

MÔ HÌNH SỐ TÍCH HỢP MÔ PHỎNG SẠT LỞ ĐẤT NGẦM TẠO SÓNG THẦN: KIỂM CHUẨN CHO BÀI TOÁN MỘT CHIỀU

INTEGRATED NUMERICAL MODEL OF SUBMARINE LANDSLIDE- INDUCED TSUNAMI: VERIFICATION TO ONE - DIMENSIONAL DOMAIN

PHẠM VĂN KHÔI

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: khoipv.ctt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Do động đất hoặc núi lửa hoạt động ngoài khơi, đáy biển nơi có mái dốc lớn có thể bị sạt lở gây ra sóng thần. Sóng thần tuy được hình thành ở vùng nước sâu với biên độ ban đầu khá nhỏ nhưng nó có thể lan truyền nhanh và không bị suy giảm năng lượng. Đặc biệt khi gặp đường bờ dốc ngược, chiều cao sóng thần sẽ tăng rất nhanh và có thể gây ra thảm họa với đất liền. Sạt lở đất ngầm tạo sóng thần là hiện tượng phức tạp chịu sự tác động qua lại giữa năng lượng đáy biển và năng lượng sóng. Trong nghiên cứu này, tác giả giới thiệu mô hình số tích hợp mô phỏng hiện tượng sạt lở đất ngầm bằng hệ phương trình phi tuyến nước nông và hiện tượng tạo - lan truyền sóng bằng hệ phương trình Boussinesq mở rộng có xét tới điều kiện biên đáy biển thay đổi theo thời gian - không gian. Kết quả mô phỏng bài toán một chiều của mô hình tích hợp sạt lở đất ngầm tạo sóng thần được kiểm chuẩn với kết quả thí nghiệm của mô hình vật lý.

Từ khóa: Mô hình số, mô hình tích hợp, sạt lở đất ngầm, sóng thần, bài toán một chiều.

Abstract

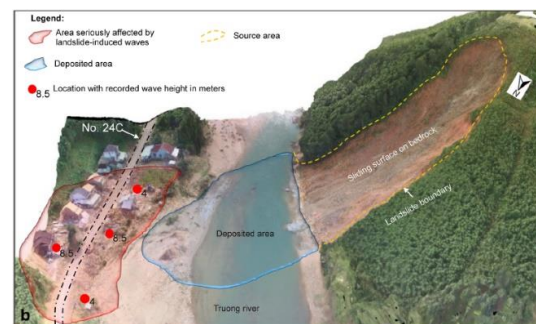
Due to the earthquake or the active volcano at the ocean, the seabed surface at the steep slope may slide down that induces tsunami. Tsunami generated in the deep water area has the initial small amplitude, but it can propagate very quickly, without energy loss. Especially when it meets the shore line, the wave height may be increased quickly then causes the disaster problem. The submarine landslide-induced tsunami is the complicated inter - connected phenomenon between seabed energy and water wave energy. In this study, the integrated model is introduced to simulate submarine landslide using the nonlinear shallow water equations and tsunami using the extended Boussinesq equations

including the bottom - varying in time and space. The result of one - dimensional integrated model of submarine landslide - induced tsunami is verified to the experimental data.

Keywords: Numerical model, integrated model, submarine landslide, tsunami, one-dimensional domain.

1. Giới thiệu

Sạt lở đất tạo sóng thần luôn là một đề tài thử thách với các nhà khoa học đại dương từ trước tới nay [1] - [7]. Năm 2011, trận động đất sóng thần hỗn hợp tại Tohoku, Nhật Bản xảy ra đã làm khoảng 18.000 người chết và thiệt hại hàng tỷ đô la. Trong một nghiên cứu sau đó, các nhà khoa học đã chứng minh rằng sạt lở đất ngầm dưới đáy biển do động đất đã góp phần làm gia tăng chiều cao sóng thần lên đến 40 m khi vào đến bờ biển [4]. Cuối năm 2018, núi lửa Anak Krakatau hoạt động ngoài khơi Indonesia đã làm xuất hiện sóng thần và làm chết hơn 400 người [6]. Tại Quảng Nam cuối năm 2017 cũng đã xảy ra sạt lở đất tạo sóng thần đã làm một người chết và phá hủy nhiều ngôi nhà ven sông Trường như Hình 1 [7]. So với sóng thần tạo bởi động đất, sóng thần tạo bởi sạt lở đất thường có biên độ sóng cao hơn và chiều dài sóng ngắn hơn [8]. Do đó, nhiều nhà khoa học đã dày công nghiên cứu để dự báo hiện tượng kết hợp nguy hiểm này.



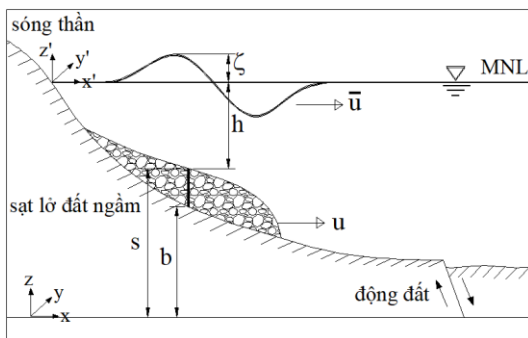
Hình 1. Sạt lở đất gây sóng thần tại khu vực sông Trường, Quảng Nam [7]

Đến nay, có hai cách tiếp cận để giải bài toán sạt lở đất tạo sóng thần. Cách thứ nhất là giả sử bề mặt đáy thay đổi như hình e-líp chuyển động trượt xuống để tạo sóng dùng các hệ phương trình bán ba chiều (hệ phương trình Boussinesq) [9]. Cách thứ hai là mô phỏng sạt lở đất đồng thời với mô phỏng sóng đều dùng hệ phương trình phi tuyến nước nông [10]. Cách thứ nhất có ưu điểm là mô phỏng được sóng ngắn nhưng lại không mô phỏng sạt lở đất mà chỉ giả sử điều kiện biên đáy chuyển động. Cách thứ hai tuy mô phỏng được sạt lở đất nhưng lại không mô phỏng được sóng ngắn khi dùng hệ phương trình phi tuyến nước nông [11].

Trong nghiên cứu này, tác giả mô phỏng sạt lở đất ngầm và lấy đó làm giá trị đáy thay đổi để mô phỏng sóng ngắn bằng hệ phương trình Boussinesq mở rộng. Do đó, phương pháp này có thể khắc phục nhược điểm của cả hai cách tiếp cận trên. Sạt lở đất ngầm được mô phỏng chính xác với hiện tượng không liên tục của điều kiện ban đầu bằng phương pháp thể tích hữu hạn. Hơn nữa, hệ phương trình Boussinesq mở rộng với thành phần phân tán có tính chính xác cao có thể mô phỏng được sóng ngắn như đặc trưng của hiện tượng sạt lở đất tạo sóng thần.

2. Mô hình tích hợp

Hình 2 thể hiện các biến và đại lượng chính của mô hình tích hợp, trong đó hệ trục tọa độ (x, y, z) áp dụng cho bài toán sạt lở đất ngầm và hệ trục tọa độ (x', y', z') áp dụng cho bài toán tạo sóng.



Hình 2. Miền tính toán cho mô hình tích hợp sạt lở đất ngầm tạo sóng thần

2.1. Mô hình sạt lở đất ngầm

Hệ phương trình chủ đạo dùng để tính toán sạt lở đất ngầm được là hệ phương trình phi tuyến nước nông một chiều dưới dạng bảo toàn dùng hệ tọa độ (b, s) [12] như sau:

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

Trong đó U, F, H lần lượt là thành phần biến, thông lượng và nguồn. Cụ thể:

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

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

$$H(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ g(s-b) \left(S_0 - \mu \cos \theta - \frac{n^2 u^2}{(s-b)^{4/3}} \right) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Trong đó, s và b tương ứng là cao độ bề mặt sạt lở và đáy sạt lở, u là vận tốc trung bình theo phương đứng của phần tử đất bị sạt lở theo phương ngang Ox . $S_0 (= -\partial b / \partial x = \tan \theta)$ là độ dốc đáy không xói (θ là góc dốc), $\mu (= \tan \phi)$ và n tương ứng là hệ số ma sát trong (ϕ là góc ma sát trong) và hệ số nhám Manning thể hiện thành phần lực cản do ma sát. Các biến s, u được thể hiện trên Hình 2. Vì hệ tọa độ (b, s) được định nghĩa theo phương trục z thẳng đứng nên có thể dễ dàng kết nối đáy thay đổi với hệ tọa độ (h, ζ) được định nghĩa theo chiều sâu nước của mô hình sóng.

Để giải tích phân hệ phương trình (1) của mô hình sạt lở đất ngầm theo thời gian, phương pháp tường minh Runge-Kutta 3 bước bậc 3 được sử dụng [13]. Phương pháp này cho độ chính xác với bước thời gian đủ nhỏ và được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực mô phỏng dòng chảy. Để giải tích phân hệ phương trình (1) theo không gian, phương pháp hỗn hợp thể tích hữu hạn - sai phân hữu hạn được sử dụng. Phương pháp này gần đây được sử dụng phổ biến như sự kết hợp giữa bài toán có điều kiện ban đầu không liên tục và liên tục [14]. Trong đó, phương pháp thể tích hữu hạn áp dụng giải thành phần thông lượng $(F(U))$ cho điều kiện bề mặt không liên tục, còn phương pháp sai phân hữu hạn áp dụng giải thành phần nguồn có độ dốc đáy liên tục. Phương pháp thể tích hữu hạn mới được sử dụng trong khoảng 30 năm gần đây với thế mạnh giải những bài toán điều kiện ban đầu không liên tục. Phương pháp này khá phức tạp và sẽ được đề cập chi tiết trong những nghiên cứu sau.

2.2. Mô hình sóng thần

Hệ phương trình mô phỏng sóng thần được sử dụng là hệ phương trình một chiều Boussinesq mở rộng với điều kiện biên đáy thay đổi theo thời gian [11], [15]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta)\bar{u}] + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$$

$$+ \frac{h^2}{6} \frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial x^2 \partial t} - \left(\frac{1}{2} + \gamma\right) h \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(h \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}\right)$$

$$- \gamma gh \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(h \frac{\partial \zeta}{\partial x}\right) - \frac{h}{2} \frac{\partial^3 h}{\partial x \partial t^2} = 0 \quad (6)$$

Trong đó \bar{u} và ζ tương ứng là vận tốc phần tử sóng trung bình theo chiều sâu theo phương Ox và tung độ bề mặt sóng, $h(x,t)$ là độ sâu nước thay đổi theo không gian và thời gian được thể hiện trên Hình 2, $\gamma (=1/15)$ là hệ số điều chỉnh mở rộng khả năng tính toán của mô hình ra vùng nước sâu hơn.

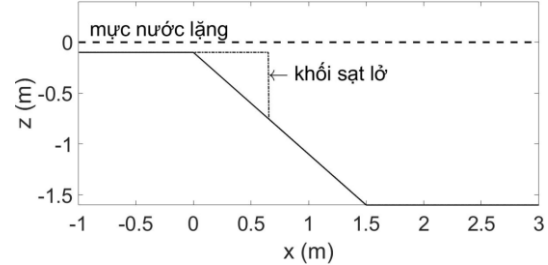
Phương pháp sai phân hữu hạn được sử dụng để giải hệ phương trình (5) và (6) tương tự như sử dụng trong mô hình sóng nổi tiếng FUNWAVE 1.0. Để giải tích phân theo thời gian, phương pháp dự đoán Adams-Bashforth bậc ba và phương pháp hiệu chỉnh Adams-Moulton bậc bốn được sử dụng. Để giải tích phân theo không gian, thành phần đạo hàm bậc nhất được rời rạc hóa với độ chính xác bậc 4 ($O(\Delta x^4)$) và những thành phần đạo hàm bậc cao hơn được rời rạc hóa chính xác bậc 2 ($O(\Delta x^2)$). Chi tiết về phương pháp sai phân hữu hạn có thể được tham khảo trong tài liệu [16].

3. Kiểm chuẩn mô hình bài toán một chiều

Do tính phức tạp của mô hình sạt lở đất ngầm tạo sóng thần, có rất ít thí nghiệm vật lý mô phỏng hiện tượng này. Trong bài báo này, tác giả dùng thí nghiệm vật lý tỷ lệ nhỏ sạt lở đất cát ngầm tạo sóng được trình bày trong tài liệu [17] để kiểm chuẩn cho mô hình số đề xuất. Đây cũng là thí nghiệm kiểm chuẩn cho nhiều mô hình số ba chiều mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần với độ chính xác cao [17], [18]. Miền tính toán mô hình thí nghiệm dài 4m, từ hoành độ $x = -1m$ đến $x = 3m$ như thể hiện trong Hình 3. Chiều sâu nước là 0,1m phía trên (ở vùng nước nông) và tăng dần theo mái dốc đáy đến 1,6m ở vùng nước sâu. Một hộp đất cát khối lượng riêng $\rho_c = 1.950kg/m^3$ với kích thước hình chiếu đứng là 0,65m x 0,65m được đặt trên mái

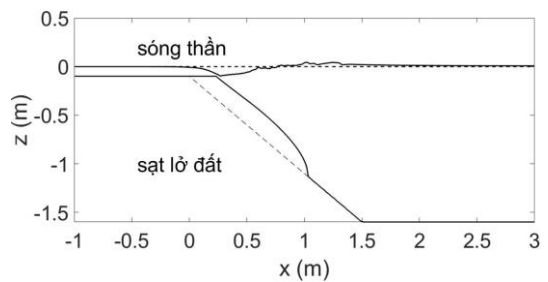
dốc lớn 45° và được ngăn bởi một cánh cửa. Sau khi cánh cửa đột ngột mở, đất cát sạt tự do xuống mái dốc và mặt nước dao động tạo sóng (hay sóng thần).

Hình 4 thể hiện kết quả của mô hình tích hợp đối

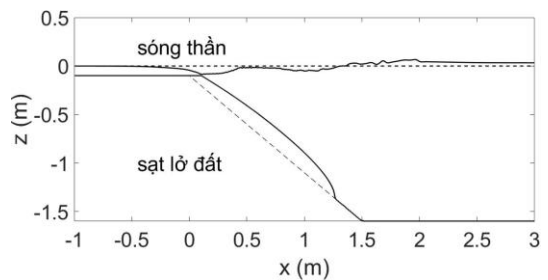


Hình 3. Điều kiện ban đầu của thí nghiệm sạt lở đất ngầm tạo sóng [17]

với miền tính toán của thí nghiệm kiểm chuẩn tại các thời điểm $t=0,4s$ (Hình 4.a) và $t=0,8s$ (Hình 4.b). Dưới tác dụng đẩy nổi của nước, khối cát trượt xuống mái dốc 45° với gia tốc đẩy nổi $g_{dn} = g(\rho_c - \rho_n)/\rho_c \approx 0,5g$ (trong đó $g = 9,81m/s^2$ là gia tốc trọng trường).



a) $t=0,4s$



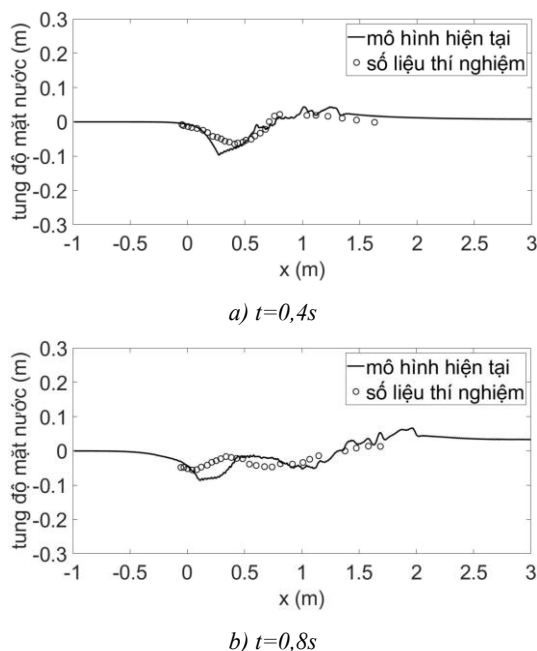
b) $t=0,8s$

Hình 4. Kết quả mô phỏng sạt lở đất ngầm và sóng thần được tạo ra của mô hình: a) $t=0,4s$, b) $t=0,8s$.

Có thể nhận thấy, so với gia tốc sạt lở đất trong không khí, gia tốc sạt lở đất ngầm dưới nước chỉ bằng một nửa, cho nên khối đất sạt khá chậm. Điều này được thể hiện sau khoảng thời gian 0,8s mà khối đất có kích thước 0,65m x 0,65m chưa sạt đến chân mái

dốc (Hình 4.b). Một nguyên nhân nữa làm cho khối đất sạt xuống với tốc độ chậm là do thành phần lực cản (thành phần nguồn thứ 2 và thứ 3 trong công thức (4)) chịu ảnh hưởng của hệ số ma sát trong của khối đất ngập nước và hệ số nhám Manning của bề mặt mái dốc. Các hệ số này khó xác định theo thực nghiệm trong điều kiện khối đất cát làm việc thực tế dưới nước nên được lấy theo giá trị kinh nghiệm lần lượt là hệ số ma sát trong $\mu = 1$ và hệ số nhám Manning $n=0,56m^{-1/3}s$.

Hình 5 thể hiện kết quả kiểm chuẩn trực tiếp tung độ mặt sóng của mô hình số với số liệu thí nghiệm tại các thời điểm $t=0,4s$ (Hình 5.a) và $t=0,8s$ (Hình 5.b). Có thể thấy một cách tổng quát, kết quả mô phỏng của mô hình số phù hợp với kết quả của thí nghiệm tại cả hai thời điểm nêu trên. Tại thời điểm $t=0,4s$ thì kết quả mô hình số thể hiện được một chân - một đỉnh sóng hình thành. Và tại thời điểm $t=0,8s$ thì kết quả mô hình số cũng thể hiện được hai chân - hai đỉnh sóng lan truyền như số liệu thí nghiệm, tuy rằng pha lan truyền có nhanh hơn một chút. Điều này hoàn toàn có thể được giải thích do mô hình số giả sử vật liệu đất cát là đồng nhất nên năng lượng sạt lở đất của mô hình truyền cho năng lượng sóng là lớn hơn trong thí nghiệm thực tế.



Hình 5. So sánh tung độ mặt sóng với số liệu thí nghiệm kiểm chuẩn mô hình: a) $t=0,4s$; b) $t=0,8s$

4. Kết luận

Trong bài báo này, mô hình tích hợp sạt lở đất tạo sóng thần được thiết lập bằng cách kết hợp giữa mô hình sạt lở đất và mô hình sóng. Trong đó, mô hình sạt lở đất sử dụng hệ phương trình phi tuyến nước nông,

phương pháp Runge-Kutta và phương pháp hỗn hợp thể tích hữu hạn - sai phân hữu hạn tương ứng được dùng để giải tích phân theo thời gian và không gian. Mô hình sóng sử dụng hệ phương trình Boussinesq mở rộng có xét đến điều kiện biên đáy biển đổi theo thời gian và không gian. Với mô hình sóng, phương pháp sai phân hữu hạn bậc cao được dùng để giải tích phân theo cả thời gian và không gian. Kết quả của mô hình tích hợp được kiểm chuẩn với số liệu thí nghiệm vật lý cho thấy sự phù hợp nhất định. Những nghiên cứu tiếp theo, mô hình tích hợp có thể kể đến ảnh hưởng ngược lại của sóng thần tới mô hình sạt lở đất ngầm để có thể tăng độ chính xác khi mô phỏng bài toán sạt lở đất ngầm tạo sóng thần trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. Heinrich, *Nonlinear Water Waves Generated by Submarine and Aerial Landslides*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.118, No.3, pp.249-266, May 1992, doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:3(249).
- [2] S. Assier-Rzadkiewicz, P. Heinrich, P. C. Sabatier, B. Savoye, and J. F. Bourillet, *Numerical Modelling of a Landslide-generated Tsunami: The 1979 Nice Event*, Pure appl. geophys., Vol.157, No.10, pp.1707-1727, Oct. 2000, doi: 10.1007/PL00001057.
- [3] D. Dutykh and H. Kalisch, *Boussinesq modeling of surface waves due to underwater landslides*, Nonlin. Processes Geophys., Vol.20, No.3, pp.267-285, May 2013, doi: 10.5194/npg-20-267-2013.
- [4] D. R. Tappin *et al.*, *Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami?*, Marine Geology, Vol.357, pp.344-361, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.margeo.2014.09.043.
- [5] S. T. Grilli *et al.*, *Modeling coastal tsunami hazard from submarine mass failures: effect of slide rheology, experimental validation, and case studies off the US East Coast*, Nat Hazards, Vol. 86, No.1, pp.353-391, Mar. 2017, doi: 10.1007/s11069-016-2692-3.
- [6] A. Paris, P. Heinrich, R. Paris, C. Guerin, H. Hebert, and A. Gailler, *Numerical modeling of the December 22, 2018 Anak Krakatau landslide and the following tsunami in Sunda Strait, Indonesia*, in OCEANS 2019 - Marseille, Marseille, France, Jun. 2019, pp.1-6. doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867270.
- [7] D. M. Duc *et al.*, *Analysis and modeling of a*

- landslide-induced tsunami-like wave across the Truong river in Quang Nam province, Vietnam*, *Landslides*, Vol.17, No.10, pp.2329-2341, Oct. 2020, doi: 10.1007/s10346-020-01434-2.
- [8] S. Yavari-Ramshe and B. Ataie-Ashtiani, *Numerical modeling of subaerial and submarine landslide-generated tsunami waves-recent advances and future challenges*, *Landslides*, Vol. 13, No.6, pp.1325-1368, Dec. 2016, doi: 10.1007/s10346-016-0734-2.
- [9] P. Lynett and P. L.-F. Liu, *A Numerical Study of Submarine-Landslide-Generated Waves and Run-Up*, *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol.458, No.2028, pp. 2885-2910, 2002.
- [10] K. Sassa, K. Dang, H. Yanagisawa, and B. He, *A new landslide-induced tsunami simulation model and its application to the 1792 Unzen-Mayuyama landslide-and-tsunami disaster*, *Landslides*, Vol. 13, No.6, pp.1405-1419, Dec. 2016, doi: 10.1007/s10346-016-0691-9.
- [11] V. K. Pham, V. N. Vu, and C. Lee, *Numerical simulation of tsunami due to submarine landslide using extended Boussinesq equations*, *Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2019) Hanoi, Vietnam, September 25-28, 2019, 2020*.
- [12] V. K. Pham, C. Lee, and V. N. Vu, *Numerical Simulation of Subaerial and Submarine Landslides Using the Finite Volume Method in the Shallow Water Equations with (b, s) Coordinate*, *J Korean Soc Coast Ocean Eng*, Vol. 31, No.4, pp.229-239, Aug. 2019, doi: 10.9765/KSCOE.2019.31.4.229.
- [13] D. Dutykh, T. Katsaounis, and D. Mitsotakis, *Finite volume schemes for Boussinesq type equations*, *Proceedings of Colloque EDP-Normandie*, 2011.
- [14] E. F. Toro, *Shock-capturing methods for free-surface shallow flows*. John Wiley & Sons, LTD, 2001.
- [15] C. Lee and V. N. Vu, *Development of extended Boussinesq equations to simulate tsunami generation and propagation*, *Proceedings of Coastal and Ocean Engineering in Korea, South Korea*, pp.1-3, 2015.
- [16] G. Wei and J. T. Kirby, *Time-Dependent Numerical Code for Extended Boussinesq Equations*, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.121, No. 5, pp.251-261, Sep. 1995, doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1995)121:5(251).
- [17] S. A. Rzedkiewicz, C. Mariotti, and P. Heinrich, *Numerical Simulation of Submarine Landslides and Their Hydraulic Effects*, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.123, No.4, pp.149-157, Jul. 1997, doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1997)123:4(149).
- [18] G. Ma, J. T. Kirby, and F. Shi, *Numerical simulation of tsunami waves generated by deformable submarine landslides*, *Ocean Modelling*, Vol.69, pp.146-165, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.ocemod.2013.07.001.

Ngày nhận bài:	19/11/2021
Ngày nhận bản sửa:	09/12/2021
Ngày duyệt đăng:	14/12/2021