

MÔ PHỎNG SÓNG LEO TRÊN BÃI NGHIÊNG NHẢM SỬ DỤNG PHƯƠNG TRÌNH NƯỚC NÔNG PHI TUYẾN BẢO TOÀN

WAVE RUN-UP ON A ROUGH SLOPE APPLYING CONSERVATIVE FORM OF NONLINEAR SHALLOW WATER EQUATIONS

¹Vũ Văn Nghi, ²Phạm Văn Khôi, ³Lee Changhoon

¹Khoa Công trình giao thông, trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

²Khoa Công trình, trường Đại học Hàng hải Việt Nam

³Khoa Kỹ thuật xây dựng và Môi trường, trường Đại học Sejong, Hàn Quốc

Tóm tắt: Sóng leo và sóng rút là các hiện tượng tự nhiên, xảy ra phổ biến khi sóng truyền tới bãi biển hay mái dốc công trình như đê chắn sóng, đê biển. Nghiên cứu này phát triển phương trình sóng nước nông phi tuyến dạng bảo toàn trong môi trường rỗng. Kết quả mô phỏng mô hình sử dụng phương trình cơ bản này được kiểm chứng với lời giải giải tích cho bài toán sóng lan truyền trong môi trường rỗng với các độ rỗng khác nhau và cho thấy sự phù hợp của mô hình. Đặc biệt, nghiên cứu cũng mô phỏng sóng leo và sóng rút trên bãi nghiêng có độ nhám và được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm từ mô hình vật lý. Mô hình số sử dụng trong nghiên cứu được áp dụng phương pháp thể tích hữu hạn cho thấy độ chính xác cao khi sóng truyền lên mái dốc.

Từ khóa: Phương pháp thể tích hữu hạn, phương trình bảo toàn nước nông phi tuyến, sóng leo, sóng rút.

Mã phân loại: 11.2

Abstract: Waves run-up and run-down happen when water waves propagate to the slope of a structure such as the foreshore of a rubble mound breakwater or the slope of a beach. This study introduces a conservative form of nonlinear shallow water equations in porous media. The numerical results of the model are well verified with the analytical solution employing various porosities. The second part of the model simulation shows a good agreement between the current model and the physical experimental data for waves run-up and run-down on a rough slope. This study applies the finite volume method which shows its advantages in the simulation of waves on slopes.

Keywords: Finite volume method, nonlinear shallow water equations, wave run-up, wave run-down.

Classification code: 11.2

1. Giới thiệu

Chiều cao sóng leo là thông số quan trọng trong việc xác định cao trình đỉnh của các công trình đê chắn sóng và cũng là một chỉ số quan trọng để xác định sóng tràn khi thiết kế các công trình ven biển. Hiện tượng sóng leo, sóng rút là hiện tượng tự nhiên xảy ra phổ biến khi sóng truyền tới mái dốc (bãi biển, mái đê biển, mái đê chắn sóng, ...).

Đã có khá nhiều nghiên cứu về hiện tượng sóng leo trên mái dốc. Một số nghiên cứu sử dụng mô hình vật lý để đưa ra công thức thực nghiệm xác định chiều cao sóng leo. Battjes (1974) đề xuất công thức xác định chiều cao sóng leo trên mái dốc phẳng, không thấm dựa trên các kết quả thí nghiệm. Trong khi đó Van der Meer và Stam (1992) tiến hành các thí nghiệm để xác định chiều cao sóng leo trên

mái dốc đê đá đổ và cũng đề xuất các công thức thực nghiệm.

Đa số các nghiên cứu trên được thực hiện trong phòng thí nghiệm với các mái dốc nhân tạo. Tuy nhiên, cũng đã có một số nghiên cứu về sóng leo được tiến hành trên bãi biển tự nhiên. Holman (1986) đã nghiên cứu về sóng leo sử dụng số liệu từ quân đội Mỹ tại bãi biển Duck (Mỹ) với chiều cao sóng tới khoảng từ 0.4 m tới 4 m và độ dốc bãi trong khoảng 0.1.

Trong khi đó Nielsen và Hanslow (1991) đã thu thập số liệu để nghiên cứu về sóng leo tại 06 bãi biển ở New South Wales (Úc) với chiều cao sóng khoảng từ 0.53 m tới 3.76 m, chu kỳ sóng từ 6.4 s tới 11.5 s và độ dốc bãi biển trong khoảng từ 0.026 tới 0.189. Các nghiên cứu này có thể được sử dụng để dự báo chiều cao sóng leo cực trị khi biết các điều kiện sóng ngoài khơi.

Vũ và cộng sự (2018) đã phát triển phương trình Boussinesq mở rộng mô phỏng sóng truyền trong môi trường rỗng và cũng có thể được sử dụng để mô phỏng sóng truyền qua đê chắn sóng kết cấu rỗng có mặt cắt ngang dạng hình chữ nhật như đê bằng hai hàng cọc bê tông ly tâm đổ đá học vào giữa, đê bằng hàng rào tre. Tuy nhiên mô hình này chưa mô phỏng được trường hợp sóng truyền qua đê kết cấu rỗng có mặt cắt ngang dạng hình thang hoặc đê rỗng ngập. Để khắc phục nhược điểm này, Lee và cộng sự (2018) đã phát triển phương trình Bussinesq mở rộng mô phỏng sóng truyền qua hai lớp rỗng theo phương đứng. Mô hình này có thể mô phỏng cho trường hợp sóng truyền qua đê đá đò ngập và không ngập. Tuy nhiên, hai mô hình trên đều ở dạng phương trình không bảo toàn, chỉ thích hợp với miền tính toán có chiều sâu nước liên tục. Mặt khác, khi mô phỏng cho các trường hợp sóng leo, sóng tràn trên đê đá đò hoặc bãi biển sẽ gặp khó khăn do miền tính toán có chiều sâu nước không liên tục (Phạm và cộng sự, 2019). Để giải quyết các vấn đề trên, trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu bước đầu phát triển phương trình dạng bảo toàn cho sóng truyền trong môi trường rỗng ở vùng nước nông.

Ngoài phần 1 giới thiệu tổng quan về một số nghiên cứu liên quan tới sóng leo, bài báo được bố cục như sau: Phần 2 giới thiệu hệ phương trình phi tuyến dạng bảo toàn cho sóng lan truyền trong môi trường rỗng vùng nước nông có xét tới độ nhám đáy và giới thiệu về phương pháp số áp dụng trong nghiên cứu này; phần 3 tiến hành mô phỏng sóng truyền trong môi trường rỗng cũng như sóng leo, sóng rút trên mái dốc có độ nhám và so sánh với số liệu thí nghiệm của O'Donoghue và cộng sự (2010); và phần cuối cùng là đánh giá kết luận.

2. Phương trình cơ bản dạng bảo toàn cho sóng lan truyền trong môi trường rỗng

Hệ phương trình phi tuyến dạng bảo toàn một chiều theo phương x có xét tới ảnh hưởng của độ dốc đáy và độ nhám địa hình dùng hệ tọa độ (b, s) như sau:

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

Với U là véc tơ của các biến bảo toàn; F là véc tơ thông lượng theo phương x ; H là thành phần nguồn.

Các đại lượng U , F , H lần lượt được xác định theo các công thức sau:

$$U = \begin{pmatrix} s \\ \beta(s-b)u \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$F(U) = \begin{pmatrix} (s-b)u \\ \beta(s-b)u^2 + \frac{1}{2}g(s-b)^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$H(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ g(s-b) \left(S_0 - \frac{u^2}{C_z^2(s-b)} \right) \\ -\alpha(s-b)u \end{pmatrix} \quad (4)$$

Với u là vận tốc hạt nước theo phương x ; s là chiều cao mặt nước và b là chiều cao đáy tính từ mặt chuẩn được chọn theo nghiên cứu của Phạm và cộng sự (2019); S_0 ($= -\partial b / \partial x = \tan \theta$, θ là góc dốc) là độ dốc đáy; C_z ($C_z = (s-b)^{1/6} / n$, n là hệ số nhám Manning) là hệ số Chezy; α và β lần lượt là hệ số cản dòng chảy và hệ số cản quán tính của môi trường rỗng, được xác định theo công thức (Vũ và cộng sự, 2018) như sau:

$$\alpha = \alpha_l \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right)^2 \frac{\nu}{d^2} + \alpha_r \frac{1-\lambda}{\lambda} \frac{1}{d} |u| \quad (5)$$

$$\beta = 1 + (1-\lambda)\kappa \quad (6)$$

Với λ là độ rỗng của môi trường; α_l và α_r lần lượt là hệ số cản dòng chảy tầng và hệ số cản dòng chảy rối; ν là hệ số nhớt động học của nước; d là đường kính hạt và κ là hệ số khối lượng nước kèm. Khi độ rỗng $\lambda < 1$, phương trình (1) mô tả sóng phi tuyến lan truyền trong môi trường có suy giảm năng lượng; khi độ rỗng $\lambda = 1$, hệ số cản dòng chảy $\alpha = 0$ và hệ số cản quán tính $\beta = 1$, phương trình (1) là hệ phương trình phi tuyến nước nông thông thường.

Phương pháp thể tích hữu hạn được áp dụng để rời rạc hóa thành phần thông lượng và phương pháp sai phân hữu hạn được áp dụng để rời rạc hóa thành phần độ dốc đáy.

3. Mô phỏng sóng sử dụng mô hình số trị

3.1. Sóng truyền trong môi trường rỗng

Khi sóng được tạo ra và lan truyền trong môi trường rỗng (môi trường có suy giảm năng lượng), năng lượng sóng bị suy giảm phụ thuộc vào đặc trưng của môi trường rỗng, đặc trưng của sóng tới cũng như khoảng cách từ nguồn sóng tới vị trí cần xác định. Trong phần này nghiên cứu tiến hành mô phỏng sóng lan truyền trong môi trường rỗng và so sánh với lời giải giải tích để kiểm chứng mô hình đã phát triển. Theo Vũ và cộng sự (2015), lời giải giải tích của biên độ sóng khi suy giảm năng lượng, a_e , được xác định theo công thức:

$$a_e = a_0 \exp[\mp k_i(x - x_s)] \quad (6)$$

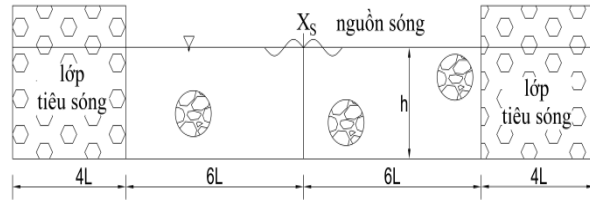
Với a_0 là biên độ sóng tới, x_s là vị trí nguồn sóng và k_i là thành phần ảo của số sóng phức k . Trong nghiên cứu này, phần ảo của số sóng phức được xác định theo công thức:

$$k_i = \frac{\alpha}{\sqrt{2gh}} \frac{1}{\sqrt{\beta \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2} \right]}} \quad (7)$$

Môi trường rỗng trong mô phỏng được xác định với các đặc trưng sau: Hệ số cản dòng chảy tầng $\alpha_1 = 800$; hệ số cản dòng chảy rối $\alpha_2 = 3$; hệ số nhớt động học của nước $\nu = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; đường kính hạt $d = 2 \text{ cm}$ và hệ số khối lượng nước kèm $\kappa = 0.34$; ảnh hưởng của độ nhám đáy được bỏ qua trong tính toán này. Độ rỗng của môi trường được sử dụng với 04 giá trị khác nhau để phân tích ảnh hưởng của độ rỗng môi trường tới mức độ suy giảm năng lượng sóng, $\lambda = 1, 0.9, 0.8, \& 0.5$. Cần lưu ý trường hợp $\lambda = 1$, khi sóng truyền trong môi trường không có suy giảm năng lượng hay môi trường nước thông thường.

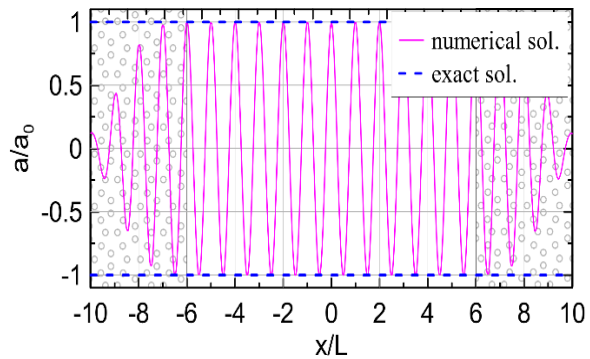
Miền tính toán được thể hiện trong hình 1 với độ sâu nước $h = 1 \text{ m}$, sóng tuyến tính có chu kỳ $T = 12.8 \text{ s}$ và nguồn sóng được đặt giữa miền tính toán. Lớp tiêu sóng có chiều

dày $4L$ để triệt tiêu hoàn toàn sóng phản xạ lại vào miền tính toán.

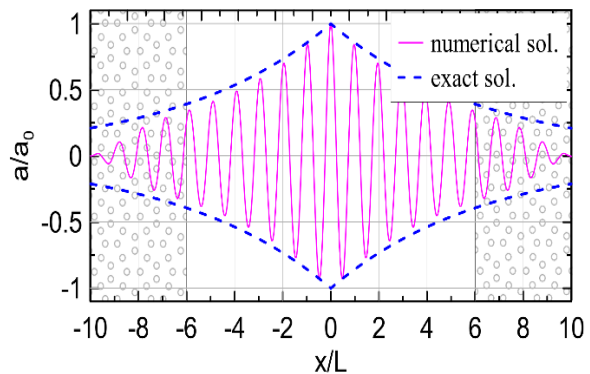


Hình 1. Miền tính toán 1 chiều mô phỏng sóng truyền trong môi trường rỗng.

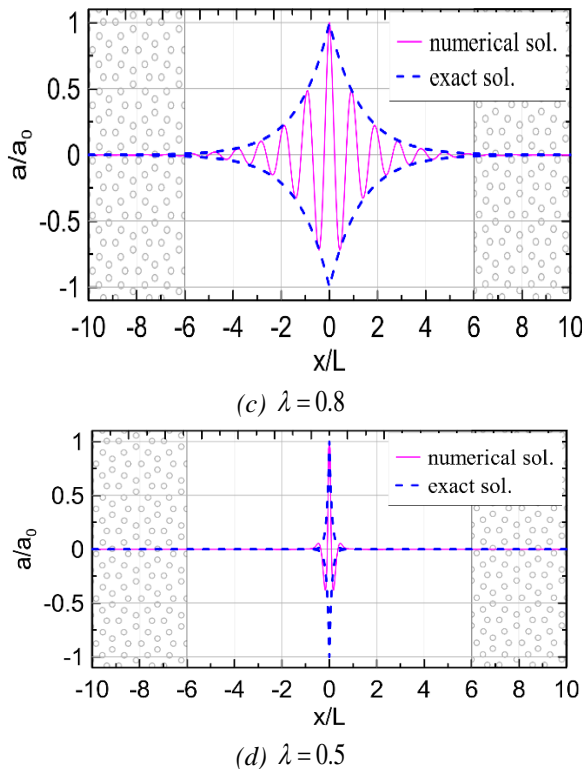
Hình 2 so sánh chiều cao sóng không thứ nguyên (a/a_0) giữa kết quả từ mô hình số và lời giải giải tích cho thấy rất phù hợp. Khi độ rỗng bằng 1 (hình 2a), năng lượng sóng không bị suy giảm trong suốt miền tính toán. Khi độ rỗng nhỏ hơn 1 (hình 2b, c, d) chiều cao sóng giảm dần từ nguồn sóng. Đặc biệt với độ rỗng $\lambda = 0.5$ (hình 2d) là trường hợp phổ biến với các thí nghiệm đê rỗng (Thieu và Mai, 2020; Mai và cộng sự, 2019), có thể thấy năng lượng sóng bị triệt tiêu hoàn toàn sau khoảng một lần chiều dài sóng.



(a) $\lambda = 1$



(b) $\lambda = 0.9$



Hình 2. Sóng lan truyền trong môi trường có độ rỗng khác nhau.

3.2. Sóng leo trên bãi nghiêng nhám

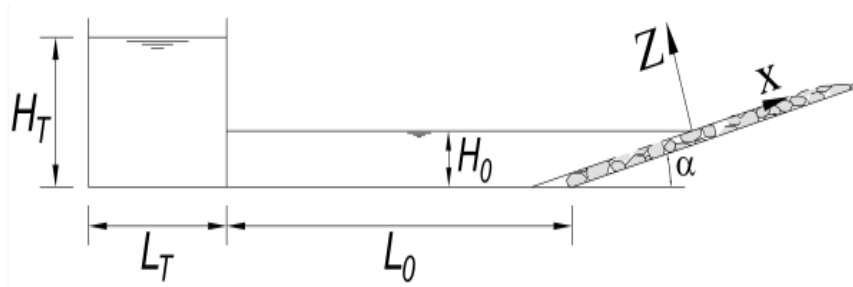
Để tiếp tục kiểm chứng mô hình đã phát triển, nhóm nghiên cứu tiến hành mô phỏng sóng leo và sóng rút trên bãi nghiêng nhám, đồng thời so sánh với kết quả thí nghiệm từ mô hình vật lý của O'Donoghue và cộng sự (2010) được thể hiện trên hình 3. Chiều cao cột nước ban đầu $H_T = 0.65$ m, với chiều rộng $L_T = 1$ m, độ sâu nước phía bãi $H_0 = 0.06$ m, với chiều rộng $L_0 = 3.8$ m. Độ nhám của bãi được tạo ra bằng cách sử dụng một lớp đá cuội nhỏ có đường kính $d = 5 \div 6$ mm xếp phía trên mái dốc cứng có độ dốc $\tan \alpha = 0.1$. Hệ số Chezy được sử dụng trong tính toán là $C_z = 28 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Cột nước ban đầu sau khi đổ xuống sẽ tạo sóng lan truyền trong môi trường nước thông thường với hệ số rỗng $\lambda = 1$, sau đó sóng leo lên mái dốc nhám theo trục x như hình 3. Kết quả mô hình được so sánh với số liệu thí nghiệm tại bốn vị trí $x = 0.5$ m, 2.35 m, 3.0 m, 3.55 m.

Hình 4 thể hiện mô hình số đã mô phỏng hiệu quả hiện tượng sóng leo trên bãi nhám tại

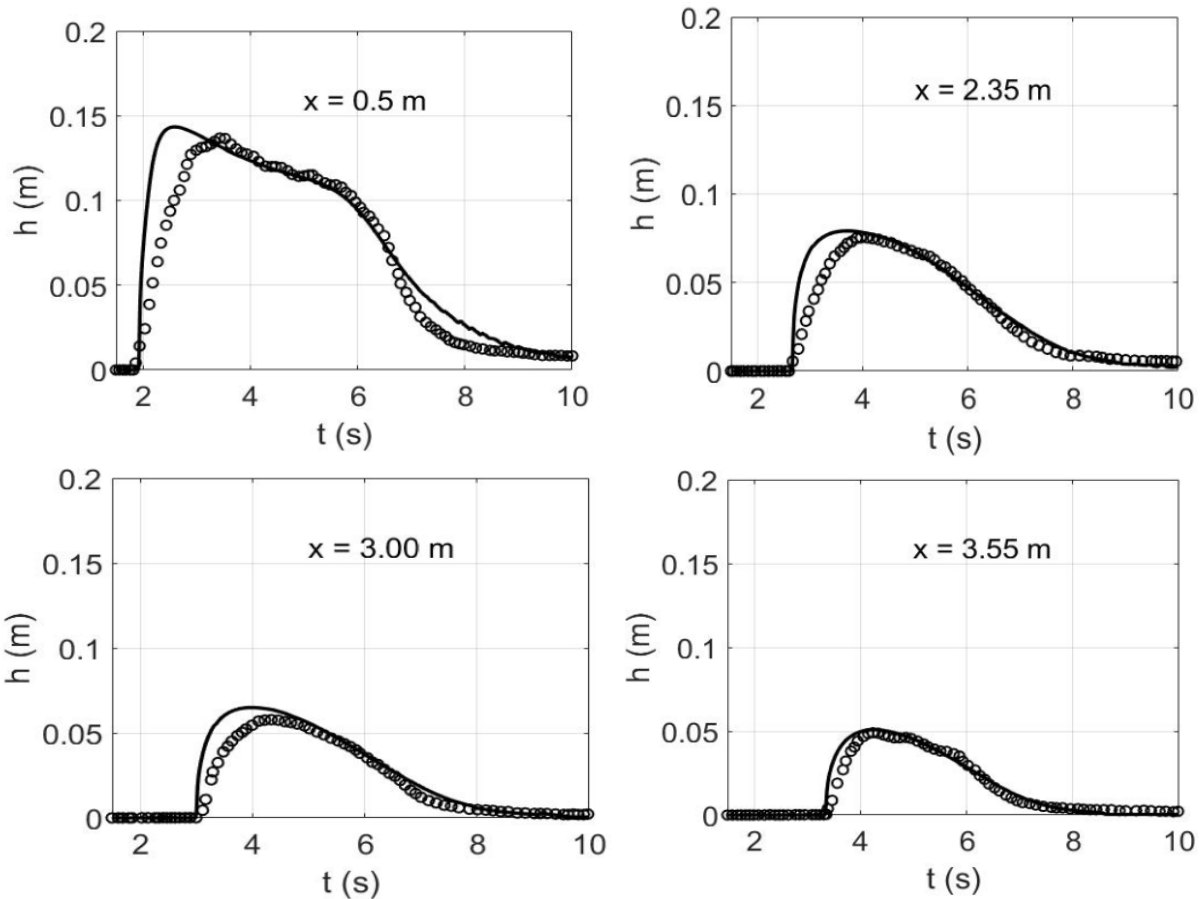
bốn vị trí khác nhau. Có thể nhận thấy khá rõ sự phù hợp được thể hiện cả về vận tốc sóng và chiều cao sóng. Về vận tốc sóng, tại bốn vị trí sóng truyền đến, kết quả thời gian để sóng leo tới mỗi vị trí của mô hình hiện tại và của số liệu thí nghiệm là hầu như không có sự khác biệt. Cụ thể, thời gian để bắt đầu leo tới điểm $x = 0.5$ m; 2.35 m; 3.0 m; 3.55 m tương ứng là $t = 1.92$ s; 2.66 s; 2.99 s; 3.34 s. Do đó, cùng một quãng đường và một thời gian, vận tốc sóng giữa hai kết quả là như nhau. Về chiều cao sóng, có thể thấy các thời điểm đầu ($t < 4$ s), kết quả cho thấy có sự chênh lệch đôi chút giữa số liệu mô hình số và số liệu thí nghiệm. Tuy nhiên, tại các thời điểm sau đó ($t > 4$ s), kết quả chênh lệch này giảm dần. Đặc biệt, tại điểm cao nhất trên mái dốc ($x = 3.55$ m), kết quả chiều cao sóng leo hầu như không có sự chênh lệch giữa kết quả mô hình số hiện tại và số liệu thí nghiệm.

4. Kết luận

Trong bài báo, nhóm tác giả đã áp dụng phương trình cơ bản phi tuyến dạng bảo toàn cho sóng nước nông lan truyền trong môi trường rỗng. Mô hình số trong nghiên cứu áp dụng phương pháp thể tích hữu hạn cho độ chính xác cao. Với trường hợp sóng truyền trong môi trường rỗng, kết quả mô phỏng từ mô hình số được so sánh với lời giải giải tích cho thấy năng lượng sóng suy giảm phụ thuộc vào độ rỗng của môi trường cũng như khoảng cách từ nguồn sóng tới vị trí tính toán. Trường hợp sóng leo và sóng rút trên mái dốc có độ nhám, mô hình số mô phỏng khá chính xác các hiện tượng sóng này ở những vị trí khác nhau trên mái dốc nhám khi so sánh với số liệu thí nghiệm của O'Donoghue và cộng sự (2010). Kết quả nghiên cứu ban đầu cũng là cơ sở để nhóm nghiên cứu tiếp tục phát triển mô hình số mã nguồn mở mô phỏng cho các trường hợp sóng leo trên bãi biển, sóng leo trên đê đá đổ, đê mái nghiêng không thấm hay trường hợp đặc biệt là sóng tràn trên đê mái nghiêng □



Hình 3. Thí nghiệm sóng leo mái dốc nhám (O'Donoghue và cộng sự, 2010).



Hình 4. So sánh chiều cao sóng leo và sóng rút trên mái dốc nhám giữa mô hình số hiện tại (nét liền) và kết quả thí nghiệm của O'Donoghue và cộng sự, 2010 (khoanh tròn) tại bốn vị trí trên mái dốc nhám.

Tài liệu tham khảo

- [1] Battjes, J.A. (1974), *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves*, PhD-thesis at the Delft University of Technology;
- [2] Van der Meer, J.W., Stam, C.-J. (1992), *Wave run-up on smooth and rock slopes of coastal structures*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 118 (5), 534-550;
- [3] Holman, R.A. (1986), *Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach*, Coastal Engineering, 9, 527-544;
- [4] Nielsen, P. and Hanslow, D.J. (1991), *Wave run-up distributions on natural beaches*, Journal of Coastal Research, 7(4), 1139 – 1152;
- [5] Vu, V.N., Lee, C., Jung, T.-H. (2018), *Extended Boussinesq equations for waves in porous water..* Coastal Engineering, 139, 85-97;
- [6] Lee, CH., Vu, V.N., Huynh, T.T., Jung, T.-H. (2018), *Extended Boussinesq equations for waves in two porous layers..* Proceeding of Coastal Engineering, 139, 85-97;
- [7] Pham V.K., Lee C., Vu V.N. (2019), *Numerical Simulation of Subaerial and Submarine Landslides Using the Finite Volume Method in the Shallow Water Equations with (b, s) Coordinate*, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(4), 229–39;
- [8] O'Donoghue, T., Pokrajac, D., Hondebrink, L.J. (2010), *Laboratory and numerical study of dam-break-generated swash on impermeable*

- slopes*, Coastal Engineering, 51 (11–12), 1164–1184;
- [9] Vu, V.N., Lee C., Jung, T.H. (2015), *Internal generation of damped waves in linear shallow water equations*, Coastal Engineering, 104, 13–25;
- [10] Thieu, Q.T., Mai, T.L. (2020), *Monsoon wave transmission at bamboo fences protecting mangroves in the lower Mekong delta*, Appl. Ocean Res. 101, 102259.
- [11] Mai, T., Dao, T., Ngo, A., Mai, C. (2020), *Porosity effects on wave transmission through a bamboo fence*, Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts. Springer Nature Singapore Pte Ltd.. 1413–1418.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.03-2019.338.

Ngày nhận bài: 06/04/2021

Ngày chuyển phản biện: 09/04/2021

Ngày hoàn thành sửa bài: 01/05/2021

Ngày chấp nhận đăng: 07/05/2021