ĐÁNH GIÁ SỰ PHÁ HỦY CÂU KIỆN BÊ TÔNG CỐT THÉP DƯỚI TÁC DỤNG TẢI TRỌNG NỔ GẦN BẰNG MÔ PHỎNG SỐ VÀ THỰC NGHIỆM TẠI HIỆN TRƯỜNG

ASSES THE FRACTURE RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE COMPONENTS UNDER BLAST LOADING USING THE SIMULATION AND ON SITE TESTING METHOD

ThS. **PHAN THÀNH TRUNG**, ThS. **NGUYĒN HỮU HÀ** Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự GS.TS. **NGUYĒN QUỐC BẢO** Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

Tóm tắt: Đánh giá tác động và phá hủy của lượng nổ gần với các cấu kiện là bài toán rất phức tạp và có sai số lớn. Ở Việt Nam, tính toán này hiện nay chủ yếu sử dụng một số công thức thực nghiệm tham khảo đã có. Kết quả thực nghiệm chỉ phù hợp trong phạm vi thực nghiệm đề ra và còn có nhiều sai lệch đáng kể so với thực tế tại hiện trường. Bài báo tập trung vào nghiên cứu và đánh giá sự phá hủy của tải trọng nổ gần đối với bê tông cốt thép theo phương pháp thực nghiệm tại hiện trường và mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS.

Từ khóa: Nổ gần, phá hủy bê tông cốt thép, mô hình Holmquist - Johnson - Cook, mô hình Johnson - Cook, mô hình CONWEP.

Abstract: Evaluation of and fracture failure of contact blast loading on structural components is normally a complicated issue with errors. In Vietnam, the problem has been solved by applied some empirical models in the litterature. However, the experimental results are only suitable for each case study and still have significant deviations in comparison with reality. The paper is aimed to assess the fracture failure mode of reinforced concrete components under blast loading using both on site experiment and numerical simulation in the ABAQUS program has been evaluated.

Keywords: Blast loading, demolition of reinforced concrete, explicit time integration, Holmquist - Johnson - Cook model, Johnson - Cook model, CONWEP model.

1. Giới thiệu

Trên thế giới các nghiên cứu về tác dụng của nổ lên kết cấu bê tông cốt thép đã được thực hiện trong các thập kỷ qua. Một vài nghiên cứu xác định tải trọng và phá hoại do nổ để đưa ra tải trọng tương đương cho sự phá hoại đó, làm căn cứ bước

đầu nghiên cứu lý thuyết về phá hoại do nổ [2,3]. Kot và cs. [4,5] đã đề xuất các phương pháp lý thuyết về sự phá hoại của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nổ, tuy nhiên các phương pháp này chỉ dựa trên một số giả định đơn giản làm ảnh hưởng đến tính chính xác của kết quả. Vào cuối những năm 1980, một loạt các thử nghiệm nổ bê tông đã được McVay [6] tóm tắt, các thông số ảnh hưởng đến sự phá hoại của bê tông như: khoảng cách, trọng lượng chất nổ, độ dày tường, cường độ bê tông, phụ gia bê tông và hàm lượng cốt thép đã được nghiên cứu. Wang và cs. [7] đã tiến hành các thử nghiệm nổ trên các tấm bê tông cốt thép (BTCT) vuông với khối lượng thuốc nổ khác nhau, kết quả được quan sát, nghiên cứu qua đó sử dụng để xác minh mô hình số của chúng. Dựa trên lượng lớn các cơ sở dữ liệu từ các thử nghiệm nổ trên tấm sàn và tường bê tông cốt thép, Marchand và cs. [8] đã phát triển thuật toán về nứt dưới tác dụng của tải trọng nổ đối với tấm sàn và tường bê tông cốt thép. Các nghiên cứu trên cho thấy, ứng xử cơ học của bê tông chiu tác đông của tải trong nổ gần rất phức tạp. Khả năng chịu tác động tải trọng nổ của cấu kiện bê tông cốt thép không được cao, sự phá hoại xuất hiên kèm theo sự phát triển nhanh của các vết nứt làm cho công trình rất dễ bị phá hoại.

Ở Việt Nam, các nghiên cứu về vấn đề nổ cũng thực hiện trong những năm gần đây [1]. Việc nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số quá trình tác dụng của tải trọng nổ đối với cấu kiện bê tông cốt thép với bê tông B25 chưa được công bố. Mục tiêu của nghiên cứu này là thử nghiệm hiện trường và mô phỏng lại quá trình phá hoại cấu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng của nổ gần. Các cấu kiện bê tông cốt thép có cùng kích thước đã được chế tạo và thử nghiệm nổ để so sánh với kết quả mô phỏng số. Tải trọng nổ gần của thuốc nổ TNT. Từ các tham số mô hình vật liệu có được sau khi thí nghiệm, tác giả tiến hành bằng mô phỏng số bài toán phá hủy cấu kiện (BTCT) chịu tác dụng của tải trọng nổ gần bằng phần mềm ABAQUS [9], so sánh và đánh giá với kết quả thực nghiệm tại hiện trường.

2. Mô phỏng số phá hủy cấu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng của tải trọng nổ gần

2.1 Cơ sở lý thuyết của các vùng trong bài toán mô phỏng

a. Thuốc nổ: Thuốc nổ được tính theo mô hình CONWEP, áp lực sóng xung kích trong không khí được tính theo tiêu chuẩn UFC 3-340-2 [10]. Thông qua thực hành mô phỏng số bằng việc sử dụng các mô hình cho thuốc nổ như mô hình SPH hay CONWEP để khảo sát bài toán thì việc sử dụng mô hình CONWEP cho kết quả khả quan nhất.

b. Kết cấu công trình: Đối với kết cấu công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ, sự biến dạng của của các phần tử kết cấu, vị trí của mỗi chất điểm trong môi trường kết cấu được mô hình hóa bằng phương pháp lưới Lagrange [11] để giải, chuyển vị, vận tốc và gia tốc của các nút cũng như ứng suất và biến dạng của các phần tử trong vùng này nhận được nhờ giải các phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng. Phương trình này cùng với mô hình vật liệu cụ thể và một tập hợp các điều kiện ban đầu, điều kiện biên sẽ cho ta lời giải hoàn chỉnh [12].

2.2 Mô hình vật liệu được sử dụng trong bài toán mô phỏng

a. Bê tông: Sử dụng mô hình vật liệu Holmquist -Johnson – Cook (HJC), các tham số của mô hình HJC được xác định bằng phương pháp do Holmquist và cộng sự đề xuất [13]. Loại bê tông được sử dụng trong nghiên cứu này là bê tông B25 hiện chưa có các tham số cho mô hình HJC, do vậy tác giả đã thực hiện các thí nghiệm nén đơn trục, thí nghiệm lặp cũng như các thí nghiệm ép chẻ và nén ba trục bằng máy nén ba trục tại Phòng thí nghiệm của Bộ môn Cơ sở kỹ thuật công trình/Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt/Học viện Kỹ thuật Quân sự để đưa ra các tham số của mô hình HJC cho bê tông B25. Ở độ tuổi 21 ngày, 14 mẫu thử hình trụ với chiều dài 110mm và đường kính 54mm, được đưa ra khỏi phòng bảo dưỡng và được mài cẩn thận ở cả hai đầu để tạo ra các khu vực phẳng và nhẵn cho các tấm chất tải, sau đó chúng được đưa trở lại phòng bảo dưỡng cho đến tuổi thí nghiệm.

Các tham số trọng lượng riêng ρ_0 , cường độ nén đơn trục f_c , mô đun đàn hồi E, hệ số Poisson v, mô đun cắt G, độ bền kéo đơn trục T, hằng số hư hỏng $e_{f\min}$, tham số đặc trưng cho độ bền của vật liệu $B, N, P_{crush}, \mu_{crush}$ được xác định bằng thí nghiệm. Các tham số đặc trưng độ bền vật liệu khác A, S_{\max}, D_1, D_2 , đặc trưng cho tốc độ biến dạng C, áp lực giới hạn nén P_{lock} , biến dạng thể tích ở áp lực nén μ_{lock} , và các hằng số vật liệu K_1, K_2 và K_3 được xác định bằng các thí nghiệm va đập và các thử nghiệm thanh áp lực Split-Hopkinson, do điều kiện thí nghiệm hạn chế nên các giá trị của các tham số này được lấy theo đề xuất bởi Holmquist và cộng sự (1993) [13].

Từ đó các tham số của mô hình HJC cho bê tông B25 được xác định và liệt kê trong bảng 1.

$ ho_{_0}$ (kg/m³)	$G \; ({\sf Pa})$	Α	В	С	N	$e_{f\min}$
2406	11,292 x10 ⁹	0,79	1,405	0,007	1,085	0,0016
T (Pa)	$f_{\scriptscriptstyle c}$ (Pa)	$S_{_{ m max}}$	$P_{_{crush}}$ (Pa)	$\mu_{_{crush}}$	$P_{\scriptscriptstyle lock}$ (Pa)	$\mu_{\scriptscriptstyle lock}$
3,24 x10 ⁶	41,305 x10 ⁶	7	13,768 x10 ⁶	0,0007	1 x10 ⁹	0,08
D_1	D_2	$K_{_1}$ (Pa)	$K_{\scriptscriptstyle 2}$ (Pa)	$K_{_3}$ (Pa)		
0,04	1,0	85x10 ⁹	-171 x10 ⁹	208 x10 ⁹		

Bảng 1. Các tham số mô hình HJC cho bê tông B25

b. Cốt thép: Sử dụng mô hình phá hủy do Johnson-Cook đề xuất, các tham số của phương trình trạng thái, mô hình bền, mô hình phá hủy của cốt thép được lấy theo tài liệu [14,15] cụ thể như bảng 2:

E (MPa)	v	A (MPa)	B (MPa)	п	$T_{\scriptscriptstyle melt}$ (K)	$T_{_{\!H}}$ (K)	т
200000	0,3	263	130	0,0915	1800	293,2	1
$ ho$ (kg/m 3)	С	D	D_1	D_{2}	$D_{_3}$	$D_{_4}$	D_5
7850	0,017	1	0.05	3,44	2,12	0,002	0,61

Bảng 2. Các tham số mô hình vật liệu thép

2.3 Mô hình hình học bài toán



Nghiên cứu sự phá huỷ và tương tác của cấu kiện bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ gần. Cấu kiện BTCT có chiều dài 1,5m, tiết diện 0,2x0,2m được gia cường bằng 4 thanh thép Φ 14, cốt đai Φ 6a200 với chiều dày bảo vệ 0,01m. Cấu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ gần có khối lượng 1600g đặt chính giữa, cách mặt trên cấu kiện BTCT 0,3m (hình 1).

Cấu kiện BTCT được mô tả như phần tử khối trong khi phần tử thanh áp dụng cho thanh thép. Liên kết giữa các phần tử của khối bê tông và thanh thép được xác định theo liên kết cứng. Lưới bê tông được chia mịn với kích thước 5mm. Lưới chịu lực và thép đai cũng được chia mịn với kích thước 5mm (hình 2).



Hình 2. Chia lưới phần tử cấu kiện BTCT của mô hình mô phỏng

Kết cấu bê tông được mô hình hóa bằng phương pháp lưới Lagrange. Điều kiện phá huỷ được xác định theo tiêu chuẩn vật liệu người dùng tự định nghĩa, sử dụng các tham số vật liệu như thí nghiệm đã nêu. Thuốc nổ được tính theo mô hình CONWEP, áp lực sóng xung kích trong không khí được tính theo tiêu chuẩn UFC 3-340-2 [10].

Điều kiện biên: Cấu kiện BTCT được liên kết trên 2 gối ($u_1 = ur_2 = ur_3 = 0$) (hình 3).



Hình 3. Điều kiện biên của kết cấu

2.4 Kết quả mô phỏng số



Kết quả mô phỏng số được thể hiện như trong hình 4, 5, 6 và bảng 3.

KẾT CẦU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG



Hình 4. Quá trình phá hủy cấu kiện BTCT theo thời gian trên mô hình mô phỏng



Hình 5. Kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT trên mô hình mô phỏng số



Hình 6. Biến dạng dọc trục tại phần tử 42307 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện) và phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cấu kiện)

Bảng 3. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình mô phỏng số					
Chiều sâu phễu chấn sụp (mm)	Chiều dài phễu chấn sụp (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt bên (mm)			
125	780	320			

Mô phỏng số cho thấy quá trình phá hoại của cấu kiện bê tông cốt thép khi chịu tác dụng nổ gần theo các thời điểm 0,0003, 0,0009, 0,0012, 0,0015, 0,003, 0,006, 0,0075 và 0,009s (hình 4), quá trình phá hoại của nổ gần là rất nhanh, đến thời điểm 0,009s trở đi vùng phá hoại của cấu kiện đạt đến trạng thái lớn nhất, kết quả vùng bê tông của cấu kiện BTCT bị sóng nổ tạo phễu chấn sụp phía mặt đối diện với lượng nổ, chiều dài phễu chấn sụp là 780mm, chiều sâu phễu chấn sụp là 125mm (bảng 3). Còn cốt thép trong cấu kiện BTCT gần như không bị ảnh hưởng. Biến dạng tại phần tử 42307 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện BTCT) đạt giá trị là 0,2705 và biến dạng tại phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cấu kiện BTCT) đạt 0,2849 sau đó những phần tử bê tông tại vị trí đó bị phá hoại khỏi cấu kiện (hình 6).

3. Thử nghiệm nổ phá hoại cấu kiện bê tông cốt thép

Tác giả tiến hành thử nghiệm nổ tại hiện trường để phá hoại cấu kiện BTCT có chiều dài 1,5m, tiết diện 0,2x0,2m được gia cường bằng 4 thanh thép Φ 14, cốt đai a200 với chiều dày bảo vệ 0,01m. Cấu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ gần có khối lượng 1600g đặt chính giữa, cách mặt trên cấu kiện BTCT 0,3m, tác giả sử dụng khối thuốc nổ TNT dạng bánh và cấu tạo lượng nổ dạng hình khối lập phương, trong công tác nổ xem đây là khối lượng nổ tập trung và có thể sử dụng tính gần đúng cho các công thức của lượng nổ hình cầu (hình 7). Xác định được thực trạng bị phá hoại của kết cấu. Từ đó so sánh kết quả giữa thí nghiệm và mô phỏng.

3.1 Thử nghiệm nổ phá hoại cấu kiện bê tông cốt thép

a. Chuẩn bị mô hình thử nghiệm

Mô hình thử nghiệm chế tạo tại xưởng bê tông đúc sẵn Chèm, kích thước và chất lượng đảm bảo đúng theo yêu cầu bài toán, sau đó được vận chuyển đến thao trường của Học viện Kỹ thuật Quân sự tại Hòa Lạc. Tại thao trường tiến hành làm công tác chuẩn bị (hình 7).



Hình 7. Ảnh mô hình thử nghiệm

b. Thiết bị thí nghiệm

 Máy đo động NI SCXI–1000DC: Máy đo động đa kênh NI SCXI–1000DC (hình 8) là thiết bị đo động đa kênh hiện đại do hãng National Instrument của Mỹ chế tạo. Đây là một hệ thống đo thông minh có cấu hình mềm dẻo bằng cách tích hợp các loại card đo khác nhau tùy theo mục đích thí nghiệm của người sử dụng;



Hình 8. Máy đo động NI SCXI–1000DC

 Cảm biến đo biến dạng: Trong thí nghiệm, cảm biến đo biến dạng KC-60-120-A1-11 được sử dụng để đo biến dạng của cấu kiện bê tông cốt thép khi chịu tác dụng nổ gần tại các điểm dưới đáy cấu kiện (hình 9);



Hình 9. Vị trí gắn cảm biến đo biến dạng trên mô hình thử nghiệm

 Máy điểm hỏa FD200: Máy điểm hỏa FD200 (hình 10(a)) là loại máy dùng để điểm hỏa gây nổ cho tối đa 200 kíp nổ điện. Thông số cơ bản: điện áp đầu ra 3000V, thời gian nạp điện nhỏ hơn 30 giây, điện áp nguồn 6VDC; Thuốc nổ và kíp nổ: Thuốc nổ được sử dụng là loại thuốc nổ TNT được đúc thành bánh có khối lượng 200g, kích thước 100x50x25mm (hình 10 (b)). Kíp nổ điện được sử dụng là loại kíp nổ điện số 8 (hình 10(c)).



Hình 10. Máy điểm hỏa FD200, thuốc nổ TNT, kíp nổ điện số 8

c. Trình tự thí nghiệm

Tiến hành thí nghiệm nổ lần lượt với thuốc nổ TNT khối lượng 1600g đặt chính giữa, cách mặt

trên cấu kiện BTCT 0,3m với trình tự cụ thể như sau: Đặt cấu kiện BTCT vào vị trí để thí nghiệm liên kết chặt; gắn các đầu đo biến dạng tại các điểm 1

Tạp chí KHCN Xây dựng - số 1/2021

KẾT CẦU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

(chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện BTCT), điểm 2 (mặt dưới chính giữa cấu kiện BTCT); cấu tạo lượng nổ và bố trí lượng nổ vào mô hình kết cấu BTCT. Khi bố trí lượng nổ, tất cả người không có trách nhiệm phải ra khỏi vị trí nổ và rút về vị trí an toàn theo qui định được phổ biến tại thao trường; kiểm tra công tác an toàn trước khi nổ, cho phép kiểm tra mạch nổ; tiến hành nổ, kiểm tra và xử lý mìn câm sau đó đo kết quả thí nghiệm.

3.2 Kết quả thử nghiệm

Kết quả cấu kiện BTCT bị phá hoại sau khi nổ cấu kiện BTCT như trong hình 11(a), (b), (c) và bảng 4.



(c) Chiều cao vùng chấn sụp của BTCT sau khi nổ gần Hình 11. Hình ảnh cấu kiện BTCT bị phá hủy sau khi nổ

Bảng 4. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm

	· · ·	_
Chiều sâu phễu chấn sụp (mm)	Chiều dài phễu chấn sụp (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt bên (mm)
130	750	400

Biến dạng đo được thông qua các cảm biến gắn trên cấu kiện BTCT tại điểm 1 và 2 (hình 12).



Hình 12. Kết quả đo biến dạng tại điểm 1, 2 trên mô hình thực

KẾT CẦU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Thử nghiệm nổ trên hiện trường cho kết quả vùng bê tông của cấu kiện BTCT bị sóng nổ tạo phễu chấn sụp phía mặt đối diện với lượng nổ, chiều dài phễu chấn sụp là 750mm, chiều sâu phễu chấn sụp là 130mm (bảng 4). Còn cốt thép trong cấu kiện BTCT gần như không bị ảnh hưởng. Biến dạng tại điểm 1 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều

dài cấu kiện BTCT) đạt giá trị là 0,2376 và biến dạng tại điểm 2 (mặt dưới chính giữa cấu kiện BTCT) đạt 0,2394 sau đó những phần tử bê tông tại vị trí đó bị phá hoại khỏi cấu kiện (hình 12).

4. So sánh, đánh giá kết quả

Kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số được thể hiện như trong hình 13, 14 và bảng 5.



Hình 13. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 14. Biến dạng tại điểm 1, 2 trên mỗ hình thử nghiệm và mô phỏng số

	Mô phỏng số	Thử nghiệm	Sai khác
Chiều sâu phễu chấn sụp (mm)	125	130	3,85%
Chiều dài phễu chấn sụp (mm)	780	750	4,0%
Chiều dài vùng phá hủy mặt bên (mm)	320	400	20,0%
Biến dạng dọc trục điểm 1	0,2705	0,2376	19,0%
Biến dạng dọc trục điểm 2	0,2849	0,2394	13,8%

Kết quả kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số (hình 13) có sự sai khác chiều sâu phễu chấn sụp 3,85%; chiều dài phễu chấn sụp 4,0%; chiều dài vùng phá hủy mặt bên 20,0% (bảng 5). Còn biến dạng dọc trục điểm 1 (trung bình của điểm đo 1a và 1b) và 2 (hình 14) có

Tạp chí KHCN Xây dựng - số 1/2021

sự sai khác lần lượt là 19,0% và 13,8%. Sai khác này hoàn toàn chấp nhận được đối với bài toán mô phỏng tác dụng của tải trọng nổ.

5. Kết luận

Bài cáo đã trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số sự phá hoại của cấu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng của nổ gần. Kết quả nghiên cứu cho thấy:

 Thời gian tác dụng phá hủy cấu kiện bê tông cốt thép của nổ gần là rất ngắn, cấu kiện bị phá hủy tạo phễu chấn sụp ở mặt dưới của cấu kiện bê tông cốt thép do pha dãn của sóng nổ. Cốt thép gần như không bị ảnh hưởng;

- Sai khác kết quả mô phỏng số và thực nghiệm cụ thể lần lượt: Chiều sâu phễu chấn sụp 3,85%; Chiều dài phễu chấn sụp 4,0%; chiều dài vùng phá hủy mặt bên 20,0%. Còn biến dạng dọc trục điểm 1 và 2 có sự sai khác lần lượt là 19,0% và 13,8%. Kết quả nhận được từ mô phỏng số phù hợp với kết quả thí nghiệm hiện trường, thông qua mô phỏng số cho ta thấy rõ cơ chế phá hoại kết cấu bê tông cốt thép khi chịu tác dụng của tải trọng nổ gần theo từng thời điểm.

Từ đó có cơ sở để khẳng định tính hợp lý khi sử dụng mô hình vật liệu HJC cho bê tông và mô hình vật liệu Johnson-Cook cho cốt thép trong phân tích kết cấu bê tông cốt thép chịu tác dụng nổ gần bằng phần mềm ABAQUS. Kết quả đó hữu ích cho mô phỏng các bài toán kháng xuyên, kháng nổ và kháng sập luỹ tiến chịu tác dụng nổ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Danh, L.B., Hòa, P.D., Thắng, N.C., Linh, N.Đ., Dương, B.T.T., Lộc, B.T., Đạt, Đ.V. (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.
- Li, J., Hao, H. (2011). A two-step numerical method for efficient analysis of structural response to blast load. *International Journal of Protective Structures*, 2(1):103–126.
- Dragos, J., Wu, C. (2014). Interaction between direct shear and flexural responses for blast loaded one way reinforced concrete slabs using a finite element model. *Engineering Structures*, 72:193–202.
- Kot, C. A., Valentin, R. A., McLennan, D. A., Turula, P. (1978). Effects of air blast on power plant structures and components. *Technical report*,

Argonne National Lab., IL (USA).

- Kot, C. A. (1978). Spalling of concrete walls under blast load. Structural Mechanics in Reactor Technology, 31(9):2060–2069.
- cVay, M. K. (1988). Spall damage of concrete structures. Technical report, ARMY Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Structures LAB.
- Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S.-c., Tang, F. (2013). Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion. *Engineering Failure Analysis, 27:41–51.*
- 8. Marchand, K. A., Plenge, B. T. (1998). Concrete hard target spall and breach model. *Air Force Research Laboratory, Munitions Directorate, Lethality.*
- 9. ABAQUS Theory Manual, *revision 2020, Pawtucket, Rhode Island, Mỹ, 2020.*
- Unified Facilities Criteria (UFC) (2008), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, U. S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency, UFC 3-340-02.
- Johnson GR (1994). Linking of Lagrangian particle methods to standard nite element methods for high velocity impact computations. *Post-SMIRT Impact IV Seminar, Berlin. Nuclear Engineering and Design 150p.*
- Abascal R., Dominguez J. (1984), Dynamic behavior of strip footings on non-homogeneous Viscoclastic Soil, Pavement International Symposium on dynamic Soil Structure interaction, Minneapolis, Minnesota.
- Holmquist TJ, Johnson GR and Cook WH (1993), A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. In: *The 14th international symposium on ballis-tic, Quebec, Canada, 26–29 September, pp.* 591–600. Arlington, VA: American Defense Preparedness Association.
- 14. Johnson G. R., 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 Inter-national Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands.*
- Johnson G. R., Cook W. H.(1985), Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressure, *EngngFractMech, Vol. 21(1) pp. 31-48.*

Ngày nhận bài: 27/11/2020.

Ngày nhận bài sửa:22/12/020.

Ngày chấp nhận đăng: 22/12/2020.

ASSES THE FRACTURE RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE COMPONENTS UNDER BLAST LOADING USING THE SIMULATION AND ON SITE TESTING METHOD