

MÔ PHỎNG SÓNG LAN TRUYỀN PHÍA TRÊN ĐÊ CHẮN SÓNG NGẦM KẾT CẤU RỖNG TRONG VÙNG NƯỚC NÔNG

PROPAGTION OF WAVES OVER A SUBMERGED POROUS BREAKWATER IN SHALLOW WATER AREA

¹Nguyễn Thị Trúc Linh, ²Vũ Văn Nghi

¹Sở Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh
linhchau1207@gmail.com

²Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh
nghi.vu@ut.edu.vn

Tóm tắt: Trong nghiên cứu này tác giả mô phỏng sóng lan truyền trên đê chắn sóng ngầm kết cấu rỗng trong vùng nước nông. Sóng biên độ nhỏ được tạo ra bằng phương pháp Tối ưu miền tạo sóng (Relaxation Zone Method). Để mô phỏng sóng truyền trên đê ngầm kết cấu rỗng, nhóm nghiên cứu sử dụng phương trình sóng nước nông lan truyền trong hai môi trường thấm được rút gọn từ phương trình Boussinesq mở rộng của Lee và cộng sự (2018). Phương pháp sai phân hữu hạn được sử dụng để giải bài toán sóng nước nông. Kết quả mô phỏng từ mô hình số được so sánh kiểm chứng với lời giải giải tích và cho thấy độ tin cậy của mô hình số.

Từ khóa: Phương pháp Tối ưu miền tạo sóng, đê ngầm kết cấu rỗng, vùng nước nông, lời giải số, lời giải giải tích.

Chỉ số phân loại: 2.4

Abstract: In this research, a relaxation zone method is applied to generate waves propagating over a submerged porous breakwater. The governing equations are obtained by removing the dispersive terms from the extended Boussinesq equations of Lee et al. (2018) for waves propagating in two porous layers. A numerical model is developed to solve the governing equations by using finite difference method. The results from the numerical model are well compared with the analytical solutions.

Keywords: Relaxation Zone Method, submerged porous breakwater, shallow water, numerical solution, analytical solution.

Classification number: 2.4

1. Giới thiệu

Các dạng đê rỗng phá sóng đang được xây dựng khá phổ biến hiện nay trên thế giới và Việt Nam. Tương tác giữa sóng và đê chắn sóng kết cấu rỗng là chủ đề quan trọng trong thiết kế các công trình chắn sóng ven biển. Về nguyên tắc đê chắn sóng kết cấu rỗng làm suy giảm năng lượng sóng khi truyền qua đê. Tùy thuộc vào độ rỗng của đê cũng như các yếu tố về kích thước đê và đặc trưng của sóng tới mà năng lượng sóng có sự suy giảm khác nhau khi truyền qua thân đê. Có hai hướng nghiên cứu chính về đê kết cấu rỗng hiện nay: Hướng nghiên cứu thứ nhất về đê kết cấu rỗng không ngập (sóng chỉ truyền qua thân đê chứ không truyền qua phía trên đê) và hướng nghiên cứu thứ hai về đê ngầm kết cấu rỗng (sóng truyền qua thân đê và phía trên đê).

Với hướng nghiên cứu thứ nhất, Vidal và cộng sự (1988), Liu và Wen (1997), Lynett

và cộng sự (2000) đã tiến hành các nghiên cứu về tương tác giữa sóng đơn (solitary waves) với đê rỗng qua các thí nghiệm bằng mô hình vật lý trong máng sóng cũng như mô hình số một chiều để xét hiệu quả giảm sóng phía sau đê rỗng. Trong các thí nghiệm của mình, các tác giả đều thay đổi bề rộng đê, đường kính viên đá, chiều cao sóng tới (thay đổi tính phi tuyến của sóng đơn) và đặc trưng độ rỗng của đê (đối với trường hợp mô phỏng bằng mô hình số). Các kết quả thí nghiệm đều cho thấy khi tính phi tuyến của sóng tăng lên thì hệ số truyền sóng qua thân đê giảm và hệ số phản xạ tăng. Với các thí nghiệm số hai chiều và mô hình vật lý trong bể sóng, các nghiên cứu của Lara và cộng sự (2012), del Jesus và cộng sự (2014), Vu và cộng sự (2018) đã phản ánh chính xác các hiện tượng sóng xuất hiện khi sóng tương tác với đê chắn sóng kết cấu rỗng như hiện tượng phản xạ, hiện tượng truyền sóng qua

thân đê, hiện tượng nhiễu xạ phía sau đê và tương tác giữa sóng nhiễu xạ sau đê với sóng truyền qua thân đê.

Với hướng nghiên cứu thứ hai, Cruz và cộng sự (1997), Hsiao và cộng sự (2002) đã phát triển mô hình số cho sóng truyền phía trên đê chắn sóng kết cấu rỗng và đã kiểm chứng mô hình với các số liệu thí nghiệm trong máng sóng. Hai nghiên cứu này chỉ có thể áp dụng cho trường hợp lớp phía trên không có suy giảm năng lượng và lớp phía dưới có kết cấu rỗng (sóng truyền trong môi trường có suy giảm năng lượng). Nguyễn Anh Tiến và cộng sự (2018) đã đề xuất công thức thực nghiệm tính toán hệ số truyền sóng qua đê rỗng dựa trên các kết quả thí nghiệm được tiến hành trên mô hình vật lý trong máng sóng thủy lực. Kết quả thí nghiệm của nhóm nghiên cứu cũng cho thấy các yếu tố ảnh hưởng tới hiệu quả giảm sóng của đê ngầm bao gồm kích thước hình học của đê, đặc trưng sóng tới, độ ngập đỉnh đê và tương tác giữa sóng với mái đê. Thiều Quang Tuấn và cộng sự (2018) cũng đã tiến hành các nghiên cứu thí nghiệm bằng máng sóng, đề xuất công thức thực nghiệm xác định hệ số truyền sóng qua đê rỗng trên bãi nông của rừng ngập mặn. Tuy nhiên một yếu tố quan trọng mà các nghiên cứu này chưa xét tới là các đặc trưng độ rỗng của đê.

Lee và cộng sự (2018) đã phát triển mô hình toán cho sóng lan truyền trong hai môi trường rỗng (lớp phía trên và lớp phía dưới đều có suy giảm năng lượng) và cũng có thể áp dụng cho trường hợp sóng truyền phía trên đê ngầm kết cấu rỗng (lớp phía trên không có suy giảm năng lượng, lớp phía dưới có suy giảm năng lượng).

Trong nghiên cứu này, tác giả áp dụng mô hình của Lee và cộng sự cho vùng nước nông để mô phỏng sóng truyền trong hai lớp rỗng và sóng truyền phía trên một lớp rỗng (đê ngầm kết cấu rỗng).

Ngoài phần giới thiệu chung, phần thứ hai của bài báo giới thiệu phương trình cơ bản cho sóng nước nông lan truyền trong hai môi trường thấm được rút gọn từ phương trình Boussinesq mở rộng của Lee và cộng sự (2018). Các kết quả mô phỏng bằng mô hình

số được giới thiệu và phân tích trong phần thứ ba của bài báo. Phần thứ tư đưa ra một số kết luận đối với kết quả đạt được của bài báo.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Phương trình cơ bản

Phương trình cơ bản cho sóng lan truyền trong hai lớp rỗng được Lee và cộng sự (2018) phát triển dựa trên giả thiết chất lỏng không nén và dòng chảy không rối. Phương trình sóng được phát triển có dạng phương trình Boussinesq mở rộng với tính phi tuyến yếu. Sóng truyền trong môi trường có hai lớp rỗng được miêu tả qua các phương trình liên tục và phương trình động lượng như sau:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot [(h_1 + \varepsilon \eta) \mathbf{u}_1] + \quad (1)$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \nabla \cdot [(h_2 - h_1) \mathbf{u}_2] = 0$$

$$\left(\beta_1 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_1 \right) \mathbf{u}_1 + \nabla \eta + \varepsilon \beta_1 \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1 + \frac{\mu^2}{2} \left(\beta_1 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_1 \right) \left\langle \frac{h_1^2}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) - \quad (2)$$

$$h_1 \nabla [\nabla \cdot (h_1 \mathbf{u}_1)] - h_1 \nabla \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \nabla \cdot [(h_2 - h_1) \mathbf{u}_2] \right\} \Bigg\rangle$$

$$= O(\varepsilon \mu^2, \mu^4)$$

$$\left(\beta_2 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_2 \right) \mathbf{u}_2 + \nabla \eta + \varepsilon \beta_2 \mathbf{u}_2 \cdot \nabla \mathbf{u}_2 +$$

$$\frac{\mu^2}{2} \left(\beta_2 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_2 \right) \left[-\frac{2}{3} (h_2 - h_1)^2 \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_2) - \right. \quad (3)$$

$$\left. - (h_2 - h_1) \nabla (\nabla h_2 \cdot \mathbf{u}_2) - (h_2 - h_1) \nabla (h_2 - 2h_1) \times \right.$$

$$\left. \nabla \cdot \mathbf{u}_2 + 2 \nabla h_1 \nabla h_2 \cdot \mathbf{u}_2 \right] - \frac{\mu^2}{2} \left(\beta_1 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_1 \right) \times$$

$$\left. \nabla \left\{ \nabla \cdot (h_1^2 \mathbf{u}_1) + 2h_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \nabla \cdot [(h_2 - h_1) \mathbf{u}_2] \right\} \right.$$

$$\left. = O(\varepsilon \mu^2, \mu^4) \right.$$

Các đại lượng trong các công thức từ (1) đến (3) được giải thích như sau: $\mathbf{u} = (u, v)$ là vec tơ vận tốc nước lỗ rỗng trung bình theo phương z ; $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ là toán tử hai chiều gradient; η là cao độ mặt nước, h là độ sâu nước; λ , α , β lần lượt là độ rỗng, hệ số cản dòng chảy và hệ số cản quán tính của lớp rỗng; $\varepsilon = a/h$ (a là biên độ sóng) là thông số phi tuyến của sóng (nonlinearity);

$\mu = h/l$ (l là chiều dài sóng) là thông số phân tán của sóng (dispersivity). Chỉ số dưới 1,2 thể hiện lớp thứ nhất và lớp thứ hai. Các hệ số cản dòng chảy và hệ số cản quán tính được cho bởi các công thức sau:

$$\alpha = \alpha_1 \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right)^2 \frac{\nu}{d^2} + \alpha_2 \frac{1-\lambda}{\lambda} \frac{1}{d} |\mathbf{u}| \quad (4)$$

$$\beta = 1 + (1-\lambda)\kappa \quad (5)$$

Với α_1 , α_2 lần lượt là hệ số cản dòng chảy tầng và dòng chảy rối; ν là hệ số nhớt động học của chất lỏng; d là đường kính hạt và κ là hệ số khối lượng nước kèm (added mass coefficient).

Trong vùng nước nông, phương trình (2) và (3) được rút gọn có dạng sau:

$$\left(\beta_1 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_1 \right) \mathbf{u}_1 + g \nabla \eta + \beta_1 \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1 = 0 \quad (6)$$

$$\left(\beta_2 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_2 \right) \mathbf{u}_2 + g \nabla \eta + \beta_2 \mathbf{u}_2 \cdot \nabla \mathbf{u}_2 = 0 \quad (7)$$

Phương trình (6) và (7) áp dụng cho trường hợp sóng lan truyền trong 2 lớp rỗng trong vùng nước nông. Khi sóng truyền phía trên một lớp rỗng như trường hợp sóng truyền phía trên đê rỗng, sóng truyền phía trên rừng ngập mặn hoặc sóng truyền phía trên bãi cát, vẫn có thể áp dụng phương trình trên với việc sử dụng hệ số rỗng của lớp trên $\lambda_1 = 1$ (khi đó $\alpha_1 = 0$, $\beta_1 = 1$) và hệ số rỗng của lớp dưới $\lambda_2 < 1$.

2.2. Quan hệ phân tán

Từ hệ phương trình cơ bản cho sóng nước nông lan truyền trong hai lớp rỗng (1), (6) và (7), nếu loại bỏ các đại lượng phi tuyến, giả thiết sóng một chiều lan truyền trên đáy phẳng nằm ngang, khi đó các phương trình (1), (6) và (7) được viết lại có dạng:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (h_2 - h_1) \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$\left(\beta_1 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_1 \right) u_1 + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\left(\beta_2 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_2 \right) u_2 + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

Đạo hàm phương trình (9) và (10) theo thời gian và kết hợp với phương trình (8):

$$\beta_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + \alpha_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} - g h_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - g (h_2 - h_1) \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} = 0 \quad (11)$$

$$\beta_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} + \alpha_2 \frac{\partial u_2}{\partial t} - g h_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - g (h_2 - h_1) \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} = 0 \quad (12)$$

Các thành phần vận tốc u_1 và u_2 có thể được định nghĩa như sau:

$$u_1 = A_1 \exp[i(k_r + ik_i)x - \omega t] \quad (13)$$

$$u_2 = A_2 \exp[i(k_r + ik_i)x - \omega t] \quad (14)$$

Với A_1 và A_2 lần lượt là các giá trị biên độ vận tốc của các thành phần vận tốc u_1 và u_2 , i là số ảo, số sóng phức k ($k = k_r + ik_i$) gồm hai thành phần: k_r là phần thực liên quan tới pha sóng và k_i là phần ảo liên quan tới suy giảm năng lượng của biên độ sóng.

Sau khi thay phương trình (13), (14) vào hai phương trình (11), (12) và bỏ qua các số hạng bậc cao cho ta quan hệ phân tán (dispersion relation):

$$c^2 = \left(\frac{\omega}{k_r} \right)^2 = g \left[1 - \left(\frac{k_i}{k_r} \right)^2 \right] \left(\frac{h_1}{\beta_1} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{h_2}{\beta_2} \right) \quad (15)$$

Với c là vận tốc pha sóng. Khi sóng truyền trong môi trường nước bình thường (không có suy giảm năng lượng), $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$, $\beta_1 = \beta_2 = 1$ và $k_i = 0$ khi đó $c^2 = g(h_1 + h_2)$. Đây chính là công thức xác định quan hệ phân tán của sóng trong vùng nước nông trong các trường hợp thông thường không có suy giảm năng lượng.

Từ công thức (15), có thể xác định được phần thực k_r và phần ảo k_i của số sóng phức k tùy thuộc vào độ sâu nước cũng như các đặc trưng của môi trường trầm.

3. Mô hình số

3.1. Rời rạc hóa mô hình toán

Phương pháp sai phân hữu hạn được sử dụng để giải phương trình (1), (6) và (7). Các phương trình (1), (6) và (7) được viết lại trong không gian một chiều như sau:

$$\eta_t = E(\eta, u_1, u_2) \quad (16)$$

$$[u_1]_t = F_1(\eta, u_1) \quad (17)$$

$$[u_2]_t = F_2(\eta, u_2) \quad (18)$$

Với các thông số E , F_1 và F_2 được định nghĩa như sau:

$$E(\eta, u_1, u_2) = -\left[(h_1 + \eta)u_1 \right]_x - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left[(h_2 - h_1)u_2 \right]_x \quad (19)$$

$$F_1(\eta, u_1) = -\frac{\alpha_1}{\beta_1} u_1 - u_1 u_{1x} - \frac{g}{\beta_1} \eta_x \quad (20)$$

$$F_2(\eta, u_2) = -\frac{\alpha_2}{\beta_2} u_2 - u_2 u_{2x} - \frac{g}{\beta_2} \eta_x \quad (21)$$

Phương pháp sai phân được sử dụng để giải bài toán này được rút gọn và bổ sung từ mô hình FUNWAVE cho phương trình Boussinesq (Wei và Kirby, 1995). Mô hình FUNWAVE là mô hình một lớp (η, u) và sử dụng hàm nguồn (source function) để tạo sóng. Trong nghiên cứu này nhóm tác giả sử dụng mô hình hai lớp (η, u_1, u_2) và tạo sóng sử dụng phương pháp tối ưu miền tạo sóng (relaxation method).

Các phương trình (16) - (18) được rời rạc hóa trong hệ lưới không lệch (unstaggered grid system). Hệ lưới này cho phép xác định các giá trị cao độ mặt nước (η) và vận tốc hạt nước (u_1, u_2) tại cùng một điểm lưới.

3.2. Phân tích kết quả mô phỏng từ mô hình số

Trong phần này mô hình số được phát triển để mô phỏng sóng lan truyền trong các trường hợp khác nhau: Sóng truyền trong hai lớp rỗng có độ rỗng khác nhau, sóng truyền trên bề mặt có mái dốc khác nhau, ...

Để khởi tạo con sóng ban đầu, các nghiên cứu thường sử dụng phương pháp hàm nguồn (Larsen và Dancy 1983, Lee và

Suh 1998, Wei và cộng sự 1999, Vũ và cộng sự 2015). Phương pháp này có ưu điểm là độ chính xác cao tuy nhiên việc cần phải tìm ra hàm nguồn để tạo sóng khá phức tạp đặc biệt là khi phương trình cơ bản có nhiều đại lượng. Trong nghiên cứu này tác giả sử dụng phương pháp Relaxation Zone để tạo sóng. Phương pháp này đã được kiểm chứng qua một số nghiên cứu (Madsen và cộng sự 2003, Eskilsson và cộng sự 2006, Engsig - Karup và cộng sự 2006, Jacobsen và cộng sự 2012). Phương pháp này cho độ chính xác cao và không cần phải tìm hàm nguồn. Để tạo sóng, tại mỗi bước thời gian, các giá trị của cao độ mặt nước và vận tốc hạt nước tại mỗi điểm lưới trong miền tạo sóng (Ω_T) cần được điều chỉnh từng bước bằng việc sử dụng hàm tạo sóng $\Gamma(x)$. Khi đó lời giải từ hàm tạo sóng này được xác định bởi:

$$u^*(x_i) = \Gamma(x_i)u(x_i) + [1 - \Gamma(x_i)]u_e(x_i) \quad (22)$$

Trong đó $\Gamma(x) \in [0, 1]$ phải là một hàm đơn trị với $x_i \in \Omega_T$. Đại lượng đầu tiên bên vế phải của phương trình (22) đóng vai trò như lớp xấp hấp thu năng lượng sóng trong vùng tạo sóng; đại lượng thứ hai chứa thông số u_e , với u_e là lời giải chính xác hoặc lời giải giải tích, đóng vai trò như hàm nguồn trong vùng tạo sóng và đại lượng này giúp cho việc tạo sóng được chính xác.

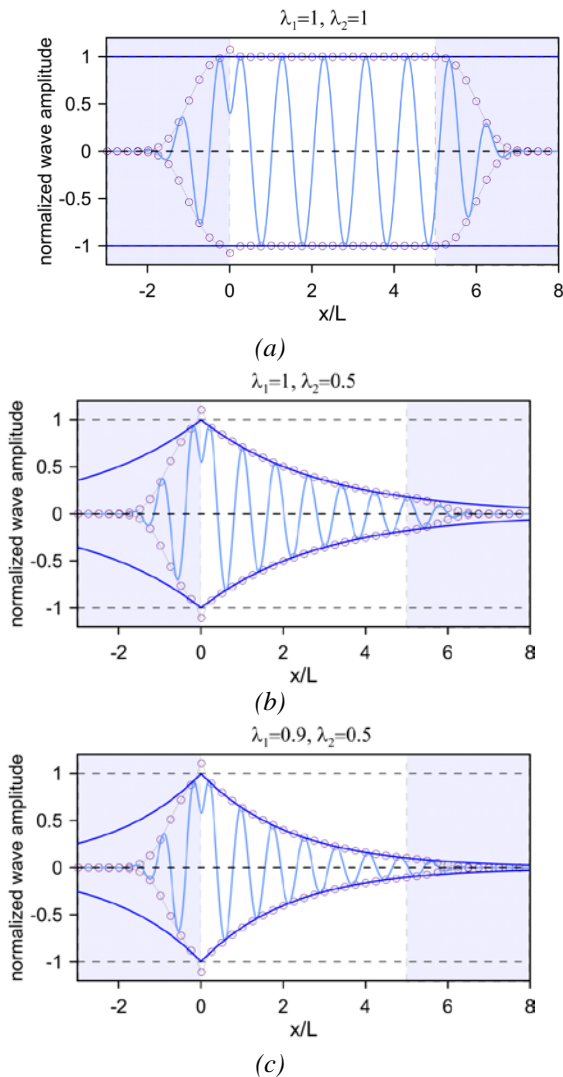
3.2.1. Sóng truyền trong hai lớp rỗng có độ rỗng khác nhau

Thí nghiệm này được tiến hành cho trường hợp sóng truyền trong môi trường có hai lớp rỗng với độ rỗng khác nhau. Hình 1 cho thấy biên độ sóng từ mô hình số phù hợp với biên độ sóng từ lời giải giải tích ($\exp(-k_i x)$), với k_i là phần ảo của số sóng phức $k = k_r + ik_i$. Trường hợp thứ nhất (hình 1a) sóng truyền trong vùng nước thông thường, không bị suy giảm năng lượng ($\lambda_1 = \lambda_2 = 1$). Có thể thấy trong miền tính toán ($x = 0 \div 5L$) sóng hoàn toàn không bị suy giảm năng lượng.

Trường hợp thứ hai (hình 1b) sóng truyền phía trên môi trường thấm với lớp nước phía trên có độ rỗng $\lambda_1 = 1$ và lớp phía

dưới là môi trường thấm có độ rỗng $\lambda_2 = 0,5$. Trong trường hợp này càng xa vùng tạo sóng ($x=0$) biên độ sóng càng giảm, sự mất mát năng lượng sóng càng lớn.

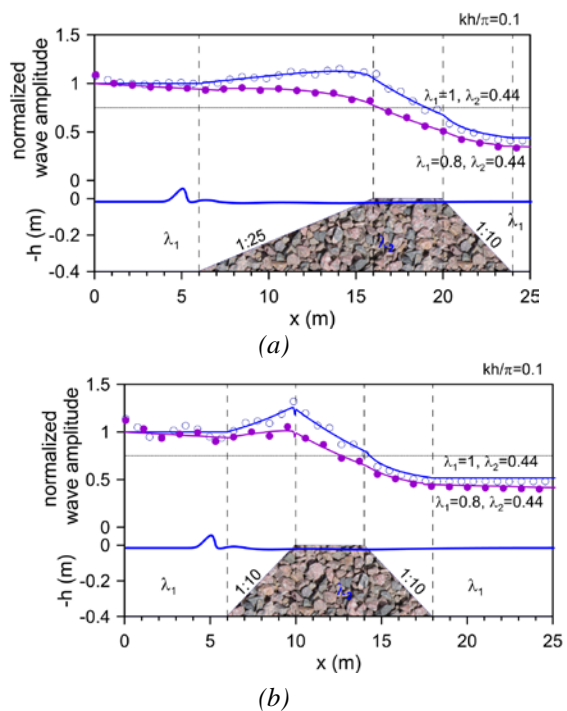
Hình 1c mô tả sóng truyền trong hai lớp rỗng có độ rỗng khác nhau với lớp trên có độ rỗng $\lambda_1 = 0,9$ và lớp dưới có độ rỗng $\lambda_2 = 0,5$. So sánh hình 1b và hình 1c cho thấy năng lượng sóng trong trường hợp thứ hai bị suy giảm nhiều hơn trong trường hợp thứ nhất. Điều này là tương đối hiển nhiên do ở lớp hai độ rỗng của hai trường hợp này như nhau nhưng lớp một của hình 1b là vùng nước thông thường trong khi lớp một của hình 1c là vùng nước có suy giảm năng lượng.



Hình 1. Sóng truyền trong hai môi trường thấm với độ rỗng khác nhau. Khoanh tròn là biên độ sóng từ mô hình số, đường nét liền là biên độ sóng từ lời giải giải tích.

3.2.2. Sóng truyền phía trên đê ngầm có mặt cắt ngang dạng hình thang

Sóng biên độ nhỏ được mô phỏng lan truyền phía trên đê ngầm rỗng cho hai trường hợp đê có mái dốc khác nhau. Trường hợp thứ nhất mái dốc phía trước và phía sau lần lượt là $m_t = 1:25$, $m_s = 1:10$; Trường hợp thứ hai mái dốc phía trước và phía sau lần lượt là $m_t = 1:10$, $m_s = 1:10$. Trong cả 2 trường hợp, lớp nước phía trên đê $h_1 = 0,1m$, chiều cao của đê $h_2 = 0,3m$, bề rộng đỉnh đê $b = 4m$. Đê được đặt trong vùng nước nông với $kh = 0,1\pi$. Mỗi dạng mặt cắt ngang đều được mô phỏng với hai trường hợp lớp nước phía trên có độ rỗng khác nhau ($\lambda_1 = 1; 0,8$). Trong cả hai trường hợp đê ngầm đều có độ rỗng $\lambda_2 = 0,44$.



Hình 2. Sóng truyền phía trên đê ngầm rỗng. Khoanh tròn là biên độ sóng từ mô hình số, đường nét liền là biên độ sóng từ lời giải giải tích.

Hình 2a mô phỏng sóng truyền phía trên đê ngầm có mái dốc phía trước thoải ($m_t = 1:25$). Trường hợp một khi độ rỗng lớp phía trên $\lambda_1 = 1$, chiều cao sóng không đổi từ vùng tạo sóng ($x=0m$) cho tới khi gặp chân đê ($x=6m$). Khi sóng bắt đầu gặp đê ngầm, chiều cao sóng tăng nhẹ từ chân đê

tới đỉnh đê ($x = 15m$) do độ sâu nước giảm. Phía trên đỉnh đê ($x = 16 \div 20m$) chiều cao sóng giảm dần chứ không duy trì hoặc tăng tiếp do ảnh hưởng của độ rỗng đê phía dưới. Khi sóng truyền phía sau đê ($m_s = 1:10$), độ sâu nước tăng dần, chiều cao sóng tiếp tục suy giảm. Trong trường hợp thứ hai khi lớp nước phía trên là môi trường có suy giảm năng lượng, chiều cao sóng giảm dần từ vùng tạo sóng, đặc biệt cả khi sóng truyền phía trên vùng có độ sâu giảm dần ($x = 6 \div 15m$).

Hình 2b miêu tả hiện tượng sóng tương tự như trong hình 2a. Tuy nhiên do mái dốc phía trước đê trong trường hợp này dốc hơn ($m_t = 1:10$) nên chiều cao sóng phía trước đê dâng cao hơn. Có thể nhận thấy trong trường hợp này lời giải số không hoàn toàn trùng với lời giải giải tích do mái dốc dốc hơn trường hợp trên Hình 2a, tính phi tuyến của sóng lớn hơn và phản xạ của sóng trên mái dốc lớn hơn.

3. Kết luận

Trong nghiên cứu này tác giả đã tiến hành mô phỏng sóng nước nông lan truyền trong hai lớp rỗng cũng như sóng lan truyền phía trên đê ngầm kết cấu rỗng. Mô hình có ưu điểm là có thể mô phỏng sóng trong nhiều trường hợp khác nhau ở vùng nước nông như sóng truyền trong hai lớp rỗng, sóng truyền phía trên lớp rỗng hoặc phía trên đê ngầm kết cấu rỗng. Các kết quả mô phỏng bằng mô hình số cho thấy sự phù hợp với lời giải giải tích. Mặc dù mô hình toán có xét tới tính phi tuyến của sóng nhưng mô hình số trong nghiên cứu này mới chỉ giới hạn trong việc mô phỏng sóng tuyến tính và cần được cải thiện trong các nghiên cứu tiếp theo □

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này nhận được sự tài trợ từ đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường của Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, mã số KH1811.

Tài liệu tham khảo

- [1] Cruz, E.C., Isobe, M., Watanabe, A. (1997), *Boussinesq equations for wave transformation on porous beds*, Coastal Engineering 30, pp. 125–156;
- [2] del Jesus, M., Lara, J.L., Losada, I.J. (2012), *Three-dimensional interaction of waves and porous structures. Part I: numerical model formulation*, Coastal Engineering 64, pp. 57–72;
- [3] Engsig-Karup, A., Hesthaven, J., Bingham, H. and Madsen, P. (2006), *Nodal DG-FEM solutions of high-order Boussinesq type equations*, Journal of Engineering Math, 46, pp. 351–370;
- [4] Eskilsson, C., Sherwin, S. J. and Bergdahl, L. (2006), *An unstructured spectral/HP element model for enhanced Boussinesq-type equations*, Coastal Engineering 53, pp. 947–963;
- [5] Hsiao, S.-C., Liu, P.L.-F., Chen, Y. (2002), *Nonlinear water waves propagating over a permeable bed*, Proceedings of the Royal Society of London, A 458, pp. 1291–1322;
- [6] Jacobsen, N. G., Fugrman, D. R. and Fredoe, J. (2012), *A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®*, International Journal for numerical methods in fluids, 70, pp. 1073–1088;
- [7] Lara, J.L., del Jesus, M., Losada, I.J. (2012), *Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures. Part II: experimental validation*, Coastal Engineering 64, pp. 26–46;
- [8] Larsen, J. and Dancy, H. (1983), *Open boundaries in short wave simulation – a new approach*, Coastal Engineering, 7, pp. 285–297;
- [9] Lee, C. and Suh, K.D. (1998), *Internal generation of waves for time-dependent mild-slope equations*, Coastal Engineering, 34, pp. 35–57;
- [10] Lee, C., Vu, V.N., Jung, TH. (2018), *Extended Boussinesq equations for waves in two porous layers*, 36th International Conference on Coastal Engineering, Baltimore, Maryland, USA;
- [11] Liu, P.L.-F., Wen, J. (1997), *Nonlinear diffusive surface waves in porous media*, Journal of Fluid Mechanics, 347, pp. 119–139;
- [12] Lynett, P.J., Liu, P.L.-F., Losada, I.J. (2000), *Solitary wave interaction with porous breakwaters*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 126 (6), pp. 314–322;
- [13] Madsen, P. A., Bingham, H. B. and Schaffer, H. A. (2003), *Boussinesq-type formulations for fully nonlinear and extremely dispersive water waves: derivation and analysis*, The Royal society, 459, pp. 1075–1104;
- [14] Nguyễn Anh Tiên, Trịnh Công Dân, Lại Phước Quý, Thiệu Quang Tuấn (2018), *Nghiên cứu xây dựng phương pháp tính toán hệ số truyền sóng qua đê ngầm dạng rỗng bằng mô hình vật lý*, Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi, 46, pp. 24–34;
- [15] Thiệu Quang Tuấn, Đinh Công Sản, Lê Xuân Tú, Đỗ Văn Dương (2018), *Nghiên cứu hiệu quả giảm sóng của đê kết cấu rỗng trên mô hình máng*

- sóng. Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi, 49, pp. 95-102;
- [16] Wei, G., Kirby, J.T., Sinha, A. (1999), *Generation of waves in Boussinesq models using a source function method*, Coastal Engineering, 36, pp. 271-299;
- [17] Vidal, C., Losada, M.A., Medina, R., Rubio, J. (1988), *Solitary wave transmission through porous breakwaters*, 21st International Conference on Coastal Engineering. ASCE, pp. 1073-1083;
- [18] Vu, V.N., Lee, C., Jung, TH. (2015), *Internal generation of damped waves in linear shallow water equations*, Coastal Engineering, 104, pp. 13-25;
- [19] Vu, V.N., Lee, C., Jung, TH. (2015), *Extended Boussinesq equations for waves in porous media*, Coastal Engineering, 139, pp 85-97;
- [20] Wei, G., and Kirby, J. T. (1995), *Time-Dependent Numerical Code for Extended Boussinesq Equations*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 121(5), pp. 251-261.

Ngày nhận bài: 30/8/2019

Ngày chuyển phản biện: 3/9/2019

Ngày hoàn thành sửa bài: 24/9/2019

Ngày chấp nhận đăng: 1/10/2019