

PHÂN TÍCH CHUYỂN VỊ THEO PHƯƠNG ĐỨNG CỦA BÁNH XE DI CHUYỂN TRÊN TẤM NỔI BẰNG PHƯƠNG PHÁP KẾT HỢP PHẦN TỬ CHUYỂN ĐỘNG VÀ PHẦN TỬ BIÊN

ANALYSIS OF THE VERTICAL DISPLACEMENT OF A WHEEL MOVING ON THE FLOATING PLATE BY THE COMBINATION OF THE MOVING ELEMENT METHOD AND THE BOUNDARY ELEMENT METHOD

PHAN NHẬT TÂN¹, DƯƠNG CHUNG NGUYỄN², NGUYỄN TẤN HÙNG^{1,*}

¹Trường Đại học KTCN Cần Thơ; ²Trường Đại học SPKT Vĩnh Long.

Email*: nthung@ctu.edu.vn

Nhận bài (Received): 03/4/2022; Phản biện (Reviewed): 24/4/2022; Chấp nhận (Accepted): 18/7/2022

TÓM TẮT:

Bài báo giới thiệu phương pháp số tính toán kết hợp giữa phần tử chuyển động và phần tử biên để tính toán mô hình hệ ba bậc tự do di chuyển trên một kết cấu tấm nổi. Dựa vào phương pháp này, các tác giả đã xác định được chuyển vị theo phương đứng của bánh xe di chuyển trên tấm nổi. Đồng thời dựa vào mô hình, các tác giả còn khảo sát ảnh hưởng của thông số vật liệu đến ứng xử động lực học của bánh xe. Kết quả nghiên cứu cho thấy, chuyển vị của bánh xe tỉ lệ nghịch với hệ số cản giá chuyển hướng, hệ số cản bánh xe, độ cứng giá chuyển hướng, và độ cứng của bánh xe. Trong các thông số khảo sát, độ cứng của bánh xe có ảnh hưởng nhiều nhất đến chuyển vị của bánh xe. Trong tương lai, nghiên cứu về ứng xử hệ xe di chuyển trên một kết cấu tấm nổi bằng phương pháp thí nghiệm cần được thực hiện để kiểm chứng sự chính xác của phương pháp tính toán đã được đề xuất trong bài báo này.

Từ khóa: Móng giếng chìm; tính toán phần tử hữu hạn; phần mềm Plaxis 2D.

ABSTRACT:

This paper presents a numerical approach with the combination of the moving element method and the boundary element method to analyze the hydroelastic behavior of the three-degree freedom system moving on a floating plate structure. Based on this approach, the vertical displacement of a wheel moving on the floating plate has been determined. Furthermore, the influence of material parameters on the hydroelastic of the wheel has also been identified. The results of the study show that the displacement of the wheel had a positive relationship to the drag coefficient of the bogie, the drag coefficient of the wheel, the stiffness of the bogie and the stiffness of the wheel. Among the parameters observed, the stiffness of the wheel has the most influence on the displacement of the wheel. In the future, the study on the behavior of the three-degree freedom system on the floating plate

structure by experimental evaluation should be conducted to examine the accuracy of the calculation method presented in this article.

Keywords: *Suction caisson foundation; finite element analysis, Plaxis 2D program.*

1. Giới thiệu

Mô hình hệ ba bậc tự do di chuyển trên một kết cấu tấm nổi đã được ứng dụng rộng rãi để tính toán cho công trình có xe chạy trên một cầu nổi, hoặc máy bay di chuyển trên một sân bay nổi, hoặc xe chạy trên cầu nổi, v.v. Hình 1 bên dưới là ví dụ cụ thể về sân bay nổi Mega-Float tại vịnh Tokyo - Nhật Bản.



Hình 1. Sân bay nổi Mega-Float tại vịnh Tokyo - Nhật Bản

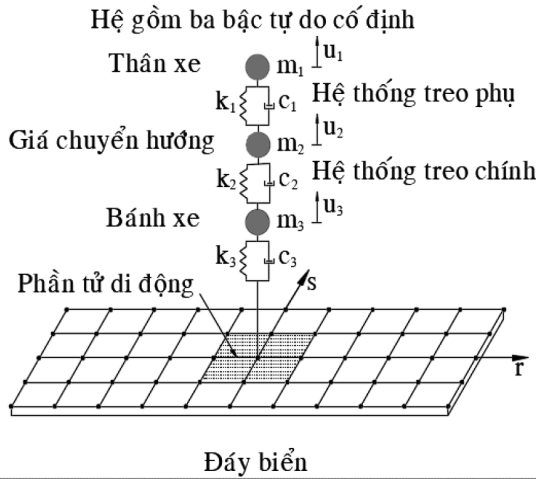
Để giải quyết bài toán trên, phương pháp phần tử chuyển động (Moving element method, MEM) kết hợp với phần tử biên (Boundary element condition, BEM) được đề xuất. Phương pháp MEM được đề xuất bởi Koh, C., Ong, J., Chua, D., & Feng, J. (2003) cho phép xây dựng bài toán trong một hệ thống tọa độ tương đối, gắn liền với tải chuyển động. Trong khi đó, phương pháp BEM được dùng để phân tích chuyển động của chất lỏng theo Hamamoto, T., Suzuki, A., & Fujita, K.-i. (1997). Phương pháp kết hợp MEM-BEM đã được sử dụng và mang lại một số kết quả nổi bật. Nguyễn Xuân Vũ và các cộng sự (2020) đã khảo sát ứng xử của tấm nổi composite dưới tác động của tải trọng động bằng phương pháp kết hợp phần tử chuyển

động và phần tử biên bởi Nguyen, X. V., Luong, V. H., Cao, T. N. T., Lieu, X. Q., & Nguyen, T. B. (2020). Kết quả của nghiên cứu này được kiểm chứng với kết quả tính toán bằng triển khai chuỗi Fourier và biểu thức tiệm cận (asymptotic expression). Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng, tốc độ di chuyển của tải trọng ảnh hưởng đáng kể đến chuyển vị của tấm nổi. Bài báo kết luận rằng, phương pháp kết hợp MEM-BEM đã được giới thiệu đầu tiên và đã mang lại hiệu quả trong việc tính toán ứng xử của tấm nổi composite.

Cho đến nay, chưa có nhiều nghiên cứu ứng xử tấm nổi bằng phương pháp kết hợp MEM-BEM được thực hiện. Đặc biệt là nghiên cứu về ứng xử động lực học của hệ ba bậc tự do di chuyển trên một kết cấu tấm nổi sử dụng phương pháp MEM-BEM. Vì vậy nghiên cứu này được thực hiện nhằm giới thiệu rõ hơn về phương pháp. Đồng thời, dựa trên kết quả tính toán, các tác giả sẽ khảo sát chuyển vị bánh xe theo phương đứng của hệ ba bậc tự do di chuyển trên một kết cấu tấm nổi.

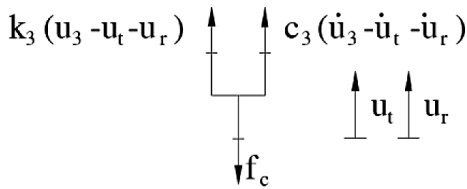
2. Cơ sở lý thuyết tính toán hệ ba bậc tự do di chuyển trên một kết cấu tấm nổi

Trong nghiên cứu này, phần tử tấm được mô phỏng với ba bậc tự do di chuyển gồm thân xe, giá chuyển hướng, bánh xe có các thông số lần lượt là khối lượng thu gọn m_1, m_2, m_3 , độ cứng lò xo k_1, k_2, k_3 , bộ giảm sóc c_1, c_2, c_3 , chuyển vị theo phương đứng u_1, u_2, u_3 , vận tốc theo phương đứng $\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3$, gia tốc theo phương đứng $\ddot{u}_1, \ddot{u}_2, \ddot{u}_3$ và g là gia tốc trọng trường. Mô hình hệ 3 bậc tự do di chuyển trên một kết cấu tấm nổi được thể hiện ở Hình 2 bên dưới.



Hình 2. Mô hình hệ ba bậc tự do di chuyển trên một kết cấu tám nổi

Xét cân bằng ở vị trí tiếp xúc của kết cấu tám nổi và hệ ba bậc tự do di chuyển:



Hình 3. Xét cân bằng vị trí tiếp xúc của kết cấu tám nổi và hệ ba bậc tự do di chuyển

Lực tương tác giữa bánh xe và kết cấu tám nổi

$$f_c = c_3 (\dot{u}_3 - \dot{u}_t - \dot{u}_r) + k_3 (u_3 - u_t - u_r) \quad (1)$$

Trong đó, $u_t, \dot{u}_t$ lần lượt là chuyển vị và vận tốc tám nổi, a_r là biên độ, λ_r là bước sóng của độ gồ ghề tám nổi, $u_r = a_r \sin(2\pi x / \lambda_r)$ là chuyển vị phát sinh do bề mặt tám nổi.

$$m_3 \ddot{u}_3 - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_3) - k_2 (u_2 - u_3) = -m_3 g - f_c \quad (2)$$

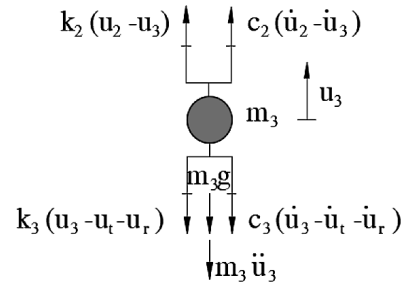
Vậy hệ phương trình của hệ 3 bậc tự do di chuyển là:

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + k_1 (u_1 - u_2) = -m_1 g \quad (3)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_3) + k_2 (u_2 - u_3) - c_1 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) - k_1 (u_1 - u_2) = -m_2 g \quad (4)$$

$$m_3 \ddot{u}_3 - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_3) - k_2 (u_2 - u_3) = -m_3 g - f_c \quad (5)$$

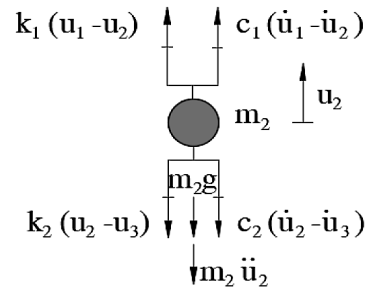
Xét cân bằng ở bánh xe của hệ ba bậc tự do di chuyển:



Hình 4. Xét cân bằng ở bánh xe của hệ ba bậc tự do di chuyển

$$m_3 \ddot{u}_3 - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_3) - k_2 (u_2 - u_3) = -m_3 g - c_3 (\dot{u}_3 - \dot{u}_t - \dot{u}_r) - k_3 (u_3 - u_t - u_r) \quad (6)$$

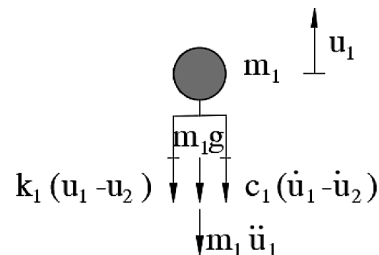
Xét cân bằng ở giá chuyển hướng của hệ ba bậc tự do di chuyển:



Hình 5. Xét cân bằng ở giá chuyển hướng của hệ ba bậc tự do di chuyển

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_3) + k_2 (u_2 - u_3) - c_1 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) - k_1 (u_1 - u_2) = -m_2 g \quad (7)$$

Xét cân bằng ở vị trí thân xe của hệ ba bậc tự do di chuyển:



Hình 6. Xét cân bằng ở vị trí thân xe của hệ ba bậc tự do di chuyển

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + k_1 (u_1 - u_2) = -m_1 g \quad (8)$$

Ta có, phương trình dao động của kết cấu đang xét có dạng như sau:

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \alpha \nabla^4 \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) + c \frac{\partial w}{\partial t} + D (\nabla^4 w) + \rho g w = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} + f_c(t) \delta(x-d) \quad (9)$$

Trong đó, ϕ là hàm thế vận tốc, w là chuyển vị của tấm, ρ là khối lượng riêng của vật liệu tấm, D là độ cứng trụ của tấm.

Phương trình chủ đạo của chuyển động cho mô hình kết hợp của kết cấu tấm nổi và chất lỏng:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{w}} \\ \ddot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & -\rho \mathbf{L}_2 \\ -\mathbf{G} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{w}} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & -\rho \cdot \dot{\mathbf{d}} \cdot \mathbf{L}_{d2} \\ \dot{\mathbf{d}} \cdot \mathbf{G} \mathbf{d} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_c \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Trong đó, $\mathbf{M}$ là ma trận khối lượng, $\mathbf{K}$ là ma trận độ cứng, $\mathbf{C}$ là ma trận cản, $\mathbf{f}_c$ là vector lực tương tác, Φ là vector chứa tại các điểm biên và w biểu thị cho vector gồm chuyển vị nút của kết cấu tấm. Chi tiết về khai triển công thức được trình bày cụ thể trong nghiên cứu của trước đây của Tân, P. N., Vũ, N. X., Thân, C. T. N., & Hải, L. V. (2019).

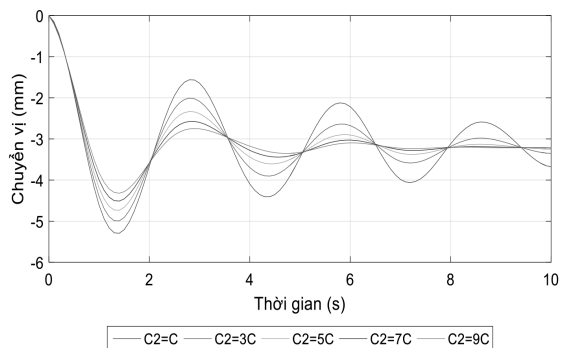
3. Kết quả phân tích số

Xét kết cấu tấm nổi gồm có kích thước (L, B, h) , độ cứng trụ EI/B , hệ số Poisson ν của tấm, khối lượng riêng ρ_p , hệ số cản vật liệu α , chiều dài miền khảo sát L_o , hệ số cản ảo nhân tạo γ , độ sâu vùng nước H ; khối lượng thân xe m_1 , hệ số cản thân xe c_1 , độ cứng thân xe k_1 , khối lượng giá chuyển hướng m_2 , hệ số cản giá chuyển hướng c_2 , độ cứng giá chuyển hướng k_2 , khối lượng bánh xe m_3 , hệ số cản bánh xe c_3 , độ cứng bánh xe k_3 . Thông số vật liệu của kết cấu tấm nổi khảo sát trong nghiên cứu này được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Thông số kết cấu tấm nổi

Thông số	Giá trị
Chiều dài L (m)	2000
Chiều rộng, B (m)	1000
Chiều cao, h (m)	2
Độ cứng trụ, EI/B (N x m)	1.764e11
Hệ số poisson, ν	0.3
Khối lượng riêng, ρ (kg/m ³)	256.25
Hệ số cản vật liệu, α (Ns/m ²)	0
Chiều dài miền khảo sát, L_o (m)	500
Hệ số cản ảo nhân tạo, γ (Ns/m ²)	4.07e5
Độ sâu vùng nước, H (m)	300

Tiến hành khảo sát chuyển vị bánh xe theo phương đứng u_3 theo thời gian dao động khi thay đổi các giá trị của tác thông số như hệ số cản giá chuyển hướng c_2 , hệ số cản bánh xe c_3 , độ cứng giá chuyển hướng k_2 và độ cứng bánh xe k_3 . Kết quả chuyển vị của bánh xe khi thay đổi hệ số cản giá chuyển hướng c_2 được thể hiện ở Hình 7.

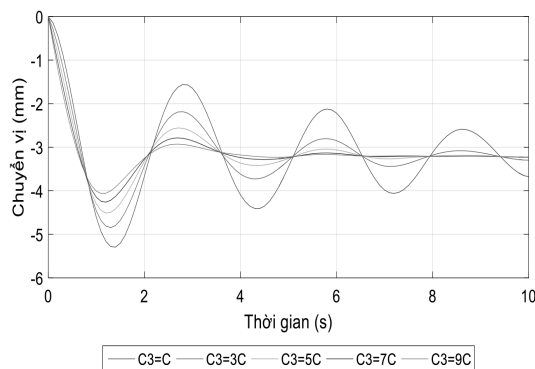


Hình 7. Chuyển vị bánh xe khi thay đổi hệ số cản giá chuyển hướng c_2

Qua phân tích chuyển vị của bánh xe, có thể thấy rằng khi tăng hệ số cản giá chuyển hướng c_2 thì chuyển vị bánh xe giảm. Đặc biệt là, khi hệ số cản giá chuyển hướng c_2 tăng lên 9 lần thì chuyển vị bánh xe giảm 18.40%. Điều này được giải thích là khi hệ số cản giá chuyển hướng c_2 càng lớn thì năng lượng tiêu tán cho lực cản gây ra cũng tăng, từ đó giảm chuyển vị của

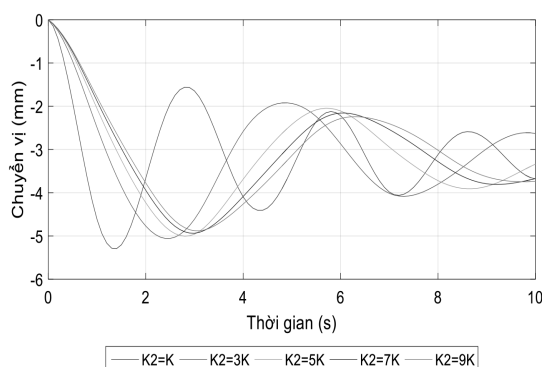
bánh xe. Từ kết quả trên có thể kết luận rằng, hệ số cản giá chuyển hướng có ảnh hưởng đáng kể đến chuyển vị của bánh xe khi hệ chuyển động.

Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của hệ số cản bánh xe đến chuyển vị bánh xe được trình bày ở Hình 8.



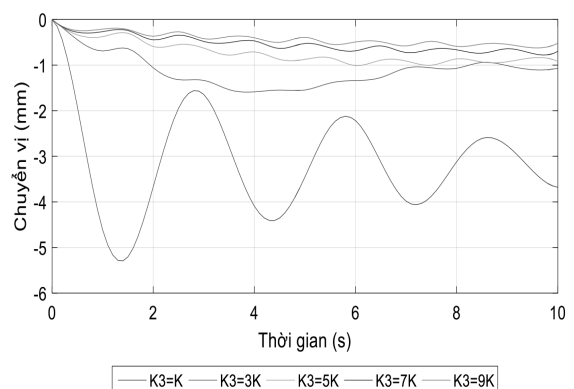
Hình 8. Chuyển vị bánh xe khi thay đổi hệ số cản bánh xe c_3

Kết quả từ Hình 8 cho thấy rằng, khi hệ số cản bánh xe c_3 tăng thì chuyển vị bánh xe giảm. Cụ thể, khi hệ số cản bánh xe c_3 tăng 9 lần thì chuyển vị bánh xe giảm 23.25%. Sự giảm chuyển vị của bánh xe được giải thích rằng, khi hệ số cản bánh xe c_3 càng lớn thì năng lượng tiêu tán cho lực cản gây ra cũng tăng, từ đó làm giảm chuyển vị của bánh xe. Kết quả nghiên cứu cho thấy, hệ số cản bánh xe ảnh hưởng đáng kể đến chuyển vị của bánh xe khi hệ chuyển động.



Hình 9. Chuyển vị bánh xe khi thay đổi độ cứng giá chuyển hướng k

Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng giá chuyển hướng của xe k đến chuyển vị bánh xe được trình bày ở Hình 9 bên trên. Đối với hệ xe, khi độ cứng giá chuyển hướng k tăng thì chuyển vị bánh xe giảm. Cụ thể là, khi độ cứng giá chuyển hướng tăng 9 lần thì chuyển vị bánh xe giảm 7.8%. Tương tự như kết luận bên trên, hệ số cản bánh xe k có ảnh hưởng đến chuyển vị của bánh xe khi hệ chuyển động. Tuy nhiên, ảnh hưởng này là không đáng kể.



Hình 10. Chuyển vị bánh xe khi thay đổi độ cứng bánh xe

Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng bánh xe đến chuyển vị của bánh xe được thể hiện ở Hình 10 bên trên. Dựa vào Hình 10, có thể thấy rằng, đối với hệ xe, khi độ cứng bánh xe tăng thì chuyển vị bánh xe giảm. Cụ thể là, khi độ cứng chuyển hướng tăng 9 lần thì chuyển vị bánh xe giảm 88.22%. Qua phân tích, có thể kết luận rằng độ cứng bánh xe có ảnh hưởng rất lớn đến chuyển vị của bánh xe khi hệ chuyển động.

4. Kết luận và Kiến nghị

Trong nghiên cứu này, phương pháp phân tử chuyển động kết hợp với phân tử biên đã được sử dụng để tính toán hệ ba bậc tự do di chuyển trên một kết cấu tám nối. Dựa vào mô hình tính toán, các tác

giả xác định chuyển vị theo phương đứng của bánh xe trên tấm nổi. Đồng thời dựa vào mô hình, các tác giả còn khảo sát ảnh hưởng của thông số vật liệu đến ứng xử động lực học của bánh xe. Kết quả nghiên cứu cho thấy, chuyển vị của bánh xe tỉ lệ nghịch với hệ số cản giá chuyển hướng, hệ số cản bánh xe, độ cứng giá chuyển hướng,

và độ cứng của bánh xe. Trong các thông số khảo sát, độ cứng của bánh xe có ảnh hưởng nhiều nhất đến chuyển vị của bánh xe. Trong tương lai, cần có nhiều nghiên cứu về ứng xử hệ xe di chuyển trên một kết cấu tấm nổi bằng phương pháp thí nghiệm để kiểm chứng phương pháp tính toán đã được đề xuất trong nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Andrianov, A. (2005). Hydroelastic analysis of very large floating structures. *Doctorale thesis, Delft University of Technology*.
- [2]. Hamamoto, T., Suzuki, A., & Fujita, K.-i. (1997). *Hybrid dynamic analysis of large tension leg floating structures using plate elements*. Paper presented at the The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference.
- [3]. Koh, C., Ong, J., Chua, D., & Feng, J. (2003). Moving element method for train-track dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 56(11), 1549-1567.
- [4]. Nguyen, X. V., Luong, V. H., Cao, T. N. T., Lieu, X. Q., & Nguyen, T. B. (2020). Hydroelastic responses of floating composite plates under moving loads using a hybrid moving element-boundary element method. *Advances in Structural Engineering*, 23(13), 2759-2775.
- [5]. Tân, P. N., Vũ, N. X., Thân, C. T. N., & Hải, L. V. (2019). Ứng xử thủy đàn hồi học của một tấm nổi dưới tác động của hệ nhiều bậc tự do di chuyển sử dụng phương pháp kết hợp giữa phần tử biên và phần tử chuyển động. *Tạp Chí Xây Dựng*, 143-150.
- [6]. Yago, K., & Endo, H. (1996). On the Hydroelastic Response of Box-Shaped Floating Structure with Shallow Draft Tank Test with Large Scale Model. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1996(180), 341-352.