

# Lựa chọn mặt cắt ngang đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn cho đê chắn sóng tường đứng rỗng dạng ngấp dùm mô hình Flow-3D

## Selection of cross sections for solitary wave transmission efficient for submerged vertical porous breakwater using Flow-3D model

Phạm Văn Khôi

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Tác giả liên hệ: khoipv.ctt@vimaru.edu.vn

Ngày nhận bài: 1/11/2023; Ngày chấp nhận đăng: 15/11/2023

### Tóm tắt:

Biến đổi khí hậu gây xói lở bờ biển ngày càng nghiêm trọng, đặc biệt, tại những bãi biển, khu du lịch. Để bảo vệ bãi biển, đê chắn sóng tường đứng rỗng được lựa chọn vì tác dụng giảm sóng và ngăn xói lở. Tuy nhiên, do đặc thù bãi biển du lịch không cho phép che chắn nên đê rỗng phải có dạng ngấp. Do đó, chiều rộng đê rỗng phải tăng lên, làm phát sinh chi phí xây dựng. Bài báo đề xuất các mặt cắt ngang đê tường đứng rỗng dạng ngấp có cùng chiều rộng và lựa chọn mặt cắt ngang phù hợp đáp ứng hiệu quả chiết giảm chiều cao sóng. Mô hình số Flow-3D áp dụng cho đê rỗng với biên sóng đơn được sử dụng để mô phỏng 72 trường hợp tương tác sóng với đê rỗng dạng ngấp. Mặt cắt ngang được lựa chọn là loại đê chính – phụ, khoảng cách đê phụ tới đê chính bằng hai lần chiều rộng đê chính. Hệ thống đồ thị không thứ nguyên xác định thông số cụm đê rỗng chính – phụ theo chiều cao sóng đơn tới được thiết lập.

**Từ khóa:** Đê chắn sóng dạng ngấp; Đê chắn sóng rỗng; Đê chắn sóng tường đứng; Hiệu quả giảm sóng; Mô hình Flow-3D.

### Abstract:

Climate change is causing progressively severe coastal erosion, especially in beaches and tourist areas. Vertical porous breakwaters were chosen to protect the beaches for their effectiveness in reducing waves and preventing erosion. However, submerged vertical porous breakwaters must be applied due to the characteristics of beaches that do not allow shielding. Thus, the width of the porous breakwaters should be increased, incurring construction costs. This study proposes cross-sections of submerged vertical porous breakwaters that have the same width and determines the selected cross-section in those sections that effectively meets the wave height reduction. The Flow-3D numerical model with porous structures and solitary wave boundary conditions was used to simulate 72 scenarios of the interactions between solitary waves and submerged vertical porous breakwaters. The selected cross-section is a parallel configuration, where the distance between the two breakwaters is twice the width of the first breakwater. Dimensionless graph systems defining parallel breakwater parameters according to incoming solitary waves were established.

**Keywords:** Submerged breakwater; Porous breakwater; Vertical breakwater; Transmission efficient; Flow-3D model.

## 1. Giới thiệu

Đê chắn sóng rộng ngày càng được sử dụng rộng rãi ở Việt Nam và trên thế giới bởi tác dụng kép, vừa giảm chiều cao sóng tới vừa cho phép dòng chảy và bùn cát truyền qua [1]–[12]. Tại Indonesia, đê chắn sóng rộng dạng ngập hiệu quả trong bảo vệ bãi biển khỏi xói mòn, đồng thời, giữ được cảnh quan phục vụ du lịch [2]. Tại Việt Nam, đê rộng bằng hàng rào tre phát huy tính năng có thể bảo vệ rừng ngập mặn do cho phép bùn cát trao đổi qua kết cấu rộng vẫn bảo vệ được xói lở đường bờ biển Đồng bằng sông Cửu Long [3]. Với các bãi biển và hải đảo, đê rộng dạng ngập [2], [12], [13] được áp dụng vì ưu điểm không che chắn các cảnh quan du lịch. Tuy nhiên, hiệu quả chiết giảm sóng của đê rộng dạng ngập thường không cao do sóng vừa tràn qua đỉnh đê vừa truyền qua thân đê. Để tăng hiệu quả chiết giảm sóng, bề rộng đê rộng ngập cần tăng kích, dẫn đến tăng chi phí xây dựng công trình [10]. Vì vậy, yêu cầu đặt ra, với cùng một bề rộng đê rộng ngập cho trước cần lựa chọn mặt cắt ngang đê sao cho hiệu quả chiết giảm sóng là phù hợp nhất. Nghiên cứu này đưa ra một số mặt cắt ngang điển hình của đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngập, phân tích đặc điểm chiết giảm chiều cao sóng đơn của từng mặt cắt và lựa chọn mặt cắt ngang hiệu quả nhất. Mô hình số Flow-3D được sử dụng để mô phỏng ảnh hưởng của các thông số mặt cắt ngang đê rộng, chiều cao sóng tới theo các kích bản khác nhau. Hệ thống đồ thị không thứ nguyên được xây dựng để thực hành tính toán xác định các thông số của đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngập đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn.

## 2. Mô hình Flow-3D

Mô phỏng số trong nghiên cứu này được thực hiện bởi mô hình Flow-3D, thuộc họ mô hình mô phỏng động lực học dòng chảy (Computational Fluid Dynamics – CFD). Đây

là mô hình được sử dụng rộng rãi trong mô phỏng cơ lưu chất ứng dụng thuộc công nghiệp cũng như học thuật. Trong mô hình, chất lỏng được coi là không nén và giả sử là chất lỏng Newton. Mô hình Flow-3D sử dụng hệ phương trình chủ đạo là hệ phương trình ba chiều Navier-Stokes. Phương pháp sai phân hữu hạn và phương pháp thể tích hữu hạn được sử dụng để giải phương trình bảo toàn khối lượng và bảo toàn động lượng đối với kết cấu rộng:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \frac{-\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} - R_p \quad (2)$$

Trong đó:  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$  là toán tử vi phân,  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  tương ứng là vận tốc dòng chảy theo các phương  $x, y, z$ ;  $\rho$  là khối lượng riêng nước;  $p$  là áp suất;  $\mathbf{g}$  là gia tốc trọng trường ( $9,81 \text{ m/s}^2$ );  $\nu$  là hệ số nhớt động học ( $\nu = \mu/\rho$ ,  $\mu$  là hệ số nhớt động lực); và  $R_p$  là tổn thất dòng chảy trong kết cấu rộng.

Tổn thất này được xác định theo nguyên lý lực kéo bão hòa Forchheimer [5] bao gồm thành phần tổn thất dòng chảy tầng và tổn thất dòng chảy rối tương ứng trong công thức sau:

$$R_p = \alpha_l \nu \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3} \mathbf{u} + \alpha_t \frac{1-\lambda}{\lambda^3} \mathbf{u} |\mathbf{u}| \quad (3)$$

Trong đó:  $\lambda$  là độ rộng;  $\alpha_l$  và  $\alpha_t$  tương ứng là hệ số sức cản do chảy tầng và chảy rối được xác định từ thí nghiệm kiểm chuẩn mô hình số với mô hình vật lý.

Nghiên cứu này sử dụng sóng đơn là điều kiện biên trái của mô hình. Sau đó sóng đơn lan truyền theo thời gian vào miền tính toán tương tác với kết cấu rộng và ra ngoài biên phải. Hình dạng sóng đơn là một con sóng có chiều dài lớn, thông số thiết lập đơn giản là chiều sâu nước và chiều cao sóng. Vì thế, sóng đơn được sử dụng để xác định đặc trưng của kết cấu rộng nó tương tác [9], [11]. Lý thuyết sóng đơn của McCowan [14] được sử dụng trong mô hình Flow-3D.

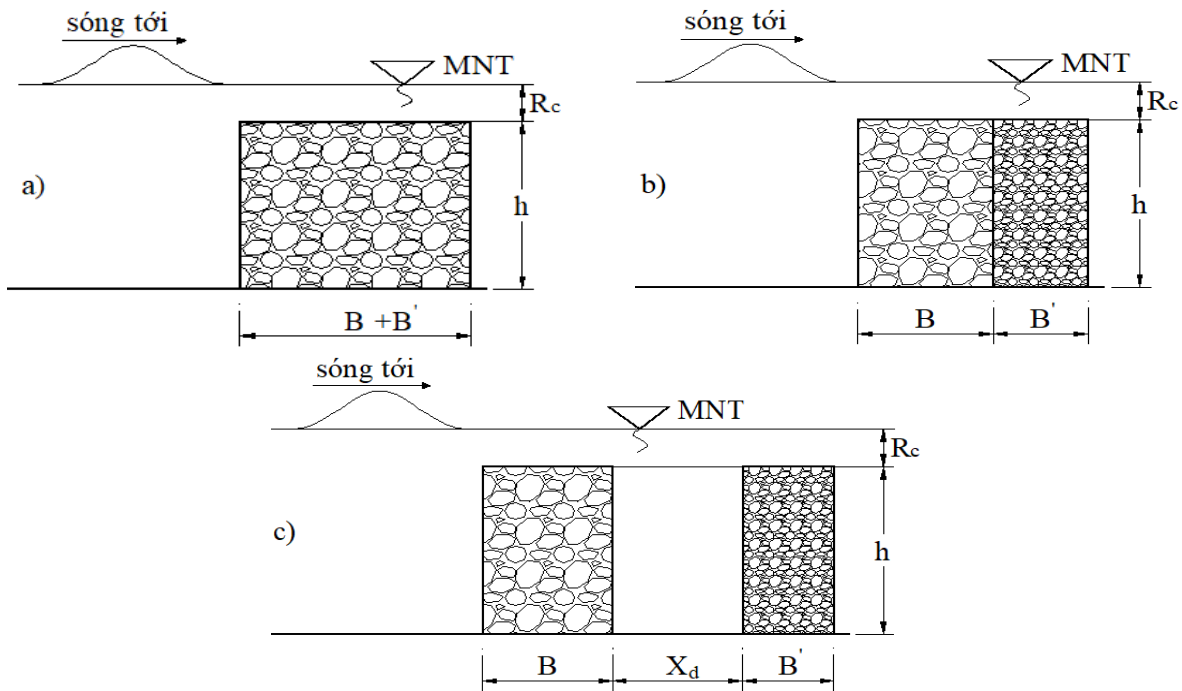
### 3. Lựa chọn mặt cắt ngang đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn cho đê chắn sóng tường đứng rỗng dạng ngập

#### 3.1. Thiết lập các mặt cắt ngang điển hình và mô phỏng số

Tác dụng chiết giảm sóng của đê chắn sóng rỗng được thể hiện bằng thành phần tổn thất dòng chảy  $R_p$  trong phương trình động lượng (2). Giá trị này được xác định theo phương trình (3) dựa vào độ rỗng  $\lambda$  của đê. Với môi trường nước,  $\lambda = 1$ , không có tổn thất xảy ra  $R_p = 0$ , sóng lan truyền giữ nguyên năng lượng. Khi gặp môi trường đê rỗng,  $\lambda < 1$ , làm phát sinh giá trị  $R_p$  trong (2), tổn thất phát

sinh và chiều cao sóng suy giảm. Khi chiều rộng đê tăng lên, môi trường đê rỗng nơi có  $\lambda < 1$  ngày càng tăng, dẫn đến chiều cao sóng ngày càng giảm [10]. Điều này cũng chứng minh sóng truyền qua đê có độ rỗng nhỏ hơn sẽ bị tổn thất năng lượng nhiều hơn, chiều cao sóng truyền qua nhỏ hơn. Nhưng chiều rộng đê không thể quá lớn, sẽ phát sinh khối lượng gây tổn kém. Vì vậy, cần nghiên cứu đưa ra cấu tạo đê vừa đáp ứng chiều rộng đê không quá lớn vừa đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng.

Theo yêu cầu trên và dựa vào bản chất vật lý – toán học đã phân tích của đê rỗng, ba mặt cắt ngang điển hình được sử dụng trong nghiên cứu này có cấu tạo hình học được thể hiện như Hình 1.

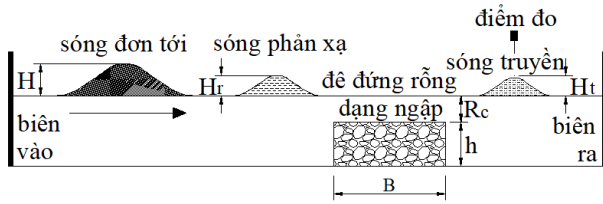


**Hình 1.** Các mặt cắt ngang điển hình sử dụng trong mô phỏng số.

a) Loại 1: Đê đơn, b) Loại 2: Đê kép, c) Loại 3: Đê chính – phụ.

Trong Hình 1,  $B$  là bề rộng đê chính;  $B'$  là bề rộng đê phụ;  $h$  là chiều sâu nước;  $R_c$  là chiều cao lưu không đê;  $X_d$  là khoảng cách đê phụ với đê chính. Ba mặt cắt ngang đê rỗng có cùng bề rộng đê,  $(B + B')$ , nên được coi là tương đương về mặt khối lượng kết cấu, chỉ khác cấu tạo độ rỗng và bố trí hình học. Hình 1a thể hiện cấu tạo đê loại 1, đê đơn, với độ rỗng  $\lambda = 0,55$ . Hình 1b thể hiện đê loại 2,

chia bề rộng đê thành hai phần bề rộng  $B$  và  $B'$  đặt cạnh sát nhau tương ứng với  $\lambda = 0,55$  và  $\lambda = 0,45$ , gọi là đê kép. Hình 1c thể hiện cấu tạo đê loại 3, gồm hai phần bề rộng đê  $B$  và  $B'$  đặt cách nhau một khoảng  $X_d$ , gọi là đê chính – phụ. Các mặt cắt ngang đê trên được thiết lập trong miền tính toán mô hình số được thể hiện trên Hình 2.



**Hình 2.** Thiết lập mô hình số Flow-3D mô phỏng hiệu quả chiết giảm sóng đơn 03 loại mặt cắt ngang đê rộng tường đứng dạng ngập.

Trong Hình 2, biên vào là biên tạo sóng đơn, biên ra là biên sóng ra khỏi miền tính toán. Sóng đơn tới đi từ biên vào miền tính toán gặp đê rộng ngập bị phản xạ lại một phần ( $H_r$ ) và truyền qua đê một phần ( $H_t$ ). Điểm đo sóng truyền được đặt tại vị trí phù hợp sau đê rộng ngập 5 m để có thể đo được trọn vẹn sóng truyền qua đê. Hiệu quả chiết giảm sóng đơn được xác định bằng tỷ lệ phần trăm chiều cao sóng suy giảm so với chiều cao sóng tới, tức là  $(H - H_t)/H = 1 - H_t/H = 1 - k_t$ . Vì vậy, trong nghiên cứu này, có thể xét hiệu quả chiết giảm sóng thông qua hệ số truyền sóng  $k_t$ . Hệ số cản chảy tầng  $\alpha_t = 10000$  và cản rối  $\alpha_r = 80$  được lấy theo thí nghiệm kiểm chuẩn mô hình trong tài liệu [11], hệ số nhớt động lực  $\mu = 0,00104$  kg/ms, khối lượng riêng của nước  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, đường kính viên đá  $d = 5$  cm. Thí nghiệm số được tiến hành với 03 chiều cao sóng đơn, 03 loại mặt cắt ngang đê và 04 chiều cao lưu không, được thể hiện trong Bảng 1. Như vậy, tổng cộng có 36 kịch bản mô phỏng được tiến hành trong bước nghiên cứu này.

**Bảng 1.** Các thông số được sử dụng để mô phỏng.

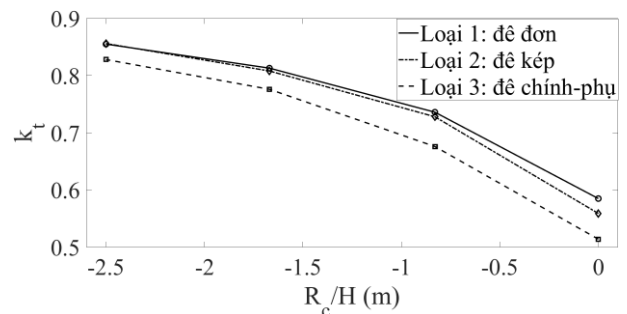
$B$ (cm)	30			
$B'$ (cm)	20			
$X_d$ (cm)	30			
$\lambda$	0,55	0,45		
$R_c$ (cm)	-15	-10	-5	0
$h$ (cm)	45	50	55	60
$H$ (cm)	6	9	12	

Trong Bảng 1, chiều sâu nước ban đầu  $h = 45$  cm tương ứng với chiều cao lưu không  $R_c = 0$

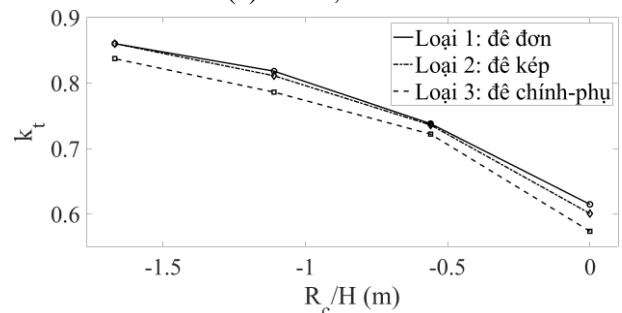
cm. Sau đó, chiều sâu nước tăng dần đến 50 cm, 55 cm và 60 cm tương ứng với chiều cao lưu không -5 cm, -10 cm, và -15 cm. Chiều cao lưu không mang giá trị âm thể hiện đê dạng ngập. Với đê loại 3, khoảng cách đê phụ so với đê chính  $X_d$  ban đầu được giả thiết bằng chiều rộng đê chính ( $B$ ).

### 3.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận

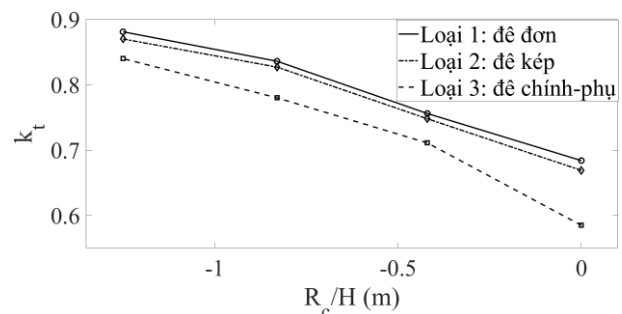
Hình 3 thể hiện kết quả mô phỏng số cho 36 trường hợp tương tác sóng đơn tới với 03 loại kết cấu mặt cắt ngang đê tường đứng rộng dạng ngập.



(a)  $H = 0,06$  m.



(b)  $H = 0,09$  m.



(c)  $H = 0,12$  m.

**Hình 3.** Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của chiều cao lưu không tương đối  $R_c/H$  tới hệ số truyền sóng đơn  $k_t$  của 03 loại đê tường đứng rộng dạng ngập. Ký hiệu điểm: Hình tròn là loại 1, hình thoi là loại 2, hình vuông là loại 3.

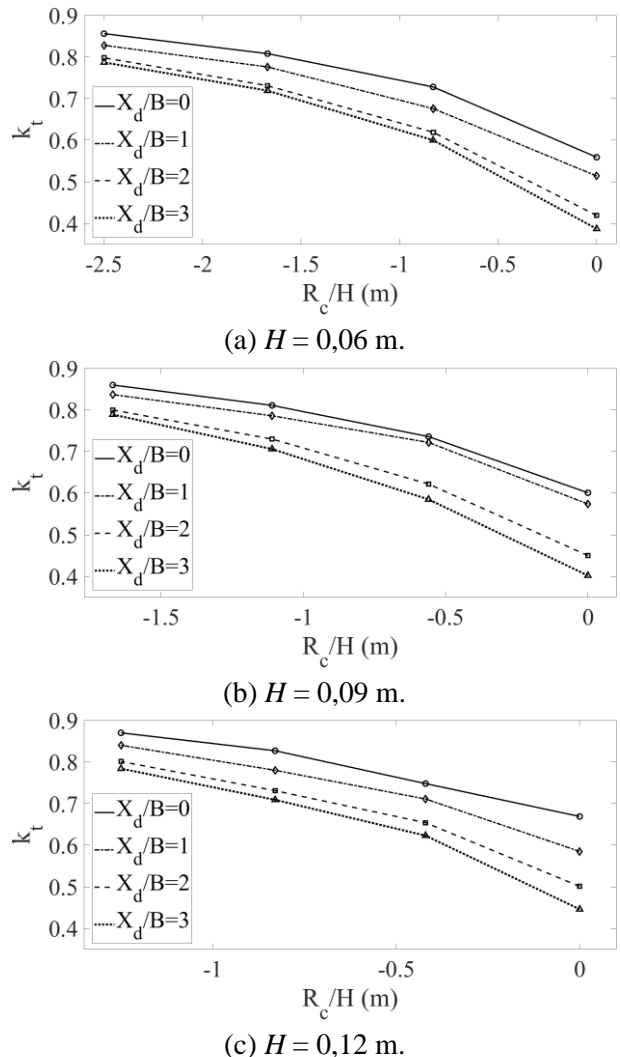
Trên Hình 3, trục hoành thể hiện giá trị chiều cao lưu không tương đối  $R_c/H$ , trục tung thể

hiện giá trị hệ số truyền sóng đơn  $k_t$ . Giá trị  $k_t$  càng nhỏ thể hiện hiệu quả chiết giảm sóng càng lớn. Có thể thấy tổng quát trên Hình 3, khi chiều cao đê tăng, hiệu quả chiết giảm sóng càng tăng, đối với cả 03 loại mặt cắt ngang và 03 chiều cao sóng tới. Điều này hoàn toàn phù hợp về mặt bản chất vật lý.

Cụ thể, hiệu quả chiết giảm sóng của đê kép (đường nét chấm gạch) tốt hơn đê đơn (đường nét liền). Điều này hoàn toàn phù hợp vì đê kép có phần đê phụ  $B'$  với độ rỗng nhỏ hơn phần đê chính. Tuy nhiên, tác dụng của độ rỗng này khá nhỏ, chỉ thể hiện rõ với sóng có độ phi tuyến lớn,  $H = 0,12$  m (Hình 3c), khi đường nét chấm gạch nằm bên dưới đường nét liền một cách rõ rệt. Đối với chiều cao sóng tới nhỏ,  $H = 0,06$  m (Hình 3a) và  $H = 0,09$  m (Hình 3b), ảnh hưởng của phần đê phụ  $B'$  là không lớn, thể hiện trên hình vẽ bằng các điểm trùng nhau ở những trường hợp chiều cao lưu không lớn và khoảng cách hai đường gần sát nhau. Có thể thấy, hiệu quả chiết giảm sóng của đê loại 3 chính – phụ khi đường nét đứt nằm dưới tách biệt hoàn toàn với đường nét liền và nét chấm gạch của đê đơn và đê kép trên Hình 3(a, b, c). Hiệu quả chiết giảm sóng lớn nhất thể hiện trên Hình 3c, chiều cao lưu không  $R_c = 0$  cm, khi đê loại 3 chiết giảm 9,9% và 8,4% tương ứng so với đê loại 1 và loại 2. Kết luận rằng hiệu quả chiết giảm chiều cao sóng đơn của đê loại 3 chính – phụ là tốt nhất. Cũng có thể khẳng định cấu tạo mặt cắt ngang đê chính – phụ là mặt cắt ngang hiệu quả hơn so với cấu tạo hai loại mặt cắt ngang còn lại.

Nhận thấy, cấu tạo đê kép tương ứng với trường hợp khoảng cách đê phụ với đê chính  $X_d = 0$ , cấu tạo đê chính – phụ là trường hợp  $X_d = B$ , tức là  $X_d/B = 1$ ,  $B$  là bề rộng đê chính. Vì vậy, tác giả tiếp tục khảo sát ảnh hưởng của khoảng cách đê chính – phụ  $X_d$  đến hiệu quả chiết giảm sóng đơn. Cụ thể, hai kịch bản khoảng cách tương đối  $X_d/B = 2$  và  $X_d/B = 3$  kết hợp với 04 chiều cao lưu không đê, 03 chiều cao sóng tới được mô phỏng, tổng cộng

có 24 trường hợp được mô phỏng thêm trong nghiên cứu này. Như vậy, kết hợp với hai kịch bản khoảng cách tương đối  $X_d/B = 0$  và  $X_d/B = 1$ , để thể hiện ảnh hưởng của khoảng cách tương đối đê chính – phụ, có tất cả 48 trường hợp mô phỏng. Hình 4 thể hiện ảnh hưởng của sự gia tăng khoảng cách đê phụ tới hiệu quả chiết giảm sóng đơn tương ứng với 04 trường hợp chiều cao lưu không đê tương đối  $R_c/H$  và 03 trường hợp chiều cao sóng đơn tới.



**Hình 4.** Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của khoảng cách tương đối đê phụ  $X_d/B$  tới hệ số truyền sóng đơn  $k_t$  của 04 chiều cao lưu không đê đối với mặt cắt ngang loại 3: đê chính – phụ tường đứng rỗng dạng ngập. Ký hiệu điểm: Hình tròn là  $X_d/B = 0$ , hình thoi là  $X_d/B = 1$ , hình vuông là  $X_d/B = 2$ , hình tam giác là  $X_d/B = 3$ .

Trên Hình 4, có thể thấy hiệu quả chiết giảm sóng càng tăng khi khoảng cách tương đối đê chính – phụ tăng, biểu hiện bằng các đường

nét chấm gạch ( $X_d/B = 1$ ), đường nét đứt ( $X_d/B = 2$ ), và đường nét chấm ( $X_d/B = 3$ ) lần lượt nằm dưới đường nét liền ( $X_d/B = 0$ ). Cụ thể, có thể thấy đường nét chấm gạch ( $X_d/B = 1$ ) khá gần đường nét liền ( $X_d/B = 0$ ) nhưng đường nét đứt ( $X_d/B = 2$ ) cách khá xa đường nét liền ( $X_d/B = 0$ ) và tách biệt hẳn với đường nét chấm gạch ( $X_d/B = 1$ ). Điều này chứng tỏ hiệu quả chiết giảm sóng của trường hợp  $X_d/B = 1$  là không cao, nhưng hiệu quả chiết giảm sóng của trường hợp  $X_d/B = 2$  là tốt hơn hẳn. Tương tự, có thể thấy trường hợp  $X_d/B = 3$  không tốt hơn nhiều so với trường hợp  $X_d/B = 2$ . Như vậy, có thể kết luận rằng, với trường hợp đê chính – phụ, khoảng cách đê càng tăng, hiệu quả chiết giảm sóng càng tăng. Tuy nhiên, tùy thuộc vào mặt bằng bố trí đê chắn sóng với bờ, khoảng cách này đảm bảo hiệu quả chiết giảm sóng tốt khi bằng hai lần bề rộng đê chính. Việc xác định thông số của cụm đê chính – phụ theo hiệu quả chiết giảm sóng đơn được trình bày trong phần tiếp theo.

#### 4. Xác định thông số đê chính – phụ đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn

Để thực hành xác định thông số cụm đê chính – phụ, cần xây dựng phương trình hồi quy bậc hai của các điểm rời rạc có dạng sau:

$$y = f(x) = ax^2 + bx + c = 0 \text{ với } a \neq 0 \quad (4)$$

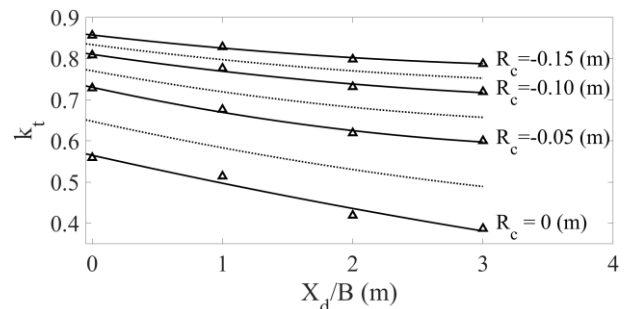
Các hệ số  $a, b, c$  sau khi áp dụng nguyên lý “bình phương tối thiểu” là nghiệm hệ phương trình tuyến tính như sau:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

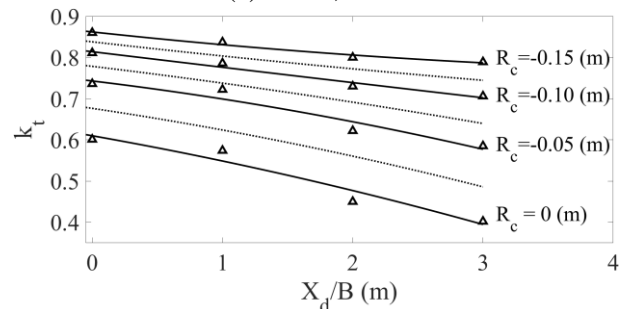
Trong đó:  $x_i, y_i$  là cặp số liệu rời rạc ( $X_d/B, k_t$ ) thứ  $i, N$  là tổng số cặp số liệu rời rạc. Trong nghiên cứu này,  $N = 4$  cặp tương ứng với mỗi chiều cao lưu không  $R_c$ , gọi là đường hồi quy chính, nên có tất cả 04 đường hồi quy chính. Để tăng số lượng chiều cao lưu không tính

toán, 03 đường hồi quy nội suy được xác định theo nguyên tắc trung bình của 04 đường hồi quy chính. Vậy, ứng với mỗi trường hợp chiều cao sóng tới  $H$ , xác định được 04 phương trình đường hồi quy chính và 03 phương trình đường hồi quy nội suy.

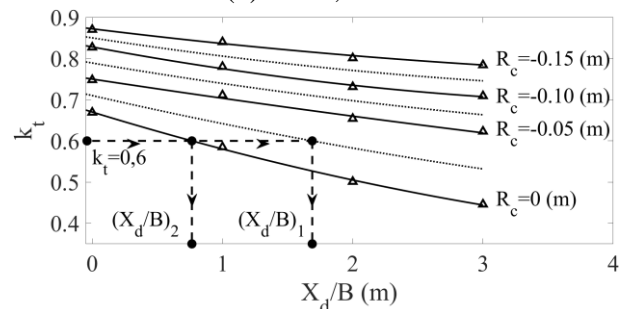
Hình 5 dưới đây là hệ thống đồ thị thể hiện 48 điểm rời rạc ( $X_d/B, k_t$ ) tương ứng với 03 chiều cao sóng tới 0,06 m, 0,09 m và 0,12 m, 04 chiều cao lưu không 0 m, -0,05 m, -0,1 m, và -0,15 m, 12 đường hồi quy chính (nét liền), 09 đường hồi quy nội suy (nét chấm).



(a)  $H = 0,06$  m.



(b)  $H = 0,09$  m.



(c)  $H = 0,12$  m.

**Hình 5.** Hệ thống đồ thị xác định thông số cụm đê chính – phụ đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn cho các chiều cao sóng: (a)  $H = 0,06$  m, (b)  $H = 0,09$  m, (c)  $H = 0,12$  m.

Dựa vào hệ thống đồ thị trên, tương ứng với mỗi chiều cao sóng tới, từ giá trị  $k_t$  mong muốn có thể xác định được chiều cao lưu không  $R_c$  và khoảng cách tương đối đê phụ

với đê chính  $X_d/B$ . Đối với các trường hợp chiều cao sóng tới khác, có thể xác định thông số theo phương pháp nội suy hay ngoại suy. Thông số thực tế của sóng và kết cấu đê tường đứng rỗng dạng ngập được xác định theo tỷ lệ mô hình. Hình 5c thể hiện ví dụ xác định thông số đê chính – phụ theo hệ số truyền sóng  $k_t = 0,6$ , tức là hiệu quả chiết giảm sóng 40%. Từ giá trị  $k_t = 0,6$  trên trục tung, giống mũi tên sang phải theo đường nét đứt gặp đường hồi quy chính ( $Rc = 0$  m) và đường hồi quy nội suy ( $Rc = -0,025$  m). Từ hai điểm trên hai đường hồi quy, giống mũi tên xuống gặp trục hoành tại hai giá trị khoảng cách tương đối đê chính – phụ  $(X_d/B)_1 = 1,689$  và  $(X_d/B)_2 = 0,765$ . Theo phương pháp giải tích, điểm  $(X_d/B)_1$  chính là nghiệm của phương trình đường thẳng song song trục hoành đi qua điểm có  $k_t = 0,6$  với đường hồi quy nội suy ứng với  $Rc = -0,025$  m. Tương tự, điểm  $(X_d/B)_2$  chính là nghiệm của phương trình đường thẳng song song trục hoành đi qua điểm có  $k_t = 0,6$  với đường hồi quy chính ứng với  $Rc = 0$  m. Vậy, với  $k_t = 0,6$  có hai lựa chọn cấu tạo đê chắn sóng rỗng dạng ngập:  $Rc = -0,025$  m và  $X_d = 1,689B$ , hoặc  $Rc = 0$  m và  $X_d = 0,765B$ . Phương án lựa chọn tối ưu được các nhà thiết kế đưa ra tùy theo mặt bằng không gian bố trí cho trường hợp cụ thể.

## 5. Kết luận

Bài báo trình bày 03 mặt cắt ngang điển hình đê chắn sóng tường đứng rỗng dạng ngập dựa theo đặc điểm cấu tạo và hình học. Mô hình số Flow-3D được sử dụng để mô phỏng số ảnh hưởng của cấu tạo mặt cắt ngang đê tới hiệu quả chiết giảm chiều cao sóng đơn. Các mô hình số được thiết lập và mô phỏng 72 trường hợp khác nhau về thông số sóng đơn tới và thông số đê rỗng dạng ngập. Kết quả đã chỉ ra rằng mặt cắt ngang chính – phụ đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn của đê chắn sóng tường đứng rỗng dạng ngập. Với mặt cắt ngang đê chính – phụ, khoảng cách giữa đê phụ đến đê chính càng lớn, hiệu quả chiết

giảm sóng càng cao. Tuy nhiên, khoảng cách từ đê phụ tới đê chính được khuyến nghị bằng hai lần bề rộng đê chính thì hiệu quả chiết giảm sóng là phù hợp. Hệ thống đê thị không thứ nguyên được thiết lập để thực hành xác định thông số đê chắn sóng tường đứng rỗng dạng ngập đối với mặt cắt ngang đê chính – phụ được lựa chọn. Trong nghiên cứu tiếp theo, điều kiện biên sóng thực có thể được áp dụng để khảo sát tương tác của sóng với mặt cắt ngang đê chắn sóng tường đứng rỗng dạng ngập chính – phụ.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT23-24.73.

## Tài liệu tham khảo

- [1] P. L.-F. Liu, P. Lin, K.-A. Chang, and T. Sakakiyama, “Numerical Modeling of Wave Interaction with Porous Structures,” *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, vol. 125, no. 6, pp. 322–330, Nov. 1999, doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1999)125:6(322).
- [2] E. Pradjoko, I. Bachtiar, N. Matalatta, and G. Sugihartono, “The Submerged Breakwater as Prototype of Coastal Protection in Gili Trawangan, Lombok, Indonesia,” *Procedia Eng.* vol. 125, pp. 284–290, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.041.
- [3] T. T. Quang and L. M. Trong, “Monsoon wave transmission at bamboo fences protecting mangroves in the lower mekong delta,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 101, Aug. 2020, Art. no. 102259, doi: 10.1016/j.apor.2020.102259.
- [4] P. Đ Hưng, T. Đ. Hòa, N. N. Nam, “Đê cọc rỗng mặt cắt hình móng ngựa - giải pháp công nghệ mới trong bảo vệ bờ biển,” *TC KH & CN TL*, số 69, 2021, bài số 6.
- [5] T. V. Tiếng, N. V. Khánh, N. P. Dung, “Nghiên cứu hiệu quả giảm sóng của kết cấu đê chắn sóng rỗng bằng phương pháp mô phỏng số,” *TC XD*, tr. 68–75, 4. 2021.
- [6] E. Jafari, M. M. Namin, and P. Badiei, “Numerical simulation of wave interaction

- with porous structures,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 108, Mar. 2021, Art. no. 102522, doi: 10.1016/j.apor.2020.102522.
- [7] E. Zhao, Y. Dong, Y. Tang, and X. Xia, “Performance of submerged semi-circular breakwater under solitary wave in consideration of porous media,” *Ocean Eng.*, vol. 223, Mar. 2021, Art. no. 108573, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108573.
- [8] L. H. Trung, N. V. Tuấn, T. T. Tùng, Đ. T. Linh, N. T. Duy, B. Dương, “Thí nghiệm đánh giá khả năng giảm sóng của cấu kiện bê tông rỗng,” *TCKHCN XD*, tập 15, số 3V, tr. 44–54, 7. 2021, doi: 10.31814/stce.nuce2021-15(3V)-04.
- [9] V. N. Vu and V. K. Pham, “Numerical simulation of wave overtopping of a vertical porous detached breakwater,” *GEOMATE*, vol. 23, no. 98, pp. 1-9 Oct. 2022, doi: 10.21660/2022.98.3447.
- [10] N.-M. Nguyen *et al.*, “The Influence of Crest Width and Working States on Wave Transmission of Pile–Rock Breakwaters in the Coastal Mekong Delta,” *JMSE*, vol. 10, no. 11, Nov. 2022, Art. no. 1762, doi: 10.3390/jmse10111762.
- [11] P. V. Khôi “Lựa chọn chiều cao đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng đơn của đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng,” *TC KHCN HH*, số 73, tr. 47–51, 1. 2023.
- [12] P. Wang, K. Fang, G. Wang, Z. Liu, and J. Sun, “Experimental and Numerical Study of the Nonlinear Evolution of Regular Waves over a Permeable Submerged Breakwater,” *JMSE*, vol. 11, no. 8, Aug. 2023, Art. no. 1610, doi: 10.3390/jmse11081610.
- [13] E. Repousis, I. Roupas, and C. Memos, “Wave Transmission over Rubble-Mound Submerged Breakwaters,” *JMSE*, vol. 11, no. 7, Jul. 2023, Art. no. 1346, doi: 10.3390/jmse11071346.
- [14] J. McCowan, “On the solitary wave,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philos. Mag. and J. of Sci.*, vol. 32, no. 194, pp. 45–58, Jul. 1891, doi: 10.1080/14786449108621390.