



## RESEARCH AND DERIVE FORMULATIONS FOR PREDICTING THE ULTIMATE STRENGTH OF OF TENSION LEG PLATFORM UNDER SUPPLY VESSEL COLLISIONS

Do Quang Thang<sup>\*</sup>, Nguyen Van Quan

Faculty of Transportation and Engineering, Nha Trang University, 02 Nguyen Dinh Chieu Street, Nha Trang, Khanh Hoa, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 08/02/2021

Revised: 19/05/2021

Accepted: 26/05/2021

Published online: 15/06/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.5.9>

*\* Corresponding author*

Email: thangdq@ntu.edu.vn; Tel: 0903102869

**Abstract.** Durability assessment of a tension-leg platform structure after the collision plays a very important role in the operation and maintenance. This study presents the results of numerical simulation and derived equations to predict the residual ultimate strength of a floating tension-leg platform structures after colliding by service vessels. The numerical simulation was carried out using ABAQUS commercial software. Numerical investigations on the effects of basic parameters on the residual ultimate strength of actual floating tension-leg platform dimension were performed. The basic parameters were investigated including the effect of collision velocity, the effect of collision location, and the effect of striker header shape when collision. After investigating the effects of basic parameters, series of different collision scenarios for a collision between actual floating tension leg platform and service vessels were performed. Then, proposed equations were provided based on numerical results and regression analysis. The accuracy and reliability of proposed equations have been evaluated by comparing them with numerical results and available experimental results.

**Keywords:** ultimate strength, residual ultimate strength, tension leg platform, stringer-stiffened cylinder, strength formulation.



# NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CÔNG THỨC DỰ ĐOÁN ĐỘ BỀN TỚI HẠN KẾT CẤU CHÂN ĐÉ GIÀN KHOAN NGOÀI KHƠI KIỂU BÁN CHÌM KHI BỊ ĐÂM VÀ BỎI CÁC TÀU DỊCH VỤ

Đỗ Quang Thắng\*, Nguyễn Văn Quân

Khoa Kỹ thuật Giao thông, Đại học Nha Trang, Số 02 Nguyễn Đình Chiểu, Nha Trang, Khánh Hòa, Việt Nam

## THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 08/02/2021

Ngày nhận bài sửa: 19/05/2021

Ngày chấp nhận đăng: 26/05/2021

Ngày xuất bản Online: 15/06/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.5.9>

\* Tác giả liên hệ

Email: thangdq@ntu.edu.vn; Tel: 0903102869

**Tóm tắt.** Việc đánh giá độ bền của kết cấu chân giàn khoan sau va chạm có vai trò rất quan trọng trong vận hành và bảo dưỡng giàn khoan. Nghiên cứu này trình bày kết quả mô phỏng số và xây dựng hệ thống các công thức dự đoán độ bền tới hạn của chân giàn khoan ngoài khơi kiểu bán chìm khi bị tai nạn đâm va bởi các tàu dịch vụ. Các mô phỏng số được thực hiện phần mềm thương mại ABAQUS. Các mô phỏng khảo sát sự ảnh hưởng của các tham số cơ bản đến độ bền sau va chạm của kết cấu chân giàn khoan bán chìm với kích thước thực tế được thực hiện. Các tham số được khảo sát bao gồm: ảnh hưởng của tốc độ đâm va, ảnh hưởng của vị trí va chạm và ảnh hưởng của hình dạng mũi tàu dịch vụ khi va chạm. Sau khi khảo sát sự ảnh hưởng của các tham số đến độ bền của chân giàn khoan, hàng loạt các kịch bản khác nhau về tai nạn đâm va giữa tàu dịch vụ và chân giàn khoan thực tế được thực hiện. Tiếp theo, hệ thống công thức dự đoán độ bền tới hạn sau va chạm của các kết cấu chân giàn khoan bán chìm được đề xuất dựa trên các kết quả mô phỏng số và thuật toán hồi quy. Độ chính xác và tin cậy của các công thức đã đề xuất được đánh giá khi so sánh với kết quả mô phỏng và thí nghiệm đã công bố.

**Từ khóa:** độ bền tới hạn, độ bền còn lại, chân giàn khoan bán chìm, kết cấu cylinder có nẹp gia cường dọc, công thức độ bền.

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Để đáp ứng nhu cầu năng lượng ngày càng tăng, nhiều giàn khoan tự nâng ngoài khơi kiểu

bán chìm đã được lắp đặt để khoan dầu khí. Ưu điểm của loại giàn khoan này là có khả năng tự ổn định tốt trong môi trường đại dương. Đặc biệt, chúng được sử dụng phổ biến ở các vùng nước sâu trên 300 m. Trong quá trình hoạt động, các giàn khoan luôn cần sự hỗ trợ của các tàu dịch vụ để cung cấp trang thiết bị, lương thực thực phẩm và cũng như các tàu vận chuyển dầu. Do đó, va chạm giữa chúng là điều không thể tránh khỏi. Đối với các va chạm lớn có thể dẫn đến hậu quả thảm khốc như sụp đổ giàn khoan, ô nhiễm môi trường, tổn thất tài chính và thậm chí gây nguy hiểm đến tính mạng con người (xem hình 1 [1,2]).

Mối quan tâm chính trong quá trình thiết kế và vận hành hệ thống kết cấu giàn khoan là đảm bảo rằng chúng có đủ độ an toàn trong trường hợp có sự cố va chạm. Vấn đề đặt ra là làm sao để đánh giá được độ bền còn lại của giàn khoan sau va chạm. Bởi vì việc sửa chữa các vị trí hư hỏng có thể rất khó khăn và đôi khi là không thể bởi vì lý do kinh tế và các yêu cầu kỹ thuật. Do đó, việc đánh giá độ bền của kết cấu chân giàn khoan sau va chạm có vai trò rất quan trọng, trên cơ sở đó các nhà kỹ thuật và quản lý sẽ đưa ra quyết định sửa chữa hay không sửa chữa [3,4].



Hình 1. Minh chứng hậu quả của va chạm giữa tàu dịch vụ và giàn khoan [1,2].

Nghiên cứu về ứng xử va chạm của các kết cấu chân giàn khoan lần đầu tiên được trình bày bởi Walker và Kwok [2]. Trong đó, các thí nghiệm được thực hiện trên mô hình thu nhỏ của kết cấu cylinder với va chạm kiểu tải tĩnh (quasi-static denting). Walker và các cộng sự [5, 6] cung cấp các thí nghiệm va chạm tĩnh trên mô hình thu nhỏ của kết cấu cylinder có nẹp gia cường theo cả phương ngang và dọc (ring and stringer stiffener). Gần đây, Cerik [7] thực hiện thí nghiệm va chạm động và mô phỏng số trên 2 mô hình cylinder có nẹp gia cường hình vòng tròn. Hầu hết các kết quả thí nghiệm được công bố chỉ nghiên cứu các va chạm của kết cấu ngoài khơi theo cách tiếp cận gần như tĩnh và giả sử rằng các ứng xử của kết cấu này dưới tác dụng của tải trọng động tại tốc độ va chạm thấp là giống như ứng xử tĩnh của lực và chuyển vị. Tuy nhiên, trong thực tế các va chạm xảy ra ngoài khơi là các va chạm động (dynamic collision). Do đó, các ảnh hưởng của tải trọng động như tốc độ biến dạng (strain-rate effect) và lực quán tính (inertial force) cần được quan tâm khi dự đoán ứng xử va chạm một cách chính xác. Khắc phục các hạn chế đó, tác giả và cộng sự [8-12] đã thực hiện các thí nghiệm va chạm động trên 9 mô hình chân giàn khoan thu nhỏ, sau đó kiểm tra độ bền của nó sau va chạm dưới tác dụng của áp suất thủy tĩnh. Các mô hình này là các dữ liệu quý giá để đánh giá độ chính xác và tin cậy của phương pháp mô phỏng số đã xây dựng.

Liên quan đến độ bền của các kết cấu chân giàn khoan có nẹp gia cường sau va chạm, cho đến nay chỉ có một vài nghiên cứu được báo cáo trong các tài liệu mở. Harding và Onoufriou [13] đã trình bày các thí nghiệm nén dọc trục đối với các kết cấu cylinder có nẹp gia cường hình vòng tròn sau va chạm. Các biến dạng cục bộ được tạo ra bởi các va chạm tĩnh. Walker và các cộng sự [5,6] cũng thực hiện các thí nghiệm va chạm tĩnh trên các kết cấu cylinder có nẹp gia cường và sau đó kiểm tra độ bền giới hạn của chúng dưới sự kết hợp của áp lực thủy tĩnh và nén dọc trục. Ronalds và các cộng sự [14,15] thực hiện thí nghiệm va chạm tĩnh trên 4 mô hình 3B1, 3B2, 3B3 và 3B4. Sau đó, các mô hình này được kiểm tra độ bền tới hạn dưới tác dụng

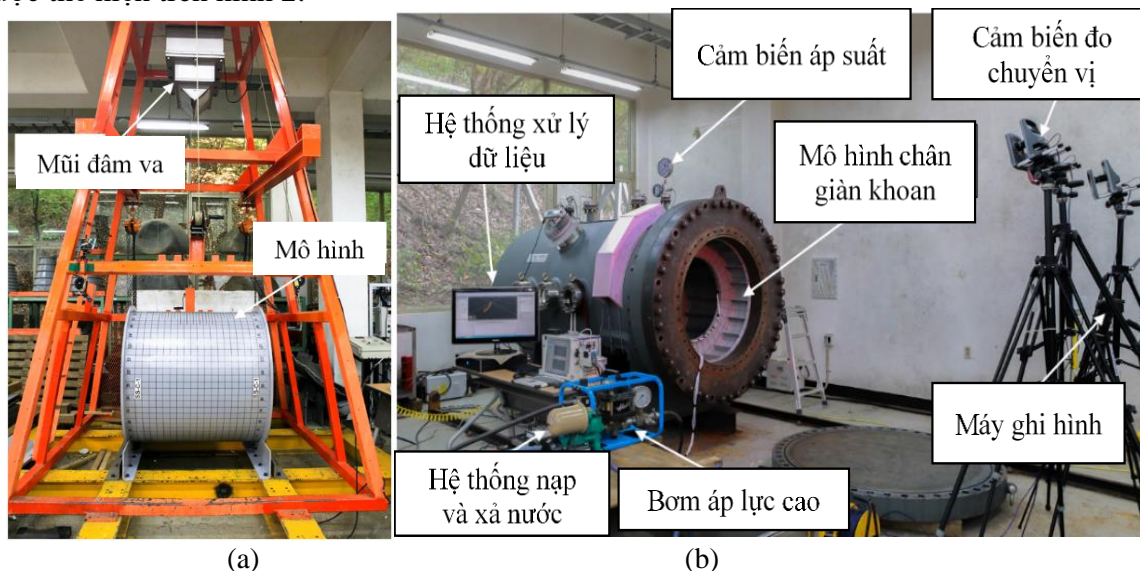
của lực nén dọc trục. Mục đích của các thí nghiệm này để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các mức độ va chạm khác nhau tới độ bền tới hạn của chân giàn khoan.

Ngày nay, phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến đã trở thành một công cụ tuyệt vời để đánh giá ứng xử va chạm và sự cố của các kết cấu trong lĩnh vực công trình biển [3,4]. Nó cũng được áp dụng trong một số công trình ngoài khơi, bao gồm các kết cấu chân giàn khoan cố nẹp gia cường. Chi tiết một số phương pháp mô phỏng số về độ bền còn lại của chân giàn khoan sau tai nạn đâm va được trình bày bởi tác giả và các cộng sự [8-12, 16-17] và Cerik [18].

Ý tưởng của nghiên cứu này là khảo sát các ứng xử va chạm (đâm va) và độ bền tới hạn còn lại sau va chạm của chân giàn khoan bán chìm dưới tác dụng của tải trọng nén dọc trục bằng phương pháp mô phỏng số trên phần mềm ABAQUS. Tiếp theo, các ảnh hưởng của các tham số cơ bản đến độ bền sau va chạm như tốc độ đâm va, vị trí va chạm và cũng như hình dạng mũi tàu dịch vụ khi va chạm đều được xem xét. Cuối cùng, hệ thống công thức dự đoán độ bền tới hạn sau va chạm của các kết cấu chân giàn khoan bán chìm được đề xuất dựa trên các kết quả mô phỏng số và thuật toán hồi quy.

## 2. GIỚI THIỆU CÁC MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM

Trong phần này sẽ giới thiệu thí nghiệm của 07 mô hình chân giàn khoan thu nhỏ. Trong đó, 03 mô hình (SS-I, SS-C-1, SS-C-2) được thực hiện bởi tác giả tại phòng thí nghiệm va chạm động, Đại học Ulsan, Hàn Quốc [4, 8]. Trong các mô hình này thì SS-I là mô hình nguyên vẹn và SS-C-1, SS-C-2 là mô hình chịu biến dạng ban đầu bởi thí nghiệm va chạm động. Mục đích sử dụng mô hình nguyên vẹn là để so sánh mức độ sụt giảm độ bền của mô hình bị va chạm và mô hình không bị va chạm. Sau thí nghiệm va chạm động, tất cả mô hình này sẽ được kiểm tra độ bền tới hạn dưới tải trọng áp suất thủy tĩnh. Tiếp theo là 04 mô hình (3B1, 3B2, 3B3 và 3B4) được thực hiện bởi Ronalds và các cộng sự [14,15]. Chi tiết các kích thước, vật liệu của mô hình thí nghiệm được thể hiện trong bảng 1. Chi tiết quá trình thực hiện thí nghiệm và kết quả thí nghiệm được cung cấp tại tài liệu tham khảo [4,8,14-15]. Việc sử dụng các kết quả thí nghiệm này nhằm mục đích so sánh với kết quả mô phỏng số để đánh giá độ chính xác và tin cậy của phương pháp mô phỏng số đã xây dựng, cũng như để đánh giá độ chính xác của hệ thống công thức mà tác giả đề xuất trong phần tiếp theo. Một vài hình ảnh thiết lập thí nghiệm được thể hiện trên hình 2.



Hình 2. Setup thí nghiệm và va chạm động [4] và [8] độ bền cho chân giàn khoan: (a) va chạm; (b) độ bền.

Bảng 1. Thông số kích thước và vật liệu của các mô hình thí nghiệm.

Tên mô hình		Đơn vị	SS-I	SS-C-1	SS-C-2	3B1	3B2	3B3	3B4
Bán kính trung bình		$R$	mm	550	550	550	160	160	160
Chiều dày vỏ		$t$	mm	2.99	2.98	2.97	0.6	0.6	0.6
Tổng chiều dài		$L$	mm	1060	1060	1060	319	319	319
Số lượng nếp gia cường vòng		$N_{sr}$	-	2	2	2	2	2	2
Số lượng nếp gia cường dọc		$N_s$	-	20	20	20	40	40	20
Nếp gia cường dọc	Chiều cao	$h_{sw}$	mm	65.0	65.0	65.0	4.8	4.8	4.8
	Độ dày	$t_{st}$	mm	4.93	4.89	4.87	0.6	0.6	0.6
Nếp gia cường vòng	Chiều cao bản thành	$h_{rw}$	mm	200	200	200	6.5	6.5	6.5
	Độ dày bản thành	$t_{rw}$	mm	4.91	4.90	4.92	0.82	0.82	0.82
	Chiều rộng bản cánh	$b_{rf}$	mm	50.0	50.0	50.0	-	-	-
	Độ dày bản cánh	$t_{rf}$	mm	4.91	4.89	4.88	-	-	-
Ứng suất chảy		$\sigma_Y$	MPa	336	336	336	332	332	332
Mô đun đàn hồi		$E$	GPa	210	206	206	205	205	205
Độ sâu va chạm lớn nhất		$d$	mm	-	36.8	43.2	7.36	12.48	12.96

### 3. MÔ PHỎNG SỐ

#### 3.1. Phần tử và điều kiện biên

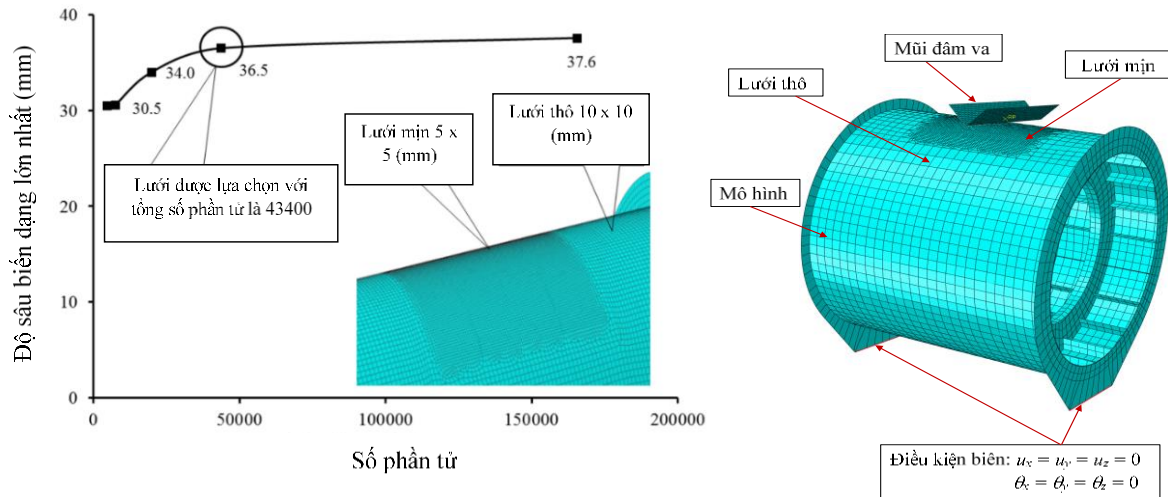
Các kết cấu chân giàn khoan được mô hình hóa bằng các phần tử tám bốn nút (ABAQUS S4R). Quy luật sắp xếp chiều dày được thực hiện bằng nguyên tắc Simpson, với năm điểm tích hợp trong suốt bề dày. Trọng vật va chạm được giả thiết là vật rắn tuyệt đối (Rigid body). Hệ số ma sát tiếp xúc giữa hai bên mặt kim loại được thiết kế bằng 0.3 để tính mức độ trượt giữa hai bề mặt đối tượng va chạm.

Để xác định được kích thước lưới tối ưu thì hàng loạt các mô phỏng hội tụ (convergence test) đã được thực hiện bằng cách thay đổi kích thước lưới của mô hình tính toán. Trong nghiên cứu này, kích thước lưới tối ưu của vùng va chạm bằng 50% kích thước của các vùng lân cận. Các kết quả hội tụ được thể hiện trong hình 3. Như đã thấy trong hình, khi số phần tử là 54000, giá trị biến dạng lớn nhất tập trung đến một giá trị nhất định. Kích thước phần tử được chọn cho vùng va chạm (lưới mịn) là 5x5 mm mm và của vùng lân cận (lưới thô) là 10x10 mm. Kích thước mắt lưới này là đủ để xác định chính xác ứng xử của lực-chuyển vị. Điều kiện biên tại các vị trí bulong là ngàm cứng 6 bậc tự do tại vị trí của vòng gia cường cứng (End plate) nối với hệ thống chân đế của máy va chạm, xem hình 3.

#### 3.2. Vật liệu

Đối với mô phỏng va đập, các thuộc tính của vật liệu được xác định bằng các công thức được đề xuất bởi tác giả trong tài liệu tham khảo [3-4, 8-9]. Các phương trình này được xây dựng bằng cách sử dụng kết quả của 7500 mẫu kéo bao gồm cả tải trọng tĩnh và động với các loại thép khác nhau như: SS41, AH36, HSLA, HY-80, HY-100,... Các giá trị của ứng suất chảy, giới hạn bền, biến dạng tới hạn động và độ bền kéo giới hạn được thể hiện theo giá trị của tốc độ biến dạng. Cần chú ý rằng đối với bài toán va chạm thì ứng xử va chạm của vật liệu phụ thuộc lớn vào tốc độ biến dạng. Trong nghiên cứu này, tốc độ biến dạng được thực hiện trong

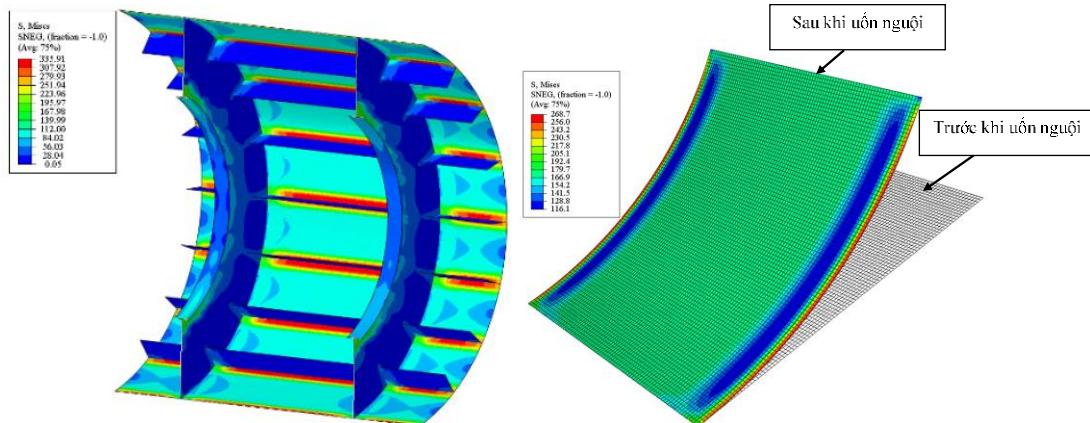
phạm vi từ 10/s, 20/s, 50/s, 70/s, 100/s tới 150/s.



Hình 3. Kết quả mô phỏng hội tụ để tìm kích thước lưới tối ưu và điều kiện biên.

### 3.3. Ứng suất dư và biến dạng ban đầu

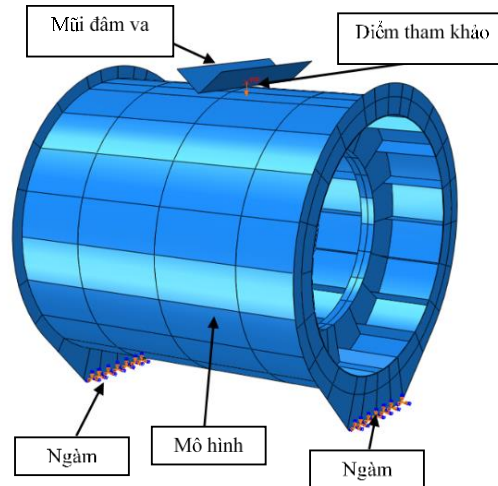
Quá trình chế tạo các cylinder được chia làm hai giai đoạn gồm: uốn nguội tấm tôn vò và quá trình hàn các nẹp gia cường vào tôn vò. Chính quá trình này tạo nên ứng suất dư và biến dạng ban đầu ở các mô hình. Ứng suất dư được phân bố không đều theo độ dày của tôn vò theo cả phương chu vi và phương dọc. Trong quá trình hàn, nhiệt độ cao được tạo ra để làm nóng chảy vật liệu trước khi kết nối các cấu trúc với nhau. Sự thay đổi nhiệt độ cũng tạo ra ứng suất dư bên trong kết cấu cũng như khu vực hàn xung quanh. Chi tiết về công thức tính ứng suất dư do hàn có thể tham khảo tại tài liệu tham khảo [3, 10]. Phân bố ứng suất dư do hàn và uốn nguội của mô hình SS-C-2 được thể hiện trong hình 4.



Hình 4. Phân bố ứng suất dư do quá trình hàn và uốn nguội cho mô hình SS-C-2.

### 3.4. Mô phỏng bài toán va chạm

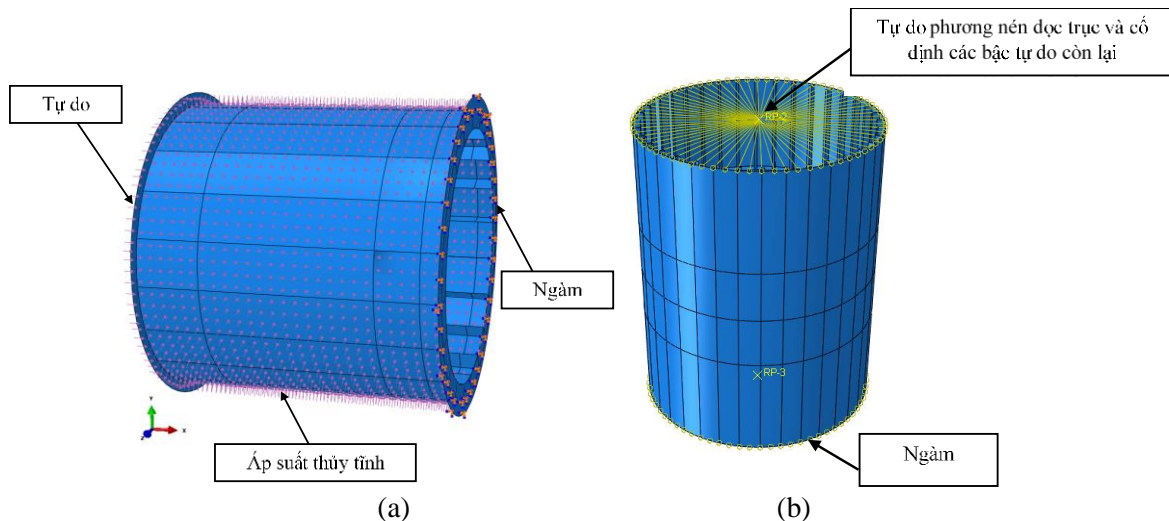
Mục đích của phân tích số cho bài toán va chạm là để tạo ra các biến dạng, hư hỏng ban đầu, nó giống như quá trình chân giàn khoan bị tàu dịch vụ đâm va. Mô phỏng số quá trình va chạm được thực hiện trên giải thuật Dynamic/ Explicit của phần mềm Abaqus. Trong mô hình, các điều kiện biên được mô hình hóa như trong hình 5.



Hình 5. Mô hình phần tử hữu hạn cho bài toán mô phỏng va chạm.

### 3.5. Mô phỏng độ bền còn lại sau va chạm

Giống như trong các thí nghiệm, phân tích số cũng bao gồm hai bước: tạo ra các hư hỏng ban đầu và phân tích độ bền dư. Khi bước đầu tiên kết thúc, mô hình với những biến dạng, hư hỏng ban đầu được chuyển sang phân tích độ bền dư. Bước đầu tiên nhằm mục đích cập nhật các tọa độ của phần tử trong vùng bị hư hỏng và sự phân bố ứng suất ban đầu của các phần tử đó. Do đó, tất cả các ứng suất dư từ phân tích va chạm của các mô hình đã được tích hợp. Với bài toán độ bền dư, giải thuật Static Riks đã được áp dụng. Mô hình được cố định ở mặt bích, bên ngoài là áp suất thủy tĩnh của nước như Hình 6.

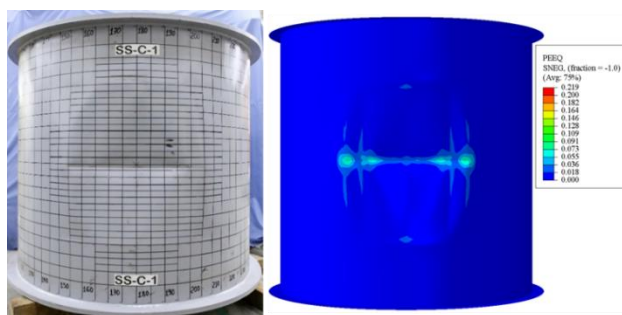


Hình 6. Mô hình phần tử hữu hạn cho mô phỏng độ bền dư sau va chạm:  
(a) Tải trọng áp suất thủy tĩnh; (b) Tải trọng nén dọc trục.

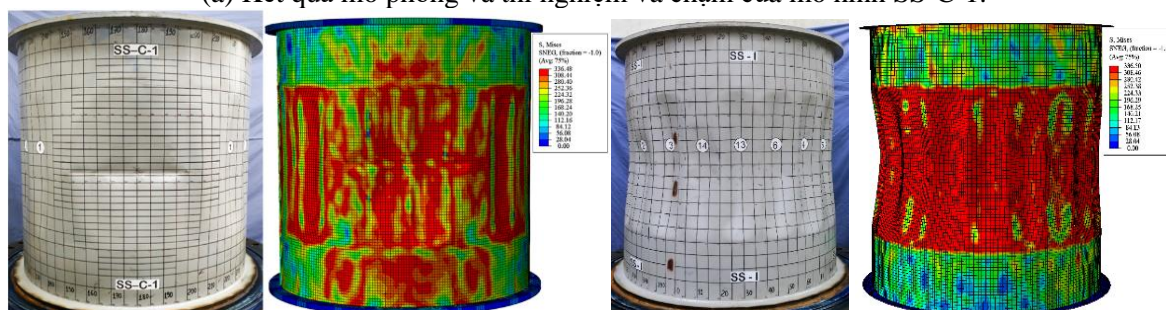
### 3.6. Độ chính xác và tin cậy của phương pháp mô phỏng số

Biến dạng dự đoán sau va chạm của các mô hình được so sánh với kết quả thử nghiệm của mô hình SS-C-1 như được thể hiện trong hình 7a. Kết quả chỉ ra rằng hình dạng biến dạng do va chạm của kết quả mô phỏng và thí nghiệm là gần như nhau. Sự sai khác của độ sâu biến dạng lớn nhất ( $d$ ) của mô phỏng số khi so sánh với kết quả thử nghiệm là khoảng 4,2%. Đối với bài toán va chạm thì sự sai khác này là tương đối nhỏ và được đánh giá là tin cậy. Tương tự, so

sánh hình dạng buckling của mô hình nguyên vẹn SS-I và mô hình bị va chạm SS-C-1 với kết quả thử nghiệm được thể hiện trong hình 7b. Có thể thấy rằng kết quả mô phỏng có độ chính xác cao so với thực nghiệm. Chi tiết so sánh kết quả mô phỏng với kết quả thí nghiệm được tổng hợp trong bảng 2. Có thể thấy rằng giá trị sai lệch trung bình giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm không quá 3.9%. Độ biến thiên COV giữa độ lệch chuẩn và giá trị trung bình không quá 2%. Có thể kết luận rằng phương pháp mô phỏng số đã được xây dựng và phát triển trong nghiên cứu này có độ chính xác và tin cậy cao. Vì vậy, có thể sử dụng phương pháp mô phỏng số này áp dụng để dự đoán ứng xử va chạm và độ bền dư sau va chạm cho kết cấu chân giàn khoan thực ngoài thực tế.



(a) Kết quả mô phỏng và thí nghiệm va chạm của mô hình SS-C-1.



(b) Kết quả mô phỏng và thí nghiệm độ bền của mô hình nguyên vẹn SS-I và va chạm SS-C-1.

Hình 7. Mô hình mô phỏng số và mô hình thí nghiệm vật lý về va chạm và độ bền của chân giàn khoan.

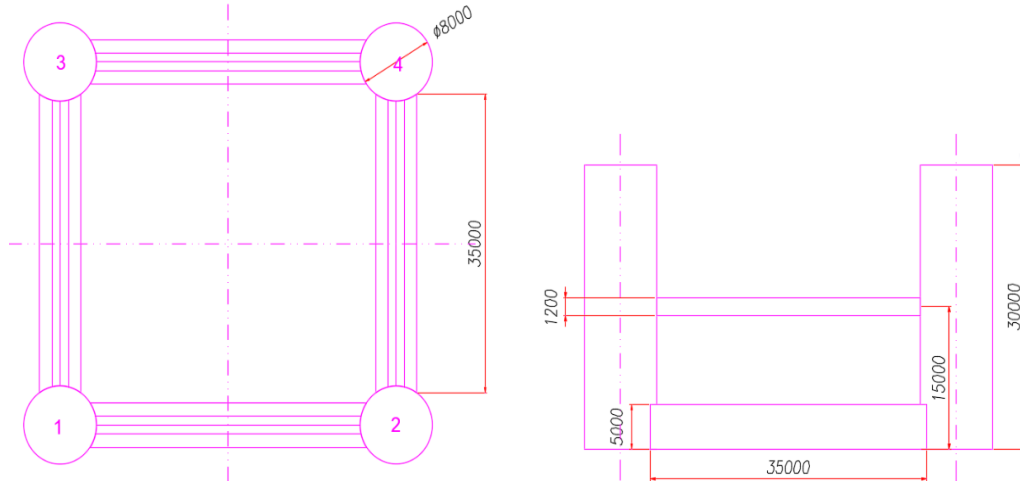
Bảng 2. So sánh giá trị độ bền tới hạn giữa mô phỏng và thí nghiệm.

Áp suất tới hạn; hoặc ứng suất nén dọc trục tới hạn. Đơn vị: MPa				
Mô hình	Độ sâu biến dạng/ Bán kính	Kết quả thực nghiệm (1)	Kết quả mô phỏng số (2)	Tỷ lệ (1)/(2)
SS-I	-	0.86	0.82	1.049
SS-C-1	6.69%	0.83	0.78	1.064
SS-C-2	7.85%	0.85	0.81	1.049
3B1	4.60%	318	308	1.032
3B2	7.20%	277	272	1.018
3B3	8.10%	202	198	1.020
3B4	10.70%	195	187	1.043
<b>MEAN</b>				<b>1.039</b>
<b>STDEV</b>				<b>0.017</b>
<b>COV%</b>				<b>1.616</b>



#### 4. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ

Sau khi đã đánh giá được độ chính xác và tin cậy của phương pháp mô phỏng số đã xây dựng, trong phần này tác giả sẽ thực hiện khảo sát ứng xử va chạm và độ bền dư sau va chạm của kết cấu chân giàn khoan ngoài thực tế với các tham số ảnh hưởng khác nhau. Kích thước của một giàn khoan đang được khai thác ngoài thực tế được sử dụng để mô hình hóa và khảo sát sự ảnh hưởng của các tham số được thể hiện như hình 8. Chi tiết kích thước của kết cấu chân giàn khoan được thể hiện trong bảng 3.

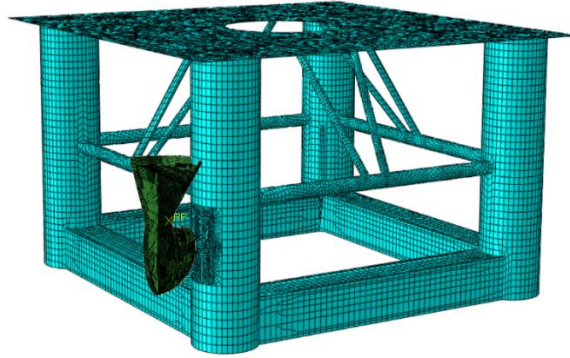


Hình 8. Kích thước tổng thể của chân đế giàn khoan (đơn vị: mm).

Cần chú ý rằng, nghiên cứu này chỉ trọng tâm nghiên cứu về chân giàn khoan, do đó phần thượng tầng không được mô hình hóa chi tiết để giảm khối lượng tính toán. Tổng số phần tử đã chọn là 54000, kích thước lưới mịn tại khu vực va chạm là 100x100 mm, kích thước lưới thô ngoài vùng va chạm là 400x400 mm. Tàu dịch vụ đâm va có mũi quả lê và trọng tải 5000 tấn. Mô hình chia lưới phần tử của chân giàn khoan và mũi quả lê của tàu đâm va được thể hiện trên hình 9. Điều kiện biên của mô hình mô phỏng được ngàm ở phía cuối mỗi chân giàn khoan. Còn phần chân giàn khoan nối với boong được cố định 5 bậc tự do và chịu tải nén dọc trục theo hướng từ boong xuống.

Bảng 3. Các kích của mô hình thí nghiệm (Đơn vị: mm).

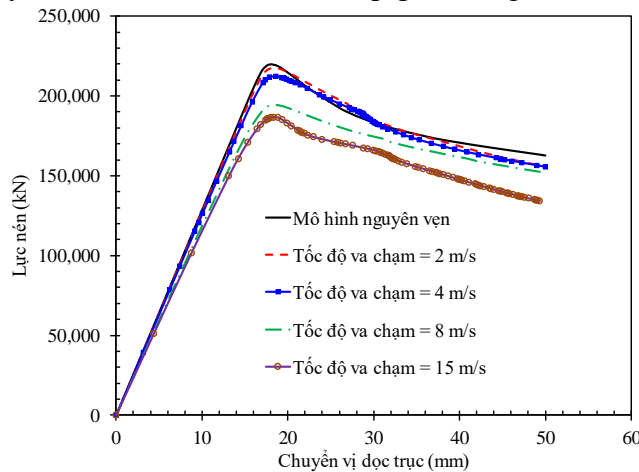
	Kí hiệu	Cylinder	Pontoon
Bán kính	$R$	8000	-
Độ dày	$t$	25	25
Chiều dài	$L$	30000	35000
Khoảng cách giữa các vòng gia cường	$l$	8000	10000
Số lượng vòng gia cường	$n_r$	3	3
Số lượng nẹp gia cường dọc	$n_s$	18	12
Chiều cao bản thành của vòng gia cường	$h_{rw}$	570	270
Chiều dày bản thành của vòng gia cường	$t_{rw}$	20	20
Chiều cao bản thành nẹp gia cường dọc	$h_{sw}$	285	285
Chiều dày bản thành nẹp gia cường dọc	$t_{sw}$	22	22
Chiều rộng bản cánh vòng gia cường	$b_{rf}$	200	-
Chiều dày bản cánh vòng gia cường	$t_{rf}$	22	-
Chiều rộng bản cánh nẹp gia cường dọc	$b_{sf}$	420	-
Chiều dày bản cánh nẹp gia cường dọc	$t_{sf}$	20	-



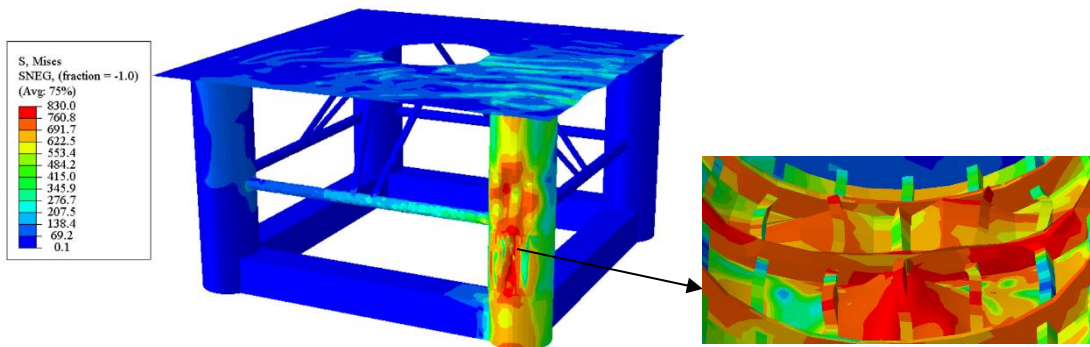
Hình 9. Mô hình phần tử của kết cấu chân giàn khoan và mũi quả lê của tàu đâm va.

#### 4.1 Ảnh hưởng của tốc độ va chạm

Trong phần này, ảnh hưởng của vận tốc va chạm được nghiên cứu bằng cách tăng vận tốc va chạm ban đầu với 2,0 m/s, 4,0 m/s, 8,0 m/s, và 15 m/s. Rõ ràng là năng lượng va chạm tỷ lệ thuận với bình phương vận tốc va chạm  $v$ . Hơn nữa, tốc độ biến dạng cũng tỉ lệ tuyến tính với vận tốc va chạm  $v$ . Khi vận tốc va chạm tăng dần đều thì chuyển vị cũng tăng theo, đặc biệt chuyển vị sẽ tăng với bước nhảy lớn khi tốc độ va chạm từ 8 m/s trở đi, xem hình 10. Rõ ràng là sự giảm độ bền tới hạn phụ thuộc tốc độ va chạm, tốc độ va chạm càng tăng thì độ bền tới hạn của chân giàn khoan càng giảm. Tuy nhiên, trong các trường hợp ở nghiên cứu này thì mức độ giảm độ bền tới hạn lớn nhất không vượt quá 15%. Tại tốc độ va chạm trên 8 m/s thì hiện tượng mất ổn định xảy ra cho cả tôn vò, và các nẹp gia cường dọc và ngang, xem hình 11.



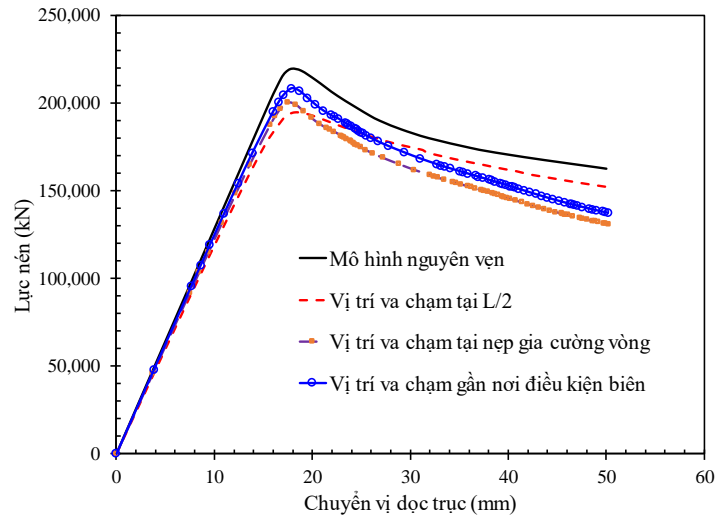
Hình 10. Đường cong lực nén và chuyển vị dọc trục với các tốc độ va chạm khác nhau.



Hình 11. Kết quả mô phỏng của chân giàn khoan đâm va với tàu có mũi quả lê.

#### 4.2 Ảnh hưởng của vị trí va chạm

Vị trí va chạm được lựa chọn tại ba vị trí bao gồm: Vị trí va chạm số 01 đặt tại  $L/2$ , vị trí va chạm số 02 tại nẹp gia cường vòng và vị trí va chạm số 03 gần nơi đặt điều kiện biên. Đường cong lực nén và chuyển vị dọc trục tại các vị trí va chạm khác nhau được thể hiện trên hình 12. Rõ ràng là mức độ hư hại cục bộ của chân giàn khoan phụ thuộc nhiều vào các vị trí va đập. Hơn nữa, độ sâu của biến dạng cũng giảm đáng kể với từng vị trí theo hướng dọc của chân giàn khoan. Tuy nhiên, việc giảm độ bền tối thiểu với các vị trí va chạm khác nhau không lớn. Sự giảm độ bền lớn nhất ở vị trí va chạm 01 tại  $L/2$  so với vị trí va chạm số 03 gần nơi đặt điều kiện biên là 7%.

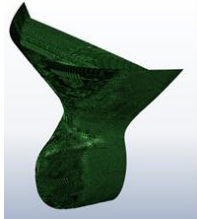
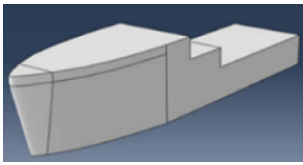
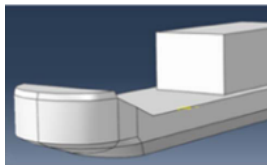


Hình 12. Đường cong lực nén và chuyển vị dọc trục tại các vị trí va chạm khác nhau.

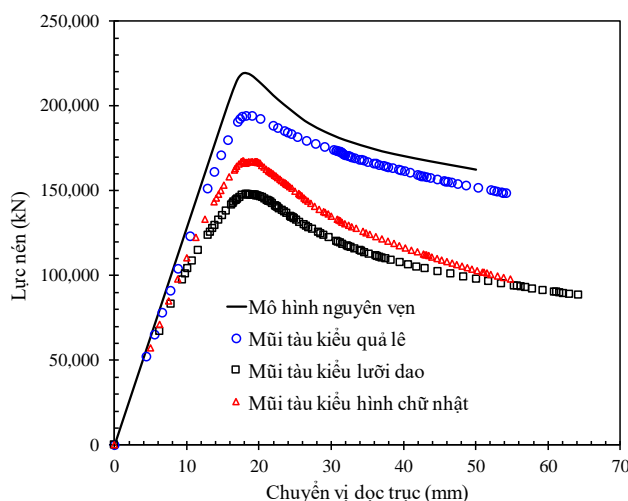
#### 4.3 Ảnh hưởng của hình dạng mũi tàu dịch vụ khí va chạm

Trong thực tế, các kết cấu chân đế giàn khoan thường bị đâm va theo nhiều cách, chẳng hạn như một con tàu nổi, có thể va chạm với các kết cấu này bởi mũi tàu, đuôi tàu hoặc cạnh của nó. Trong nghiên cứu này, ba loại tàu 5000 tấn với hình dạng khác nhau đã được áp dụng. Ba loại kết cấu điển hình cho các loại tàu này có hình dạng lần lượt là: loại mũi quả lê, loại mũi hình lưỡi dao và loại hình chữ nhật đã được nghiên cứu và được thể hiện trong bảng 4.

Bảng 4. Thông số của tàu đâm va.

Thông số	 Bulk Carrier ship	 Utility vessel	 Offshore accommodation barge
Chiều dài lớn nhất (m)	76.0	65.0	71.0
Chiều rộng lớn nhất (m)	16.0	14.4	20.0
Mớn nước (m)	4.2	4.0	3.5
Trọng tải (tấn)	5000	5000	5000

Đường cong lực và chuyển vị có các hình dạng vật thể đâm va khác nhau được thể hiện trong hình 13. Có thể nhận thấy rằng trường hợp nghiêm trọng nhất là trường hợp va chạm của mũi quả lê, ở đó tải trọng cục bộ là lớn nhất. Chuyển vị do mũi quả lê gây ra lớn hơn so với hình lưỡi dao và hình chữ nhật lần lượt là 19% và 32%. Đáng chú ý rằng khi đuôi tàu đâm va có hình dạng chữ nhật thì gây ra chuyển vị nhỏ nhất bởi vì lực va chạm được phân bố trong một khu vực tiếp xúc rất lớn. Tuy nhiên, điều thú vị là trường hợp nghiêm trọng nhất là khi khi đâm va bằng tàu có mũi kiểu lưỡi dao. Trong trường hợp này, mức độ giảm độ bền tới hạn khi so sánh với mô hình nguyên vẹn là 32.6%. Còn đối với mũi tàu kiểu quả lê và kiểu chữ nhật, mức độ giảm độ bền tới hạn khi so sánh với kiểu nguyên vẹn lần lượt là 11.4% và 23.8%.



Hình 13. Đường cong lực nén và chuyển vị dọc trục tại các vị trí va chạm khác nhau.

## 5. XÂY DỰNG HỆ THỐNG CÔNG THỨC

Sau khi khảo sát ảnh hưởng của các tham số khác nhau đến ứng xử va chạm và độ bền dư sau va chạm trong phần trước, trong phần này một loạt các mô phỏng số đã được thực hiện trên các thiết kế thực tế của chân giàn khoan được tham khảo trong đăng kiểm API [19] và ABS [20]. Chi tiết về kích thước và đặc tính vật liệu được thể hiện ở bảng 5. Phạm vi  $R/t$  của chân giàn khoan được khảo sát từ 111 đến 475.

Trong mô phỏng số quá trình va đập, vật thể va đập là tàu có mũi quả lê. Đối với mỗi mô hình, chuỗi phân tích số được thực hiện với các vận tốc va chạm khác nhau từ 1,0 m/s, 2,5 m/s, 5,0 m/s, 7,5 m/s và 10 m/s. Các vận tốc được lựa chọn này đại diện cho các kịch bản đâm va của các công trình lắp đặt ngoài khơi với các vật thể rơi từ boong hoặc vật thể nổi. Khối lượng va chạm lần lượt là 10 tấn, 20 tấn, 50 tấn và 100 tấn với mỗi vận tốc. Ngoài ra, sự va chạm của các công trình ngoài khơi với các tàu dịch vụ cũng được khảo sát. Các vận tốc va chạm là 1 m/s, 2 m/s và 3 m/s. Đối với mỗi vận tốc, trọng lượng của tàu đâm va là 1000 tấn, 3000 tấn, 5000 tấn và 7500 tấn. Sau khi các phân tích va chạm kết thúc, các mô hình được chuyển sang phân tích độ bền dư sau va chạm với tải trọng kết hợp nén dọc trục. Như vậy có 256 mô phỏng số của quá trình va chạm và 256 mô phỏng số về độ bền dư sau va chạm.

Trên cơ sở áp dụng thuật toán hồi quy và khảo sát sự ảnh hưởng của các thông số cơ bản tới độ bền sau va chạm của chân giàn khoan, hệ số giảm độ bền  $R_{ux}$  được xác định là tỷ lệ giữa ứng suất nén dọc trục giới hạn của mô hình bị va chạm/ứng suất nén dọc trục của mô hình nguyên vẹn, xác định theo công thức trung bình (1). Khi quan tâm đến hệ số an toàn khi thiết kế thì  $R_{ux}$  được tính theo công thức (2). Trong các công thức này, độ sâu biến dạng lớn nhất do

va chạm được tính toán theo công thức (3) – (14). Chi tiết quá trình xây dựng công thức này được trình bày trong tài liệu tham khảo [3, 9]. Trong khi, ứng suất nén giới hạn của mô hình nguyên vẹn  $\sigma_{xu\_in}$  được tính toán nhanh chóng bằng công thức được công bố bởi Cerik [17].

Bảng 5. Kích thước và đặc tính vật liệu của chân giàn khoan.

Kí hiệu	Đơn vị	SS-1	SS-2	SS-3	SS-4	SS-5	SS-6	SS-7	SS-8
$R$	mm	3100	3025	2500	4200	3025	13320	8880	9500
$t$	mm	28	19.0	15	20.0	12.0	41.5	25.0	20.0
$L$	mm	12500	10240	11250	10500	10240	17500.0	6600	26000
$L_s$	mm	3000	2048.0	2250	3500	2048	3500.0	2200	3200
$n_r$	[-]	4.0	4.0	4.0	2.0	4.0	4.0	2.0	8.0
$h_{rw}$	mm	210.0	214.0	190.00	700	214.0	787.5	525	650
$t_{rw}$	mm	25.0	20.0	20	12.0	15.0	37.5	25.0	20.0
$w_{rf}$	mm	250	200.0	150	300	200	450.0	300	300
$t_{rf}$	mm	25	20.0	20	16.0	15.0	45.0	30.0	20.0
$n_s$	[-]	20	18.0	20	36	18.0	36.0	60.0	18.0
$h_{sw}$	mm	130.0	160.0	150	250.0	160.0	450.0	300	400
$t_{sw}$	mm	25.0	15.0	20	12.0	11.5	37.5	15.0	20.0
$w_{sf}$	mm	80.0	100.0	100	90.0	100.0	285.0	190.0	200
$t_{sf}$	mm	25	15.0	20	12.0	11.5	45.0	19.0	20.0
$\sigma_Y$	MPa	450	276.0	380	355	276	345.0	345	645
$E$	GPa	210	205	206	206	205	206	200	207
$R/t$	[-]	<b>111</b>	<b>159</b>	<b>167</b>	<b>210</b>	<b>263</b>	<b>321</b>	<b>355</b>	<b>475</b>

Độ chính xác của phương trình (1) khi so sánh với giá trị mô phỏng số là 0.998 và độ lệch chuẩn COV 1.68%. Khi so sánh với mô hình thí nghiệm 3B1, 3B2, 3B3 và 3B4 với sự sai khác trung bình 6.2 % và độ lệch chuẩn COV 5.55%, xem bảng 6. Đối với bài toán dự đoán độ bền tới hạn sau va chạm thì độ sai khác này là chấp nhận được.

$$R_{ux} = \frac{\sigma_{xu\_dam.}}{\sigma_{xu\_in.}} = \text{Exp}\left(-0.688 \frac{d}{R}\right) \quad ; \text{ Phương trình trung bình} \quad (1)$$

$$R_{ux} = \frac{\sigma_{xu\_dam.}}{\sigma_{xu\_in.}} = \text{Exp}\left(-0.35 - 0.688 \frac{d}{R}\right) \quad ; \text{ Phương trình thiết kế} \quad (2)$$

Trong đó:  $R_{ux}$  là hệ số giảm độ bền tới hạn;  $\sigma_{xu\_in.}$  là ứng suất nén giới hạn của giàn khoan nguyên vẹn (không bị va chạm);  $\sigma_{xu\_dam.}$  là ứng suất nén giới hạn của giàn khoan bị va chạm;  $d$  độ sâu biến dạng lớn nhất do va chạm được xác định theo công thức (3) đối với phương trình trung bình và được xác định theo công thức (4) đối với phương trình thiết kế;  $R$  là bán kính trung bình của chân giàn khoan.

$$\delta_d = \frac{d}{R} = 3.59 C_S C_L C_\beta (\lambda_E)^{0.68}; \text{ Phương trình trung bình} \quad (3)$$

$$\delta_d = \frac{d}{R} = 4.16 C_S C_L C_\beta (\lambda_E)^{0.68}; \text{ Phương trình thiết kế} \quad (4)$$

$$\lambda_E = \frac{E_k}{E_a} \quad ; \text{ Hệ số năng lượng va chạm} \quad (5)$$

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad ; \quad \text{ Động năng va chạm} \quad (6)$$

$$E_a = \frac{\sigma_Y + \sigma_T}{2} \varepsilon_T V_{str}; \quad \text{ Năng lượng biến dạng hấp thụ của kết cấu} \quad (7)$$

$$V_{Str} = V_{shell} + V_{stringer-stiffener} + V_{ring-stiffener} = A.L + V_{stringer-stiffener} + V_{ring-stiffener} \quad (8)$$

Trong đó

$V_{Sr}$ : Thể tích của kết cấu giàn khoan bị va chạm

$C_S$ : hệ số ảnh hưởng của hình dạng vật thể đâm va ( $C_S = 1$ : hình bán cầu;  $C_S = 0.74$ : hình lưỡi dao;  $C_S = 0.63$ : hình chữ nhật),  $C_L$ : hệ số vị trí va chạm,  $C_\beta$ : hệ số góc va chạm

$$C_L = \text{Exp} \left( -9.91 \frac{x}{L} \right) \quad (9)$$

$$C_\beta = 0.114\beta^2 - 0.346\beta + 1 \quad (10)$$

• Với thép thông thường:

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_Y} = \left\{ 1 + 0.664 \left( \frac{E}{1000\sigma_Y} \right)^{2.4} \right\} \quad (11)$$

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_Y} = 336 \left( \frac{E}{1000\sigma_Y} \right)^{2.52} \quad (12)$$

• Với thép độ bền cao:

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_Y} = \left\{ 1 + 1.3 \left( \frac{E}{1000\sigma_Y} \right)^{2.5} \right\} \quad (13)$$

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_Y} = 320 \left( \frac{E}{1000\sigma_Y} \right)^{1.76} \quad (14)$$

Bảng 6. So sánh kết quả dự đoán của công thức đề xuất và kết quả thí nghiệm.

Mô hình	3B1	3B2	3B3	3B4
Kết quả thí nghiệm, $\sigma_{xu\_dam}$ (MPa)	318	287	277	271
Kết quả dự đoán của công thức, $\sigma_{xu\_dam}$ (MPa)	311	305	304	301
Sai khác (Công thức /Thí nghiệm), $X_m$	0.98	1.06	1.10	1.11
Trung bình			1.062	
COV (%)			5.55	

## 6. KẾT LUẬN

Mục đích chính của nghiên cứu này là ứng dụng phương pháp mô phỏng số để xây dựng hệ thống các công thức dự đoán độ bền tới hạn của chân giàn khoan ngoài khơi kiểu bán chìm khi bị tai nạn đâm va bởi các tàu dịch vụ. Dựa trên kết quả của nghiên cứu, một số kết luận được rút ra như sau:

- Phương pháp mô phỏng số được phát triển trong nghiên cứu này có độ chính xác và độ tin cậy cao khi so sánh với kết quả thí nghiệm với độ sai khác trung bình là 1.039 và độ lệch chuẩn 1.62%. Do đó, nó có thể được áp dụng cho các mô phỏng dự đoán ứng xử va chạm và độ bền sau va chạm của các kết cấu thực tế kiểu cylinder ngoài khơi để phát triển các thiết kế và các công thức hướng dẫn cho quy phạm.

- Lần đầu tiên, các phương trình thiết kế để dự đoán độ bền sau va chạm của kết cấu chân giàn khoan đã được xây dựng thành công trong nghiên cứu này. Các công thức được đề xuất có độ chính xác khá cao và đáng tin cậy khi so sánh với giá trị thực nghiệm với độ sai khác trung bình là 6.2%. Hơn nữa, hệ thống công thức này thuận tiện để sử dụng trong dự đoán độ bền và khả năng sử dụng của kết cấu trong các điều kiện rủi ro trong giai đoạn thiết kế ban đầu của chân giàn khoan.

- Trong các nghiên cứu khảo sát chỉ ra rằng mức độ hư hỏng cục bộ chân giàn khoan phụ thuộc nhiều vào vị trí va đập. Chiều sâu biến dạng lớn nhất xảy ra tại  $L/2$  và giảm dần với mỗi vị trí theo hướng dọc của chân giàn khoan tới vị trí đặt điều kiện biên. Ngược lại, độ bền dư sẽ tăng dần từ vị trí va chạm  $L/2$  tới vị trí đặt điều kiện biên. Khi xem xét ảnh hưởng của hình dạng

vật thể va chạm, trường hợp nghiêm trọng nhất là vật thể va chạm kiểu mũi quả lê của các tàu dịch vụ. Tuy nhiên, mức độ giảm độ bền giới hạn của kiểu lưới dao là lớn nhất khi so sánh với mô hình nguyên vẹn là 32,6%. Khi xem xét tới tốc độ va chạm, tốc độ va chạm càng tăng thì độ bền tới hạn của chân giàn khoan càng giảm.

## LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2019.333. Đồng thời tác giả xin chân thành cảm ơn trường Đại học Nha Trang đã hỗ trợ các thủ tục thuận lợi trong quá trình thực hiện nghiên cứu.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. IOPCF, International Oil Pollution Compensation Funds, Annual report, UK, 2010.
- [2]. A. C. Walker, M. Kwok, Process of damage in thin-walled cylindrical shells, In: Smith, Clarke, editors, *Advances in Marine Structures*, London, UK: Elsevier Applied Science Publishers; 1986, pp. 111-36.
- [3]. Q.T. Do et al., Predicting the collision damage of steel ring-stiffened cylinders and their residual strength under hydrostatic pressure, *Ocean Engineering*, 169 (2018) 326-43. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.041>
- [4]. Q. T. Do et al., Dynamic lateral mass impact on steel stringer stiffened cylinders, *International Journal of Impact Engineering*, 116 (2018) 105-126. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.02.007>
- [5]. A. C. Walker, S. McCall, T. W. Thorpe, Strength of damaged ring and orthogonally stiffened shells-part I: Plain ring stiffened shells, *Thin-Walled Structures* 5 (1987) 425-453. [https://doi.org/10.1016/0263-8231\(87\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0263-8231(87)90032-2)
- [6]. A. C. Walker, S. McCall, T.W. Thorpe, Strength of damaged ring and orthogonally stiffened shells-part II: T-ring and orthogonally stiffened shells, *Thin-Walled Structures*, 6 (1988) 19-50. [https://doi.org/10.1016/0263-8231\(88\)90024-9](https://doi.org/10.1016/0263-8231(88)90024-9)
- [7]. B. C. Cerik, H. K. Shin, S.-R. Cho, On the resistance of steel ring-stiffened cylinders subjected to low-velocity mass impact, *International Journal of Impact Engineering*, 84 (2015) 108–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.04.011>
- [8]. Q.T. Do, T. Muttaqie, H.K. Shin, S.-R. Cho, Ultimate strength of intact and dented steel stringer-stiffened cylinders under hydrostatic pressure, *Thin-Walled Structures*, 132 (2018) 442-460. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.010>
- [9]. Q.T. Do et al., A new formulation for predicting the collision damage of steel stiffened cylinders subjected to dynamic lateral mass impact, *Applied Sciences*, 10 (2020) 3856. <https://doi.org/10.3390/app10113856>
- [10]. S.-R. Cho, Q.T. Do, H. K. Shin HK, Residual strength of damaged ring-stiffened cylinders subjected to external hydrostatic pressure, *Marine Structures*, 56 (2017) 186–205. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.08.005>
- [11]. Q.T. Do, S.H. Park, S.-R. Cho, Ultimate strength formulae of intact and damaged ring-stiffened cylinders under external hydrostatic pressure, *Chinese Journal Ship Research*, 14 (2019) 25–34. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01968>
- [12]. S.-R. Cho et al., Experimental study on ultimate strength of steel-welded ring-stiffened conical shell under external hydrostatic pressure, *Marine Structures*, 67 (2019) 102634. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.102634>
- [13]. J. E. Harding, A. Onoufriou, Behaviour of ring-stiffened cylindrical members damaged by local denting, *Journal of Constructional Steel Research*, 33 (1995) 237–257. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(94\)00005-3](https://doi.org/10.1016/0143-974X(94)00005-3)
- [14]. B. F. Ronalds, P. J. Dowling, Collision resistance of orthogonally stiffened shell structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 9 (1988)179-194. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(88\)90088-0](https://doi.org/10.1016/0143-974X(88)90088-0)
- [15]. B. F. Ronalds, P. J. Dowling, A denting mechanism for orthogonally cylinders, *International*

Journal Mechanical Sciences, 29 (1987) 743–759. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(87\)90060-9](https://doi.org/10.1016/0020-7403(87)90060-9)

[16]. Q. T. Do, Deriving formulations for forecasting the ultimate strength of locally dented ring-stiffened cylinders under combined axial, Sciences & Technology Development Journal, 23 (2020) 640–654. <https://doi.org/10.32508/stdj.v23i3.2412>

[17]. Q. T. Do et al., Residual ultimate strength formulations of locally damaged steel stiffened cylinders under combined loads, Ocean Engineering, 225 (2021) 108802. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108802>

[18]. B. C. Cerik, Ultimate strength of locally damaged steel stiffened cylinders under axial compression, Thin-Walled Structures, 95 (2015) 138-151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2015.07.004>

[19]. API, Bulletin on Stability Design of Cylindrical Shells, API Bulletin 2U, USA, 2000.

[20]. ABS, Guide for Buckling and Ultimate Strength Assessment for Offshore Structures, 2014.