệm (tỷ số L/D). Từ kết quả mô phỏng đã tìm được các quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu, giúp cho việc phân tích và thiết kế công trình chịu tải trọng tốc độ cao.

Tài liệu tham khảo

- [1] Malvar, L. J. and Ross, C. A., (1999). "Review of strain rate effects for concrete in tension." ACI Materials Journal, (95), 735-739.
- [2] Hopkinson B., (1914). "A method of measuring the pressure in the deformation of high explosives or by the impact of bullets." Philos Trans R Soc 1914; A213:437-52.
- [3] Davies, E. D. H., (1948). "A critical study of the Hopkinson pressure bar." Phil. Trans. Ser. A, 240, 375-475.
- [4] Kolsky, H., (1949). "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading." Proc. Phys. Soc., B-62, 676-700.
- [5] Harding, J., Wood, E. O. and Campbell, J. D., (1960). "Tensile testing of materials at impact rates of strain." J. Mech. Engng Sci., 2, 88-96.
- [6] Wang, L. L., (2007). "Foundations of Stress Waves." Elsevier Press, First edition.
- [7] Hauser, F. E., (1966). "Techniques for Measuring Stress-Strain Relations at High Strain Rates and typical results presented." Experimental Mechanics, 395-402.
- [8] Lindholm, U. S., and Yeakley, L. M., (1968). "High Strain-rate Testing: Tension and Compression." Experimental Mechanics, Vol.8, 1, 1-9.
- [9] Albertini, C., and Montagnani, M., (1976). "Wave Propagation Effects in Dynamic Loading." Nuclear Engineering and Design, 37, 115-124.
- [10] Nicholas, T., (1981). "Tensile testing of materials at high rates of strain." Exp. Mechanics, 21, 177-185.
- [11] 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.
- [12] 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.