

KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ SÂU NƯỚC ĐỐI VỚI TẢI TRỌNG SÓNG TRÔI DẠT TÁC DỤNG LÊN CÔNG TRÌNH BIỂN NỔI NEO XIÊN

TS. Nguyễn Quốc Hòa

Viện Xây dựng Công trình biển - Đại học Xây dựng

Tóm tắt

Công trình nổi có neo giữ được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp dầu khí ở các độ sâu nước khác nhau. Neo đậu thường xuyên tại vị trí khai thác công trình nổi chịu tác dụng của tải trọng sóng trôi dạt (tải trọng sóng bậc cao) gây nên các chuyển vị lớn làm ảnh hưởng đến sự an toàn của công trình và các thiết bị. Trong nghiên cứu này, tác giả thực hiện tính toán bằng chương trình chuyên dụng Hydrostar phiên bản 6.2 (của Bureau Veritas - Cộng hòa Pháp) để khảo sát ảnh hưởng của độ sâu nước đối với tải trọng sóng trôi dạt tác dụng lên công trình nổi neo xiên.

Từ khóa: Công trình nổi có neo giữ, tải trọng sóng bậc cao, lực sóng trôi dạt dây neo xiên

1. Mở đầu

Tải trọng sóng tác dụng lên công trình nổi có neo giữ gồm tải trọng sóng bậc 1 và bậc cao. Tải trọng sóng bậc 1 là tải trọng sóng có chu kỳ bằng chu kỳ của sóng tác động. Tải trọng sóng bậc cao là tải trọng sóng phát sinh do yếu tố phi tuyến của chuyển động sóng bề mặt và chuyển động của công trình nổi. Tải trọng sóng bậc cao có thể do sóng bậc cao có chu kỳ lớn (tần số thấp) hoặc chu kỳ nhỏ (tần số cao) gây ra [6, 11, 12]. Tải trọng sóng bậc cao có chu kỳ lớn (tần số thấp) gây nên sự trôi dạt của công trình nổi, ảnh hưởng đến sự an toàn của công trình và các thiết bị của công trình nổi neo xiên.

Việc xác định chính xác tải trọng sóng tác dụng lên công trình nổi có vai trò quan trọng trong việc lựa chọn các thông số thiết kế của hệ thống neo giữ, khống chế các chuyển vị của công trình nổi là vật thể tuyệt đối rắn theo 6 bậc tự do. Do tính chất phức tạp của bài toán tương tác giữa sóng và công trình nổi nên đã có nhiều nghiên cứu về việc xác định tải trọng sóng tác dụng lên công trình nổi [2, 8, 10, 13]. Các lý thuyết tính toán chủ yếu dựa trên lý thuyết chuyển động thể của chất lỏng bao quanh công trình nổi. Tải trọng sóng được xác định bằng phép tích phân áp lực sóng lên công trình nổi trong miền chất lỏng bao quanh công trình.

Bài báo giới thiệu lý thuyết xác định tải trọng sóng bậc 1 và bậc 2 tần số thấp tác dụng lên công trình nổi và sử dụng phần mềm chuyên dụng Hydrostar để khảo sát ảnh hưởng của độ sâu nước đối với tải trọng sóng trôi dạt bậc 2.

2. Tải trọng sóng tác dụng lên công trình biển nổi

Ngoại lực tác dụng lên công trình nổi có neo giữ bao gồm lực sóng, lực dòng chảy, lực gió và lực giữ của các

dây neo. Tải trọng sóng bậc 1 và bậc 2 được xác định cho trường hợp sóng đơn tần và sóng đa tần. Tải trọng sóng tác dụng lên công trình nổi gồm tải trọng của sóng tới, sóng nhiễu xạ và sóng bức xạ. Chúng được xác định dựa trên lý thuyết chuyển động thể của nước bao quanh công trình [2, 8] và được xác định bằng phương pháp số phần tử biên [3].

2.1. Trường hợp sóng đơn tần

Sóng bề mặt bậc 1, $\eta^{(1)}(t)$ và sóng bề mặt bậc 2, $\eta^{(2)}(t)$ được xác định bởi các công thức sau:

$$\eta^{(1)}(x, y, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$\eta^{(2)}(x, y, t) = A^2 \frac{ch kd}{sh^3 kd} \cos(2kx \cos \theta + 2ky \sin \theta - 2\omega t) \quad (2)$$

Trong đó:

A: Biên độ sóng;

k: Số sóng, $k = 2\pi/L$;

L: Chiều dài sóng;

ω : Tần số góc của sóng;

d: Độ sâu nước;

θ : Góc lan truyền sóng.

Tải trọng sóng bậc 1 và bậc 2 xác định bằng phép tích phân áp lực thủy động tác dụng lên mặt ướt của công trình nổi.

Tải trọng sóng bậc 1 được xác định theo công thức sau:

$$F_j^{(1)}(t) = \begin{cases} \rho \iint_{S_B} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} n_j dS & j = 1, 2, 3 \\ \rho \iint_{S_B} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} (r \times n)_j dS & j = 4, 5, 6 \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó:

$\Phi^{(1)}$: Hàm thế vận tốc sóng bậc 1;

ρ : Mật độ nước bao quanh công trình nổi;

r và n : Bán kính véc tơ và pháp tuyến của mặt ướt S_b của công trình nổi.

Tải trọng sóng bậc 2 được xác định theo công thức sau:

$$F_q^{(2)} = -\rho \iint_{S_b} \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} n \, dS - \rho \iint_{S_b} \left[\frac{1}{2} (\nabla \Phi^{(1)})^2 + (U^{(1)} + \alpha^{(1)} \times r) \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \Phi^{(1)}) \right] n \, dS \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{2} \rho g \int_{WL} \left[\eta_r^{(1)} - (\xi_3^{(1)} + y \alpha_1^{(1)} - x \alpha_2^{(1)}) \right] N \, dl + \alpha_1^{(1)} \times F^{(1)}$$

$$- \rho g A_w \left[\alpha_2^{(1)} (x_f \alpha_1^{(1)} + y_f \alpha_2^{(1)}) \right] k$$

Trong đó:

$\eta_r^{(1)}$: Chiều cao sóng bậc 1;

n : Véc tơ pháp tuyến mặt ướt công trình nổi;

$$\vec{N} = \vec{n} / \sqrt{(1 - n_3^2)};$$

k : Véc tơ đơn vị theo hướng z ;

WL: Chu tuyến đường mặt nước thân công trình nổi;

A_w : Diện tích mặt đường nước;

ξ_j, α_j : Các chuyển vị lắc của công trình nổi.

2.2. Trường hợp sóng lưỡng tần (bi-chromatic wave)

Trong trường hợp sóng lưỡng tần có liên quan đến các nhóm sóng, tải trọng sóng bậc 2 là hàm của tổ hợp từng cặp 2 con sóng.

Sóng không đều được coi là tập hợp của các con sóng hình sin dạng sóng Airy:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) = \text{Re} \sum_{i=1}^N A_i e^{i\omega_i t} \quad (5)$$

Trong đó:

$A_i, \omega_i, \varepsilon_i$: Biên độ, tần số và pha của sóng thành phần thứ i và ε_i là biến ngẫu nhiên phân bố đều trong khoảng $[0, 2\pi]$.

Tải trọng sóng kích động bậc 2 (gồm tải trọng của sóng tới và sóng nhiễu xạ) được xác định theo công thức sau:

$$F_{EX}^{(2)} = \text{Re} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \left[A_j A_k f_{jk}^+ e^{-i\omega^+ t} + A_j A_k^* f_{jk}^- e^{-i\omega^- t} \right] \quad (6)$$

$$\text{với } f_{jk}^\pm = f_{pjk}^\pm + f_{qjk}^\pm \quad (7)$$

Trong đó:

f_{jk}^\pm : Hàm truyền bậc 2 (QTF - Quadratic Transfer Function) của lực sóng kích động đối ứng với tổng và hiệu của các tần số sóng;

$\omega^- = \omega_m - \omega_n$: Tần số sóng bằng hiệu tần số của hai con sóng;

$\omega^+ = \omega_m + \omega_n$: Tần số sóng bằng tổng tần số của hai con sóng;

A_j và A_k : là biên độ sóng. Dấu "*" biểu thị số phức liên hợp.

Tải trọng sóng trôi dạt là tải trọng tần số thấp, liên quan đến hiệu các tần số sóng, được xác định như sau:

$$F_{EX}^{(2)} = \text{Re} \left[\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N A_j A_k P_{ji}(\omega_j - \omega_i) e^{-i\omega^- t} + A_j A_k^* Q_{ji}(\omega_j - \omega_i) e^{-i\omega^- t} \right] \quad (8)$$

Trong đó P_{ji} và Q_{ji} tương ứng là thành phần đồng pha và ngược pha của các hàm truyền bậc 2.

Tải trọng sóng được tính toán bằng Hydrostar là tải trọng tác dụng của sóng có chiều cao đơn vị, và được thể hiện qua toán tử phản ứng đơn vị RAO (Response Amplitude Operator) theo công thức sau [4, 12]:

$$F(t) = \text{RAO} \times \eta(t) \quad (9)$$

Trong đó: $\eta(t)$: Hàm biểu diễn sóng bề mặt, phụ thuộc thời gian, theo công thức (5).

Toán tử phản ứng đơn vị RAO được xác định bằng công thức:

$$\text{RAO}(\omega) = \frac{x}{\eta_a} = \frac{F_0}{C - (m - A(\omega))\omega^2 + iB(\omega)} \quad (10)$$

Trong đó:

F_0 : Biên độ dạng phức của lực sóng kích động tuyến tính theo chiều cao sóng;

ω : Tần số dao động;

m : Ma trận khối lượng của kết cấu công trình;

$A(\omega)$: Ma trận khối lượng nước kèm, phụ thuộc tần số ω ;

C : Ma trận hệ số lực phục hồi thủy tĩnh;

η_a : Chiều cao sóng;

$B(\omega)$: Ma trận lực cản tuyến tính, phụ thuộc tần số ω .

Kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm [16], cho thấy khối lượng nước kèm $A(\omega)$ và ma trận lực cản $B(\omega)$ phụ thuộc vào tần số dao động ω , dạng hình học của vật thể, hệ tọa độ được chọn để tính toán và mật độ khối

lượng của chất lỏng và số trị của $A(\omega)$ tăng lên khi độ sâu nước giảm.

Ảnh hưởng của độ sâu nước đến số trị của tải trọng sóng trôi dạt theo công thức (9) được khảo sát thông qua sự thay đổi của RAO bằng phần mềm Hydrostar được trình bày dưới đây.

Sự thay đổi lực sóng nói chung, lực sóng trôi dạt nói riêng, dẫn đến sự thay đổi lực tác dụng trong dây neo và sự thay đổi trạng thái cân bằng của cả hệ công trình nổi - dây neo - neo. Hình 1 thể hiện trạng thái cân bằng tĩnh học của dây neo đơn.

Hình 1, đối với đoạn dây neo nằm treo trong nước:

- Lực ngang tác dụng lên dây neo tại điểm bất kỳ có xét đến biến dạng đàn hồi của dây khi chịu lực được xác định theo công thức sau:

$$H = AE \sqrt{\left(\frac{T}{AE} + 1\right)^2 - \frac{2qd}{AE}} - AE \quad (11)$$

- Lực tác dụng lên dây neo theo phương đứng:

$$V = qL \quad (12)$$

- Hoành độ hình chiếu của điểm bất kỳ nằm trên dây neo:

$$X = X_B + \frac{H}{q} \text{Arc sin}\left(\frac{ql}{H}\right) + \frac{HL}{AE} \quad (13)$$

- Chiều dài dây neo nằm treo trong nước từ điểm B đến điểm bất kỳ nằm trên dây neo:

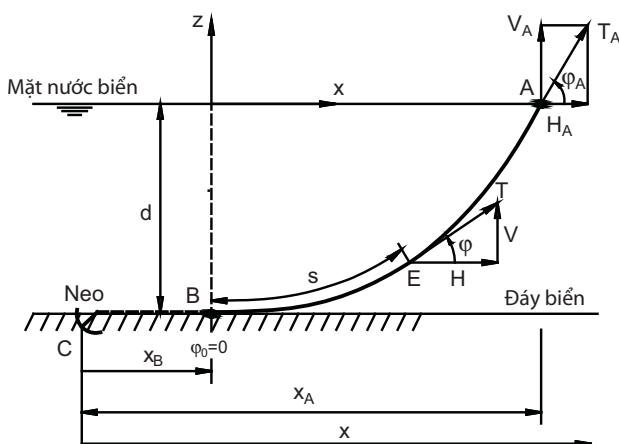
$$L = \frac{1}{q} \sqrt{T^2 - H^2} \quad (14)$$

Trong đó:

A: Diện tích mặt cắt ngang đường dây neo;

E: Module đàn hồi của vật liệu chế tạo dây neo;

T: Lực căng trong dây neo;



Hình 1. Sơ đồ cân bằng tĩnh học của dây neo đơn

q: Trọng lượng dây neo nằm trong nước trên chiều dài đơn vị;

d: Độ sâu nước;

X_B : Chiều dài dự trữ của đường dây neo.

Từ các phương trình (11) - (14) thấy rằng, nếu các đại lượng A, E, q, T không đổi, thì lực ngang H tác động lên hệ neo (do gió, dòng chảy, thủy triều và do sóng bao gồm cả sóng bậc cao gây ra lực trôi dạt) phụ thuộc vào độ sâu nước. Ở một độ sâu nước d cho trước, khi lực ngang H thay đổi dẫn đến sự thay đổi của lực căng T và chiều dài dây neo nằm trong nước L_{AC} cũng như khoảng cách X_A là các thông số cần quan tâm trong thiết kế hệ thống dây neo giữ công trình nổi.

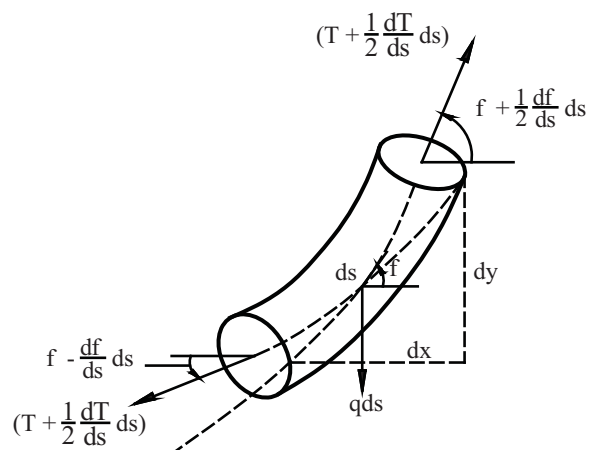
3. Ứng dụng phần mềm Hydrostar xác định tải trọng sóng tác dụng lên công trình biển nổi

Để khảo sát ảnh hưởng độ sâu nước đến số trị của tải trọng sóng trôi dạt một ví dụ tính toán cho công trình FPSO (Floating Production Storage Offloading Systems) neo xiên dạng Turret để chứa, xử lý và xuất dầu thô tại mỏ Tê Giác Trắng, thềm lục địa Việt Nam.

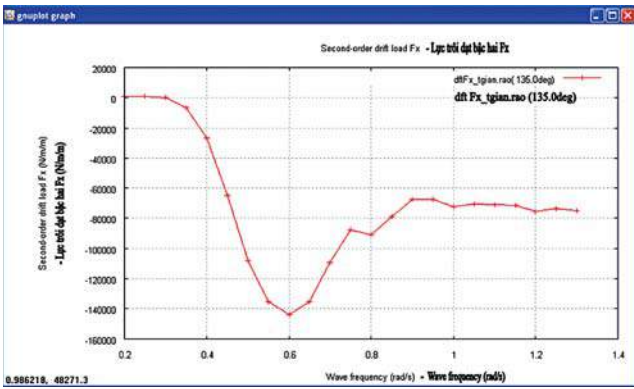
FPSO có các thông số sau:

Chiều dài lớn nhất	$L_{max} = 274m$
Chiều dài tính toán	$L_{pp} = 264m$
Chiều rộng tàu	$B = 48m$
Chiều cao mạn tàu	$H = 23,9m$
Mớn nước:	$T = 16m$
Lượng choán nước	$D = 169.789T$
Vận tốc chuyển động của tàu	$V_{tàu} = 0,0m/s$

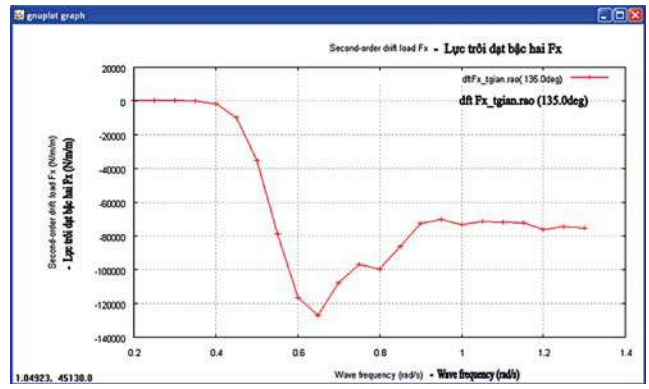
Các tính toán được thực hiện cho một hướng sóng có góc lệch với trục dọc thân tàu tính từ đuôi tàu về mũi tàu là 135°, ở các độ sâu nước 35m, 100m và 350m.



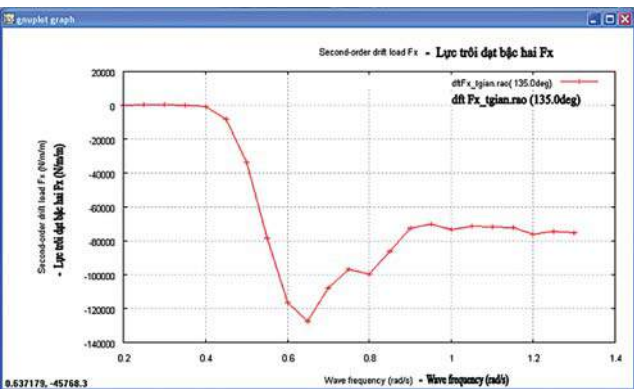
Hình 2. Lực tác dụng lên một phần tử dây neo



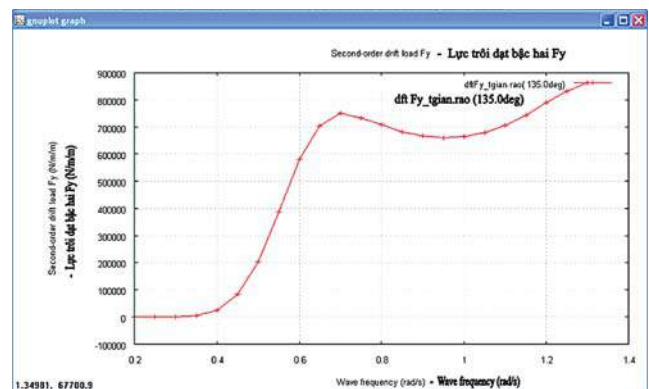
Hình 3a. Lực ngang Fx, $d = 35m$, $d/T = 2,18$



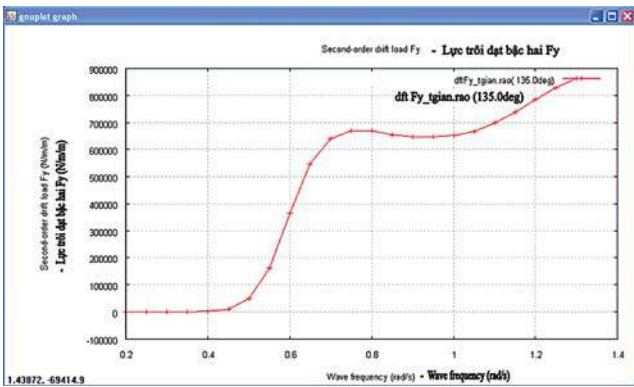
Hình 3b. Lực ngang Fx, $d = 100m$, $d/T = 6,25$



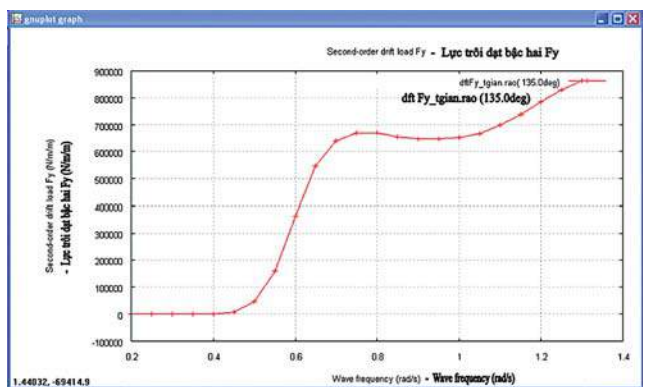
Hình 3c. Lực ngang Fx, $d = 350m$, $d/T = 21,88$



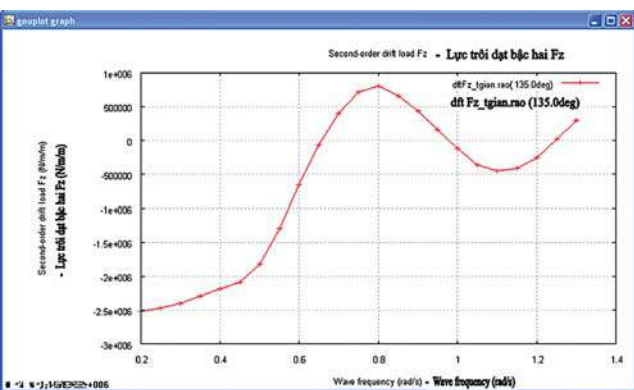
Hình 4a. Lực ngang Fy, $d = 35m$, $d/T = 2,18$



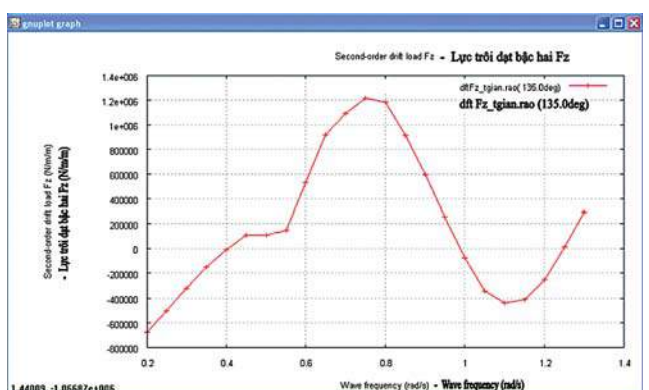
Hình 4b. Lực ngang Fy, $d = 100m$, $d/T = 6,25$



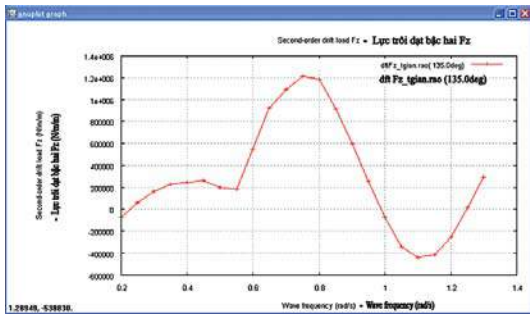
Hình 4c. Lực ngang Fy, $d = 350m$, $d/T = 21,88$



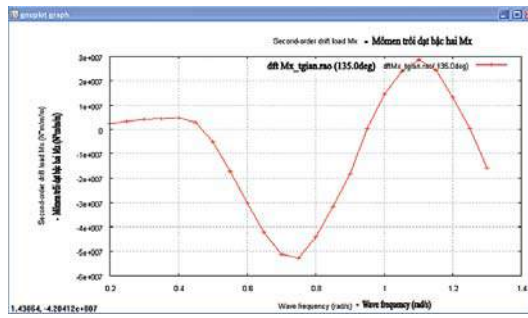
Hình 5a. Lực Fz, $d = 35m$, $d/T = 2,18$



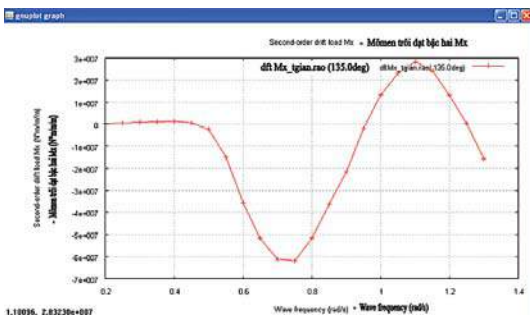
Hình 5b. Lực Fz, $d = 100m$, $d/T = 6,25$



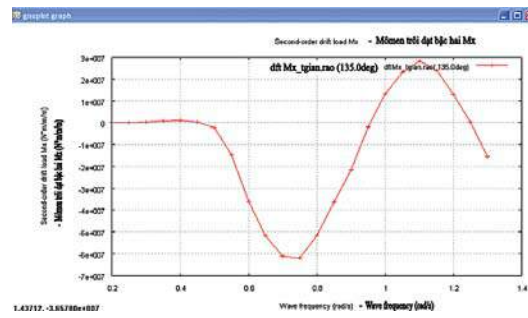
Hình 5c. Lực Fz, d = 350m, d/T = 21,88



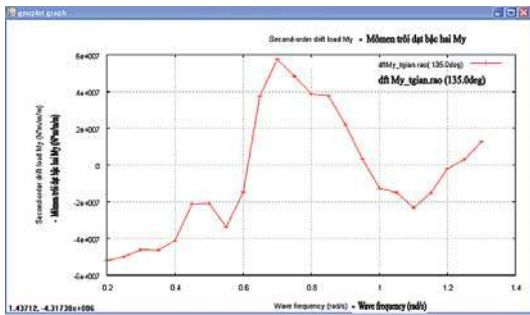
Hình 6a. Moment Mx, d = 35m, d/T = 2,18



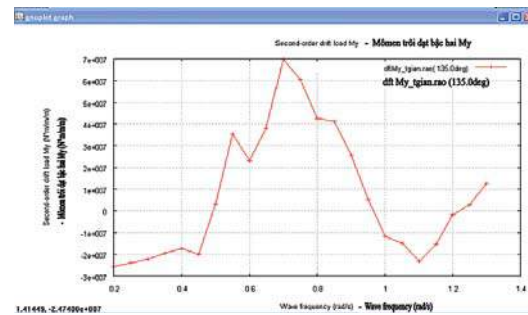
Hình 6b. Moment Mx, d = 100m, d/T = 6,25



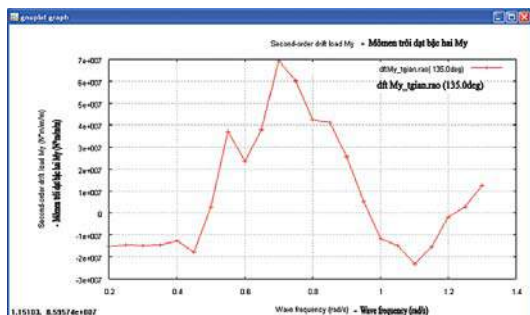
Hình 6c. Moment Mx, d = 350m, d/T = 21,88



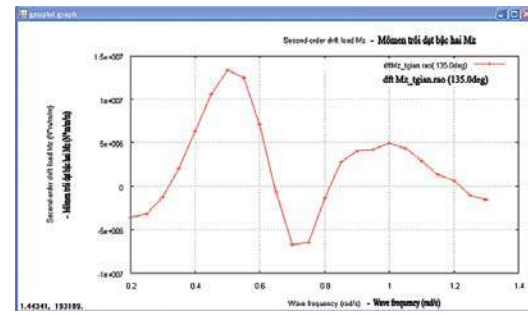
Hình 7a. Moment My, d = 35m, d/T = 2,18



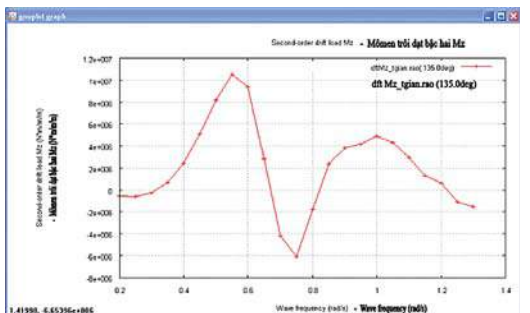
Hình 7b. Moment My, d = 100m, d/T = 6,25



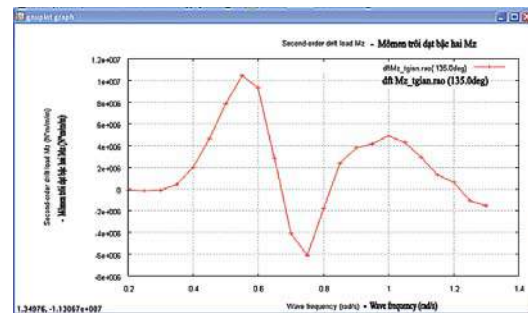
Hình 7c. Moment My, d = 350m, d/T = 21,88



Hình 8a. Moment xoay Mz, d = 35m, d/T = 2,18



Hình 8b. Moment xoay Mz, d = 100m, d/T = 6,25



Hình 8c. Moment xoay Mz, d = 350m, d/T = 21,88

Trên Hình 3 - 8 trình bày 6 thành phần tải trọng sóng trôi dạt theo 6 bậc tự do dưới dạng các toán tử phản ứng đơn vị (RAO).

Nhận xét kết quả tính toán:

- Các hình vẽ cho thấy khi độ sâu nước giảm thì tải trọng sóng trôi dạt có xu hướng tăng.
- Ở độ sâu nước nông ($d = 35\text{m}$) tải trọng sóng trôi dạt tăng đáng kể so với ở độ sâu nước $\geq 100\text{m}$

4. Kết luận

Tải trọng sóng trôi dạt thuộc loại tải trọng tần số thấp, gây nên các chuyển động lớn của công trình nổi có neo giữ. Ở các độ sâu nước không lớn tải trọng sóng trôi dạt có xu hướng tăng do đó cần có sự quan tâm trong lựa chọn các giải pháp kết cấu công trình.

Tài liệu tham khảo

1. API-Recommended practice 2SK 3rd Edition. *Design and analysis of stationkeeping systems for floating structures*. Copyright American Petroleum Institute, Provided by IHS under license with API. October 2005: 227p.
2. Bernard Molin. *Hydrodynamique des structures offshore*. Edition Technip. 2002: 415p.
3. C.A.Brebbia. *The boundary element method for engineer*. Pentech Press, London. 1980.
4. Bureau Veritas - France. *Hydrostar for experts user manual*. Distributed by Bureau Veritas. March 2011.
5. James F. Wilson. *Dynamics of offshore structures*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2003: 343p.
6. Minoos H. Patel. *Compliant offshore structures*. Butterworths Publisher. 1991: 412p.
7. Minoos H. Patel. *Dynamics of offshore structures*. Butterworths Publisher. 1989: 402p.
8. N.D.P.Barltrop. *Floating structures: A guide for design and analysis*. Edited by the Centre for Marine and Petroleum Technology. 1988; 1 & 2.
9. O.M.Faltinsen. *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge University Press. 1991: 328p.
10. J.A.Pinkster. *Low frequency second order wave exciting forces on floating structures*. H. Veenman en Zonen B.V. - Wageningen, the Netherlands. October 1980.
11. Subrata K. Chakrabarti. *Handbook of Offshore Engineering*. Elsevier Science Publisher. 2006; 1 & 2: 1274p.
12. Subrata K. Chakrabarti. *Hydrodynamics of offshore structures*. Elsevier Science Publisher. 1986.
13. Van Oortmerssen G. *The motions of a moored ship in waves, a dissertation for the degree of doctor of philosophy*. Netherlands Ship Model Basin Wageningen, the Netherlands. 1976; 510: 134p.
14. Xiaobo CHEN. *Approximation on the quadratic transfer function of low-frequency loads*. Proceeding of 7th BOSS '94, MIT. 1994; 2: p. 208 - 302.
15. Yong Bai. *Marine structural design*. Elsevier Science Publisher. 2003: 634p.
16. Короткин А.И. *Присоединённые Массы Судна: Справочник*, Изд. Судостроение, Ленинград, СССР. 1986: 312с.

Study of the influence of water depth on wave drift load acting on offshore floating structures with catenary mooring lines

Nguyen Quoc Hoa

Institute of Offshore

Construction Engineering National University of Civil Engineering

Summary

Floating moored structures are widely used in the petroleum industry at different water depths. Permanently moored in the exploitation place, floating structures are subject to wave drift loads (higher order wave loads) causing large displacements and affecting the safety of the facility and equipment. In this article, the author made calculations with the specialised HydroSTAR software of Bureau Veritas (France) to investigate the influence of water depth on the wave drift load acting on the floating structures with catenary mooring lines.

Key words: *Floating moored structures, higher order wave loads, wave drift load, catenary mooring.*