

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH FLOW3D ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG GIẢM SÓNG TRÀN CỦA KẾT CẤU KÈ DẠNG BẬC

Nguyễn Thành Luân, Phạm Ngọc Tú

Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển

Tóm tắt: Kết cấu kè dạng bậc đã được áp dụng ở một số công trình dọc ven biển Việt Nam. Dạng kết cấu này vừa có khả năng giảm sóng leo, sóng tràn, vừa có tính thẩm mỹ cao, phù hợp với các địa điểm ven biển khai thác dịch vụ du lịch, thương mại, phù hợp với mục tiêu chiến lược phát triển đa mục tiêu của công trình thủy lợi nói chung và công trình biển nói riêng. Nghiên cứu này sử dụng mô hình Flow-3D mô phỏng đánh giá khả năng giảm sóng tràn của kè kết cấu dạng bậc với chiều cao của mỗi bậc khác nhau trên cùng mái dốc $m = 3$ nhằm tìm chiều cao bậc phù hợp. Kết quả nghiên cứu cho thấy tỷ lệ giữa chiều cao bậc và chiều cao sóng nằm trong khoảng 0,2 đến 1 cho hiệu quả sóng tràn tốt nhất. Hệ số nhám mái trong khoảng 0,39 – 0,82; lưu lượng tràn lớn nhất giảm khoảng 50% so với kè mái nghiêng trơn và khoảng 35% so với kè dạng tường đứng.

Từ khoá: Công trình biển, kè mái nghiêng, kè bậc, Flow-3D, sóng tràn.

Summary: The stepped revetment structure has been applied in several works along the coast of Vietnam. This type of structure can reduce wave run-up and wave overtopping, and is highly aesthetic, suitable for coastal locations exploiting tourism and commercial services, suitable for the multi-purpose development strategy of hydraulic works in general and marine works in particular. This study uses the Flow-3D model to simulate and evaluate the wave overtopping reduction ability of stepped revetments with different heights of each step on the same slope $m = 3$ to find the appropriate step height. The research results show that the ratio between step height and wave height is in the range of 0.2 to 1 for the best wave overtopping efficiency. The slope roughness coefficient is in the range of 0.39 - 0.82; the maximum overtopping flow is reduced by about 50% compared to smooth slope revetments and about 35% compared to vertical wall revetments.

Keywords: Marine and coastal construction, slope revetment, stepped revetment, Flow-3D, wave overtopping.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các quá trình phát triển đô thị và tăng trưởng kinh tế, đặc biệt ở vùng ven biển, nhiều tài sản và cơ sở hạ tầng đã và đang bị ảnh hưởng bởi xói lở bờ biển và lũ lụt tiềm tàng do ảnh hưởng của biến đổi khí hậu và nước biển dâng. Những xu hướng rõ ràng này cho thấy nguy cơ thiệt hại và mất mát ngày càng tăng, đòi hỏi các cơ quan có thẩm quyền ven biển trên toàn thế giới cũng như Việt Nam phải thường xuyên đánh giá lại và có khả năng chuyển hướng các khái niệm thích ứng của họ đối với đường bờ biển liên quan, tức là xem xét lại các chiến lược và cơ sở

hạ tầng bảo vệ bờ biển. Kè bậc thang là kết cấu cơ sở hạ tầng bảo vệ bờ biển đẹp về mặt thẩm mỹ (ít nhất là từ quan điểm Kỹ thuật) gần đây đã thu hút được sự quan tâm của các cơ quan quản lý ven biển chủ yếu do các tác dụng phụ có lợi so với các công trình ven biển thông thường, tức là về các khía cạnh hiệu quả, khả năng tiếp cận, bảo trì và độ bền. Kè bậc đặc biệt thích hợp tại các khu đô thị ven biển, các khu du lịch ven biển do khả năng linh hoạt về mỹ quan, kỹ thuật, áp dụng được những nơi điều kiện địa hình, bãi biển ngắn, hạn chế. Những mái dốc này có thể tiếp cận dễ dàng và an toàn cho các hoạt động thương mại và du

Ngày nhận bài: 17/10/2024

Ngày thông qua phản biện: 22/11/2024

Ngày duyệt đăng: 02/12/2024

lịch, do vậy đáp ứng được mục tiêu đa chức năng của công trình ven biển.

Việc đánh giá khả năng giảm sóng tràn của dạng kết cấu kè bậc phụ thuộc nhiều vào kết quả đo đạc tại hiện trường hay trên mô hình vật lý và cho kết quả tương đối chính xác, đáng tin cậy. Tuy nhiên thực hiện việc đo đạc như trên gặp rất nhiều khó khăn như chi phí cao, khó thực hiện đo đạc liên tục trong thời gian dài và có nguy cơ nguy hiểm cho người đo đạc trong thời điểm sóng lớn. Bài báo này trình bày phương pháp nghiên cứu thông qua việc mô phỏng khả năng giảm sóng tràn của kết cấu kè bậc trên máy tính với mô hình thủy động lực học 3 chiều Flow-3D. Mô hình thương mại thủy động lực học 3 chiều Flow-3D được xây dựng bởi công ty Flow Scien INc. Trong những năm gần đây, mô hình này được sử dụng rộng rãi do khả năng xử lý được nhiều vấn đề thủy lực của dòng chảy.

2. PHƯƠNG PHÁP VÀ DỮ LIỆU NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này sử dụng mô hình Flow-3D mô phỏng khả năng giảm sóng tràn của kết cấu kè dạng bậc [1]. FLOW-3D là một phần mềm hỗ trợ mô phỏng các bài toán động lực học chất lỏng tính toán CFD (Computational fluid dynamics). Tương tự các phần mềm mô phỏng CFD khác, FLOW 3D sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn (FVM) và lấy phương trình hệ phương trình Navier – Stokes làm phương trình chủ đạo kết hợp cùng phương pháp thể tích chất lỏng VOF, rất phù hợp cho mô hình các dòng chảy có bề mặt thoáng.

Các mô phỏng số được thực hiện dựa trên phương trình Navier Stokes, được sử dụng để mô tả chuyển động của chất lỏng, giả sử chất lỏng không thể nén được; các phương trình của mô hình như sau:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

Trong đó:

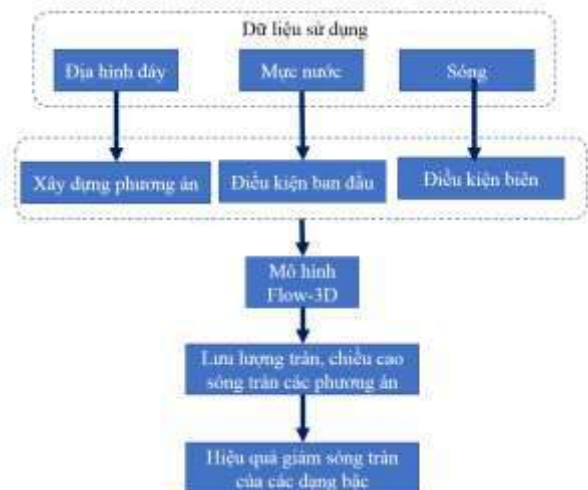
u, v và w là các thành phần vận tốc theo trục x, y, z,

ρ là khối lượng, ν là độ nhớt của chất lỏng,

p là áp lực, g là gia tốc trọng trường, t là thời gian.

Trong thực tế, dòng chảy tác dụng lên các công trình thủy lợi hầu hết là dòng chảy rối, đặc biệt là dòng chảy của sóng. Để giải được hệ phương trình Navier - Stokes hệ (1) và (2) mô hình dòng chảy rối được phát triển để mô tả được 6 thành phần ứng suất rối Reynolds. Mô hình dòng chảy rối RANS được sử dụng phổ biến nhất là mô hình dòng chảy rối hai phương trình k- ϵ .

Các bước nghiên cứu được tiến hành như sơ đồ Hình 1 các số liệu sẽ được thu thập. Sau khi thu thập, các số liệu địa hình đáy sẽ được sử dụng thiết kế mặt cắt kè sau đó xây dựng mô hình ba chiều. Số liệu mực nước và sóng sẽ được sử dụng để gán điều kiện ban đầu và điều kiện biên cho mô hình. Sau khi chạy mô hình, các số liệu về chiều cao sóng trước và sau kè sẽ được trích xuất để đánh giá hiệu quả giảm sóng của kè.



Hình 1: Sơ đồ nghiên cứu sử dụng mô hình FLOW-3D nghiên cứu kè bậc

2.2. Tài liệu sử dụng

2.2.1. Dữ liệu địa hình đáy biển

- Bình đồ địa hình 1/5.000 đo đạc năm 2018 do Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về động lực học sông biển thực hiện;
- Bản đồ địa hình tỷ lệ 1/50.000 do Tổng cục biển và Hải đảo đo đạc năm 2005
- Mặt cắt địa hình: dữ liệu được cắt từ bình đồ

địa hình và tính toán truyền sóng vào chân công trình phục vụ thiết kế mặt cắt kè cho khu vực nghiên cứu.

2.2.2. Dữ liệu sóng, mực nước

Các số liệu về mực nước được tra theo phụ lục B thuộc TCVN 9901-2023, mặt cắt số 32, mực nước thiết kế $h = 1,83\text{m}$ ứng với tần suất 3,33%.

Sóng tại vị trí nước sâu tính toán cho công trình cấp IV: $H_0 = 10,37\text{ m}$, $T_p = 12,27\text{s}$.

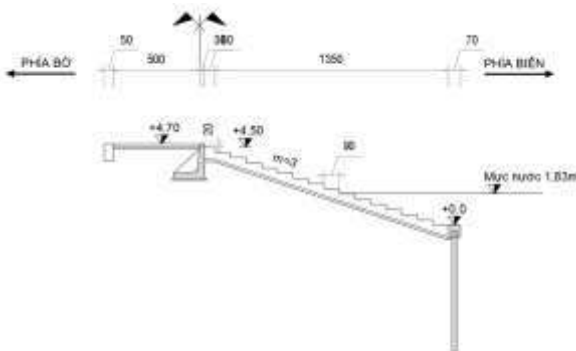
Dữ liệu sóng ngoài nước sâu được tính toán truyền vào chân công trình bằng mô hình SWAN-ONE. Kết quả chiều cao sóng, chu kỳ sóng tại chân công trình phục vụ làm biên đầu vào cho mô hình FLOW3D theo sơ đồ nghiên cứu (Hình 1).

2.3. Mặt cắt ngang kè và phương án tính toán

2.3.1. Các phương án tính toán

Dựa vào kết quả truyền sóng, tính toán mặt cắt ngang kè theo tiêu chuẩn TCVN 9901-2023, xác định được cao trình đỉnh kè thiết kế $Z_d = 4,7\text{m}$; mái dốc kè thiết kế $m = 3$.

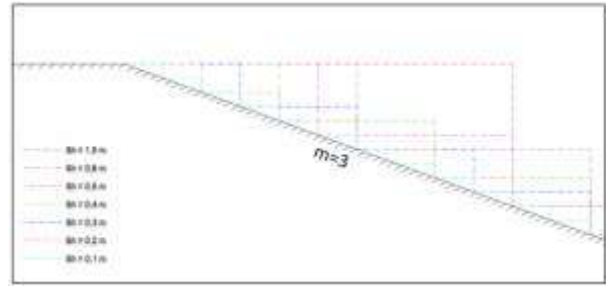
Nghiên cứu thực hiện thiết kế mặt cắt ngang kè bậc điển hình với cao trình đỉnh kè $+4,7\text{m}$, cao trình đỉnh mái bậc $+4,5\text{m}$, hệ số mái $m=3$, độ dốc địa hình nghiên cứu $i=2\%$ (Hình 2). Mực nước tính toán sử dụng trong nghiên cứu: $+1,83\text{m}$.



Hình 2: Mặt cắt ngang đại diện kè bậc nghiên cứu

Để đánh giá khả năng giảm sóng kè bậc, nghiên cứu này thực hiện đánh giá, so sánh khả năng giảm sóng của các chiều cao bậc khác nhau từ $Sh = 0,1\text{m}$ đến $Sh = 1\text{m}$. Đồng thời, so sánh với hai trường hợp kè tường đứng ($Sh \gg$) và kè mái nghiêng trường hợp mái trơn $Sh = 0$. Các

phương án mô phỏng được trình bày sơ đồ hoá tại Hình 3.



Hình 3: Các phương án kè bậc tính toán

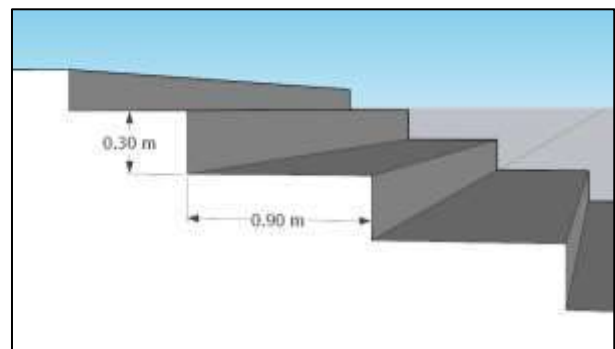
2.4. Thiết lập mô hình

2.4.1. Mô tả mô hình toán Flow-3D

Các chỉ số được sử dụng trong Flow-3D. Đơn vị lựa chọn là SI, nhiệt độ Celsius và nước được coi không nén được có trọng lượng riêng 1025 kg/lít , gia tốc trọng trường $9,81\text{ m/s}^2$. Mô hình rối Renormalized group (RNG) được sử dụng trong nghiên cứu này.

2.4.2. Xây dựng mô hình 3D cho kết cấu kè bậc

Để mô phỏng sóng tràn trên kết cấu kè dạng bậc, mô hình 3D của kè bậc được dựng trên địa hình đáy biển thực đo tại khu vực nghiên cứu. Phần mềm hỗ trợ Sketchup được sử dụng dựng 3D cho mô hình kè bậc Hình 4, và nhập trực tiếp vào mô hình Flow-3D.



Hình 4: Kết cấu kè bậc 3D được dựng đưa vào mô hình

2.4.3. Kích thước mô hình

Miền tính toán được mô phỏng tương ứng với điều kiện thực tế, tỷ lệ mô hình là 1:1 với các kích thước dài x rộng x cao tương ứng là $114\text{m} \times 2\text{m} \times 6,5\text{m}$. Để tăng độ chính xác của kết quả tính toán, tiến hành chia miền tính toán thành 2

Block: Phía biển và phía công trình. Trong đó phạm vi công trình được chia với kích thước mắt lưới nhỏ $0,05\text{m} \times 0,05\text{m} \times 0,05\text{m}$, phạm vi thượng hạ lưu công trình chia lưới rộng hơn ($0,15\text{m} \times 0,15\text{m} \times 0,15\text{m}$) để giảm thời gian tính toán.

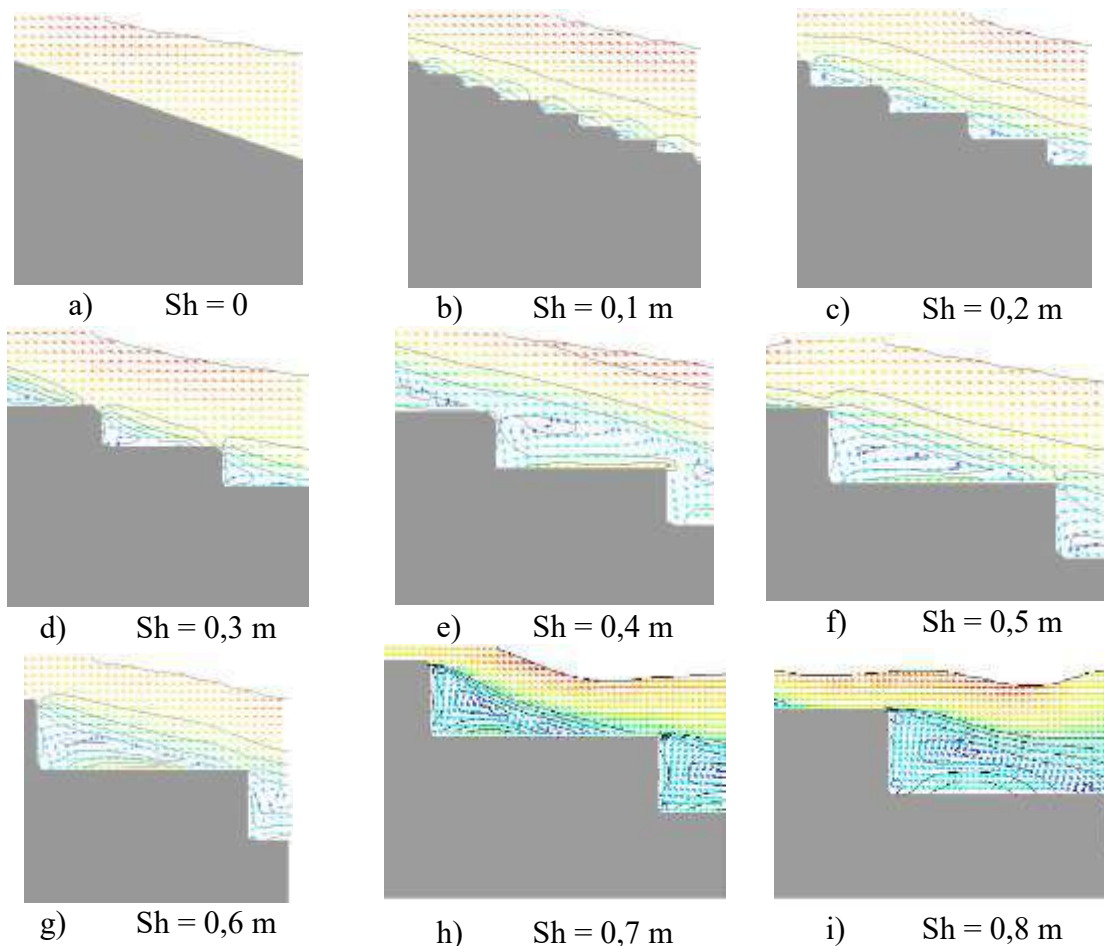
2.4.4. Điều kiện biên

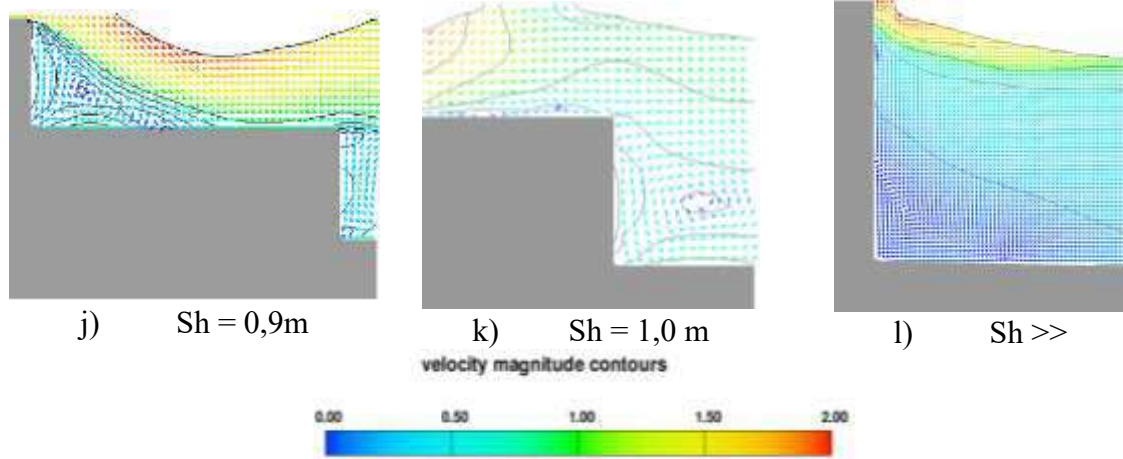
Xác định điều kiện biên được gán trong Flow 3D: Dòng chảy trong miền tính được đặt trong tọa độ đề các 6 mặt, với thứ tự lần lượt là: biên phía bờ (Xmin) được gán là điều kiện biên dòng chảy ra (Outflow), biên phía biển được gán là biên sóng dạng Linear Wave Definition với chiều cao sóng $H_s = 1,92\text{m}$, chu kỳ $T_p = 7,65\text{s}$ tương ứng sóng tại vị trí cách chân công trình 95m , mực nước $h = 1,83\text{m}$; Biên đáy Zmin được gán dạng tường (Wall); biên 2 bên và biên trên (Ymax, Ymin, Zmax) được gán dạng Symmetry.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Vận tốc dòng chảy

Vận tốc dòng chảy tại cùng một thời điểm theo các phương án bậc khác nhau cho kết quả khác nhau (Hình 5). Với mái trơn $Sh=0$ dòng chảy leo lên mái và tràn qua đỉnh kè với vận tốc khoảng 2m/s . Xu thế gần tương tự với dạng bậc $Sh=0,1$ và $Sh=0,2\text{m}$ (Hình 5 b, c). Với $Sh=0,3\text{m}$, $Sh=0,4\text{m}$, $Sh=0,5\text{m}$ và $Sh=0,6\text{m}$ đều cho thấy nước nhảy trên bậc, cho xu thế giống nhau với dòng chảy leo lên mái kè và một phần dòng rút ngược ra khi sóng tới đập vào thành bậc. Độ cao bậc càng tăng thì dòng chảy do sóng leo lên càng giảm. Do đó, tại trường hợp $Sh=0,7\text{m}$ thì xuất hiện dòng chảy dội ngược lại tại điểm tiếp xúc bậc sát đỉnh kè (Hình 5h). Tương tự vậy với các dạng bậc lớn hơn với $Sh=1,0\text{m}$ và $Sh=\infty$ (Hình 5 i,j,k). Với phương án kè tường đứng ($Sh=\infty$), vận tốc dòng chảy lớn và có xu thế cao hơn so với phương án $Sh=1,0\text{m}$ do xuất hiện sóng phản xạ đến kè dạng tường.





Hình 5: Vận tốc tại cùng t thời điểm các phương án

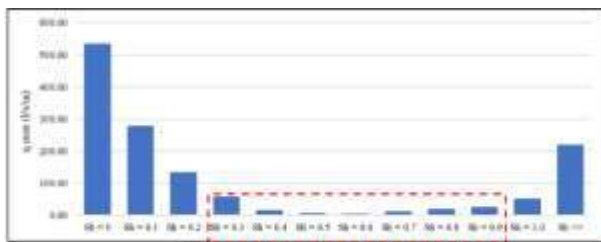
Xét về hướng vận tốc dòng chảy cho thấy, với $Sh = 0$ dòng chảy có hướng phân bố đều và cùng hướng lên theo mái dốc kè. Với các bậc cao hơn từ $Sh = 0,3m$ đến $Sh = 1m$ ngoài dòng chảy lớp nước trên leo lên mái dốc kè còn cho thấy xuất hiện các xoáy nước trước bậc (Hình 5 d-k). Xoáy nước càng lớn khi chiều cao bậc càng lớn. Kết quả này cho thấy khả năng tiêu tán năng lượng ngay trên bậc của mỗi dạng chiều cao bậc khác nhau. Với bậc cao thì dòng chảy bị tiêu tán ở trước bậc lớn, vận tốc dòng chảy lớp biên trên sẽ nhỏ và ngược lại.

3.2. Lưu lượng tràn

Kết quả tính toán cho thấy lưu lượng tràn của kè có $Sh = 0m$, đây là dạng kè mái nghiêng mái trơn nên có lưu lượng tràn cao nhất 535,77 l/s/m, và lưu lượng tràn nhỏ nhất là kè có bậc $Sh = 0,6 m$ với lưu lượng tràn 5,3 l/s/m, giảm khoảng 100 lần so với kè dạng mái trơn (Bảng 1 và Hình 6). Đối với $Sh >>$ kè dạng đứng lưu lượng tràn đạt 219,37 l/s/m, lớn hơn rất nhiều so với các phương án kết cấu kè bậc.

Bảng 1: Tổng hợp lưu lượng tràn lớn nhất các phương án

Sh	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>>
q (l/s/m)	535.77	277.53	134.79	58.01	16.33	7.23	5.30	12.34	18.82	25.78	51.22	219.37



Hình 6: Lưu lượng tràn các phương án mô phỏng

Như vậy, với Sh nằm trong khoảng từ 0,3m đến 0,9m cho lưu lượng tràn nhỏ. Khoảng bậc tối ưu nhất tương ứng với $Sh = 0,5$ và $Sh = 0,6m$ (Hình 6). Lưu lượng sóng tràn qua đỉnh trong các phương án bậc thấp hơn so với sườn dốc nhẵn và lớn hơn so với tường thẳng đứng. Sự giảm này là do hình dạng của kè bậc, giúp giảm sự dâng lên và tràn qua đỉnh bằng cách tiêu tán và phản xạ năng lượng sóng tới.

3.3. Đánh giá hiệu quả giảm sóng tràn của kè bậc

Tương tự như tràn bậc thang, đường kính bậc Kh được đưa vào để mô tả độ nhám bề mặt của kè bậc thang [2]. Đường kính bậc được định nghĩa là khoảng cách vuông góc giữa hốc bậc và kết nối thẳng giữa hai cạnh bậc liền kề. Để đánh giá khả năng giảm sóng của các dạng kè bậc, nghiên cứu này tính toán tỷ lệ giữa đường kính bậc và chiều cao sóng đối với các trường hợp tính toán. Công thức tính đường kính bậc (Kh) được tính bằng chiều cao bậc Sh nhân với hệ số mái ($\cos \alpha$) [2]:

$$Kh = \cos \alpha \times Sh \quad (3)$$

Đặc biệt hệ số nhám mái γ_f được quan tâm trong việc phân tích khả năng giảm sóng của kè. Theo

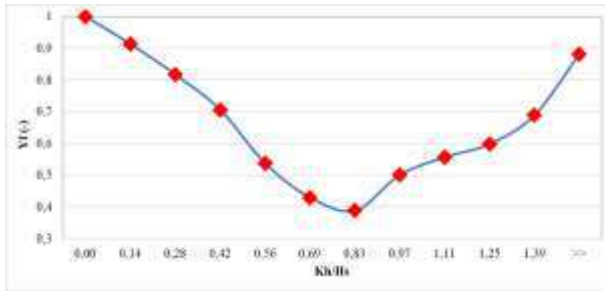
công thức thực nghiệm được trình bày Hướng dẫn về sóng tràn của các công trình bảo vệ bờ biển và các công trình liên quan [3], hệ số nhám mái cho kè dạng bậc được xác định theo công

thức sau:

$$\gamma_f = \frac{\ln(q \text{ mái bậc})}{\ln(q \text{ mái nghiêng})} \quad (4)$$

Bảng 2: Tổng hợp đường kính bậc K_h và hệ số nhám γ_f

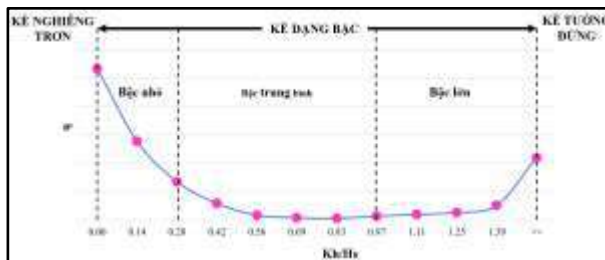
S_h	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>>
K_h/H_s	0.00	0.14	0.28	0.42	0.56	0.69	0.83	0.97	1.11	1.25	1.39	>>
γ_f	1.00	0.91	0.82	0.71	0.54	0.43	0.39	0.50	0.56	0.60	0.69	0.88



Hình 7: Hệ số giảm γ_f với các tỷ lệ bậc khác nhau

Kết quả tính toán quan hệ giữa hệ số nhám với các tỷ lệ bậc khác nhau như cho thấy kè bậc có K_h/H_s nằm trong khoảng 0,4 đến 1,39 cho khả năng giảm sóng tràn tốt nhất ($\gamma_f < 0,8$) tương ứng với $S_h = 0,3 - 1\text{m}$ đối với mái $m=3$.

Với kè mái nghiêng ($S_h = 0$) lưu lượng tràn có giá trị cao nhất do sự tiêu tán năng lượng sóng tương đối thấp, bề mặt nhẵn không có độ nhám lớn như kè kết cấu dạng bậc thang.



Hình 8: Phụ thuộc của tỷ lệ bậc kè bậc đối với sóng tràn

Đối với trường hợp $S_h = 0,1\text{m}$ tương ứng với $K_h/H_s = 0,14$ cho lưu lượng tràn qua đỉnh giảm đáng kể so với kè mái nghiêng (Bảng 2), như vậy quá trình sóng leo, sóng tràn đã bị ảnh hưởng bởi độ cao bậc. $S_h=0,2\text{m}$ đến $S_h=0,8\text{m}$ tương ứng với giá trị K_h/H_s từ 0,28 đến 1,11 dòng chảy do sóng leo trên mái bị xáo trộn và xuất hiện rõ hơn khi chiều cao bậc càng tăng

(Hình 8). Đối với phương án $S_h = 0,8\text{m}$ trở lên tương ứng với $K_h/H_s > 1$ thì bắt đầu xuất hiện các hiện tượng tiêu tán năng lượng sóng gần giống với dạng kè tường đứng nghĩa là động năng của sóng tới sẽ được chuyển hóa thành thể năng, và hầu hết năng lượng sóng tới sẽ trở thành sóng phản xạ.

Số lượng các bậc cũng như tỷ lệ bậc ảnh hưởng đáng kể đến sự tiêu tán năng lượng tại các kè bậc. Cường độ nhiễu loạn do sóng gây ra do sự hiện diện của các bậc phụ thuộc vào yếu tố nhám (hình dạng và kích thước) và vận tốc dòng chảy trên mái kè. Mô tả mối quan hệ giữa đường kính bậc với lưu lượng tràn của các kè kết cấu dạng bậc như Hình 5. Tỷ lệ bậc bằng không ($S_h = 0$) biểu thị một độ dốc trơn tru. Thể tích tràn bờ cao nhất được đo cho trường hợp mái trơn do năng lượng tiêu tán tương đối thấp trên bề mặt của chúng so với các bề mặt nhám của kè bậc thang. Do đó, ứng suất cắt trên mái trơn cũng thấp và do đó, tạo ra ứng suất cắt tương đối thấp trên kết cấu. Hầu hết năng lượng sóng động chuyển thành năng lượng tiềm năng trong quá trình chạy đà. Khi chiều cao bậc thang tăng, độ nhám và nhiễu loạn tăng lên, dẫn đến giảm thể tích tràn đỉnh. Phần nhỏ năng lượng động của sóng tới được chuyển thành năng lượng tiềm năng khi một số năng lượng bị tiêu tán do nhiễu loạn tăng ở các chiều cao bậc khác nhau.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã sử dụng mô hình Flow-3D mô phỏng sóng tràn cho kè có kết cấu dạng bậc với các chiều cao bậc khác nhau và cùng hệ số mái $m = 3$. Kết quả mô phỏng lưu lượng tràn được xác định ra 3 vùng tiêu tán năng lượng khác nhau tương ứng với các tỷ lệ chiều cao bậc trên chiều cao sóng K_h . Vùng kè bậc có bậc nhỏ

tương ứng với $K_h/H_s < 0,2$ có hệ số nhám giảm sóng tràn lớn hơn 0,9. Vùng kè bậc có bậc trung bình ứng với $0,2 < K_h/S_h < 1,0$ có hệ số giảm sóng tràn trong khoảng 0,39 đến 0,82. Vùng kè bậc có bậc lớn ứng với $K_h/S_h > 1$ có hệ số giảm sóng tràn lớn hơn 0,8.

Kết quả nghiên cứu cho thấy năng giảm sóng tràn của kè kết cấu dạng bậc là khá tốt so với kè mái nghiêng thông thường, lưu lượng giảm khoảng 50-100 lần so với kè mái nghiêng trơn. Đây cũng là cơ sở quan trọng để xem xét đưa

dạng kết cấu kè bậc vào trong các dự án đầu tư, đặc biệt những khu vực bãi biển du lịch nơi có yêu cầu tính cảnh quan, diện tích, đất thi công hạn chế và yêu cầu bảo vệ hạ tầng du lịch cao.

LỜI CẢM ƠN: Nghiên cứu này được từ kết nghiên cứu của đề tài: “*Nghiên cứu đánh giá khả năng giảm sóng của kết cấu kè bậc và đề xuất dạng phù hợp cho khu vực Bắc Trung Bộ*”, Chủ nhiệm đề tài: ThS. Nguyễn Thành Luân.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] “FLOW-3D”, FLOW-3D. [Online]. Available at: <https://www.flow3d.com/products/flow-3d/>
- [2] H. Chanson, “Stepped spillway flows and air entrainment”, *Can. J. Civ. Eng.*, vol 20, số p.h 3, tr 422–435, tháng 6 1993, doi: 10.1139/193-057.
- [3] Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., “EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.” 2018. [Online]. Available at: www.overtopping-manual.com