

NGHIÊN CỨU BẰNG MÔ HÌNH SỐ SÓNG TRÀN QUA ĐÊ BIỂN CÓ TƯỜNG ĐÌNH THẤP

Nguyễn Văn Thìn¹, Nguyễn Văn Ngọc², Thiều Quang Tuấn²

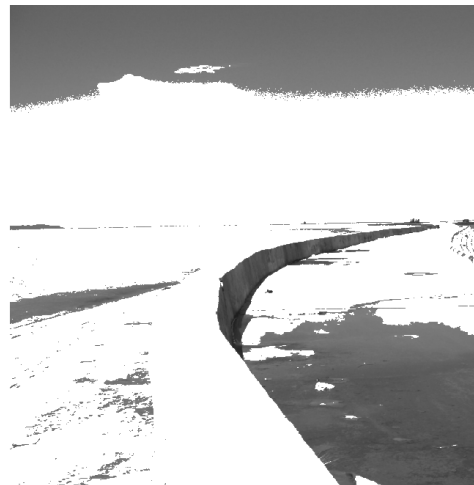
Tóm tắt: Các mô hình toán dựa trên phương trình phi tuyến nước nông (NLSW - viết tắt của Non-linear Shallow Water equations) và phương trình (RANS - viết tắt của Reynolds-Averaged Navier Stokes) được áp dụng để tính toán lưu lượng sóng tràn qua đê biển có tường đình thấp. Các mô hình được kiểm định và hiệu chỉnh với bộ số liệu sóng tràn qua đê biển (sóng ngẫu nhiên) được thực hiện bởi Tuan (2013) trong khuôn khổ đề tài nghiên cứu khoa học cơ bản NAFOSTED. Mô hình toán có thể áp dụng một cách hiệu quả để dự đoán lưu lượng sóng tràn đối cho đê biển có tường đình thấp.

Từ khóa: Sóng tràn; tường đình; thêm trước; TAW-2002; RANS-VOF.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tường đình thấp được sử dụng khá phổ biến cho hệ thống đê ở Việt Nam và được coi là giải pháp hữu hiệu để giảm sóng tràn (Hình 1). Các phương trình sóng tràn theo kinh nghiệm hiện có

như TAW-2002 và EurOtop-2007 vẫn chưa thể áp dụng một cách phù hợp cho loại đê này (Tuan et al., 2009 and Tuan, 2013). Do đó, việc hiểu rõ ảnh hưởng của tường đình thấp đối với sóng tràn là rất cần thiết trong công tác thiết kế đê biển.



a) Đê biển phá hoại nghiêm trọng do sóng tràn

b) Đê biển điển hình có tường đình

Hình 1: Đê sử dụng tường đình thấp như là một giải pháp chống sóng tràn ở Việt Nam.

Mục tiêu của nghiên cứu là tìm hiểu khả năng của mô hình số ở các mức chi tiết khác nhau từ mô hình đơn giản (NLSW) đến mô hình phức tạp hơn như (RANS-VOF) để mô phỏng sóng tràn qua đê với sự hiện diện của tường đình thấp trên đê.

Mô hình toán của sóng tràn qua các kết cấu công trình biển đã thu hút nhiều nghiên cứu và đã đạt được những bước tiến đáng kể trong vài

thập kỷ qua. Các mô hình toán dựa trên mô hình RANS và phương trình phi tuyến nước nông được sử dụng phổ biến nhất trong việc tính toán sóng tràn. Việc lựa chọn một mô hình phù hợp giữa các mô hình trên để áp dụng trong thiết kế kỹ thuật nên được dựa trên sự hiệu quả của mô hình đối với mức độ chi tiết cần thiết.

Các mô hình họ RANS-VOF có khả năng áp dụng mô phỏng vấn đề tương tác giữa sóng và tường đình với các dạng kết cấu công trình như phức tạp khác nhau. Trong vài thập niên gần

¹ Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi

² Khoa Kỹ thuật biển, Trường Đại học Thủy lợi

đây, các nỗ lực đáng kể đã được thực hiện để cải tiến khả năng tính toán của các mô hình RANS (xem e.g. Lin and Liu, 1998; Li et al., 2004; Reeve et al., 2008; Xiao et al., 2008; Losada et al., 2008; Lara et al., 2011). Khả năng mô phỏng của các mô hình này đã có những bước tiến rõ rệt như là có thể ứng dụng cho các dạng hình học và kết cấu phức tạp khác nhau, có thể kể đến các điều kiện sát với thực tế hơn như: từ tương tác sóng đơn giản với các kết cấu không thấm nước đến các dòng chảy phức tạp do sóng trong các kết cấu rỗng, từ việc tạo biên sóng nguồn đến tạo sóng tương tự như máng sóng vật lý (xem Torres-Freyermuth et al., 2010; Lara et al., 2011).

Hạn chế chính của họ mô hình RANS là hiệu quả tính toán rất thấp, thường mất nhiều giờ trên máy tính thông thường để mô phỏng một số giây của dòng chảy trong thời gian thực. Đối với việc phân tích thống kê của sóng tràn đối với sóng ngẫu nhiên thường yêu cầu mô phỏng số ít nhất 1000 con sóng thì thực sự là vấn đề nan giải đối khi sử dụng họ mô hình RANS. Khi đó các mô hình họ NLSW thể hiện ưu thế hơn so với các mô hình họ RANS-VOF.

Các phương trình NLSW đạt được bởi việc tích hợp các phương trình Navier-Stokes đối với chiều sâu dòng chảy với các giả thuyết sau đây: phân bố lưu tốc dòng chảy đều theo phương đứng; áp lực dòng chảy là thủy tĩnh và đáy lòng dẫn có độ dốc thoải. Do đó, các mô hình NLSW ít phức tạp hơn và hiệu quả hơn rất nhiều trong tính toán (chỉ cung cấp các tham số trung bình độ sâu của dòng chảy). Phân bố áp lực thủy tĩnh cùng với tính chất phi tán xạ là các mặt hạn chế nội tại của phương trình NLSW trong một số

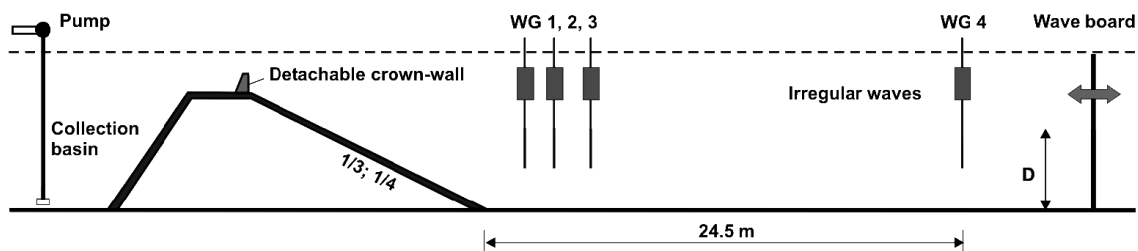
ứng dụng tính toán kỹ thuật.

Nói chung, các mô hình NLSW có khả năng khá tốt trong việc tính toán lưu lượng sóng tràn qua đê có độ dốc nhỏ và không có tường đỉnh (ví dụ xem Kobayashi and Wurjanto, 1989; Kobayashi and Wurjanto, 1992; Dodd, 1998; Hu et al., 2000; Hubbard and Dodd, 2002; Stansby and Feng, 2004). Đối với sóng tràn qua các kết cấu có hình dạng phức tạp như mái dốc phía biển rất dốc hoặc dốc đứng, khi đó việc biến đổi tương đương dạng hình học của kết cấu hoặc cải tiến mô hình số là cần thiết để mô hình NLSW có thể được áp dụng một cách tương đối hợp lý (Hu et al., 2000, Zhou et al., 2001, Shiach et al., 2004).

Các hạn chế nội tại của mô hình NLSW có thể được giải quyết bởi mô hình dạng Boussinesq. Do sóng vỡ không được mô tả một cách tự nhiên bởi phương trình Boussinesq và hệ số đạo hàm bậc cao trong phương trình này không phù hợp tại các vị trí gần với đường bờ (e.g. Bellotti and Brocchini, 2002; Brocchini and Dodd, 2008). Phương trình Boussinesq cải tiến như trong mô hình COULWAVE bởi Lynett et al. (2000; 2002) được áp dụng khá tốt cho khu vực sóng đổ. Tuy nhiên, khi đó các mô hình này trở nên rất phức tạp để có thể tính toán sóng tràn qua công trình nằm trong đới sóng đổ. Và như vậy các mô hình NLSW vẫn tỏ ra lợi thế hơn các mô hình Boussinesq với cùng mức độ chính xác trong việc tính toán dự báo sóng tràn.

Nói tóm lại, với mục đích xác định lưu lượng sóng tràn trung bình thì mô hình NLSW dường như là hấp dẫn nhất. Đối với tương tác sóng và công trình, thì cần phải sử dụng mô hình họ RANS-VOF.

2. CÁC THÍ NGHIỆM SÓNG TRÀN TỶ LỆ NHỎ



Hình 2: Bố trí thí nghiệm sóng tràn với sóng ngẫu nhiên (theo Tuan, 2013)

Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng bộ số liệu thí nghiệm sóng tràn qua đê có tường đỉnh thấp được thực hiện bởi Tuan (2013) tại phòng thí nghiệm thủy lực – Trường Đại học Thủy Lợi. Máng sóng dài 45m, cao 1.5m được trang bị hệ thống hấp thụ sóng phản xạ tự động (AUKEPC/ARC - DELTARES). Mô hình đê cao 70cm, với bề mặt mái đê nhẵn và không thấm, mái dốc đê phía biển 1/3, 1/4. Tường đỉnh có chiều cao lần lượt là 4, 6 và 9cm với kết cấu có thể tháo rời được nhằm tổ hợp thành nhiều dạng kết cấu hình học đê khác nhau. Chi tiết về các chuỗi dữ liệu sóng ngẫu nhiên, xin tham khảo thêm Tuan (2013).

3. MÔ HÌNH TOÁN

Như đã trình bày ở trên, mô hình NLSW của Tuan và Oumeraci (2010) và mô hình RANS (COBRAS-UC, Losada et al., 2008) được sử dụng ở đây để tính toán lưu lượng sóng tràn qua đê biển có tường đỉnh.

3.1. Mô hình họ NLSW

3.1.1 Các phương trình cơ bản

Mô hình của Tuan and Oumeraci (2010) dựa trên dạng bảo toàn lưu lượng của các phương trình NLSW được giải bằng việc loại bỏ biến bậc cao (TVD), dạng Roe như sau:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}(x, \bar{U})}{\partial x} = \bar{S}(x, \bar{U}) \quad (1)$$

Trong đó: các véc-tơ bảo toàn \bar{U} , $\bar{F}(x, \bar{U})$ và các véc-tơ thành phần $\bar{S}(x, \bar{U})$ được xác định như sau:

$$\bar{U}(x) = \begin{pmatrix} h \\ uh \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\bar{F}(x, \bar{U}) = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + gh^2 / 2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\bar{S}(x, \bar{U}) = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{bx} - S_f + S_r) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Trong đó: g là gia tốc trọng trường, h là chiều sâu dòng chảy, u là vận tốc dòng chảy theo phương ngang, S_{bx} và S_f tương ứng là mái dốc đáy và ma sát đáy. Chú ý rằng S_r là thành phần độ dốc do cuộn sóng bề mặt được thêm

vào bởi Tuan and Oumeraci (2010) để kể đến ảnh hưởng của sóng vỡ khi có sự hoạt động mạnh của cuộn bề mặt trong vùng sóng vỡ trên nền dòng chảy trung bình.

Mô hình mượn phương pháp giải Roe- dạng Riemann (Toro, 1997; Toro, 2001), kết hợp với phương pháp thể tích hữu hạn (FVM). Để giải số hạng cuộn sóng bề mặt S_r , mô hình được kết hợp với một mô hình suy giảm năng lượng sóng đơn giản (ENDEC) (Battjes and Janssen, 1978; Battjes and Janssen, 2008).

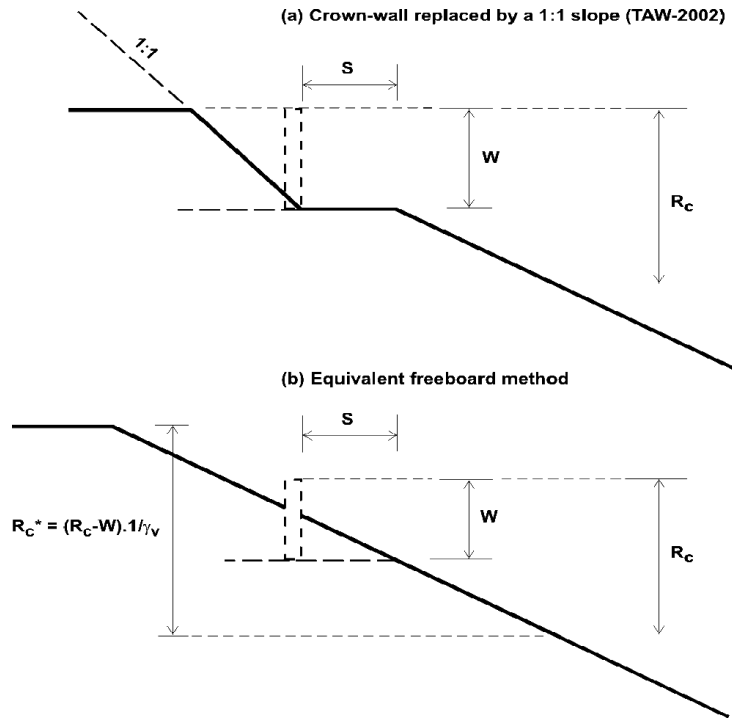
Xin tham khảo thêm Tuan and Oumeraci (2010) để biết chi tiết hơn về phương pháp tính toán.

3.1.2. Lưu lượng sóng tràn với sóng ngẫu nhiên

Theo định nghĩa của mô hình thì tường đứng không mô tả được trong mô hình NLSW do trường dòng chảy khi đó sẽ vi phạm các giới hạn nước nông, do vậy việc điều chỉnh, biến đổi hình học tương đương của tường đỉnh là cần thiết.

Hu et al. (2000) đã khảo sát dựa trên mô hình toán sóng tràn qua tường đỉnh thẳng đứng trong đó phần thẳng đứng của tường được điều chỉnh thành mái có độ dốc 1:20 tới 1:10. Sự điều chỉnh này khác xa so với giả thuyết cơ bản của các phương trình NLSW. Kết quả tính toán lưu lượng sóng tràn được dự báo từ mô hình phù hợp với dữ liệu từ mô hình vật lý của Goda (1985) and Herbert (1993). Tuy nhiên, do điều kiện thí nghiệm các thí nghiệm này không được mô tả một cách chính xác, do đó khả năng của mô hình NLSW để tính toán sóng tràn qua tường đỉnh cũng chưa được khẳng định (Hu et al., 2000).

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng kết quả nghiên cứu từ nghiên cứu mô hình vật lý của Tuan (2013) về ảnh hưởng của tường chắn sóng đến sóng tràn. Theo đó, hai phương án quy đổi có thể được dùng như được thể hiện trong các tường thẳng đứng sau đây mà không ảnh hưởng nghiêm trọng đến giả thuyết của các phương trình NLSW.



Hình 3: Mô tả mái nghiêng qua tường thẳng đứng
(a) Theo TAW-2002 (b) Theo chiều cao giá định

Ở phương pháp thứ nhất, được thể hiện trong Hình 3a, tường đỉnh được thay thế bởi tường có mái dốc 1:1 bắt đầu từ chân tường và chiều cao đỉnh tường phía trên mực nước, R_c được giữ nguyên như khoảng cách thẳng đứng từ mực nước tính đến đỉnh tường chắn thẳng đứng. Điều này đã được đề xuất trong TAW-2002 cho việc xác định mái dốc tương đương trong việc tính toán sóng tràn theo công thức kinh nghiệm. Tuan (2013) đã chỉ ra rằng sự vận dụng nguyên lý hình học này có thể đem sự phù hợp tương đối với các số liệu thí nghiệm sóng tràn và có thể áp dụng được trong tính toán lưu lượng sóng tràn.

Trong phương án thứ hai, đỉnh đê cùng với tường chắn sóng được thay thế bởi một cao trình đỉnh tương đương như Hình 3b, trong đó ảnh hưởng tổng hợp của tường theo Tuan (2013) được thể hiện như sau:

Đối với sóng vỡ: ($\gamma_b \xi_{0m} \leq \xi_{cr} \approx 2.0$):

$$Q^* = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \xi_{0m} \exp\left(-4.75 \cdot \frac{R_c - W}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_{0m}} \cdot \frac{1}{\gamma_v}\right) \quad (5)$$

Đối với sóng không vỡ: ($\gamma_b \xi_{0m} > \xi_{cr} \approx 2.0$):

$$Q^* = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.20 \cdot \exp\left(-2.6 \cdot \frac{R_c - W}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_v}\right) \quad (6)$$

Trong đó: Q^* là đại lượng không thứ nguyên của lượng sóng tràn trung bình, q là lưu lượng tràn trung bình, H_{m0} là chiều cao sóng tại chân đê, ξ_{0m} là số Iribarren được tính toán từ phổ chu kỳ $T_{m-1,0}$, R_c là độ lưu không đỉnh đê R_c , γ_v là hệ số ảnh hưởng tổng hợp của tường. Lưu ý rằng, các hệ số chiết giảm khác do bãi, do độ nhám của mái dốc và do độ xiên góc của sóng tới không xét ở đây.

Từ phương trình (5) và (6), chiều cao tương đương của đỉnh tường chắn bên trên mực nước R_c^* trong tính toán lưu lượng sóng tràn qua tường chắn sóng đỉnh thấp được tính toán như sau:

$$R_c^* = \frac{R_c - W}{\gamma_v} \quad (7)$$

Hệ số ảnh hưởng tổng thể của tường được xác định theo Tuan (2013) cho cả sóng vỡ và sóng không vỡ được tính toán như sau:

$$\frac{1}{\gamma_v} = \frac{1}{\gamma_w} \times \frac{1}{\gamma_s} \quad (8)$$

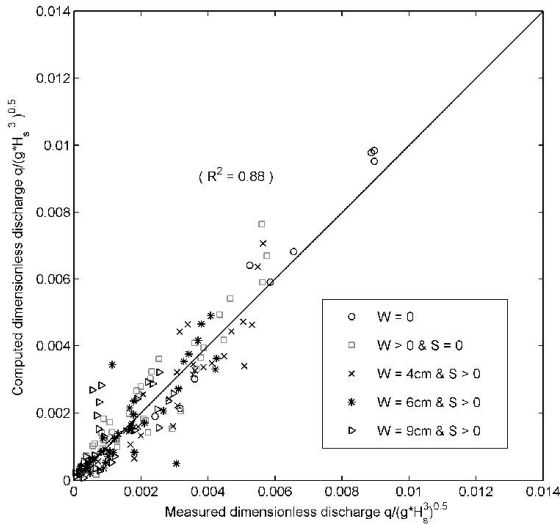
$$\frac{1}{\gamma_w} = 1 + c_1 \frac{W}{R_c - W} \frac{1}{\xi_{0m}} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\gamma_s} = 1 + c_2 \frac{S}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_{0m}} \quad (10)$$

Trong đó: γ_w và γ_s là các hệ số ảnh hưởng của chiều cao tường và chiều rộng của tường; $c_1 = 1.60$ và $c_2 = 1/8$ tương ứng là các hệ số kinh nghiệm.

Kết quả của mô hình theo hai phương án ở trên được so sánh với số liệu thí nghiệm mô hình vật lý thể hiện trong các hình 4 và 5. Nhìn chung, các kết quả của cả hai phương án phù hợp khá tốt với các số liệu thí nghiệm mô hình với mức độ hồi quy R^2 lần lượt là 0.88 và 0.87 cho phương án thứ nhất và phương án thứ hai. Sai số trung bình là 39.8%, với một sai số đặc biệt lớn khi lưu lượng sóng tràn bé với tường đỉnh khá cao ($W=9$) hoặc khi đê không có thêm trước ($S=0$).

Có một điểm đáng chú ý là trong các trường hợp tường tương đối cao ($W/H_s > 0.5$) và chiều rộng thêm ($S=0$) không có sự chuyển tiếp, thì mô hình NLSW cho kết quả có mức độ tin cậy thấp.

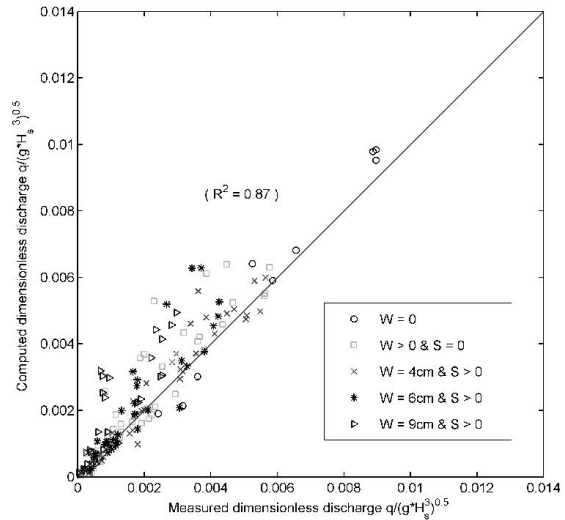


Hình 4: Kết quả tính toán sóng tràn mô hình NLSW theo phương pháp biến đổi tường tương đương thứ nhất - đo đạc so với tính toán

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (13)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (14)$$

Trong đó: $\langle u_i \rangle$ là vận tốc trung bình theo phương i ($i, j = 1, 2$ cho dòng chảy hai chiều), $\langle p \rangle$ là áp suất trung bình, ρ là mật độ chất lỏng, g_i là gia tốc trọng trường theo phương i , $\rho \langle u'_i u'_j \rangle$ là ứng suất Reynolds được mô phỏng theo độ nhớt xoáy phi tuyến (Rodi, 1980; Lin and Liu, 1998). Các hệ số kinh nghiệm là $\sigma_k = 1.0$, σ_ε



Hình 5: Kết quả tính toán sóng tràn theo phương pháp chiều cao lưu không tương đương - đo đạc so với tính toán

3.2. Sóng tràn với mô hình RANS-VOF

3.2.1 Phương trình cơ bản

COBRAS-UC (Losada et al., 2008; Torres-Freyermuth et al., 2007) được bắt nguồn từ mô hình COBRAS, mô hình RANS của Liu et al. (1999):

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} &= \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \rho \langle u'_i u'_j \rangle \right) \end{aligned} \quad (12)$$

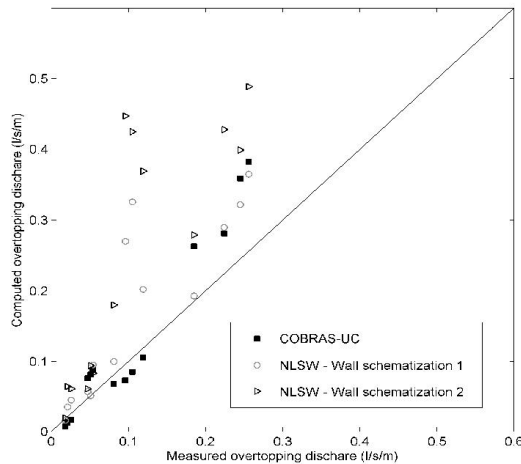
và kết hợp phương hệ phương trình vận chuyển rối ($k-\varepsilon$):

$= 1.3$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{1\varepsilon} = 1.92$ (Rodi, 1980); $\nu = \mu/\rho$ and $\nu_t = C_d k^2/\varepsilon$ ($C_d = 0.99$) tương ứng là của nhớt xoáy và nhớt động học.

COBRAS-UC tính toán dòng chảy trên một lưới chữ nhật không đồng nhất. Mặt thoáng bất kỳ của dòng chảy được tính toán theo phương pháp “thể tích chất lỏng” (VOF) (Hirt and Nichols, 1990).

Mô hình COBRAS-UC được áp dụng để mô phỏng sóng tràn cho cả sóng đều và ngẫu nhiên. Trong bài báo này chỉ tập trung sóng ngẫu nhiên, các yếu tố tập trung quan tâm ở đây là lưu lượng tràn trung bình. Để tăng hiệu quả của mô hình, phần máng sóng tính toán trong mô hình không bao gồm phần của máng sóng vật lý từ bản tạo sóng tới sen-sor đo sóng đặt xa nhất về phía biển. Do đó phạm vi tính toán là 32m dài và 1.4m cao với các ô lưới chia tương ứng là 1600x140 với bước lưới lớn nhất là 0.02m theo phương ngang và 0.01m theo phương đứng.

3.2.2. Lưu lượng tràn của sóng ngẫu nhiên



Hình 6: Lưu lượng sóng tràn của các sóng ngẫu nhiên mô hình COBRAS-UC so với mô hình NLSW

Mô hình được kiểm định với các thí nghiệm mô hình vật lý đối với các sóng ngẫu nhiên được mô tả trong mục 2. Như đã nêu trước đó, chuỗi sóng của ít nhất 1000 con sóng cần được thực hiện trong mô hình vật lý để phục vụ cho việc phân tích thống kê sóng tràn. Thời gian tính toán xấp xỉ 75 giờ cho 2200 giây mô phỏng của máy tính có cấu hình: 3.1GHz-4GB RAM PC. Do cấu hình thấp này nên chỉ có 14 trường hợp thí nghiệm được quan tâm trong các thí nghiệm sóng ngẫu nhiên, là các trường hợp mà cho kết quả khác biệt lớn nhất từ mô hình NLSW như được chỉ ra trong hình 4 và 5. Đây là sự kết hợp

của một điều kiện sóng tại bản tạo sóng ($H_{m0} = 0.10$ m, $T_p = 2.2$ s và chiều sâu nước $D = 0.55$ m) và với tất cả các dạng mái dốc đê với các tường chắn cao ($W = 6$ cm, 9cm; có hoặc không có chiều rộng thêm trước tường đỉnh $S = 0$).

Lưu lượng tương ứng do mô hình NLSW với cả hai phương pháp mô phỏng tường cũng được so sánh ở đây. Rõ ràng là, COBRAS-UC thể hiện ưu điểm hơn so với mô hình NLSW với sai số trung bình là 60.1% (độ lệch chuẩn ± 63.2 %) và 129.4 % (± 100.6 %) lần lượt cho phương pháp 1 và 2. Kết quả từ COBRAS-UC và dữ liệu từ thí nghiệm mô hình khá khớp với nhau với độ sai số trung bình là 39.7 % (± 24.5 %). Tuy vậy, sai số lên tới 63% cho các trường hợp lưu lượng tràn nhỏ.

KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã áp dụng mô hình NLSW (Tuan and Oumeraci, 2010) và mô hình RANS-VOF (COBRAS-UC, Losada et al., 2008) để mô phỏng sóng tràn qua đê có tường đỉnh thấp. Kết quả kiểm định mô hình với các số liệu thí nghiệm mô hình vật lý máng sóng chỉ ra rằng, COBRAS-UC có khả năng tính toán tin cậy lưu lượng sóng tràn qua đê biển có tường đỉnh, tuy nhiên hiệu quả tính toán lại rất thấp. Hiện tại, việc sử dụng mô hình NLSW nhìn chung là có hiệu quả cao với đủ mức độ tin cậy, cho phép ước lượng nhanh lưu lượng sóng tràn qua đê có tường chắn sóng đỉnh tương đối thấp. Đối với các trường hợp tường chắn sóng cao ($W/H_s > 0.5$), có thể cần thiết phải sử dụng tới mô hình sóng tràn phức tạp 2DV như là RANS-VOF cùng với việc chấp nhận hiệu quả tính toán không cao.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu đã được thực hiện dưới sự tài trợ kinh phí của Quỹ phát triển khoa học công nghệ quốc gia NAFOSTED [QĐ 105.09-2010.10].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proc. 14th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, pp. 466-480.
2. Battjes, J.A. and Janssen, T.T., 2008. Random wave breaking models: history and discussion. *Proc.*

- 31th Int. Conf. Coastal Engineering, Hamburg, Germany.
3. Bellotti, G. and Brocchini, M., 2002. On using Boussinesq-type equations near the shoreline: A note of caution. *Ocean Engineering*, 29, pp. 1569–1575.
 4. Brocchini M. and Nicholas Dodd, 2008. Nonlinear shallow water equation modelling for coastal engineering. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134(2), pp. 104-120.
 5. Dodd, N., 1998. A numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(2), pp. 73-81.
 6. EurOtop, 2007. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, Environment Agency UK/Expertise Netwerk Waterkeren NL/Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE (see www.overtopping-manual.com).
 7. Hirt, C.W., Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, pp. 201-225.
 8. Hu, K., Mingham, C. G. and Causon, D. M. 2000. Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the nonlinear shallow water equations. *Coastal Engineering*, 41, pp. 433-465.
 9. Kobayashi, N. and Raichle, A.W., 1994. Irregular wave overtopping of revetments in surf zones. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 120, 1, pp. 56-73.
 10. Kobayashi, N. and Wurjanto, A., 1989. Wave overtopping on coastal structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(2), pp. 235-251.
 11. Kobayashi, N. and Wurjanto, A., 1992. Irregular wave setup and runup on beaches. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118(4), pp. 368-386.
 12. Lara, J.L., Garcia, N., Losada, I.J., 2006. RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*, 53, pp. 395–417.
 13. Lara, J.L., Losada, I.J. and Guanache, R. 2008. Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model. *Ocean Engineering*, 35 (2008), pp. 1388–1400.
 14. Lara, J.L., Ruju, A., Losada, I.J. , 2011. RANS modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proc. of the Royal Society A-Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 467 (2129), pp. 1215-1242.
 15. Li, T., Troch, P. and De Rouck, J., 2004. Wave overtopping over a sea dike. *Journal of Computational Physics*, 198, pp. 686-726.
 16. Lin, P., 1998. Numerical modelling of breaking waves. Doctoral dissertation, Cornell University, USA.
 17. Lin, P., Liu, P.L., 1998. A numerical study of breaking waves in the surf zone. *Journal of Fluid Mechanics*, 359, pp. 239-264.
 18. Lin, P., Liu, P.L., 1999. Internal wave-maker for Navier–Stokes equations models. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125(4), pp. 207–217.
 19. Liu, P.L.F., Lin, P.Z., Chang, K.A. and Sakakiyama, T., 1999. Numerical modelling of wave interaction with porous structures, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125(6), pp. 322-330.
 20. Losada, I.J., Lara, J.L., Guanache, R., Gonzalez-Ondina, J. M., 2008. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 55, pp. 47-62.
 21. Lynett, P., Liu, P.L., Losada, I.J. and Vidal, C., 2000. Solitary wave interaction with porous breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 126(6), pp. 314-322.
 22. Lynett, P. J., Wu, T. and Liu, P. L., 2002. Modelling wave run-up with depth-integrated equations. *Coastal Engineering*, 46, pp. 89-107.
 23. Pullen, T. and Allsop, W., 2003. Use of numerical models of wave overtopping: summary of current understanding. R&D Interim Guidance Note FD2410/GN1, Defra/Environment Agency, 7 pp.

24. Shiach, J. B., Mingham, C. G., Ingram, D. M., and Bruce, T. 2004. The applicability of the shallow water equations for modelling violent wave overtopping. *Coastal Engineering*, 51, pp. 1-15.
25. TAW, 2002. Technical report wave run-up and wave overtopping at dikes. Technical Advisory Committee on Flood Defence, The Netherlands, 42 pp.
26. Toro, E.F., 1997. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction. Springer-Verlag, Berlin, 624 pp.
27. Toro, E.F., 2001. Shock-capturing methods for free-surface shallow flows. Wiley, New York, 309 pp.
28. Tuan, T.Q., 2013. Influence of low sea-dike crown-walls on wave overtopping discharge. *Coastal Engineering Journal*, in press.
29. Tuan, T.Q. and Oumeraci, H., 2010. A numerical model of wave overtopping on sea-dikes. *Coastal Engineering*, 57, 8, pp. 757-772.
30. Xiao H., Huang, W. and Tao, J., 2008. Numerical modelling of wave overtopping a levee during Hurricane Katrina, *Computational Fluid*, 38, 5, pp. 991-996.
31. Zelt, J.A. and Skjelbreia, J.E., 1992. Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges. *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE*, pp. 777-789.

Abstracts

NUMERICAL STUDY OF WAVE OVERTOPPING DISCHARGES AT SEA-DIKES WITH LOW CROWN-WALLS

Models based on non-linear shallow water (NLSW) and Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) equations are applied to compute wave overtopping rates at sea-dikes with low vertical crown-walls. Existing data from wave overtopping experiments of irregular waves are used to validate the models. Thanks to pragmatic wall schematization approaches a simple NLSW model can effectively be applied to predict the right wave overtopping discharges for cases of relatively low walls. The RANS model is found to reliably predict average wave overtopping discharges for walls with any complex geometric configurations, however with very low computational efficiency.

Keywords: *Wave overtopping, crown-walls, promenades, NLSW, RANS-VOF.*

Người phân biện: **TS. Mai Văn Công**

BBT nhận bài: 25/10/2013

Phản biện xong: 7/11/2013