

Nghiên cứu tính toán kết cấu cầu cảng dạng khung không gian theo lý thuyết cơ học phá huỷ dựa trên phần mềm SAP 2000

Trần Long Giang*

Viện Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, 484 Lạch Tray, phường Kênh Dương, quận Lê Chân, TP Hải Phòng, Việt Nam

Ngày nhận bài 18/3/2025; ngày chuyển phân biện 18/3/2025; ngày nhận phân biện 17/4/2025; ngày chấp nhận đăng 18/4/2025

Tóm tắt:

SAP 2000 là phần mềm cho phép mô hình hóa chính xác kết cấu khung không gian phức tạp dưới tác dụng của nhiều loại tải trọng phức tạp; hỗ trợ nhiều loại phân tích như tĩnh học, động học và phi tuyến; giúp đánh giá toàn diện khả năng chịu lực của kết cấu dưới các tải trọng khác nhau. Giao diện trực quan và dễ sử dụng của phần mềm này giúp người dùng dễ dàng nhập dữ liệu; tiết kiệm thời gian nhờ tự động hóa quá trình tính toán và cho kết quả chi tiết (biểu đồ nội lực, ứng suất, biến dạng). Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phần mềm SAP 2000 để tính toán nội lực cho kết cấu cầu cảng dạng khung không gian, sau đó dựa theo lý thuyết cơ học phá huỷ để tính toán vết nứt cho công trình cầu cảng tại Quy Nhơn (Bình Định). Qua đó, khẳng định SAP 2000 là công cụ hiệu quả để thiết kế và phân tích kết cấu cầu cảng bê tông cốt thép dạng khung không gian làm việc trong điều kiện tự nhiên và khai thác khắc nghiệt. Đồng thời, kiến nghị sử dụng lý thuyết cơ học phá huỷ vào thiết kế cầu cảng để đảm bảo an toàn và hiệu quả kinh tế cao nhất.

Từ khóa: kết cấu cầu cảng, lý thuyết cơ học phá huỷ, SAP 2000, TCVN 4116:2023, tiêu chuẩn thiết kế.

Chỉ số phân loại: 1.8, 2.1

A study on structural analysis of a 3D frame pier structure based on fracture mechanics theory using SAP 2000 software

Long Giang Tran*

Maritime Research Institute, Vietnam Maritime University, 484 Lach Tray Street, Kanh Duong Ward, Le Chan District, Hai Phong City, Vietnam

Received 18 March 2025; revised 17 April 2025; accepted 18 April 2025

Abstract:

SAP 2000 is a software that allows accurate modelling of complex spatial frame structures under the influence of various types of complex loads; supports multiple types of analysis, including static, dynamic, and nonlinear analysis, which helps to comprehensively assess the load-bearing capacity of structures under different loads. The user-friendly, intuitive interface of this software makes it easy for users to input data and saves time by automating the calculation process and generating detailed results (internal force diagrams, stress, deformation). In this article, the author uses SAP 2000 to calculate the internal forces for a spatial frame-type pier structure, then applies fracture mechanics theory to compute the cracks for a specific pier structure in Quy Nhon (Binh Dinh province). Accordingly, the author asserts that SAP 2000 serves as an effective tool for the structural design and analysis of reinforced concrete wharf frame systems operating under natural environmental conditions and subjected to severe service loads. Additionally, it is recommended to integrate fracture mechanics theory into pier design to ensure safety and achieve the highest economic efficiency.

Keywords: design standards, fracture mechanics theory, pier structure, SAP 2000, TCVN 4116:2023.

Classification numbers: 1.8, 2.1

*Email: giangtl.ird@vimaru.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Trong ngành xây dựng công trình cảng biển, cầu cảng là một yếu tố cấu thành quan trọng, đòi hỏi các nghiên cứu, phân tích kết cấu phức tạp để đảm bảo tính an toàn, ổn định và hiệu quả kinh tế. Kết cấu cầu cảng thường phải chịu tác động của các tải trọng động như: sóng biển, dòng chảy, tải trọng do tàu neo đậu, tải trọng tĩnh từ trọng lượng của công trình và môi trường xung quanh. Vì vậy, việc tính toán và phân tích nội lực, chuyển vị, đặc biệt là hiện tượng rạn nứt trong kết cấu cầu cảng là một công tác quan trọng để đánh giá khả năng chịu lực và tuổi thọ của công trình.

Để phục vụ cho việc thiết kế và kiểm tra kết cấu cầu cảng, việc sử dụng phần mềm mô phỏng kết cấu như SAP 2000 kết hợp với lý thuyết cơ học phá huỷ trở thành một phương pháp hiệu quả. Lý thuyết cơ học phá huỷ giúp xác định được độ rộng của vết nứt trong các cấu kiện bê tông cốt thép, từ đó đưa ra các giải pháp phù hợp để hạn chế sự phát triển của vết nứt, đảm bảo tính ổn định và độ bền của công trình.

Trên thế giới, đã có nhiều nghiên cứu liên quan đến phân tích và thiết kế kết cấu cầu cảng, bao gồm việc sử dụng phần mềm mô phỏng và lý thuyết cơ học phá huỷ để tối ưu hóa các thiết kế. Các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào việc mô phỏng các tải trọng động và tĩnh tác động lên kết cấu cầu cảng, cùng với việc đánh giá sự phát triển của các vết nứt trong các cấu kiện bê tông cốt thép. Các phần mềm phân tích kết cấu như SAP 2000, ANSYS và ABAQUS đã được sử dụng để mô phỏng các kết cấu phức tạp, giúp người thiết kế đưa ra các quyết định chính xác và hiệu quả hơn trong việc phân tích độ bền và tính ổn định của cầu cảng.

Trong nước, các nghiên cứu về phân tích kết cấu cầu cảng đã được thực hiện chủ yếu với các kết cấu bê tông cốt thép và khung không gian. Tuy nhiên, việc tích hợp lý thuyết cơ học phá huỷ vào trong quy trình thiết kế và phân tích kết cấu cầu cảng vẫn chưa được chú trọng một cách đầy đủ. Việc nghiên cứu sâu hơn về vấn đề này sẽ giúp tăng cường tính an toàn và hiệu quả kinh tế của các công trình cầu cảng, đặc biệt là trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ các cảng biển tại Việt Nam.

Mục tiêu nghiên cứu của bài báo là sử dụng phần mềm SAP 2000 để phân tích kết cấu cầu cảng dạng khung không gian, kết hợp với lý thuyết cơ học phá huỷ để đánh giá khả năng chịu lực và độ ổn định của công trình dưới tác động

của các loại tải trọng khác nhau. Cụ thể, bài nghiên cứu sẽ tập trung vào việc tính toán nội lực, chuyển vị và kiểm tra sự phát triển của vết nứt trong các cấu kiện bê tông cốt thép của cầu cảng. Các kết quả từ mô phỏng sẽ được so sánh với các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành là TCVN 4116:2023 và Eurocode 2-2004, từ đó đánh giá tính an toàn của công trình.

Nghiên cứu này có tính thời sự và khoa học cao vì các công trình cầu cảng đóng vai trò quan trọng trong hệ thống giao thông biển, đặc biệt là khi Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ cơ sở hạ tầng cảng biển. Việc sử dụng phần mềm SAP 2000 để phân tích kết cấu cầu cảng với tính toán vết nứt theo lý thuyết cơ học phá huỷ không chỉ giúp đảm bảo an toàn công trình mà còn giúp tiết kiệm chi phí và tăng hiệu quả kinh tế trong quá trình thiết kế và thi công.

Ngoài ra, nghiên cứu giúp mở rộng ứng dụng của lý thuyết cơ học phá huỷ trong thiết kế kết cấu cầu cảng, qua đó thúc đẩy sự phát triển của các phương pháp tính toán và kiểm tra hiện đại trong ngành xây dựng cầu cảng, góp phần nâng cao chất lượng công trình biển ở Việt Nam.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

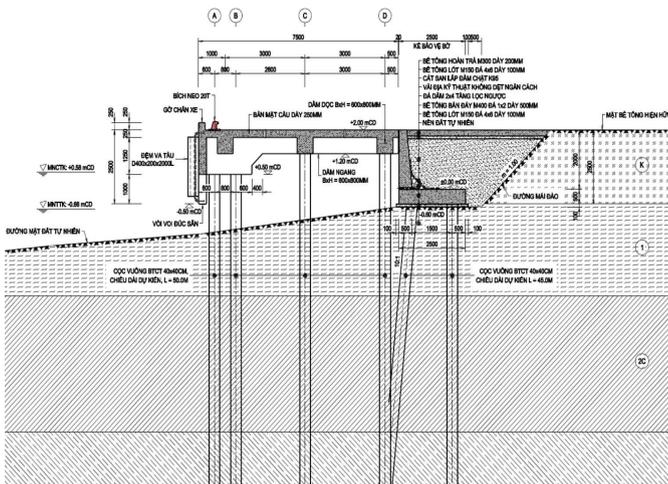
2.1. Đối tượng

Công trình được lựa chọn để nghiên cứu là cầu cảng thuộc luồng Quy Nhơn. Công trình nằm tại số 1B Phan Chu Trinh, phường Hải Cảng, TP Quy Nhơn, tỉnh Bình Định (hình 1).



Hình 1. Vị trí công trình nghiên cứu.

Công trình sử dụng kết cấu dạng khung không gian bao gồm hệ dầm dọc, dầm ngang bê tông cốt thép đặt trên hệ cọc bê tông cốt thép. Đây là một trong các dạng kết cấu được sử dụng rộng rãi ở Việt Nam hiện nay (hình 2) [1].



Hình 2. Mặt cắt ngang kết cấu công trình.

Chi tiết kích thước các cấu kiện của công trình được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số hình học của cấu kiện công trình.

STT	Hình dạng cấu kiện	Kích thước (mm)
1	Cọc vuông bê tông cốt thép 400x400 mm	Chiều rộng B=400 Chiều cao H=400
2	TB1	Chiều rộng B=600 Chiều cao H=800 Chiều dài L=7500
3	LB1	Chiều rộng B=600 Chiều cao H=800 Chiều dài L=4980
4		Chiều rộng B=600 Chiều cao H=800 Chiều dài L=4980
5	Bản mặt cầu	Chiều cao H=250

TB1: Dầm ngang số 1; LB1: Dầm dọc số 1; LB2: Dầm dọc số 2; B: Chiều rộng cấu kiện; H: Chiều cao cấu kiện; L: Chiều dài cấu kiện.

2.1.1. Thông số đầu vào mô hình

Xác định chiều dài tính toán của cọc: Chiều dài chịu uốn của cọc: do cọc ngâm trong đất vì vậy chiều dài tính toán L_U của cọc sẽ được xác định theo TCVN 10304:2014.

$$L_U = L_0 + \frac{2}{\alpha_{bd}} \quad (1)$$

trong đó: L_0 : Chiều dài tự do của cọc (m); α_{bd} : Hệ số (1/m) được tính bằng công thức:

$$\alpha_{bd} = \sqrt[5]{\frac{K \cdot b_c}{E_b \cdot I}} \quad (2)$$

trong đó: K : Hệ số phụ thuộc loại đất; b_c : Bề rộng tính toán của cọc (khi $d \geq 0,8$ m thì $b_c = d + 1$ m, khi $d < 0,8$ m thì $b_c = 1,5d + 0,5$ m); E_b : Mô đun đàn hồi của cọc (T/m^2); I : Mô men quán tính của cọc (m^4).

Kết quả tính toán chiều dài chịu uốn của cọc được thể hiện ở bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tính toán chiều dài chịu uốn của cọc.

Hàng cọc	Toàn bộ
D (m)	0,4
F_c (m^2)	0,16
b_c (m)	1,1
K_{qd} (T/m^4)	564,46
E_b (kN/m^2)	$3,10 \times 10^7$
I (m^4)	0,0021
α_{bd}	0,6119
L_0 (m)	4,1
L_U (m)	7,4

2.1.2. Thông số vật liệu

Thông số kỹ thuật của bê tông và thép được tổng hợp trong bảng 3.

Bảng 3. Các thông số kỹ thuật của vật liệu.

Vật liệu	Đơn vị	Cốt thép CB400-V	Bê tông M350
Mô đun đàn hồi	kN/m^2	$2,00 \times 10^8$	$3,10 \times 10^7$
Trọng lượng riêng	kN/m^3	78,5	24,5
Cường độ chịu kéo	kN/m^2	365000	1100
Cường độ chịu nén	kN/m^2	365000	15500
Hệ số Poisson		0,3	0,2
Hệ số giãn nở nhiệt		$1,20 \times 10^5$	$1,10 \times 10^5$

Các loại tải trọng tác dụng lên công trình bao gồm: thường xuyên: trọng lượng bản thân kết cấu công trình, áp lực đất...; tạm thời ngắn hạn: gió và dòng chảy, tải trọng do tàu bao gồm: lực neo tàu, lực va, lực tựa tàu khi cập bến, tải trọng tác động trong giai đoạn xây dựng; tạm thời tác động dài hạn: tải trọng do hoạt tải và thiết bị trên công trình. Cụ thể: tĩnh tải: trọng lượng riêng của bê tông cốt thép: $24,5 \text{ kN/m}^3$; hoạt tải khai thác trên cầu cảng: được quy về tải phân bố đều $q=1,0 \text{ Tm}^2$; tải trọng neo tàu: tác động do neo tàu tại bến được tính toán với vận tốc gió $20,7 \text{ m/s}$ và vận tốc dòng chảy phương dọc $2,20 \text{ m/s}$, vận tốc dòng chảy theo phương ngang là $0,60 \text{ m/s}$; tải trọng va tàu: theo phương vuông góc là $9,0 \text{ T}$, phân lực theo phương song song là $4,5 \text{ T}$.

2.2. Phương pháp tính toán

Mô hình hóa kết cấu: Kết cấu công trình được phân tích bởi mô hình 3 chiều với hệ trục tọa độ tổng thể X, Y, Z được thiết lập tương ứng với phương dọc, ngang và đứng. Các thuộc tính của phần tử kết cấu được gán cho các phần tử của mô hình như phần tử nút, thanh, tấm với các thuộc tính tương đương [2-4].

Mô hình mô phỏng kết cấu dựa trên phần mềm SAP 2000 như hình 3. Do địa chất khu vực xây dựng là cát và sét cứng nên cọc được mô phỏng liên kết ngầm trong đất. Mô hình cọc trong đất thường được thể hiện bằng các liên kết cơ học để mô phỏng tương tác giữa cọc và đất. Hai mô hình phổ biến là: (1) Mô hình cọc bằng liên kết ngầm (liên kết cứng); (2) Mô hình cọc bằng lò xo (liên kết mềm, thường theo mô hình nền biến dạng cục bộ, nền đất được thay thế bằng các lò xo và chỉ biến dạng tại nơi có tải trọng, khu vực lân cận không bị biến dạng hoặc mô hình phân bố đàn hồi).

Mô hình (1) phù hợp khi đất rất cứng hoặc có độ càn cao, làm cho biến dạng tương đối giữa đất và cọc nhỏ. Mô hình (2) phù hợp đất yếu hơn, điều kiện địa chất công trình là cát và sét, vì vậy mô hình cọc ngầm trong đất được lựa chọn.



Hình 3. Mô hình kết cấu bằng phần mềm SAP 2000.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Kết quả tính toán nội lực

Kết quả nội lực lớn nhất và nhỏ nhất của 6 tổ hợp tải trọng được thể hiện trong các bảng 4-9.

Bảng 4. Các tổ hợp tính toán kết cấu.

Tổ hợp	Trọng lượng bê tông cốt thép	Hoạt tải	Áp lực đất	Áp lực va	Lực neo
1	X		X		
2	X	X	X		
3	X		X	X	
4	X		X		X
5	X	X	X	X	
6	X	X	X		X

Bảng 5. Nội lực cọc.

P (tấn)	V2 (tấn)	V3 (tấn)	M2 (tấn.m)	M3 (tấn.m)	Ghi chú
-11,627	0,263	2,282	-4,458	9,834	M3max
-24,963	-2,667	1,223	4,518	-9,907	M3min
-6,499	0,320	-1,644	15,453	1,484	M2max
-13,202	-0,393	-4,171	-15,415	-1,425	M2min
-14,281	0,167	4,144	-5,984	1,960	V3max
-10,241	-0,393	-4,171	6,113	-1,125	V3min
2,208	1,738	3,245	-7,903	0,006	V2max
-22,002	-2,667	1,223	-8,470	-0,891	V2min
6,127	1,057	2,849	-1,526	-1,888	Pmax
-38,784	-0,224	-3,809	-14,539	-0,908	Pmin

P: Lực dọc trục; V2: Lực cắt theo phương trục 2; V3: Lực cắt theo phương trục 3; M2: Mômen uốn quanh trục 2; M3: Mômen uốn quanh trục 3.

Bảng 6. Nội lực dầm ngang chiều rộng kết cấu x chiều cao kết cấu=600x800 mm.

P (tấn)	V2 (tấn)	V3 (tấn)	M2 (tấn.m)	M3 (tấn.m)	Ghi chú
-4,586	7,413	-0,280	-0,290	17,593	M3max
2,641	-19,100	-1,263	-1,247	-29,577	M3min
6,400	-9,926	-1,902	2,492	-13,796	M2max
5,804	-15,790	1,902	-2,492	-16,099	M2min
6,400	-10,406	3,307	-1,117	-18,287	V3max
5,804	-15,790	-3,307	2,372	-16,099	V3min
8,996	18,561	-2,506	1,455	-10,758	V2max
2,644	-19,134	0,902	1,039	-29,200	V2min
8,997	18,540	-2,505	1,455	-10,751	Pmax
-12,653	1,882	-1,014	0,599	-1,166	Pmin

P: Lực dọc trục; V2: Lực cắt theo phương trục 2; V3: Lực cắt theo phương trục 3; M2: Mômen uốn quanh trục 2; M3: Mômen uốn quanh trục 3.

Bảng 7. Nội lực dầm dọc chiều rộng kết cấu x chiều cao kết cấu=600x800 mm.

P (tấn)	V2 (tấn)	V3 (tấn)	M2 (tấn.m)	M3 (tấn.m)	Ghi chú
0,580	0,552	-0,163	-0,275	8,306	M3max
0,155	3,981	-0,481	0,375	-9,473	M3min
5,528	6,521	-0,276	1,057	0,427	M2max
-0,736	-9,453	-0,519	-0,585	-8,855	M2min
-5,529	-4,873	0,472	1,057	0,520	V3max
0,347	4,214	-0,524	-0,106	1,771	V3min
0,856	9,519	-0,370	0,501	0,771	V2max
-0,736	-9,453	-0,519	-0,585	-8,855	V2min
1,230	-0,002	0,005	0,034	2,845	Pmax
-9,029	-1,590	-0,005	0,574	4,438	Pmin

P: Lực dọc trục; V2: Lực cắt theo phương trục 2; V3: Lực cắt theo phương trục 3; M2: Mômen uốn quanh trục 2; M3: Mômen uốn quanh trục 3.

Bảng 8. Nội lực bản sàn chiều cao kết cấu = 250 mm.

M11 (tấn.m/m)	M22 (tấn.m/m)	V13 (tấn/m)	V23 (tấn/m)	Ghi chú
1,211	0,535	-0,331	2,007	M11max
-1,895	-0,433	1,131	-0,847	M11min
0,226	1,094	0,375	1,306	M22max
-1,104	-1,750	1,076	-2,091	M22min
0,672	0,111	1,908	0,134	V13max
-1,375	-1,599	-1,611	-1,882	V13min
1,207	0,543	1,082	2,030	V23max
-1,139	-1,737	-1,473	-2,091	V23min

M11: Mômen uốn quanh trục 2 do lực tác động dọc theo trục 1 gây ra (mômen theo phương x); M22: Mômen uốn quanh trục 1 do lực tác động dọc theo trục 2 gây ra (mômen theo phương y); V13: Lực cắt theo trục 3 (z) do lực tác động dọc theo trục 1 (x); V23: Lực cắt theo trục 3 (z) do lực tác động dọc theo trục 2 (y).

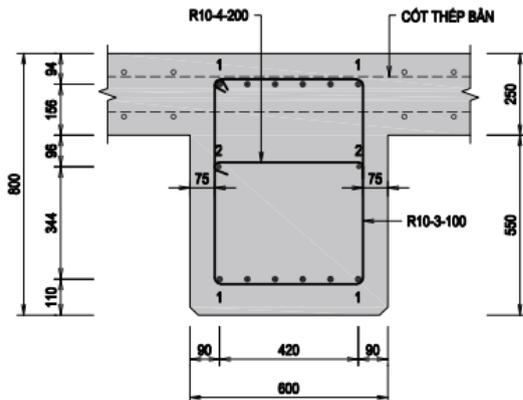
Bảng 9. Tổng hợp kết quả chuyển vị.

U1 (mm)	U2 (mm)	U3 (mm)	Ghi chú
6,172	14,584	0,007	U1max
-7,884	12,402	-0,343	U1min
4,248	18,158	-0,084	U2max
0,061	-16,843	-0,820	U2min
6,166	8,866	0,196	U3max
0,017	-16,786	-0,933	U3min

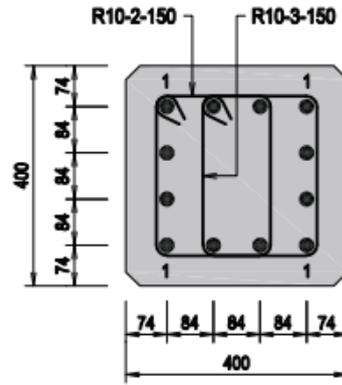
U1: Chuyển vị theo phương 1; U2: Chuyển vị theo phương 2; U3: Chuyển vị theo phương 3.

3.2. Tính toán bề rộng vết nứt theo TCVN 4116:2023

Tính toán vết nứt trong bê tông cấu kết là vấn đề phức tạp, được nghiên cứu từ lâu và xuất phát từ nhiều lý thuyết khác nhau [5], tuy nhiên, nghiên cứu này tập trung tính toán theo lý thuyết cơ học phá huỷ. Bố trí cốt thép của kết cấu công trình được trình bày trong hình 4 và 5.



Hình 4. Bố trí cốt thép của dầm và bản.



Hình 5. Bố trí cốt thép của cọc.

Tính toán bề rộng vết nứt theo TCVN 4116:2023 được tiến hành như sau: điều kiện mở rộng vết nứt [6]:

$$aT \leq [aT] \quad (3)$$

trong đó: aT: Bề rộng vết nứt tính toán (mm); [aT]: Bề rộng vết nứt cho phép (mm). [aT]=0,1 mm với công trình cấp IV có kết cấu nằm trong vùng nước biển thay đổi.

Chiều rộng vết nứt tính toán được xác định theo công thức:

$$\sigma_T = k * C_d * \eta * \frac{\sigma_a - \sigma_0}{E_a} * 7 * (4 - 100\mu) \sqrt{d} \quad (4)$$

trong đó: k: Hệ số cấu kiện chịu uốn và nén lệch tâm, k=1; khi đặt cốt thép nhiều lớp k=1,2; C_d: Hệ số điều chỉnh, hệ số này được lấy như sau: khi tải trọng tạm thời, C_d=1; khi M_{ld}/M_p<2/3, C_d=1; khi M_{ld}/M_p>2/3, C_d=1,3 (M_{ld} và M_p lần lượt là mômen uốn do tải trọng cố định, lâu dài, tải trọng toàn phần; cố định, lâu dài và ngắn hạn); η: Hệ số phụ thuộc vào loại thép, thép thanh có gờ η=1, thép thanh trơn η=1,4, thép sợi η=1,2; E_a: Mô đun đàn hồi của cốt thép (MPa); σ₀: Ứng suất giới hạn không gây nứt (MPa); d: Đường kính cong; σ_a: Ứng suất trong cốt thép chịu kéo, đối với cấu kiện chịu uốn σ_a được xác định:

$$\sigma_a = \frac{M}{F_a Z} \quad (5)$$

trong đó: M: Mômen tính toán; F_a: Diện tích cốt thép (cm²); Z: Cánh tay đòn của nội lực so với tiết diện cấu kiện; σ_a: Ứng suất ban đầu trong cốt thép.

Kết quả tính toán bề rộng vết nứt của các cấu kiện theo TCVN 4116:2023 thể hiện ở bảng 10.

Bảng 10. Bề rộng vết nứt theo TCVN 4116:2023.

STT	Cấu kiện	Bề rộng vết nứt (mm)	Bề rộng vết nứt cho phép (mm)
1	Cọc	0,041	0,1
2	TB1	0,093	0,1
3	LB1	0,041	0,1
4	LB2	0,063	0,1
5	Bản mặt cầu	0,073	0,1

TB1: Dầm ngang số 1; LB1: Dầm dọc số 1; LB2: Dầm dọc số 2.

3.3. Tính toán vết nứt theo Eurocode 2-2004

Việc tính toán vết nứt theo Eurocode 2-2004 dựa trên mô hình đàn hồi tuyến tính (LEFM) [7]. Mô hình này phù hợp với các giả định về ứng xử đàn hồi của bê tông và cốt thép dưới điều kiện tải trọng thông thường, giúp đơn giản hóa quá trình tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết. Biểu dạng trung bình để tính chiều rộng vết nứt được xác định như sau:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - K_f \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_c}{E_s} \quad (6)$$

trong đó: ϵ_{sm} : Biến dạng của cốt thép tại trạng thái giới hạn; ϵ_{cm} : Biến dạng nén trung bình của bê tông; σ_s : Biểu thị ứng suất trong thanh cốt thép; $f_{ct,eff}$: Ứng suất kéo bê tông hiệu dụng tại thời điểm cấu kiện bắt đầu nứt; $\rho_{p,eff}$: Tỷ lệ cốt thép hữu hiệu; E_s : Mô đun đàn hồi của thép; α_e : Hệ số đàn hồi tương đối giữa thép và bê tông; σ_c : Ứng suất trong bê tông; K_f : Hệ số phụ thuộc vào thời gian tải trọng, $K_f=0,6$ cho tải trọng ngắn hạn (S), $K_f=0,4$ cho tải trọng dài hạn (L).

Chiều rộng vết nứt được xác định theo công thức như sau [8]:

$$W_k = S_{r,max} * (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (7)$$

trong đó, W_k : Chiều rộng vết nứt; $S_{r,max}$: Độ rộng vết nứt lớn nhất.

Kết quả tính toán bề rộng vết nứt của các cấu kiện theo Eurocode 2-2004 được thể hiện ở bảng 11.

Bảng 11. Bề rộng vết nứt theo Eurocode 2-2004.

STT	Cấu kiện	Bề rộng vết nứt (mm)	Bề rộng vết nứt cho phép (mm)
1	Cọc	0,112	0,3
2	TB1	0,055	0,3
3	LB1	0,000	0,3
4	LB2	0,000	0,3
5	Bản mặt cầu	0,000	0,3

TB1: Dầm ngang số 1; LB1: Dầm dọc số 1; LB2: Dầm dọc số 2.

Kết quả tính toán, các giá trị bề rộng vết nứt trong cả hai phương pháp đều thấp hơn giới hạn cho phép, như vậy kết cấu đảm bảo độ an toàn trong thực tế. Tuy nhiên, TCVN 4116:2023 yêu cầu khắt khe hơn với giới hạn bề rộng vết nứt chỉ 0,1 mm, trong khi Eurocode 2-2004 cho phép tới 0,3 mm [9]. Điều này thể hiện yêu cầu cao của TCVN 4116:2023 đối với các công trình có kết cấu bê tông cốt thép chịu tác động bởi môi trường khắc nghiệt.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã thực hiện phân tích kết cấu cầu cảng dạng khung không gian bằng phần mềm SAP 2000, kết hợp với lý thuyết cơ học phá hủy để đánh giá khả năng chịu lực và hiện tượng rạn nứt của công trình. Các kết quả phân tích nội lực và chuyển vị cho thấy rằng, kết cấu cầu cảng đáp ứng được các yêu cầu về an toàn và ổn định dưới tác động

của các loại tải trọng khác nhau. Đồng thời, việc áp dụng lý thuyết cơ học phá hủy đã giúp xác định được bề rộng vết nứt trong các cấu kiện, đảm bảo rằng các vết nứt này nằm trong giới hạn cho phép theo tiêu chuẩn TCVN 4116:2023 và Eurocode 2-2004.

Các kết quả tính toán cho thấy, bề rộng vết nứt của các cấu kiện như cọc, dầm ngang, dầm dọc và bản mặt cầu đều nhỏ hơn giá trị cho phép, chứng tỏ rằng kết cấu đáp ứng được yêu cầu về độ bền và độ ổn định. Điều này khẳng định tính hiệu quả của việc sử dụng phần mềm SAP 2000 trong mô phỏng và phân tích kết cấu phức tạp, cũng như tầm quan trọng của việc áp dụng lý thuyết cơ học phá hủy trong thiết kế và đánh giá kết cấu cầu cảng.

Nghiên cứu này cũng đề xuất việc tích hợp lý thuyết cơ học phá hủy vào quy trình thiết kế cầu cảng để đảm bảo an toàn và hiệu quả kinh tế cao nhất. Các kết quả này có thể được sử dụng làm cơ sở tham khảo cho các dự án tương tự trong tương lai, đặc biệt là trong bối cảnh Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ hệ thống cảng biển và hạ tầng hàng hải.

Cuối cùng, nghiên cứu này cũng góp phần nâng cao hiểu biết về ứng dụng phần mềm phân tích kết cấu và lý thuyết cơ học phá hủy trong lĩnh vực xây dựng công trình biển, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu mới trong việc tối ưu hóa thiết kế kết cấu cầu cảng dưới tác động của các điều kiện môi trường phức tạp.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số DT24-25.157. Tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Commission for Standards, Metrology and Quality of Vietnam (2014), *TCVN 10304:2014 - Pile Foundations - Design Standards* (in Vietnamese).
- [2] N.V. Trung, N.T. Trung (2012), *SAP 2000-V11.0: Structural Analysis of Port and Coastal Structures*, Construction Publishing House (in Vietnamese).
- [3] T.L. Anderson (1995), *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, CRC Press, pp.41-67.
- [4] J. Napier (2019), "SAP 2000 documentation and user guide", *Computers and Structures Inc.*, <https://web.wiki.csiamerica.com/wiki/x/vgcT>, accessed 18 March 2025.
- [5] A. Kassimali (2010), *Matrix Analysis of Structures*, Cengage Learning, pp.10-20.
- [6] Commission for Standards, Metrology and Quality of Vietnam (2023), *TCVN 4116:2023 - Hydraulic Structures - Hydraulic Concrete and Reinforced Concrete Structures - Design Requirements* (in Vietnamese).
- [7] M.A. Wahab, I. Hilmy, T. Hafiz, et al. (2012), "Finite elements in fracture mechanics: For general power type singularity problems", *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (AMME)*, 15, pp.1-14, DOI: 10.21608/amme.2012.36949
- [8] European Committee for Standardization (2004), *Eurocode 2: Design of Concrete Structures (EN 1992-1-1:2004)*.
- [9] Z.P. Bazant, J. Planas (1999), *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC Press, pp.8-11, DOI: 10.1201/9780203756799.