



ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA ỨNG SUẤT TĨNH ĐẾN TUỔI THỌ MỖI CỦA KẾT CẤU CÔNG TRÌNH BIỂN CỐ ĐỊNH BẰNG THÉP TRONG ĐIỀU KIỆN BIỂN VIỆT NAM

Vũ Đan Chính¹, Đinh Quang Cường²

Tóm tắt: Bài báo đề cập một phương pháp và qui trình tính toán hiệu chỉnh số liệu đường cong mỏi S-N theo thí nghiệm vật liệu khi kể đến ảnh hưởng của ứng suất tĩnh, để xác định tuổi thọ mỏi của kết cấu công trình biển cố định bằng thép tính theo Palmgren-Miner là lý thuyết đang được sử dụng rộng rãi trong các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành và áp dụng để tính toán mỏi cho một kết cấu giàn thép cố định điển hình trong điều kiện biển Việt Nam.

Từ khóa: Ứng suất tĩnh; tuổi thọ mỏi.

Summary: This paper introduces a method and procedure to modify S-N curves which are based on material tests on account of static stress effects and to use them to calculate fatigue life of fixed steel offshore platform structures in accordance with Palmgren-Miner rule which is a theory being widely used in current design standards and applied for fatigue analysis of typical fixed steel offshore structures in Vietnam sea conditions.

Keywords: Static stress; fatigue life.

Nhận ngày 13/8/2014, chỉnh sửa ngày 10/9/2014, chấp nhận đăng 31/10/2014



1. Giới thiệu

Trong các tiêu chuẩn tính toán thiết kế kết cấu công trình biển cố định bằng thép phổ biến trên thế giới hiện nay như API, DnV, Lloyd Register... tuổi thọ mỏi của nút ống trong giai đoạn xuất hiện vết nứt đầu tiên được đánh giá bởi tỷ số tổn thất tích lũy mỏi được tính căn cứ trên số gia ứng suất do tải trọng động (sóng biển) theo qui tắc Palmgren-Miner. Việc tính toán mỏi này gặp phải sai số mà nguyên nhân chủ yếu, không thể khắc phục được là do sử dụng số liệu thống kê sóng của quá khứ để tính cho tương lai mà kết cấu phải chịu, ngoài ra còn bị ảnh hưởng khi không xét đến thứ tự các con sóng, tương tác giữa biên độ và số chu trình sóng, quan hệ phi tuyến giữa các trạng thái biển ngắn hạn và ảnh hưởng của sai số thí nghiệm khi đường cong S-N được thiết lập chưa kể đến ứng suất do các tải trọng tĩnh gây ra... Nên để đơn giản hóa các vấn đề đó, việc tính toán mỏi một cách gần đúng theo các tiêu chuẩn hiện hành với hệ số an toàn nhất định vẫn được thực tế chấp nhận. Tuy vậy, ở một khía cạnh hẹp, bài báo muốn làm rõ hơn ảnh hưởng của ứng suất tĩnh đến tuổi thọ mỏi của kết cấu công trình biển thép khai thác trong điều kiện biển Việt Nam.



2. Cơ sở lý thuyết dự báo tuổi thọ mỏi của kết cấu nút ống công trình biển cố định bằng thép có kể đến ảnh hưởng của ứng suất tĩnh

2.1 Điều kiện phá hủy mỏi và tuổi thọ mỏi theo Palmgren-Miner (P-M) [1,3]

Giả thiết tại điểm nóng đang xét của nút ống chịu tải trọng động gây ra k nhóm ứng suất điều hòa biên độ khác nhau với chu kỳ T_i , xảy ra trong khoảng thời gian $\tau_i (i=1 \rightarrow k)$.

Định nghĩa đại lượng tỷ số tổn thất tích lũy mỏi D theo công thức sau:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{a \cdot S_i^{-m}} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot S_i^m}{a} \quad (1)$$

¹ThS, Khoa Xây dựng Công trình biển và Dầu khí. Trường Đại học Xây dựng. E-mail: chinhdhd@gmail.com

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

trong đó n_i là số chu trình của nhóm ứng suất thứ i ; $N_i = a \cdot S_i^{-m}$ là số chu trình cần thiết tương ứng để gây phá hủy môi, xác định thông qua số gia ứng suất có kể đến hệ số tập trung ứng suất (SCF - Stress Concentration Factor) tùy theo cấu tạo nút [3,4], $S_i = |\sigma_{i\max} - \sigma_{i\min}|$, căn cứ vào đường cong S-N thiết lập dựa trên thí nghiệm với từng chủng loại vật liệu kết cấu chịu tác động của các tải trọng đơn, điều hòa; a, m là các hằng số phụ thuộc vào loại kết cấu, vật liệu, phương pháp chế tạo, thi công, điều kiện môi trường, số chu trình tải trọng...;

Điều kiện phá hủy mỗi giai đoạn 1 theo P-M của kết cấu trong thời gian xét:

$$D = [D] \quad (2)$$

Tuổi thọ mỗi của điểm nóng là thời gian cần thiết để tỷ số tổn thất tích lũy mỗi đạt đến giới hạn cho phép ($D = [D]$). Thông thường $[D] = 1$, tuy nhiên theo một số tiêu chuẩn [3,4] để kể đến hệ số an toàn thì $[D] < 1$ tùy theo điều kiện phân vùng an toàn.

Theo những trình bày trên có thể nhận xét:

- Dựa trên đường cong S-N và điều kiện phá hủy mỗi giai đoạn 1 theo P-M ta nhận thấy chỉ cần số gia ứng suất tăng lên một lượng nhỏ thì số chu trình cần thiết gây phá hủy mỗi có thể giảm đi đáng kể theo qui luật lũy thừa đồng nghĩa với tuổi thọ mỗi giảm đi đáng kể.

- Khi tính mỗi theo P-M, số gia ứng suất S chỉ được xác định bằng trị tuyệt đối của độ chênh giữa ứng suất lớn nhất và ứng suất nhỏ nhất, không quan tâm đến giá trị trung bình và chiều của ứng suất;

2.2 Ảnh hưởng của ứng suất tĩnh đến hiện tượng mỗi

Như đã trình bày ở mục 2.1, việc thiết lập đường cong S-N là thông qua thí nghiệm kết cấu chỉ chịu từng tải trọng đơn, điều hòa gây ra số gia ứng suất tại điểm nóng $S = |\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|$ mà thôi. Tuy nhiên một số nghiên cứu trên thế giới, thông qua thực nghiệm, đã cho thấy [6-10]:

a) Hiện tượng mỗi chỉ có thể xảy ra khi có xuất hiện ứng suất kéo trong quá trình tác động của tải trọng.

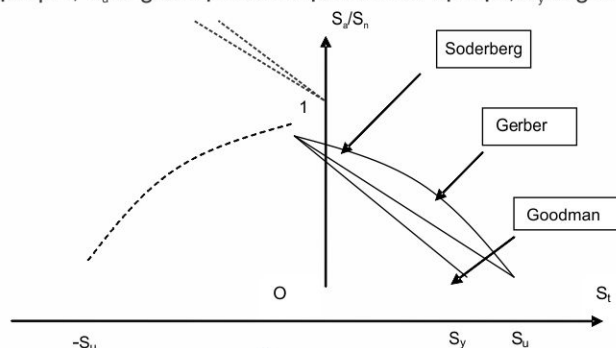
b) Khi có tác dụng của cả tải trọng động và tải trọng tĩnh thì đường cong S-N sẽ khác so với khi thí nghiệm chỉ có tác dụng của một mình tải trọng động. Tuy nhiên để đáp ứng thực tế là không thể làm nhiều thí nghiệm để xây dựng nhiều đường cong tương ứng với từng giá trị tải trọng tĩnh và vẫn chỉ cần sử dụng đường cong S-N khi thí nghiệm với tải trọng động, một số tác giả, điển hình là Gerber, Goodman và Soderberg, đã thiết lập công thức xác định số gia ứng suất gây mỗi hiệu quả khi kể đến tải trọng tĩnh ($S_e = 2S_n$) dựa trên mối quan hệ giữa S_n với một nửa số gia ứng suất do tải trọng động $S_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ và ứng suất trung bình (thường là kết quả của ứng suất tĩnh) $S_t = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ được thể hiện trong công thức 3, 4, 5 như sau (Minh họa trong Hình 1):

$$\text{Phương trình Gerber (1874): } \frac{S_a}{S_n} + \left(\frac{S_t}{S_u} \right)^2 = 1 \quad (3)$$

$$\text{Phương trình Goodman (1899): } \frac{S_a}{S_n} + \frac{S_t}{S_y} = 1 \quad (4)$$

$$\text{Phương trình Soderberg (1930): } \frac{S_a}{S_n} + \frac{S_t}{S_u} = 1 \quad (5)$$

trong đó S_n là một nửa của số gia ứng suất hiệu quả, S_u là giới hạn bền chịu kéo của vật liệu, S_y là giới hạn chảy của vật liệu.

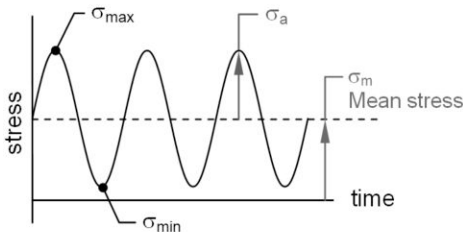


Hình 1. Mối quan hệ giữa tỷ số S_a/S_n và ứng suất trung bình S_t (Điều kiện có tồn tại ứng suất kéo)

c) Phân vùng ảnh hưởng của ứng suất trung bình đến tuổi thọ mỗi thường được đặc trưng bởi tỷ số

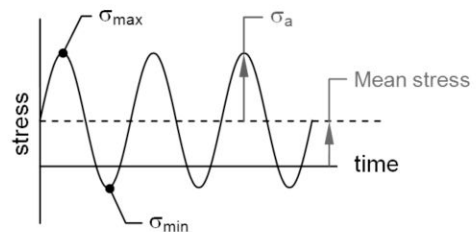
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} :$$

- + $R = 1$: Ứng suất là hằng số, không gây ra hiện tượng mỏi;
- + $R = -1$: Ứng suất là điều hòa, trung bình không, tương ứng với điều kiện phá hủy mỗi thông thường;
- + $0 \leq R < 1$: Ứng suất hoàn toàn nằm trong vùng kéo, tuổi thọ mỗi thực tế giảm nhanh tùy theo độ lớn của ứng suất trung bình, Hình 2.a;
- + $-1 < R < 0$: Có xuất hiện cả ứng suất kéo và ứng suất nén, ứng suất trung bình nằm trong vùng kéo, tuổi thọ mỗi thực tế giảm nhanh tùy theo độ lớn của ứng suất trung bình, Hình 2.b;
- + $-\infty < R < -1$: Có tồn tại ứng suất kéo, ứng suất trung bình nằm trong vùng nén, tuổi thọ mỗi thực tế có thể tăng lên tùy theo độ lớn của ứng suất trung bình, Hình 2.c;
- + $R > 1$: Ứng suất hoàn toàn nằm trong vùng nén, cơ bản không gây ra hiện tượng mỏi, Hình 2.d.



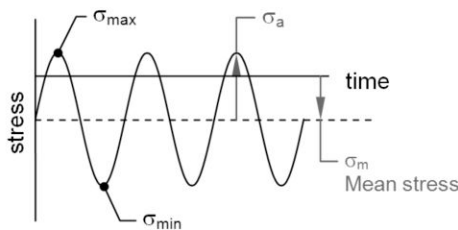
$$0 < R < 1.0 \quad |\sigma_{\max}| \neq |\sigma_{\min}|$$

a)



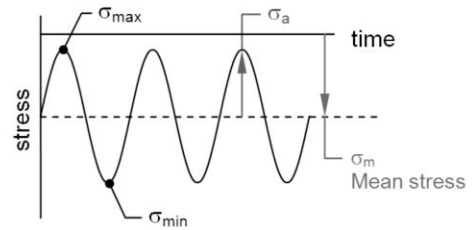
$$-1 < R < 0 \quad |\sigma_{\max}| \neq |\sigma_{\min}|$$

b)



$$-\infty < R < -1.0 \quad |\sigma_{\max}| \neq |\sigma_{\min}|$$

c)



$$1.0 < R < \infty \quad |\sigma_{\max}| \neq |\sigma_{\min}|$$

d)

Hình 2. Minh họa biểu đồ tổ hợp ứng suất động và ứng suất tĩnh

2.3 Xác định tỷ số tổn thất tích lũy và điều kiện phá hủy mỗi khi kể đến ảnh hưởng của ứng suất tĩnh

Trong trường hợp tại điểm nóng đang xét, có tồn tại ứng suất kéo, tỷ số tổn thất tích lũy mỗi D được xác định theo P-M, dựa trên số gia ứng suất hiệu quả S_e , theo công thức (1), tức là:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{a \cdot S_{ei}^{-m}} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot S_{ei}^m}{a} \quad (6)$$

Căn cứ theo (3), (4), (5), với đề ý $\frac{S_a}{S_n} = \frac{S}{S_e}$, ta có công thức tính toán tổn thất tích lũy mỗi có kể đến ứng suất tĩnh (7), (8), (9) lần lượt như sau:

$$\text{Theo Gerber: } D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot S_i^m}{a} \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{S_{ti}}{S_u} \right)^2} \right) \quad (7)$$

Theo Goodman:
$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot S_i^m}{a} \left(\frac{1}{1 - \frac{S_{ti}}{S_y}} \right) \quad (8)$$

Theo Soderberg:
$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot S_i^m}{a} \left(\frac{1}{1 - \frac{S_{ti}}{S_u}} \right) \quad (9)$$

Điều kiện phá hủy mỗi xác định theo công thức (2).



3. Khảo sát lại tuổi thọ mỗi một số nút chính của giàn khí tượng điển hình trong vùng biển Việt Nam khi kể đến ảnh hưởng của ứng suất tĩnh theo phương trình đại diện của Goodman

3.1 Số liệu đầu vào

- Độ sâu nước tại nơi xây dựng: 21m

- Các thông số chính về công trình

+ Khối chân đế gồm 04 panel, 3 vách cứng ngang, độ dốc panel so với mặt phẳng thẳng đứng là 1:10. Tổng chiều cao khối chân đế (tính đến điểm cắt cọc) là 25,4m, kích thước mặt đỉnh là 8,1x8,1m, kích thước mặt đáy là 14,7x14,7m.

+ Khung nổi dạng hình lăng trụ vuông, đáy dưới kích thước 8x8m, cao 9m. Bốn cột của khung nổi được liên kết cứng với đỉnh cọc của khối chân đế thông qua hai bản đế dày 30mm, gia cường gân tăng cứng dày 20mm.

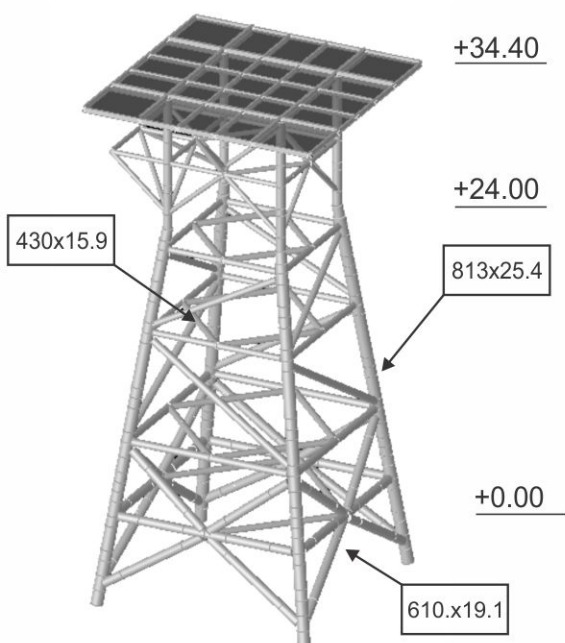
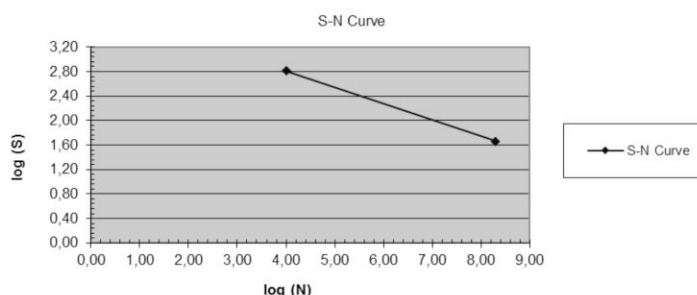
+ Ống chính đường kính 813mm, các ống nhánh đường kính lần lượt là 430mm, 508mm và 610mm, cọc đường kính 711mm đóng lồng trong ống chính.

+ Tải trọng hoạt động của thượng tầng là 260 T.

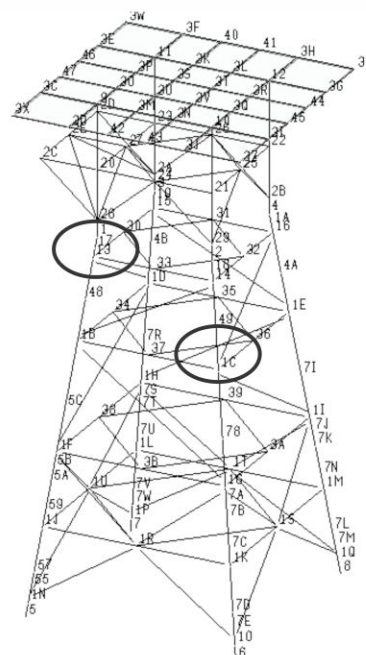
Sơ đồ tính kết cấu và sơ đồ tên nút được mô hình bằng phần mềm SACs 5.3 được thể hiện trong Hình 3.

- Số liệu đường cong mỏi S-N

Vật liệu có giới hạn chảy $S_y = 345$ MPa, với đường cong mỏi được cho như sau:



Sơ đồ kết cấu tổng thể



- Số liệu sóng thống kê hướng đông bắc (Hướng điển hình), xem Bảng 1.

Bảng 1. Số liệu sóng thống kê hướng Đông bắc

Khoảng chiều cao sóng (m)	Chiều cao trung bình (m)	Chu kỳ sóng (s)	Số cơn sóng	Khoảng chiều cao sóng (m)	Chiều cao trung bình (m)	Chu kỳ sóng (s)	Số cơn sóng	Khoảng chiều cao sóng (m)	Chiều cao trung bình (m)	Chu kỳ sóng (s)	Số cơn sóng
(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
0.15-0.5	0.30	3.35	643762	4.5-5.0	4.75	8.65	18424	8.5-9.0	8.75	10.76	225
0.5-1.0	0.75	4.65	645286	5.0-5.5	5.25	8.96	11010	9.0-9.5	9.25	10.98	125
1.0-1.5	1.25	5.48	446806	5.5-6.0	5.75	9.25	6504	9.5- 10.0	9.75	11.19	68
1.5-2.0	1.75	6.13	300060	6.0-6.5	6.25	9.53	3802	10.0-10.5	10.25	11.40	37
2.0-2.5	2.25	6.67	196800	6.5-7.0	6.75	9.80	2200	10.5-11.0	10.75	11.60	20
2.5-3.0	2.75	7.14	126516	7.0-7.5	7.25	10.06	1260	11.0-11.5	11.25	11.80	11
3.0-3.5	3.25	7.57	79916	7.5-8.0	7.75	10.30	716	11.5-12.0	11.75	11.98	6
3.5-4.0	3.75	7.96	49691	8.0-8.5	8.25	10.54	403	12.0-12.5	12.25	12.17	3
4.0-4.5	4.25	8.31	30458								

3.2 Các bước tính toán

Các bước tính toán được thực hiện theo thứ tự như sau:

B1: Lập sơ đồ tính bằng phần mềm chuyên dụng SACs 5.3 theo mô hình phần tử hữu hạn;

B2: Xác định các nhóm giá trị số gia ứng suất (có kể đến SCF) tại điểm nóng có ứng suất tập trung lớn nhất của nút đang xét tương ứng với các nhóm chiều cao sóng trong Bảng 1;

B3: Xác định tỷ số tổn thất tích lũy mỗi tương ứng với từng nhóm số gia ứng suất đã xác định bước 1 theo công thức số 1 căn cứ trên các số liệu sóng đầu vào;

B4: Xác định ứng suất tĩnh (có kể đến SCF) gây ra tại nút do tổ hợp của các tải trọng tĩnh;

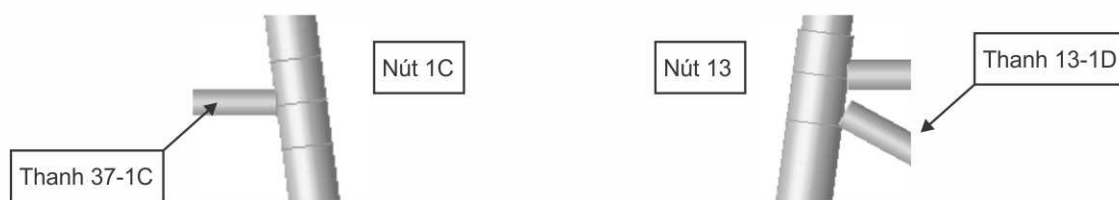
B5: Áp dụng phương trình Goodman để tính ứng suất gây mỏi thực tế có kể đến ứng suất tĩnh dựa vào công thức số 4;

B6: Xác định tỷ số tổn thất tích lũy mỗi tương ứng với từng nhóm số gia ứng suất đã xác định bước 2 theo công thức số 8 căn cứ trên số liệu ứng suất gây mỏi thực tế ở bước 5;

B7: Lập bảng so sánh các kết quả;

3.3 Kết quả tính toán

Dưới đây là kết quả tính toán mỏi của 2 nút điển hình (nút 1C và nút 13 - Hình 4) chịu tác dụng của tải trọng sóng hướng Đông Bắc cho trường hợp không kể đến và có kể đến ảnh hưởng của các tải trọng tĩnh.



Hình 4. Mô tả nút 1C và nút 13 tương ứng với kết quả tính toán mỏi

a) Nút 1C
Bảng 2. Tỷ số tổn thất tích lũy mỗi của nút 1C trong 25 năm

Số gia ứng suất do tải trọng sóng (T/m ²) Đã kể đến hệ số SCF	Số chu trình tương ứng	Tỷ số tổn thất Trong 25 năm (Hệ số an toàn =2)	Ứng suất trung bình có kể đến SCF do tổng tải trọng tĩnh (T/m ²) - Trạng thái kéo	Số gia ứng suất gây môi thực tế theo Goodman (T/m ²) Đã kể đến hệ số SCF	Tỷ số tổn thất mới trong 25 năm khi kể đến ảnh hưởng của ứng suất tĩnh (Hệ số an toàn =2)
3	643762	0	4442	3.443	0
558	645286	0	4442	640.462	0
929	446806	0	4442	1066.289	0
1196	300060	0	4442	1372.746	0
1555	196800	0	4442	1784.799	0
1963	126516	0	4442	2253.094	0
2298	79916	0	4442	2637.601	0
2945	49691	0	4442	3380.215	0
3422	30458	0	4442	3927.706	0
4266	18424	0.063	4442	4896.434	0.1055
5133	11010	0.075	4442	5891.560	0.1256
5970	6504	0.078	4442	6852.252	0.1306
7035	3802	0.084	4442	8074.639	0.1407
7751	2200	0.070	4442	8896.450	0.1172
8073	1260	0.046	4442	9266.036	0.0770
8974	716	0.039	4442	10300.186	0.0653
9881	403	0.032	4442	11341.224	0.0536
10794	225	0.025	4442	12389.148	0.0419
11707	125	0.019	4442	13437.072	0.0318
12618	68	0.013	4442	14482.700	0.0218
13358	37	0.009	4442	15332.058	0.0151
14326	20	0.006	4442	16443.110	0.0100
15287	11	0.004	4442	17546.127	0.0067
16232	6	0.003	4442	18630.780	0.0050
16933	3	0.002	4442	19435.375	0.0033
		0.568			0.9512

b) Nút 13

Bảng 3. Tỷ số tổn thất tích lũy mỗi của nút 13 trong 25 năm

Số gia ứng suất do tải trọng sóng (T/m^2) Đã kể đến hệ số SCF	Số chu trình tương ứng	Tỷ số tổn thất Trong 25 năm (Hệ số an toàn =2)	Ứng suất trung bình có kể đến SCF do tổng tải trọng tĩnh (T/m^2) - Trạng thái kéo	Số gia ứng suất gây môi thực tế theo Goodman (T/m^2) Đã kể đến hệ số SCF	Tỷ số tổn thất mới trong 25 năm khi kể đến ảnh hưởng của ứng suất tĩnh (Hệ số an toàn =2)
2	643762	0	-2375	1.871	0
260	645286	0	-2375	243.254	0
384	446806	0	-2375	359.268	0
483	300060	0	-2375	451.892	0
741	196800	0	-2375	693.275	0
804	126516	0	-2375	752.217	0
997	79916	0	-2375	932.786	0
1826	49691	0	-2375	1708.393	0
2246	30458	0	-2375	2101.342	0
2530	18424	0	-2375	2367.051	0
4152	11010	0	-2375	3884.583	0
4817	6504	0.035	-2375	4506.753	0.0296
5678	3802	0.038	-2375	5312.298	0.0265
6399	2200	0.034	-2375	5986.861	0.0164
6558	1260	0.021	-2375	6135.620	0.0140
7300	716	0.018	-2375	6829.831	0.0117
8080	403	0.015	-2375	7559.593	0.0094
8900	225	0.012	-2375	8326.780	0.0070
9750	125	0.009	-2375	9122.034	0.0055
10639	68	0.007	-2375	9953.776	0.0055
12319	37	0.007	-2375	11525.573	0.0039
13394	20	0.005	-2375	12531.336	0.0031
14509	11	0.004	-2375	13574.522	0.0023
15789	6	0.003	-2375	14772.081	0.0016
16937	3	0.002	-2375	15846.142	0.0296
		0.210			0.1637

Từ các bảng kết quả tính trên, có thể nhận xét:

- Số gia ứng suất gây mỗi thực tế tại nút 1C bằng 1.147 số gia ứng suất do sóng vì ứng suất tĩnh ở trạng thái kéo, dẫn đến tỷ số tổn thất tích lũy mỗi tăng 1.674 lần tức là tuổi thọ mỗi tính theo số gia ứng suất thực tế giảm 1.674 lần so với tuổi thọ mỗi chỉ tính theo số gia ứng suất do sóng.

- Số gia ứng suất gây mỗi thực tế tại nút 13 bằng 0.935 số gia ứng suất do sóng vì ứng suất tĩnh ở trạng thái nén, dẫn đến tỷ số tổn thất tích lũy mỗi giảm 1.283 lần tức là tuổi thọ mỗi tính theo số gia ứng suất thực tế tăng lên 1.283 lần so với tuổi thọ mỗi chỉ tính theo số gia ứng suất do sóng.



4. Kết luận

a) Ảnh hưởng của ứng suất tĩnh là một nguyên nhân gây sai số thực nghiệm trong nhiều nguyên nhân ảnh hưởng đến kết quả tính toán mỗi của kết cấu. Bài báo đã trình bày cách hiệu chỉnh đường cong mỗi S-N được lập dựa trên thí nghiệm vật liệu kết cấu chịu tác động của các tải trọng đơn, điều hòa khi có kể đến tác dụng của tải trọng tĩnh lên kết cấu thông qua các công thức lý thuyết cụ thể như đã nêu ở trên, để áp dụng tính mỗi kết cấu công trình biển cố định bằng thép theo Palmgren-Miner là công thức đang được sử dụng trong các tiêu chuẩn qui phạm phổ biến hiện hành.

b) Theo kết quả tính toán ở trên có thể nhận xét một số vấn đề sau:

- Nếu điểm nóng có ứng suất tĩnh nằm trong vùng kéo, đường cong mỗi S-N thực tế sẽ nằm thấp hơn đường cong mỗi trong số liệu đầu vào, dẫn đến tuổi thọ mỗi của kết cấu giảm so với tuổi thọ được tính theo ứng suất động thông thường khi tỷ số giữa ứng suất tĩnh và giới hạn chảy (hoặc giới hạn bền) của vật liệu kết cấu tăng lên.

- Nếu điểm nóng mà tại đó có xuất hiện ứng suất kéo nhưng ứng suất tĩnh ở trạng thái nén thì đường cong mỗi S-N thực tế sẽ nằm cao hơn đường cong mỗi trong số liệu đầu vào, dẫn đến tuổi thọ mỗi tăng lên so với tuổi thọ được tính theo ứng suất động thông thường khi tỷ số giữa ứng suất tĩnh và giới hạn chảy (hoặc giới hạn bền) của vật liệu kết cấu tăng lên.

c) Cho đến nay, nền tảng lý thuyết tính mỗi giai đoạn 1 theo Palmgren-Miner vẫn phù hợp và được áp dụng rộng rãi trong tính toán thiết kế kết cấu công trình biển cố định bằng thép. Tuy nhiên, qua bài báo này có thể nhận thấy cần nghiên cứu thêm về cách thức lựa chọn, xử lý và áp dụng số liệu đầu vào để kết quả tính toán có thể phù hợp với thực tế hơn.

Tài liệu tham khảo

1. Phạm Khắc Hùng (1995), *Phương pháp luận tính mỗi công trình biển cố định bằng thép*, Tủ sách Viện Xây dựng Công trình biển.
2. Phạm Khắc Hùng, Phan Ý Thuận và nnk (1992), *Nghiên cứu phương pháp luận xác định phản ứng của Khối chân đế Công trình Biển cố định bằng thép chịu tác động của sóng và dòng chảy*, Viện Xây dựng Công trình biển.
3. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design (2005)*, Errata and Supplement 2 American Petroleum Institute.
4. *Fatigue Design of Offshore Steel Structures (2010)*, Det Norske Veritas.
5. *Design of Steel Structures - N - 004 (2004)*, Norsok Standard.
6. Norman E. Dowling (2004), *Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue*, State University Blacksburg, USA.
7. Darrell F. Socie (2002), *Sequence Effects in Fatigue*, University of Illinois at Urbana-Champaign.
8. Priyo Tri Iswanto, Shin-ichi Nishidi, Nohusuke Hattori (2002), "Effect of Compressive Mean Stress and Compressive Residual Stress on Fatigue Properties of Stainless Steel SUS304", *Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan*.
9. P. Broz (2006), *Some Effects on Fatigue Strength*, Czech Technical University in Prague.
10. Ali Fatem, *Fatigue Test and Stress-Life (S-N) Approach*, University of Toledo.