



NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ TỔN THẤT MÔI CỦA KẾT CẤU MÔ ĐUN THƯỢNG TẦNG BỂ CHỨA NỔI TRONG TRẠNG THÁI KHAI THÁC Ở VÙNG BIỂN VIỆT NAM

Phạm Hiền Hậu^{1*}, Vũ Đan Chinh²

Tóm tắt: Vấn đề tính toán phân tích môi cho kết cấu mô đun thượng tầng của công trình nổi nói chung và bể chứa nổi nói riêng có một số điểm khác biệt cơ bản so với phân tích môi cho kết cấu công trình biển cố định bằng thép đã quen thuộc trong các tiêu chuẩn hiện hành. Các khác biệt này được thể hiện từ nguyên nhân gây môi cho đến quy trình phân tích. Bài báo đặt mục tiêu nghiên cứu, làm rõ các vấn đề liên quan và xây dựng quy trình đánh giá tổn thất môi cho kết cấu mô đun thượng tầng bể chứa nổi trong trạng thái khai thác theo tiêu chuẩn ABS, áp dụng tính toán môi cho mô đun thượng tầng bể chứa nổi VSP-01 khai thác tại mỏ Bạch Hổ, sử dụng phần mềm SACS và ANSYS. Kết quả nghiên cứu có thể sử dụng cho các thiết kế thực tế sẽ thực hiện tại Việt Nam.

Từ khóa: Tổn thất môi; kết cấu mô đun thượng tầng bể chứa nổi; trạng thái khai thác; công trình biển nổi.

Studying on fatigue damage assessment of topside module structures of floating storages in operating conditons in Vietnamese sea areas

Abstract: There are some basic differences between the fatigue analysis for topside module structures of floating structures in general and floating storages in particular and those for fixed offshore structures which has been familiar in current standards. The differences are expressed from fatiguing causes to analysis procedure. This article aims to research, clarify the involved problems and build the fatigue damage assessment procedure for topside module structures of floating storages in operating conditions in accordance with ABS standards, the application example is for the fatigue analysis of topside module of VSP-01 floating storage exploited at Bach Ho field with SACS and ANSYS software. The research results can be used for actual projects which will be done in Viet Nam.

Keywords: Fatigue damage; topside module structures of floating storages; operating conditions; floating structures.

Nhận ngày 14/12/2017; sửa xong 31/01/2018; chấp nhận đăng 28/02/2018

Received: December 14th, 2017; revised: January 31st, 2017; accepted: February 28th, 2018



1. Giới thiệu

Bể chứa nổi (Floating Production Storage and Offloading unit - FPSO) có chức năng thu gom, chế biến, chứa đựng và xuất các sản phẩm dầu khí, hiện đang được sử dụng rộng rãi ở các mỏ dầu khí ngoài khơi biển Việt Nam. Cấu tạo bể chứa nổi thường bao gồm ba phần chính là phần thượng tầng (Topside), phần thân nổi (Hull) và hệ thống neo (Mooring System) (Hình 1). Kết cấu thượng tầng bể chứa nổi được chia làm nhiều khối mô đun để đỡ các cụm công nghệ riêng biệt như cụm tháp khoan, cụm công nghệ khoan, cụm công nghệ thu gom, cụm công nghệ chế biến... (Hình 2). Kết cấu mô đun thượng tầng được thiết kế không chỉ đảm bảo điều kiện bền mà còn đảm bảo điều kiện môi. Các tác nhân gây môi bao gồm: Biến dạng cưỡng bức của thân bể chứa nổi; Rung động của thiết bị máy móc đặt trên thượng tầng; Ảnh hưởng động của gió đối với các kết cấu mảnh;... trong đó, yếu tố chính là ảnh hưởng của lực quán tính gây ra do chuyển động lắc của công trình nổi khi chịu tác động của tải trọng sóng.

Trên thực tế, để giảm khối lượng và độ phức tạp của bài toán, sau khi đã phân tích chuyển động đồng thời của toàn hệ thống, việc phân tích môi kết cấu mô đun thượng tầng thường được tách riêng độc lập với kết cấu nổi và được tính toán dựa trên mô đun tính môi của các phần mềm tính toán chuyên dụng

¹ PGS.TS, Khoa Xây dựng Công trình biển và Dầu khí, Trường Đại học Xây dựng.

² ThS, Khoa Xây dựng Công trình biển và Dầu khí, Trường Đại học Xây dựng.

* Tác giả chính. E-mail: hauph@nuce.edu.vn.

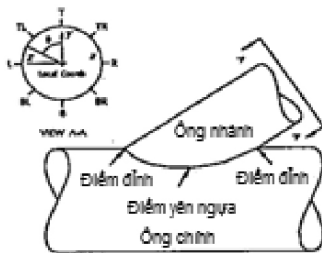
các chuyển động lắc gây ra. Thành phần lực quán tính theo phương x tại điểm m_i bao gồm lực quán tính do chuyển động theo phương x , lực quán tính li tâm và hướng tâm do chuyển động xoay quanh trục y . Theo [3], dựa trên phổ của các thành phần chuyển động của bể chứa nổi có thể xác định được phổ của lực quán tính tương ứng đặt tại m_i , phụ thuộc vào khối lượng m_i , gia tốc lắc của trọng tâm hệ, góc nghiêng do chuyển động lắc, khoảng cách giữa điểm đặt khối lượng m_i tới trọng tâm hệ.

Từ phổ lực quán tính, dựa trên phân tích nội lực, chuyển vị kết cấu theo phương pháp phần tử hữu hạn, kể đến các hệ số tập trung ứng suất (sẽ trình bày trong mục 3), xác định được phổ ứng suất $S_{\sigma\sigma}(\omega)$ tại từng điểm nóng trên các điểm giao các nút kết cấu thượng tầng. Trong trường hợp phổ ứng suất là dải hẹp thì số gia ứng suất là đại lượng ngẫu nhiên có phân phối Rayleigh, trường hợp phổ ứng suất là dải rộng thì số gia ứng suất có phân phối Gauss [2].

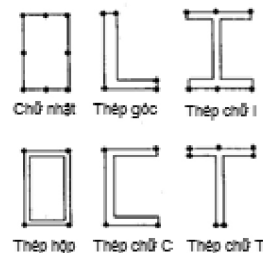


3. Xác định hệ số tập trung ứng suất tại các điểm nóng kết cấu thượng tầng bể chứa nổi

Do có sự thay đổi đột ngột về hình học nên tại các điểm nằm trên mặt giao giữa các phần tử thanh có sự tập trung ứng suất và được gọi là điểm nóng. Các điểm nóng quy ước trên tiết diện các phần tử thanh được quy định theo tiêu chuẩn DnV [4] (Hình 4) như sau:



a) Điểm nóng quy ước trên tiết diện ống



b) Điểm nóng quy ước trên các tiết diện khác

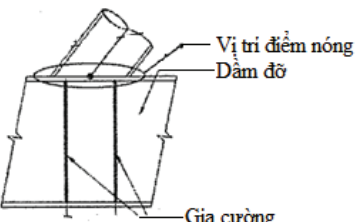
Hình 4. Các điểm nóng quy ước theo các loại tiết diện [4]

Ứng suất tập trung tại điểm nóng được tính bằng: Ứng suất danh nghĩa $\times$ Hệ số tập trung ứng suất. Trong đó ứng suất danh nghĩa được xác định theo các thành phần nội lực của phần tử thanh tại mặt cắt đầu phần tử đó giao với các thanh khác. Hệ số tập trung ứng suất (SCF) của từng điểm nóng tại vị trí các nút giao của các ống tương ứng với từng thành phần nội lực được xác định theo các công thức thực nghiệm đã quy định trong các tiêu chuẩn quy phạm [5,6]. Đối với một số điểm nóng, tại vị trí giao giữa các phần tử kết cấu tiết diện không phải là ống, một số trường hợp có thể lấy theo DnV-RP-C203 [4] hoặc lấy theo một số dự án thực tế [7] như trong Bảng 1:

Bảng 1. Hệ số tập trung ứng suất tại một số nút giao các phần tử có tiết diện khác nhau

Vị trí điểm nóng	SCF
	5
	1.5
	$SCF = 1 + \frac{h(t + 2.5a)e}{(h - 2a)(e + 5a)t}$ trong đó: D, t là đường kính, chiều dày ống; a và e là chiều dày bản cánh và bản bụng; h là chiều cao dầm.

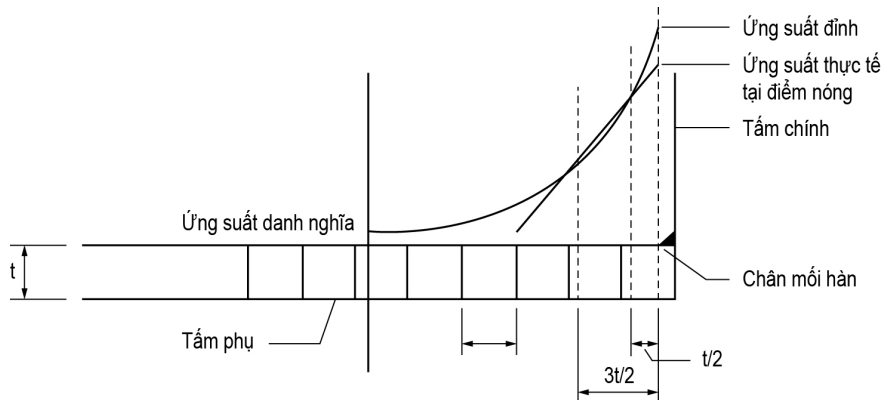
Bảng 1. (tiếp theo)

Vị trí điểm nóng	SCF
	- Có 1 gia cường: $SCF = A/(2t + e + s + 5a)$ - Có 2 gia cường: $SCF = A/(2t + e + s + 5a)$ trong đó: A là tiết diện ống $D \times t$; a là chiều dày bản cánh; e là chiều dày bản bụng; s là chiều dày gia cường

Tuy nhiên đối với đa số các nút kết cấu mô đun thượng tầng, ứng suất thực tế tại điểm nóng giao giữa phần tử kết cấu phụ và phần tử chính được xác định thông qua mô phỏng cục bộ nút bằng các phần tử tám theo phương pháp phần tử hữu hạn và xác định hệ số tập trung ứng suất theo ABS [8] khi cho phần tử kết cấu phụ chịu từng thành phần tải trọng đơn với giá trị bất kỳ.

$SCF = \text{Ứng suất thực tế tại điểm nóng} / \text{Ứng suất danh nghĩa}$

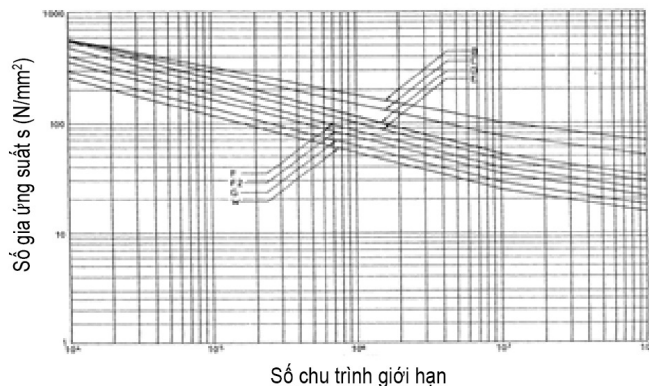
Ứng suất thực tế tại điểm nóng được xác định theo phương pháp nội suy tuyến tính giữa hai điểm trên đường cong ứng suất cách chân mỗi hàn khoảng cách lần lượt là $t/2$ và $3t/2$ theo Hình 5, với t là chiều dày tấm và lưới chia phần tử bằng chiều dày tấm.


Hình 5. Xác định ứng suất thực tế tại điểm nóng theo ABS [8]


4. Lựa chọn đường cong mỏi S-N cho kết cấu thượng tầng bể chứa nổi theo ABS

Đường cong mỏi S-N biểu diễn quan hệ giữa số gia ứng suất S và số chu trình tải trọng giới hạn phá hủy mỗi N tương ứng với S . Đường cong này được thiết lập theo thí nghiệm phụ thuộc vào vật liệu và loại mối hàn và được xấp xỉ thông qua quan hệ:

$$N = K \cdot S^{-m} \quad (2)$$


Hình 6. Đường cong mỏi kết cấu mô đun thượng tầng bể chứa nổi theo ABS

Bảng 2. Các hệ số của đường cong mô đun thượng tầng nằm trên bể chứa nổi theo ABS

Lớp	K1	M1	K2	M2	Độ lệch chuẩn theo log10
B	1.013×10^{15}	4	1.013×10^{17}	6	0.1821
C	4.227×10^{13}	3.5	2.926×10^{16}	5.5	0.2041
D	1.519×10^{12}	3	4.239×10^{15}	5	0.2095
E	1.035×10^{12}	3	2.300×10^{15}	5	0.2509
F	6.315×10^{11}	3	9.975×10^{14}	5	0.2183
F2	4.307×10^{11}	3	5.278×10^{14}	5	0.2279
G	2.477×10^{11}	3	2.138×10^{14}	5	0.1793
W	1.574×10^{11}	3	1.016×10^{14}	5	0.1846

Đối với các nút giao kết cấu mô đun thượng tầng nằm trên bể chứa nổi, theo ABS [8,9], đường cong S-N chia làm 2 đoạn dạng lô-ga-rít theo giới hạn số chu trình (Hình 6), thuộc điều kiện trong miền khí quyển (In-Air) và phân theo loại nút và mối hàn quy định trong AWS D1.1, 2002 [5] với các lớp từ B đến W. Các hệ số của phương trình được cho trong bảng tùy theo lớp vật liệu (Bảng 2).



5. Xác định tổn thất tích lũy môi và dự báo tuổi thọ môi

- Tổn thất môi D được tính theo công thức của Palmgren-Miner;
- Thông thường phổ ứng suất là phổ dải rộng, ứng suất cực đại là đại lượng ngẫu nhiên (ĐLNN) có luật phân phối Gauss, suy ra số gia ứng suất S cũng có luật phân phối Gauss [2]:

$$f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}M_o} \exp\left(-\frac{S^2}{8M_o}\right) \quad (3)$$

- Biểu thức tính tỷ số tổn thất môi trung bình D_i trong 1 đơn vị thời gian thuộc trạng thái biển (TTB) thứ i [2]:

$$D_i = \frac{n_i}{2\pi M_{oi}} \int_0^\infty \frac{1}{N(S_i)} \exp\left(-\frac{S_i^2}{2M_{oi}}\right) ds \quad (4)$$

trong đó: $M_{oi} = \int_0^\infty S_{\sigma_i \sigma_i}(\omega) d\omega$ là mô men bậc không của phổ ứng suất $S_{\sigma_i \sigma_i}(\omega)$; n_i và N_i lần lượt là số chu trình và số chu trình giới hạn gây môi của số gia ứng suất S_i .

- Từ tổn thất môi của các trạng thái biển trong 1 đơn vị thời gian xác định được tổng tổn thất trong 1 năm và xác định được tuổi thọ môi.



6. Quy trình xác định tổn thất môi mô đun thượng tầng bể chứa nổi trong trạng thái khai thác

Dựa trên các phân tích lý thuyết đã trình bày từ mục 2 đến 5 về sự khác biệt giữa tính toán môi cho kết cấu thượng tầng bể chứa nổi và kết cấu công trình biển bằng thép cố định, nhóm tác giả bài báo thực hiện xây dựng quy trình tính toán môi cho kết cấu mô đun thượng tầng chịu tác động của sóng trong trạng thái khai thác ở vùng biển Việt Nam, làm cơ sở để áp dụng cho các dự án thực tế thiết kế, chế tạo, lắp đặt và thay thế các mô đun thượng tầng sẽ thực hiện tại Việt Nam trong tương lai (Hình 7).

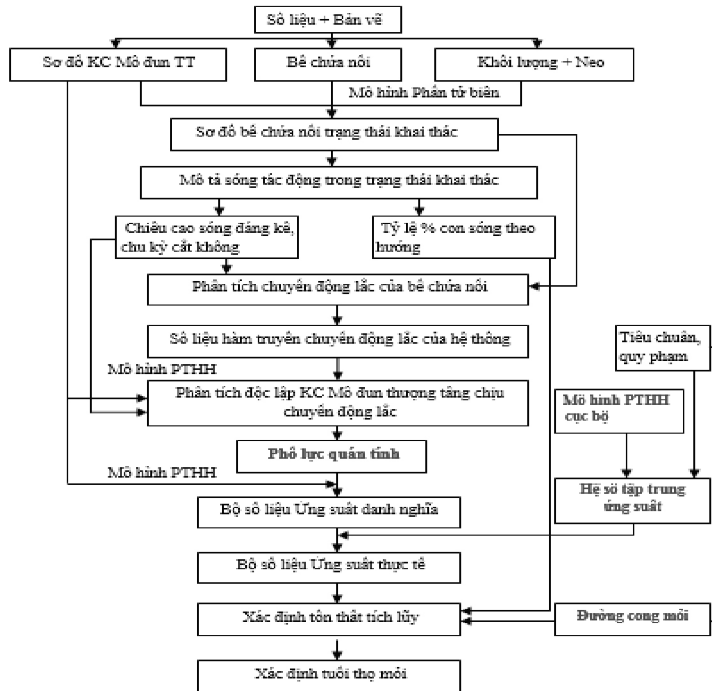
Các khối chữ đậm chưa được tích hợp trong các phần mềm tính toán, cần sự can thiệp của nhóm tác giả.



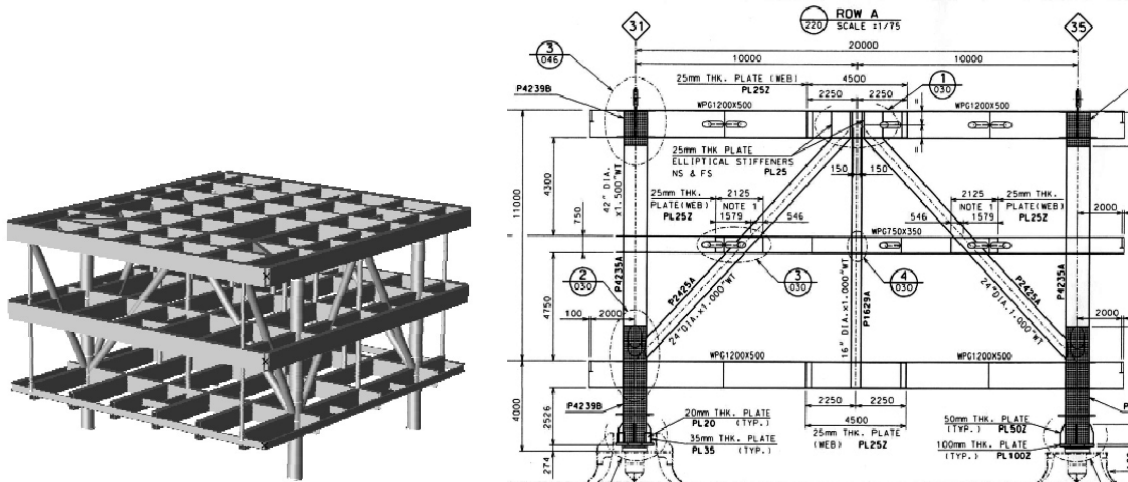
7. Đánh giá tổn thất môi mô đun thượng tầng điển hình của bể chứa nổi VSP-01 trong điều kiện khai thác ở mỏ Bạch Hổ

7.1 Số liệu đầu vào

- Kết cấu mô đun thượng tầng điển hình (Hình 8): bao gồm 3 sàn: Sàn trên (Upper Deck), sàn giữa (Mezzanine Deck) và sàn dưới (Process Deck) với diện tích mỗi sàn là $20 \times 24.5\text{m}$ đỡ hệ thống đường ống và thiết bị công nghệ. Tổng tải trọng công nghệ khai thác và hoạt tải sàn trên là 428.7T, sàn giữa là 183.8T, sàn dưới là 338.5T.



Hình 7. Quy trình tính toán môi kết cấu mô đun thượng tầng trong khi khai thác



Hình 8. Cấu tạo và mô hình hóa kết cấu mô đun thượng tầng điển hình

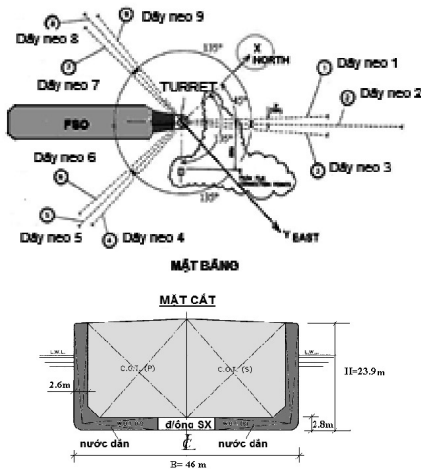
Dầm chính thép hộp 120×60×2×3.5cm, cột chống chính tiết diện ống 106.7×6.35cm, giằng chéo tiết diện ống 40.6×2.54cm. Vị trí tâm kết cấu mô đun thượng tầng cách trọng tâm bể chứa nổi 99m.

- Các thông số chính của bể chứa nổi VSP-01 được cho trong Hình 9 và Bảng 3.

- Số liệu sóng thống kê mở Bạch Hổ: Tham khảo tài liệu [10], trong đó tỷ lệ % sóng xuất hiện hàng năm theo các hướng *N*, *NE*, *E*, *SE*, *S*, *SW*, *W* và *NW* lần lượt là 0.61%, 44%, 10.08%, 2.17%, 3.03%, 26.63%, 12.61% và 0.88%. Với chiều cao sóng đáng kể lớn nhất nằm trong khoảng từ 6.5 đến 7m theo hướng sóng *NE*.

7.2 Kết quả phân tích chuyển động của bể chứa nổi trong các trạng thái biển ngắn hạn

- Thực hiện mô hình hóa và phân tích chuyển động của bể chứa nổi VSP-01 bằng phần mềm chuyên dụng SACS 5.8 theo phương pháp Phần tử biên khi bể chứa nổi chịu tác dụng của điều kiện sóng thống kê mở Bạch Hổ đã trình bày trong mục 7.1. Kết quả phân tích thu được bao gồm:



Hình 9. Cấu tạo bể chứa nổi VSP-01

Bảng 3. Các thông số của bể chứa nổi VSP-01

Các thông số FSO VSP01	Giá trị	Khả năng	Giá trị
Tổng chiều dài (m)	262.4	Khả năng chở (DWT, Mt)	154146
Chiều dài tính toán Lpp (m)	258	Khối lượng tàu (Light Weight ship) (t)	23 452
Chiều rộng (m)	46	Tải thường xuyên D.W constant (t)	500
Chiều cao (m)	23.9	Fuel-oil (96% khả năng) (t)	4198
Lượng chiếm nước (T 16.865m) (t)	177 598	gas-oil(diesel oil) (96% khả năng) (t)	334.4
Mớn nước (T) đầy tải (m)	16.865	Nước ngọt (100% khả năng) (t)	617.2
T khi dẫn (m)	7.6	Nước dẫn (100% khả năng) (t)	56 733
Hệ số khối thể tích của tàu	0.865	Dầu chứa trong các khoang (Cargo oil tank) (98% khả năng) (t)	145948
Hệ số khối đường nước	0.9472	Cách rót dầu dạng	Nổi đuôi

+ Các hàm truyền (RAO) chuyển động thể hiện đồ thị quan hệ giữa các giá trị đơn vị của 6 thành phần chuyển động của bể chứa nổi (trục đứng) theo dải chu kỳ (trục ngang) của sóng ngẫu nhiên với chiều cao đơn vị tương ứng với các trạng thái biển (Hình 10).

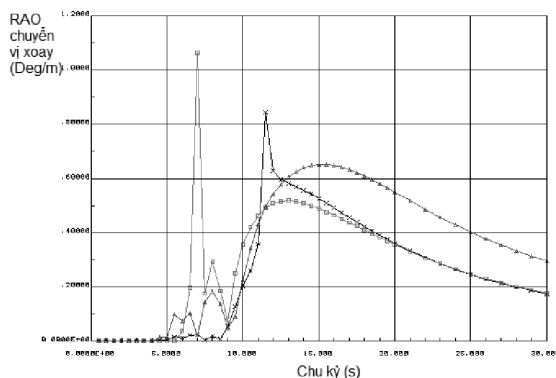
+ Các giá trị biên độ cực đại của các thành phần chuyển động, vận tốc và gia tốc của chuyển động tương ứng với từng phổ sóng đại diện cho từng trạng thái biển.

- Kết quả hàm truyền chuyển động được sử dụng để xác định phổ lực quán tính tại các nút kết cấu thượng tầng, làm cơ sở xác định số gia ứng suất gây mỏi như đã trình bày trong mục 2.

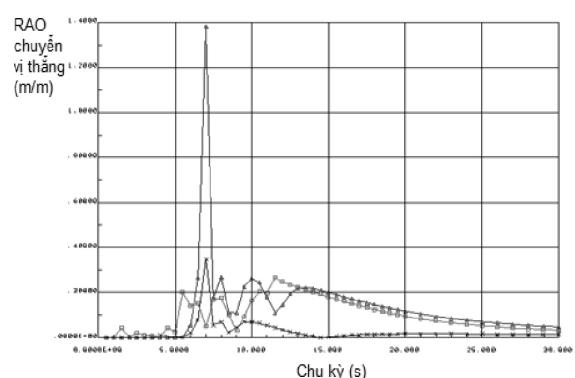
- Trong Bảng 4 dưới đây trình bày kết quả gia tốc lắc đứng, biên độ lắc dọc và lắc ngang của bể chứa nổi VSP-01 tương ứng với các trạng thái biển thống kê theo hướng Tây.

7.3 Kết quả xác định hệ số tập trung ứng suất của một số nút điển hình

Do tiết diện dầm mô đun thượng tầng là dạng dầm hộp nên chưa có công thức xác định hệ số tập trung ứng suất cho các nút giao giữa dầm và dầm, dầm và cột chống...



a) RAO của chuyển vị lắc dọc, lắc ngang và xoay tương ứng với sóng hướng Tây (W)



b) RAO của gia tốc trượt dọc, trượt ngang và lắc đứng

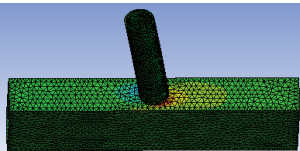
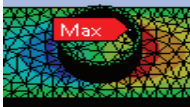
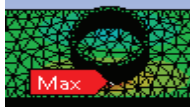
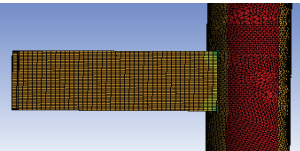
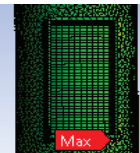
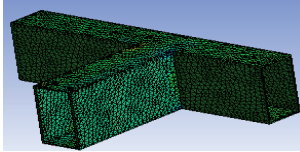
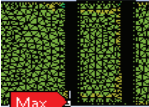
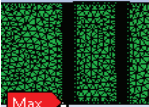
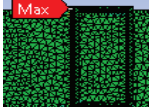
Hình 10. Kết quả RAO của 6 thành phần chuyển động của bể chứa nổi theo sóng hướng Tây

Bảng 4. Kết quả gia tốc lắc đứng và biên độ lắc dọc, lắc ngang của bể chứa nổi VSP-01 do tác động của sóng hướng Tây

Hs (m)	Lắc đứng (m/s ²)	Lắc dọc (deg)	Lắc ngang (deg)
0.25	0.01	0	0.004
0.75	0.133	0.103	0.057
1.25	0.394	0.31	0.207
1.75	0.606	0.49	0.87
2.25	0.772	0.654	2.096
2.75	0.942	0.828	3.693
3.25	1.227	1.013	5.415
3.75	1.372	1.111	6.294
4.25	1.661	1.315	8.006
4.75	1.938	1.524	9.616

Nhóm tác giả đã thực hiện mô phỏng cục bộ từng nút bằng phần mềm ANSYS để xác định hệ số tập trung ứng suất cho các điểm nóng theo phương pháp đã trình bày trong mục 3. Các kết quả điển hình được tóm tắt trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả xác định hệ số tập trung ứng suất tại một số nút điển hình bằng phần mềm ANSYS

Loại nút	SCF _{max} (Lực dọc)	SCF _{max} (Mô men uốn trong mặt phẳng)	SCF _{max} (Mô men uốn ngoài mặt phẳng)
	5.83 	2.36 	2.71 
	8.54 	5.80 	6.54 
	4.94 	5.07 	3.98 

Kết quả nghiên cứu cho thấy để đánh giá tổn thất mỗi kết cấu mô đun thượng tầng phải tốn nhiều thời gian và công sức để tính hệ số tập trung ứng suất cho từng nút theo mô phỏng cục bộ, sử dụng phần mềm ANSYS.

7.4 Kết quả tổn thất tích lũy và tuổi thọ môi ở các nút điển hình của kết cấu mô đun thượng tầng

Sử dụng đường cong môi S-N lớp B cho kết cấu nút dầm tổ hợp, thực hiện phân tích môi với số liệu sóng mô Bạch Hổ theo quy trình đã xây dựng trong mục 6. Kết quả tuổi thọ môi của một số nút nguy hiểm nhất được cho trong Bảng 6.

Theo kết quả tính toán, các nút kết cấu mô đun thượng tầng đều thỏa mãn điều kiện môi với thời gian khai thác bể chứa nổi là 25 năm.

Bảng 6. Kết quả tuổi thọ mỗi một số nút điển hình

Nút	Loại tiết diện	Vị trí	Tổn thất mỗi/1 năm	Tuổi thọ mỗi (Năm)
0010	Hộp	Dầm hộp 120×60×2×3.5 giao với cột chính 106.7×6.35, Sàn dưới	0.0360	27.5
0010	Ống tròn	Ống 61×2.54 giao với cột chính 106.7×6.35, Sàn dưới	0.0131	76
0061	Hộp	Dầm hộp 120×60×2×3.5 giao với cột chính 106.7×6.35, Sàn trung gian	0.0088	114

**8. Kết luận, kiến nghị**

Bài báo đã làm rõ một số điểm khác biệt cơ bản khi áp dụng phương pháp phân tích mỗi kết cấu công trình biển cố định bằng thép để phân tích mỗi cho kết cấu mô đun thượng tầng bể chứa nổi chịu tác động của lực quán tính gây ra do sóng. Bài báo đã xây dựng được quy trình phân tích mỗi cho mô đun thượng tầng bể chứa nổi, trong đó đã khắc phục được các khác biệt khi sử dụng phương pháp phân tích mỗi kết cấu công trình biển cố định bằng thép để phân tích mỗi cho kết cấu mô đun thượng tầng bể chứa nổi, dựa trên các tiêu chuẩn và sử dụng các phần mềm chuyên dụng hiện hành. Các kết quả nghiên cứu trên có giá trị tham khảo khi thực hiện các tính toán thiết kế thực tế tại Việt Nam trong tương lai, tiến tới nội địa hóa việc thiết kế công trình dạng bể chứa nổi, tiết kiệm thời gian và kinh phí cho chủ đầu tư.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo:

- Nghiên cứu ảnh hưởng tổn thất mỗi của thượng tầng bể chứa nổi khi di chuyển, ảnh hưởng nhiễu động của gió, của các tải trọng thiết bị rung động... đến tuổi thọ mỗi tổng thể của kết cấu theo khuyến cáo trong tiêu chuẩn ABS.

- Nghiên cứu trên mô hình số và thực nghiệm trên mô hình vật lý để hoàn thiện phương pháp luận và bổ sung thêm các công thức để xác định hệ số tập trung ứng suất cho nút giao giữa thép hình và thép ống của kết cấu mô đun thượng tầng bể chứa nổi vào tiêu chuẩn quy phạm và cập nhật vào các phần mềm chuyên dụng để áp dụng trong thực tế.

Tài liệu tham khảo

1. Phạm Hiền Hậu (2015), FPSO-Fiabilité des lignes d'ancrage avec prise en compte de fatigue, *Presses Académiques Francophones*, 2015, 336 pages.
2. Phạm Khắc Hùng (2016), *Tính toán thiết kế công trình biển cố định bằng thép trong điều kiện nước sâu*, Nhà xuất bản Xây dựng.
3. Bentley Systems Incorporated (2014), *SACS (Structure Analysis Computer System) Manual*.
4. DnV-RP-C203 (2005), *Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures*.
5. American Welding Society (2002), *Structural Welding Code-Steel*.
6. American Bureau of Shipping (ABS) (2016), *Guidance Notes on Topsides Structure Fatigue Assessment for Ship-type Floating Production Installations*.
7. Technip (2007), *Guidance Document Analysis Procedure for FPSO Topsides*.
8. American Bureau of Shipping (ABS) (2002), *Guidance Notes on Spectra-Based Fatigue Analysis for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) System*.
9. American Bureau of Shipping (ABS) (2014), *Guidance for Fatigue Assessment of Offshore Structures*.
10. Vietsovpetro (2000), *Environmental Design Criteria for the "Bach Ho"- "Rong" Fields South East Offshore Viet Nam*.