



NGHIÊN CỨU ĐẶC TRƯNG XÓI CỦA ĐÊ CHẮN SÓNG BIỂN DO SÓNG TRẦN BẰNG MÔ PHỎNG SỐ SPH

Phạm Thế Anh¹

Tóm tắt: Đê chắn sóng có vai trò quan trọng trong việc bảo vệ cảng và các công trình dân sinh. Tuy nhiên, trong các đợt bão và động đất, đê bị đe dọa phá hủy. Xói nền đê là một trong những nguyên nhân chính gây mất ổn định, phá hủy đê. Nghiên cứu trình bày đặc trưng xói của đê chắn sóng do sóng biển thông qua mô hình đơn giản của đê và sóng tràn bằng phương pháp SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics). Sóng tràn được mô phỏng bằng dòng chảy liên tục có lưu lượng không đổi, đổ từ trên xuống. Tương tác giữa pha nước và đất được thể hiện thông qua lực dòng thấm. Ảnh hưởng của lưu lượng sóng tràn đến đặc tính xói được mô phỏng và phân tích. Ảnh hưởng của thông số bề rộng vùng ảnh hưởng trong phương pháp SPH tới đặc tính của xói cũng được trình bày. Kết quả cho thấy rằng, lưu lượng sóng tràn quá trình xói diễn ra nhanh hơn và thông số của phương pháp SPH có ảnh hưởng lớn đến kết quả mô phỏng.

Từ khóa: Phương pháp SPH; phương pháp không lưới; xói; ổn định; đê chắn sóng.

Summary: Breakwaters are important countermeasures for protecting harbors and other properties. However, under heavy storms and earthquakes, breakwaters become unstable and damaged. Scouring is one of main reasons causing the failures. This study employs SPH method (Smoothed Particle Hydrodynamics) and a simplified model to investigate characteristics of the scouring of breakwater mounds due to overtopping flow. The overtopping flow is a continuous flow with constant discharge. Interaction between soil and water is expressed by seepage force. The effect of the flow discharge on characteristics of the scouring is simulated and analyzed. In addition, the influence of the smoothing length in SPH method is also presented. The results show that, as the discharge is greater, the scouring progresses more quickly. Moreover, the smoothing length has significant effect on the results.

Keywords: Smoothed Particle Hydrodynamics; meshless method; scouring; stability; breakwater.

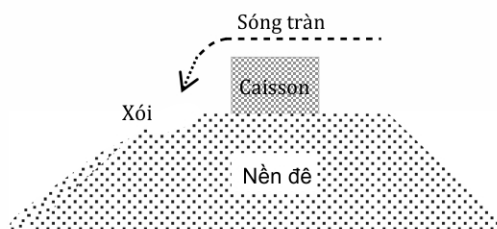
Nhận ngày 20/7/2016, chỉnh sửa ngày 3/8/2016, chấp nhận đăng 20/8/2016



1. Giới thiệu

Đê chắn sóng có vai trò quan trọng trong việc bảo vệ tàu thuyền và các công trình bên trong cảng. Đê có khả năng bị phá hoại trong đợt bão và động đất, điển hình như trong trận động đất sóng thần năm 2011 ở Nhật Bản. Arikawa [1] chỉ ra nguyên nhân gây mất ổn định và sụp đổ đê chắn sóng gồm: Áp lực sóng động; Chênh lệch mực nước hai bên caisson; Xói nền đê chắn sóng do sóng tràn; Giảm sức chịu tải của nền do tăng áp lực nước lỗ rỗng.

Trong tổng kết phá hủy của đê chắn sóng trong thảm họa năm 2011 ở Nhật Bản, Kazama [10] kết luận xói là một trong những nguyên nhân chính gây phá hoại đê. Vấn đề xói đã được nghiên cứu bởi nhiều tác giả. Farhoudi [8] cho rằng xói cục bộ là vấn đề phức tạp, phụ thuộc vào đặc điểm tính chất của dòng chảy. Bormann [2] chỉ ra chiều sâu xói là hàm của vận tốc và chiều cao dòng chảy và kích thước hạt. M. R. Islam [12] mô phỏng xói đất bằng mô hình đơn giản cho nền đất khô và đất bão hòa và thấy rằng, xói tăng theo thời gian khi lưu lượng chảy không đổi. Sulianto A. A. [15] tiến hành thí nghiệm và mô phỏng SPH cho bài toán xói cục bộ do sóng thần tràn và cho rằng chiều sâu xói tăng khi tăng lưu lượng sóng tràn và giảm khi tăng kích thước hạt của vật liệu đắp đê.



Hình 1. Mô hình đê chắn sóng bị xói do sóng biển

¹ThS, Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng. E-mail: phamtheanh1611@gmail.com.

Tuy nhiên, M. R. Islam [12] và Sulianto A. A. [15] không trình bày đầy đủ tính toán áp lực nước lỗ rỗng, ứng suất hữu hiệu và biến dạng cho nền đất bão hòa trong SPH.

Mô hình hai pha đất nước cho đất bão hòa trong khuôn khổ SPH vẫn chưa được phát triển toàn diện, chỉ có thể áp dụng giải quyết vấn đề đơn giản [3,4,5,7]. Nghiên cứu này áp dụng phương pháp SPH mô phỏng xói lở Kamaishi, Nhật Bản trong trường hợp đơn giản với nền đất khô.



2. Cơ sở của phương pháp SPH

Phương pháp SPH là phương pháp không lưới, loại hạt. Chuyển động của một thể liên tục được mô hình hóa bởi một tập các hạt chuyển động. Miền tính toán được rời rạc thành hữu hạn các hạt, trong đó các hạt được gán (mang) biến vận tốc, khối lượng, ứng suất... và chuyển động tuân theo các phương trình bảo toàn (khối lượng và động lượng). Các biến của từng hạt được tính toán dựa vào sự nội suy từ các hạt lân cận trong miền ảnh hưởng được định nghĩa trước. Việc nội suy được dựa vào biểu thức tích phân:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \quad (1)$$

trong đó: W là hàm Kernel; h là chiều dài định nghĩa vùng ảnh hưởng của W.

Phương trình xấp xỉ cho một hàm và cho đạo hàm riêng của hàm được thiết lập từ (1) (chi tiết xem [11]). Hàm xấp xỉ cho hạt i theo các hạt j trong miền ảnh hưởng được thể hiện bằng hai phương trình cốt yếu trong phương pháp SPH (2, 3):

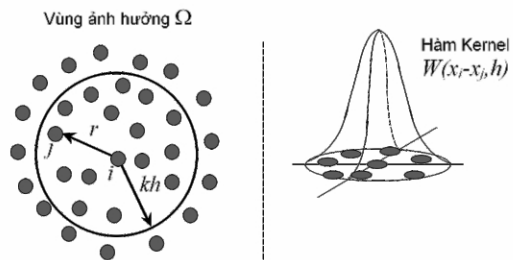
$$f(x) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x - x_j, h) \quad (2)$$

$$\frac{\partial f(x_i)}{\partial x} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \quad (3)$$

Với: N là tổng số hạt trong miền Ω ;

$$W_{ij} = W(x_i - x_j, h);$$

$$\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_j} = \frac{x_i - x_j}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}}$$



Hình 2. Minh họa miền lân cận Ω của hạt i và hàm W

Chiều dài kh quyết định đến số lượng hạt tham gia vào tính toán các thông số của hạt i, do đó có ảnh hưởng đến độ chính xác của bài toán.



3. Mô hình 2 pha đất - nước

Nghiên cứu này coi đất là tập hợp hai pha đất - nước. Trong phương pháp SPH, đất và nước ngoài tuân theo phương trình chuyển động riêng rẽ như đề cập trong nghiên cứu trước [6, 11] còn có sự tương tác với nhau. Sự tương tác hạt đất và nước được mô tả qua lực thấm. Nước chảy qua khe rỗng trong đất sẽ tác dụng một lực tới các hạt đất và ngược lại. Lực thấm f phụ thuộc vào vận tốc tương đối giữa hạt đất và nước ($v_{\text{water}} - v_{\text{soil}}$), hệ số rỗng n và hệ số thấm k. Theo Maeda [14] và Bui [3], lực thấm f được tính:

$$f = \gamma_w n \frac{(v_{\text{water}} - v_{\text{soil}})}{k} \quad (4)$$

trong đó: γ_w là trọng lượng riêng của nước.

Trong mô hình hai pha, với lực thấm được trình bày ở trên, phương trình chuyển động của hạt đất và hạt nước trong khuôn khổ phương pháp SPH [3,4,5,7, 11]:

$$\text{Đất: } \frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \frac{\sigma'_i + \sigma'_j}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} - \Pi_{ij} \delta^{\alpha\beta} + \sum_{j=1}^N m_j \frac{\gamma_w n \frac{(v_a - v_i)}{k}}{\rho_i \rho_a} W_{ia} + g_i^\alpha \quad (5)$$

$$\text{Nước: } \frac{Dv_a^\alpha}{Dt} = - \sum_{b=1}^N m_b \frac{p_a + p_b}{\rho_a \rho_b} \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_a^\alpha} + \sum_{b=1}^N m_b \frac{\mu_a \epsilon_a^{\alpha\beta} + \mu_b \epsilon_b^{\alpha\beta}}{\rho_a \rho_b} \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_a^\alpha} - \Pi_{ab} \delta^{\alpha\beta} - \sum_{b=1}^N m_b \frac{\gamma_w n \frac{(v_a - v_i)}{k}}{\rho_i \rho_a} W_{ia} + g_a^\alpha \quad (6)$$

trong đó: α và β biểu thị các thành phần Đề Các x, y, z với quy ước Einstein áp dụng cho các chỉ số lặp lại; i, a là hạt đất và hạt nước đang được xét; p_a áp lực nước tại vị trí hạt a; ρ , m là tỷ trọng (coi ρ_i không đổi), khối lượng; v là vận tốc, σ' là tenxơ ứng suất hữu hiệu (giá trị âm biểu thị sự nén), g là thành phần ngoại lực.

Việc xác định các giá trị ứng suất, áp lực nước và các giá trị khác trong khuôn khổ SPH được trình bày trong [3,4,5,7, 11] với mô hình đất Drucker - Prager và nước chuyển động tuân theo các phương trình Navier-Stokes.



4. Ứng suất ban đầu

Với bài toán mặt đất bất kỳ, phương pháp tăng tải trọng lực thường được áp dụng để tính toán ứng suất ban đầu trong đất. Theo đó, ứng suất ban đầu được tạo bằng cách tăng trọng lượng bản thân ở các bước tính toán đầu tiên. Bui [4] đã thiết lập công thức tính ứng suất ban đầu trong khuôn khổ phương pháp SPH với thành phần lực giảm chấn D_i^α được thêm vào phương trình (5):

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} - \Pi_{ij} \delta^{\alpha\beta} + f_{ij}^n (R_i^{\alpha\beta} + R_j^{\alpha\beta}) \right) \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_i^\beta} + f^\alpha + D_i^\alpha \quad (7)$$

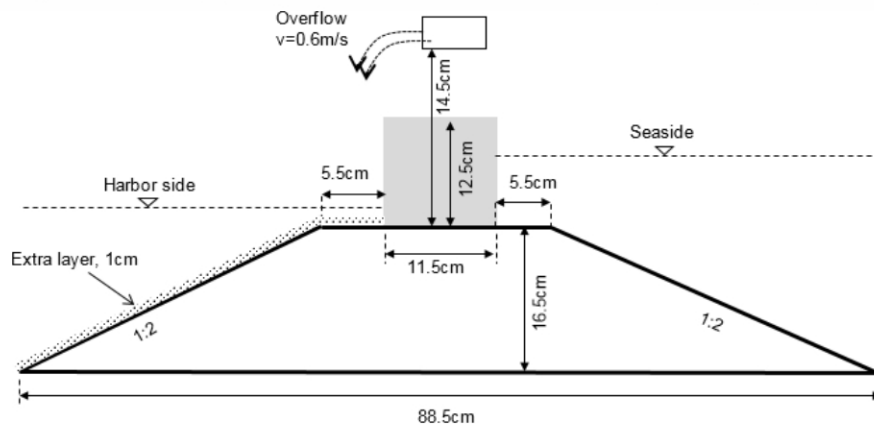
trong đó: $D_i^\alpha = -c_a v_i^\alpha$ với c_a là hệ số giảm chấn, được tính: $c_a = \mu \sqrt{\frac{E}{\rho h^2}}$; μ là hệ số giảm chấn không thứ nguyên, được lấy bằng 0.02, h chiều dài vùng ảnh hưởng và ρ , E là khối lượng riêng và module đàn hồi của đất.

Vì lý do lực giảm chấn sẽ dẫn đến sự tiêu hao năng lượng, phương trình (7) chỉ dùng cho mục đích tính toán ứng suất ban đầu.

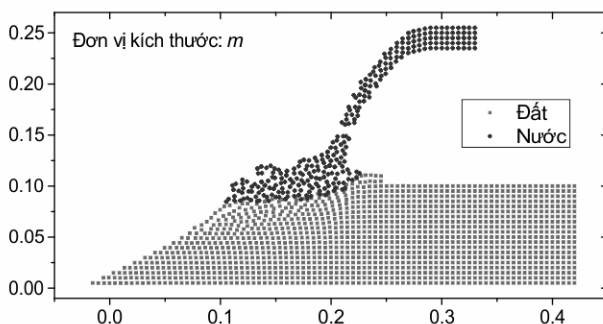


5. Mô phỏng xói lở biển do sóng bằng phương pháp SPH

Nghiên cứu mô phỏng xói lở bờ bảo vệ cảng Kamaishi, Nhật Bản trong trường hợp đơn giản. Mặt cắt của đê với tỷ lệ 1/200 thể hiện trong Hình 3. Tại thời điểm có sóng lớn, tồn tại mực nước chênh lệch hai bên của đê. Dưới tác dụng của sóng tràn, đê bị xói gây mất ổn định cho đê, đe dọa đến hoạt động bên trong cảng.



Hình 3. Mặt cắt tỷ lệ 1/200 của đê Kamaishi, Nhật Bản (M. R. Islam, 2014)



Hình 4. Mô hình mô phỏng bằng SPH

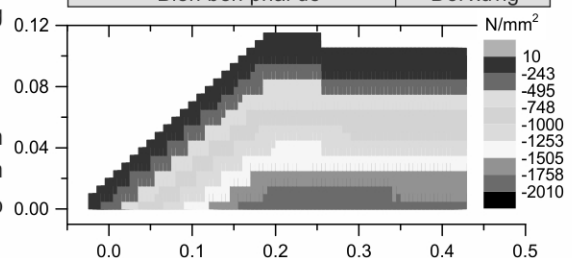
Nghiên cứu chỉ xét trường hợp đơn giản, nền đất khô (không có nước ở 2 phía của đê) và bỏ qua trọng lượng của caisson. Thành phần sóng tràn được mô hình bằng dòng chảy có lưu lượng không đổi và chiều cao sóng tràn được giả định là 14.5cm như Hình 3. Mô hình đất đàn dẻo sử dụng trong nghiên cứu là Drucker-Prager; nước tuân theo các phương trình Navier-Stokes. 1/2 mô hình được mô phỏng để nhằm giảm thời gian tính toán (Hình 4). Thông số dùng trong mô phỏng được trình bày trong Bảng 1.

5.1 Tính toán ứng suất ban đầu cho bài toán

Áp dụng phương trình (7) để tính toán ứng suất ban đầu trong nền đê có mặt đất không phẳng. Với điều kiện biên và thông số như trong Bảng 1, giá trị $k_h = 1.05\Delta d$ cho giá trị ứng suất ban đầu phù hợp (Hình 5).

Bảng 1. Thông số sử dụng trong mô phỏng

Số lượng hạt đất	924
Khoảng cách ban đầu giữa các hạt Δd , m	0.005
Chiều dài k_h , m	$1.05\Delta d$, $1.5\Delta d$ và $2.0\Delta d$
Bước thời gian Δt , s	10^{-5}
Khối lượng riêng khô của đất, kg/m ³	2008
Khối lượng riêng của nước, kg/m ³	1000
Hệ số thấm, cm/s	0.10
Hệ số rỗng n	0.50
Góc ma sát trong ϕ ($c=0$), độ	38
Modulus E , MPa	15
Hệ số Poisson ν	0.35
Hệ số α , β cho đất	0.1, 0.1
Hệ số α , β cho nước	0.1, 0
Biên cứng dưới nền	Cố định
Biên bên phải đê	Đối xứng



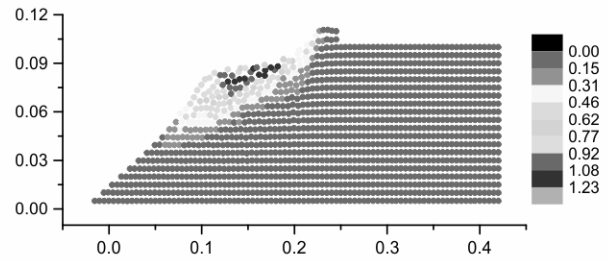
Hình 5. Ứng suất đất ban đầu trong đất, N/m²

5.2. Thay đổi phạm vi miền ảnh hưởng kh của các hạt đất và nước

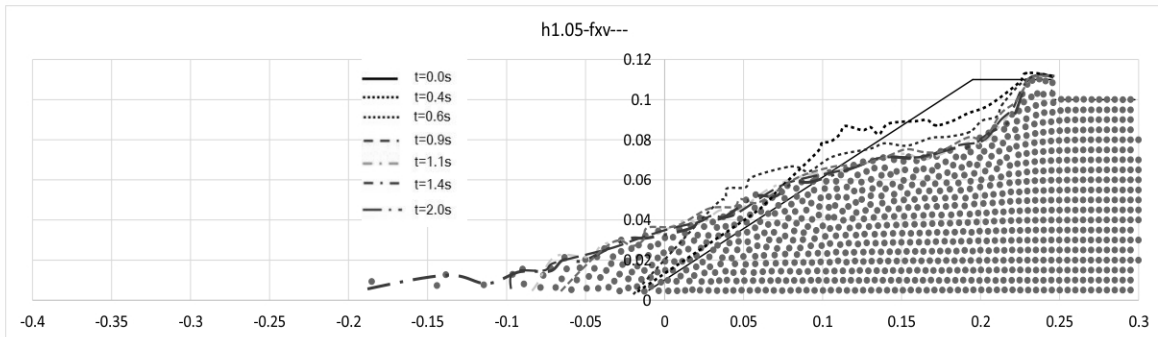
Nhằm khảo sát ảnh hưởng của chiều dài miền ảnh hưởng kh tới kết quả xói, nghiên cứu mô phỏng với 3 trường hợp như thể hiện trong Bảng 1. Điều kiện ứng suất ban đầu được thỏa mãn cho ba trường hợp phân tích, như thể hiện ở Hình 5.

Kết quả với chiều dài kh = 1.05 Δ d:

Từ kết quả thể hiện trong Hình 7, với lưu lượng không đổi, miền xói tăng dần và đất trượt xuống phía chân đê. Sau đó miền xói dần ổn định, tuy nhiên các hạt đất bị xói ở chân đê tiếp tục di chuyển ra xa hơn.

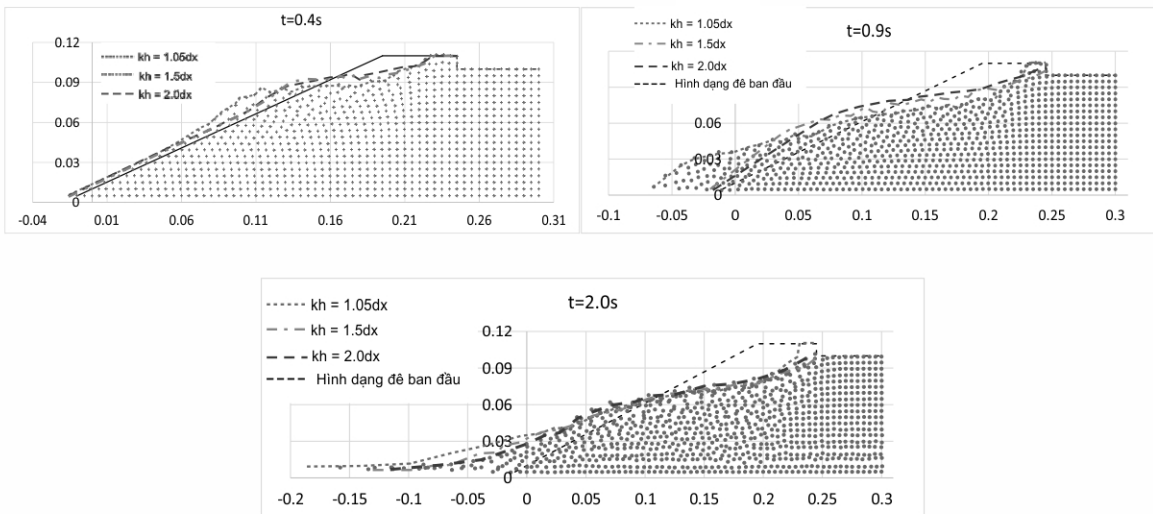


Hình 6. Biểu dạng cắt lớn nhất tại thời điểm $t=0.4s$



Hình 7. Xói của đê tại các thời điểm khác nhau (hạt đất trong hình tương ứng với $t=2.0s$)

So sánh $kh=1.05d$ với $kh=1.5\Delta d$ và $kh=2.0\Delta d$:

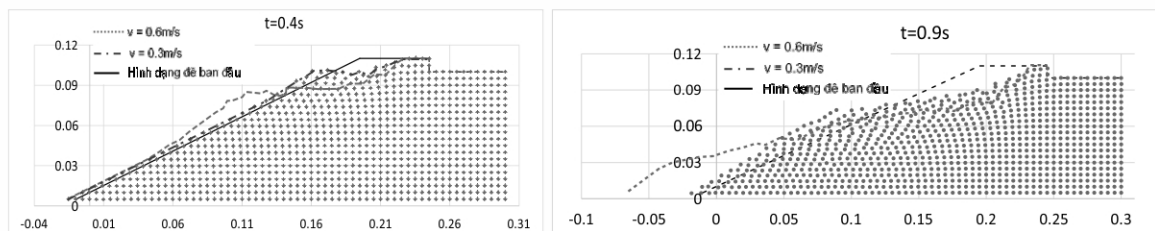


Hình 8. Phạm vi xói tại thời điểm $t=0.4s$, $t=0.9s$ và $t=2.0s$

So sánh các trường hợp với nhau trong Hình 8, ta thấy rằng khi phạm vi ảnh hưởng kh tăng, miền xói giảm. Do vậy, giá trị kh có ảnh hưởng đến ứng suất biến dạng của đê.

5.3 Trường hợp thay đổi lưu lượng

Nhằm khảo sát ảnh hưởng của lưu lượng sóng tràn tới xói của đê, sóng tràn với vận tốc $v=0.6m/s$ và $v=0.3m/s$ sẽ được mô phỏng. Sóng tràn được thiết kế sao cho vị trí xói nền đê của trường hợp $v=0.3m/s$ trùng với trường hợp $v=0.6m/s$. Thông số kh sử dụng cho mô phỏng trong trường hợp thay đổi lưu lượng là 1.05 Δ d, các thông số khác không đổi có giá trị trong Bảng 1.



Hình 9. Miền xói tại thời điểm $t=0.4s$ và $t=0.9s$

Với kết quả thể hiện trong Hình 9, khi lưu lượng sóng tràn tăng, sự xói của đề diễn ra mạnh hơn.

6. Kết luận

Nghiên cứu đã mô tả bài toán xói, bài toán biến dạng lớn bằng phương pháp SPH thông qua mô hình thực tế. Thông số kh trong phương pháp SPH có ảnh hưởng lớn kết quả tính toán. Kết quả mô phỏng cho thấy, khi vận tốc của sóng tràn tăng, nền đề bị xói nhanh hơn và phạm vi xói rộng hơn.

Nghiên cứu này chỉ dừng lại ở mô phỏng, do đó kết quả cần được kiểm chứng bằng thực nghiệm. Nghiên cứu tiếp theo cần tập trung phát triển mô Hình 2 pha đất - nước nhằm mô phỏng đầy đủ các điều kiện thực tế của bài toán, gồm đất bão hòa, mực nước hai bên đề chênh lệch và trọng lượng của cassion. Ngoài ra, cần thiết tạo mô hình sóng tràn trong điều kiện thật, ví dụ tạo sóng thật tương tác với cassion tràn qua đề để khảo sát biến dạng và ổn định của đề.

Tài liệu tham khảo

1. Arikawa T., Sato M., Shimosako K., Hasegawa I., Yeom Gyeong-Seon and Tomita T (2012), "Failure mechanism of Kamaishi breakwater due to the great east Japan earthquake tsunami", available at <http://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/viewFile/6845/pdf>.
2. Bormann, N. E., Julien, P. Y. (1991), "Scour downstream of grade- control structures", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(5), pp.579- 594
3. Bui Ha H., K. Sako and R. Fukagawa (2007), "Numerical simulation of soil-water interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method", *Journal of terramechanics* 44 (2007) pp.339-346.
4. Bui Ha H. and Fukagawa Ryoichi (2011), "An improved SPH method for saturated soils and its application to investigate the mechanisms of embankment failure: Case of hydrostatic pore-water pressure", *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2013.
5. Bui Ha H., Nguen C.T., K. Sako and R. Fukagawa (2011), "A SPH model for seepage flow through deformable porous media", *6th international SPHERIC workshop*, Hamburg, Germany, June 08-10, 2011.
6. Bui, H. H., Fukagawa, R., Sako, K. and Ohno, S. (2008), "Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic - plastic soil constitutive model", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.32, pp.1537-1570.
7. Bui, H. H., Fukagawa, R., Sako, K. and Wells J.C. (2011), "Slope stability analysis and discontinuous slope failure simulation by elasto-plastic smoothed hydrodynamics (SPH)", *Geotechnique*.
8. Farhoudi, J., Smith, K.V.H. (1985), "Local scour profiles downstream of hydraulic jump", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 23, No.4, pp.343-358.
9. Imase T., Maeda K., Miyake M., Sawada Y., Sumida H. and Tsurugasaki K. (2012), "Destabilization of a caisson-type breakwater by scouring and seepage failure of the seabed due to a tsunami", *ICSE6 Paris*.
10. Kazama Motoki, Noda Toshihiro (2012), "Damage statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake damage)", *Soils and Foundations* 2012; 52 (5): pp. 780-792.
11. Liu, G., and Liu, M., (2003), *Smoothed Particles Hydrodynamics: a meshfree method*, in World Scientific, Singapore, pp. 449.
12. M. R. Islam (2014), *SPH simulation on failure of a breakwater mound due to tsunami scour under experimental conditions*, PhD dissertation 2014, Yokohama National University.
13. M.R. Islam, K. Hayano and A.M.K.N. Nadeesha (2013), "Simulating the effect of flow volume on scouring process around breakwater", *Int. J. of GEOMATE*.
14. Maeda Kenichi, Hirotaka Sakai and Mamoru Sakai (2004), "Development of seepage failure analysis method of ground with smoothed particle hydrodynamics", *JSCE* vol.7, 2004, pp.775-786.
15. Sulianto A. A., Murakami K., Tokutomi Y., Ueno K (2015), "Study on local scouring of gravel mound due to tsunami overflow", *Procedia Engineering* 116, 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts.