

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.245

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN SỐ KẾT HỢP MÔ PHỎNG DIỄN BIẾN LÒNG DẪN VÀ SẠT LỞ BỜ SÔNG, ÁP DỤNG CHO SÔNG ĐỒNG NAI ĐOẠN CÙ LAO RỪA

Nguyễn Mộng Giang¹, Nguyễn Thị Thanh Hoa^{2,3*}, Trần Đức Đậu³ và Lê Song Giang²

¹Khoa Môi trường và Tài nguyên, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh

²Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh

³Khoa Địa chất và Khoáng sản, Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Thị Thanh Hoa (email: ntthoa.sdh19@hcmut.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 09/09/2022

Ngày nhận bài sửa: 12/10/2022

Ngày duyệt đăng: 01/12/2022

Title:

The numerical model combined with simulation of riverbed evolution and river bank erosion applied to Dong Nai river, Rua island

Từ khóa:

Diễn biến lòng dẫn, mô hình toán số, sạt lở bờ sông Cù lao Rùa

Keywords:

Bed evolution, numerical model, river erosion, Rua island

ABSTRACT

There are some approaches to researching riverbed evolution and bank erosion, such as morphology or dynamics. The aim of the paper is to present a numerical model that combines the calculation of riverbed evolution and riverbank erosion. The novelty of this study is that the flow is calculated by the 3D hydrodynamic model, so the frictional stress on the riverbank surface is calculated directly. The process of bed and bank erosion by flow was calculated using the 3D hydrodynamic model in combine with a sediment transport module. The slide of the riverbank was evaluated by a circular arc stability analysis. The pore pressure used in stability analysis was calculated by solving the infiltration flow equation. The model was tested by calculating the evolution of the Dong Nai river at Rua island. The calculations showed that the model requires one hour on a PC with an i7 core for computing 3 hours of reality. With such a calculation speed, the applicability of the model is quite good.

TÓM TẮT

Có một số cách tiếp cận trong nghiên cứu bồi xói và sạt lở bờ sông như cách tiếp cận hình thái hoặc cách tiếp cận động lực học. Mục tiêu của bài báo là trình bày một mô hình toán số kết hợp tính toán diễn biến lòng dẫn và sạt lở bờ sông. Điểm mới trong nghiên cứu là dòng chảy được tính bằng mô hình thủy động lực 3D nên ứng suất ma sát trên bề mặt bờ sông được tính toán trực tiếp. Mô phỏng diễn biến xói đáy, xói ngang bờ được tính toán bằng mô hình dòng chảy 3D kết hợp với mô hình vận tải bùn cát. Sạt lở bờ sông được tính toán bằng thông qua phân tích ổn định cung trượt tròn. Áp lực khe rỗng sử dụng trong phân tích ổn định được tính toán bằng cách giải phương trình dòng chảy thấm. Mô hình được áp dụng tính toán thử nghiệm cho đoạn sông Đồng Nai tại Cù lao Rùa. Các tính toán đã cho thấy mô hình cần 1 giờ chạy trên máy tính PC i7 để tính toán mô phỏng cho 3 giờ thực tế. Với tốc độ tính như vậy khả năng ứng dụng của mô hình là khá tốt.

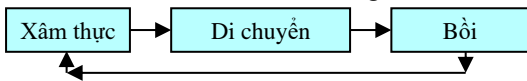
1. GIỚI THIỆU

Nghiên cứu bồi xói và sạt lở bờ sông đến nay đã có một số cách tiếp cận được sử dụng. Những năm

của thế kỷ 19-20, phương pháp nghiên cứu hình thái là cách tiếp cận cổ điển nhất được sử dụng. Với phương pháp này, giữa các kích thước lòng dẫn và

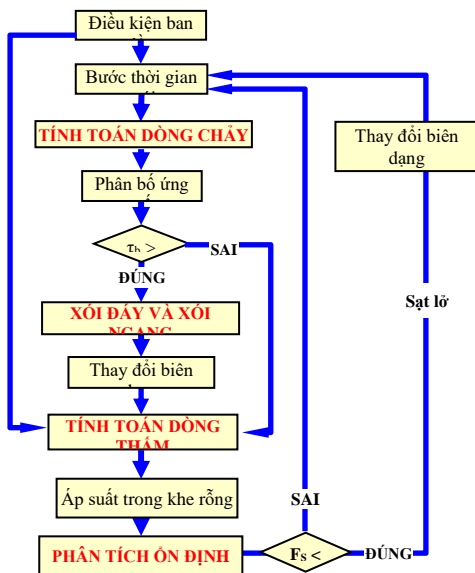
yếu tố động lực có một mối quan hệ xác định như của Bulle (1926), Lane (1937), Leopold and Maddock (1953) hay Wolman (1955). Mọi sự thay đổi các yếu tố trong quan điểm này đều dẫn tới gia tăng hoạt động xói lở hoặc bồi lắng và lòng dẫn sẽ đạt tới trạng thái ổn định chỉ khi quan hệ hình thái được tái lập. Tuy nhiên, cách tiếp cận này tồn tại 2 hạn chế cơ bản: không cho thấy được quá trình diễn biến bồi xói và không phản ánh được diễn biến phức tạp của cấu trúc địa chất và chế độ thủy lực.

Ngày nay, các cách tiếp cận hiện đại và hiệu quả được sử dụng. Trong đó, phương pháp tiếp cận động lực học được sử dụng rộng rãi. Theo các tiếp cận này, sự tương tác lực giữa dòng chảy và các hạt bùn cát trong lòng dẫn chi phối sự dịch chuyển bùn cát và bồi xói lòng dẫn. Toàn bộ quá trình cơ học biến hình lòng dẫn có thể được xem như là một chu trình (Van, 1933) và được minh họa bằng Hình 1.



Hình 1. Chu trình vận tải bùn cát

Như vậy, một nghiên cứu hoàn chỉnh sẽ phải được thực hiện theo sơ đồ logic được giới thiệu trên Hình 2. Tùy tác giả mà các tính toán dòng chảy, tính toán xói đáy và xói ngang, tính toán dòng thấm ở bờ sông và phân tích ổn định có thể được thực hiện theo các phương pháp, các sơ đồ, công thức khác nhau. Đã có nhiều tác giả nghiên cứu bài toán này (Fu and Jin, 2009) (Gupta et al., 1989) (GEO-SLOPE International, Ltd., 2012). Tuy nhiên, bài viết chỉ tập trung làm rõ vấn đề tính toán sạt lở bờ.



Hình 2. Sơ đồ logic tính diễn biến lòng dẫn

Trong phương pháp tiếp cận động lực, một trong những nghiên cứu đầu tiên về bồi xói lòng dẫn và sạt lở bờ sông là của Osman and Thorne (1988). Nghiên cứu được thực hiện đối với sông có vật liệu đáy kết dính. Osman và Thorne tính dòng chảy bằng mô hình 1D và chỉ tính xói ngang tại chân bờ sông. Osman và Thorne cũng không tính dòng chảy thấm. Hệ số an toàn chống trượt F_s (Bishop, 1955) được tính với giả thiết mặt phẳng trượt đi qua điểm chân bờ sông.

Kế thừa Osman và Thorne (1988), một loạt các nghiên cứu của Jia et al. (2019), Darby and Thorne (1996), Darby et al. (2007), Rinaldi et al. (2008) và Luppi et al. (2009) đã làm cho phương pháp tính toán diễn biến lòng dẫn trở nên hoàn thiện hơn. Các cải tiến được thực hiện như sử dụng mô hình thủy động 2D thay cho mô hình 1D để tính toán dòng chảy, ma sát đáy và vận tải bùn cát. Xói ngang cũng được tính không chỉ ở chân bờ sông mà là trên toàn bộ bề mặt bờ sông nhờ hưởng thụ kết quả tính toán phân bố ứng suất trên chu vi ướt trực tiếp bằng mô hình 2D. Phân tích ổn định bờ cũng xét đến áp suất khe rỗng thông qua việc đã bổ sung thêm tính toán dòng thấm tại bờ sông và sử dụng các lý thuyết mặt trượt mới. Trường hợp bờ sông với nhiều lớp đất khác nhau cũng đã được xét đến.

Một nghiên cứu khác là mô hình BSTEM (Simon et al., 2000) được phát triển bởi Phòng thí nghiệm trầm tích quốc gia ở Oxford, Hoa Kỳ. Mô hình gồm 2 thành phần là module ổn định bờ và module xói chân. Phân tích ổn định bờ, BSTEM tính toán hệ số an toàn (F_s) cho phép chọn 1 trong 3 phương pháp cân bằng giới hạn: lớp ngang, cột dọc và cắt hẫng (cantilever failure). Mô hình mô tả 5 lớp đất nằm ngang với các đặc tính địa kỹ thuật riêng biệt. Về tính toán xói, BSTEM chỉ tính xói ngang chân bờ do dòng chảy, không tính xói đứng. Sau đó, Lai et al. (2014, 2015, 2017) trong một chuỗi các nghiên cứu đã cải tiến mô hình BSTEM. Các cải tiến gồm: (i) sử dụng mô hình 2D trung bình chiều sâu SRH-2D để tính toán dòng chảy và xói theo phương đứng, kết hợp với tính toán xói ngang bằng BSTEM. Tuy nhiên, phân bố ứng suất tiếp dọc theo thành bờ sông không tính được bằng mô hình 2D mà phải giả thiết phân bố tuyến tính. Ứng suất ở chân bờ dốc tính từ mô hình 2D còn tại mép nước là không. Sai số do giả thiết phân bố ứng suất sẽ được hiệu chỉnh bằng hệ số xói. (ii) Sử dụng mô hình phân tích ổn định bờ đơn giản hơn trong đó bờ được giả thiết là lồi đều toàn bộ và sạt lở được tính với giả thiết góc nghiêng của bờ giữ nguyên, bằng góc nghiêng của đất.

Mục tiêu của bài báo này là trình bày một mô hình toán tích hợp mô phỏng diễn biến lòng dẫn và sạt lở bờ sông trong đó có xét đầy đủ các yếu tố như sơ đồ của Hình 2. Điểm mới trong nghiên cứu là dòng chảy được tính mô hình thủy động lực 3D nên ứng suất ma sát trên bề mặt bờ sông được tính toán trực tiếp. Ngoài ra, một cách tiếp cận khác, cách tiếp cận trong đó ổn định bờ được tính toán bằng phương pháp cung trượt tròn có xét đến áp lực khe rỗng được tính toán bằng cách giải phương trình dòng chảy thấm cũng được đề xuất và cho phép tính toán mô phỏng diễn biến lòng dẫn trong thời gian dài một cách hiệu quả. Mô hình được áp dụng tính toán thử nghiệm cho đoạn sông Đồng Nai tại Cù lao Rùa.

2. MÔ HÌNH TOÁN

2.1. Mô hình, dòng chảy, vận tải bùn cát và diễn biến bồi xói đáy

Dòng chảy và vận tải bùn cát lơ lửng được tính toán bằng mô hình 3 chiều (3D) của phần mềm F28 (Giang, 2011). Trong phần mềm này, các phương trình cơ bản được viết trong hệ tọa độ biến đổi “sigma” như sau:

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \nabla_{\sigma}(\mathbf{q}) + \frac{\partial q_{\sigma}}{\partial \sigma} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \nabla_{\sigma}[\mathbf{q}U - DA_H \nabla_{\sigma} \mathbf{U}] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[q_{\sigma} U - \frac{A_V}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] = -g D \nabla_{\sigma} \eta + D \mathbf{F} \tag{2}$$

$$\frac{\partial q_C}{\partial t} + \nabla_{\sigma} [q_C - HD_H \nabla_{\sigma} C] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[(q_{\sigma} - w_{s0}) C - \frac{D_V}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] = 0 \tag{3}$$

$$(1 - P) \rho_C \frac{\partial z_b}{\partial t} = (D_b - E_b) \tag{4}$$

Trong đó, η – mực nước; $\mathbf{U} = [u_x, u_y]^T$ – hai thành phần vận tốc của dòng chảy trên phương ngang; ω – thành phần vận tốc trên phương thẳng đứng “sigma”. $\mathbf{q} = [q_x, q_y]^T = D\mathbf{U}$ và $q_{\sigma} = D\omega$; D – độ sâu; ∇_{σ} – toán tử vi phân trên mặt phẳng “sigma”; \mathbf{F} – vector ngoại lực; A_H và A_V – độ nhớt rối; C – nồng độ bùn cát lơ lửng trong cột nước; $q_C = DC$; w_{s0} – vận tốc lắng; z_b – cao độ đáy; ρ_C – khối lượng riêng hạt bùn cát; P – hệ số rỗng; $\mathbf{q}_b = [q_{bx}, q_{by}]^T$ – vector lưu lượng đơn vị của bùn cát đáy; D_H và D_V – hệ số khuếch tán rối; D_b và E_b – suất lắng và xói của bùn cát tại đáy.

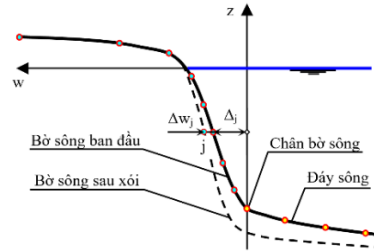
Suất xói, E_b , và lắng, D_b , được tính theo Hayter and Mehta (1986) và Krone (1962).

$$E_b = \varepsilon \left(\frac{\tau_b}{\tau_{\varepsilon}} - 1 \right) \tag{5}$$

$$D_b = w_{s0} C \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right) \tag{6}$$

Trong đó, ε - hệ số xói; τ_b - ứng suất tiếp đáy; τ_{ε} - ứng suất tiếp đáy ngưỡng xói; τ_d - ứng suất tiếp đáy ngưỡng bồi. Phương pháp giải các phương trình (1), (2), (3) và (4) được trình bày trong Giang và ctv. (2019).

2.2. Mô hình xói ngang bờ



Hình 3. Sơ đồ tính xói ngang bờ

Sơ đồ tính toán xói lòng sông do sự bào mòn bởi dòng chảy được thể hiện trong Hình 3. Lòng sông được chia thành 2 phần là đáy và bờ. Điểm phân cách 2 phần này chính là nút sạt bờ của mô hình dòng chảy và diễn biến đáy. Xói ngang bờ được tính toán tương tự như Osman and Thorne (1988) với phương trình được viết dưới dạng tương tự phương trình (4) để đồng nhất dữ liệu:

$$(1 - P) \rho_C \frac{\partial w}{\partial t} = \varepsilon \left(\frac{\tau_w}{\tau_{\varepsilon}} - 1 \right) \tag{7}$$

Với w là tọa độ đường bờ (m). Các ký hiệu khác đã được chú giải bên trên. Ứng suất tiếp trên bề mặt mái bờ sông được tính:

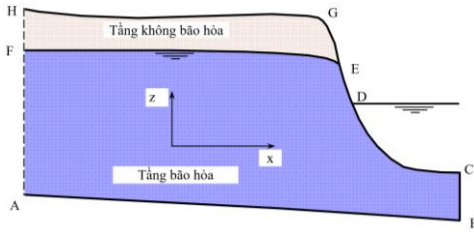
$$\frac{\tau_w}{\rho} = \left[\frac{\kappa}{\ln(\Delta/z_0)} \right]^2 u_w^2 \tag{8}$$

Trong đó, Δ là khoảng cách từ điểm tính trên bờ sông tới biên bờ sông của lưới tính 3D; u_w là vận tốc tại biên bờ sông; và z_0 là thông số nhám của bờ sông. Phương trình (7) được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn.

2.3. Mô hình dòng thấm

Vì đặc điểm hầu như chỉ chảy trên phương vuông góc với bờ sông nên bài toán dòng chảy thấm tại bờ sông được xem là bài toán 2 chiều và sơ đồ

của bài toán được mô tả trên Hình 4. Tính toán được thực hiện cho tầng chứa nước bão hòa.



Hình 4. Sơ đồ bài toán dòng thấm tại bờ sông

Trong tầng bão hòa, dòng chảy thấm được mô tả bởi phương trình theo (Harr, 1962):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad (9)$$

Cùng với các điều kiện biên:

– Biên không thấm ABC:

$$u_n = -k \left[\frac{\partial H}{\partial x} n_x + \frac{\partial H}{\partial z} n_z \right] = 0 \quad (10)$$

– Biên cột áp AF: $H = f_1(t)$ (11)

– Biên cột áp CD: $H = f_2(t)$ (12)

– Biên mặt tri nước DE: $H = z$ (13)

– Biên mặt bão hòa EF: $H = \eta$ (14)

$$S_y \frac{\partial \eta}{\partial t} - w + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = R_g \quad (15)$$

Trong đó, H - cột áp thấm ($H = z + p/\gamma$); k - hệ số thấm; η - cao độ mặt bão hòa; u, w - hai thành phần vận tốc thấm ($u_i = -k \partial H / \partial x_i$); R_g - bổ cập nước trên mặt bão hòa; S_y - hệ số nhả nước trọng lực. D di chuyển lên và xuống theo mực nước sông. Trong khi đó, điểm E di chuyển lên và xuống trên mái bờ sông DEG. Trong một số thời điểm, điểm E có thể trùng với điểm D rồi sau đó hai điểm này lại tách ra. Mặt bão hòa EF cũng thay đổi theo thời gian.

Phương trình (9) cùng với các điều kiện biên (10) – (15) được giải theo phương pháp phân tử hữu hạn. Phương pháp cho phép thực hiện tính toán trong điều kiện đường biên của miền tính thay đổi, phù hợp cho tính toán diễn biến xói lở bờ.

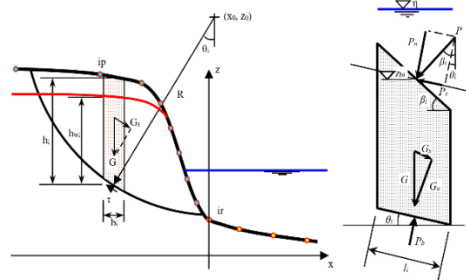
2.4. Phân tích ổn định bờ

Để phân tích ổn định bờ sông, Phương pháp cung trượt tròn của Fellenius được chọn sử dụng để phân tích ổn định bờ sông. Theo phương pháp này, cho một cung trượt giả định với bán kính R và tâm ở tọa độ (x_0, z_0) , khối đất nằm trên cung trượt được

sẽ được chia thành các cột dọc (Hình 5). Giả thiết bỏ qua lực ma sát giữa các cột và xem hệ số an toàn là giống nhau đối với tất cả các cột, hệ số an toàn chống trượt của khối đất bên trên cung trượt được tính:

$$FS = \frac{\sum_i \{ C l_i + [G \cos \theta_i - P_b + P \cos(\beta_i - \theta_i)] l_i g \varphi \}}{\sum_i [G \sin \theta_i - P \sin(\beta_i - \theta_i)]} \quad (16)$$

Trong đó, G là trọng lượng cột đất ($G = \gamma_s h_i b_i$); P là áp lực thủy tĩnh tại mặt của cột đất ($P = \gamma_w (\eta - z_{bi}) b_i / \cos \beta_i$ nếu $\eta > z_{bi}$); P_b là áp lực khe rỗng trên mặt đáy cột đất ($P_b = p_b l_i$); γ_s là dung trọng tự nhiên của đất; C và φ là lực kết dính đơn vị và góc nội ma sát của đất trên mặt trượt (theo định luật Coulomb); R là bán kính cung trượt; b_i và h_i là bề rộng và chiều cao của cột đất; η là cao độ mặt nước tự do; z_{bi} là cao độ mặt trên của cột đất; p_b là áp suất khe rỗng tại đáy của cột đất; θ_i và β_i là góc nghiêng của mặt đáy và mặt trên của cột đất.

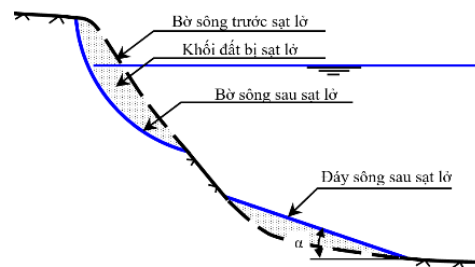


Hình 5. Sơ đồ tính ổn định cung trượt

Áp suất khe rỗng là kết quả tính của mô hình dòng thấm tại bờ sông. Một giải thuật là xác định vị trí tâm và bán kính cung trượt có hệ số an toàn nhỏ nhất cũng được phát triển. Chi tiết về giải thuật có thể tham khảo trong tài liệu Giang (2020).

2.5. Tính toán sạt lở

Sạt lở bờ sông sẽ xảy ra tại cung trượt nguy hiểm nhất khi hệ số an toàn FS nhỏ hơn giá trị tới hạn là 1, theo Tokaldany and Samadi (2007) và Osman and Thorne (1988). Khối đất bờ sông sau khi trượt xuống sẽ nằm lại tại chân bờ sông (xem Hình 6).



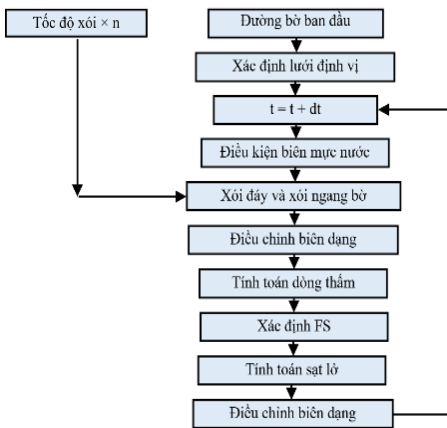
Hình 6. Sơ đồ tính toán sạt lở

Hình dạng khối đất sau khi trượt xuống đáy sông không cố định và rất khó xác định. Trong nghiên cứu này, khối đất sau khi trượt xuống đáy được giả thiết là có bề mặt phẳng và nghiêng một góc α so với phương ngang. Vị trí của bề mặt đáy sông sau sạt lở được xác định từ điều kiện cân bằng diện tích khối đất trượt xuống và khối đất nằm tại chân bờ sông.

2.6. Tích hợp các modules tính toán

Để tạo thành một chương trình máy tính thống nhất, các module tính toán sẽ được tích hợp theo sơ đồ Hình 2. Tuy nhiên, khi tính toán dòng chảy, biến hình lòng dẫn trong thời gian dài sẽ tiêu tốn rất nhiều tài nguyên và thời gian chạy máy. Vì vậy, một cách tính khác được thực hiện nhưng vẫn đảm bảo tính logic và phù hợp trong tính toán diễn biến lòng dẫn.

Tính toán diễn biến lòng dẫn và sạt lở bờ được tách làm 2 giai đoạn. Giai đoạn 1, các tính toán để xác định tốc độ bồi xói đáy và tốc độ bào mòn bờ sông bởi dòng chảy được thực hiện. Giai đoạn 2, diễn biến đáy và bờ theo thời gian được tính toán. Tốc độ xói có thể được nhân lên n lần để tăng tốc độ tính. Chương trình tính toán của giai đoạn 2 có sơ đồ được trình bày trên Hình 7. Để đảm bảo độ chính xác, biến đổi đáy và bờ sông phải là nhỏ để không ảnh hưởng đáng kể tới dòng chảy và quy luật bồi xói đáy và bào mòn bờ.



Hình 7. Cấu trúc module tính xói lở bờ

3. TÍNH TOÁN THỬ NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

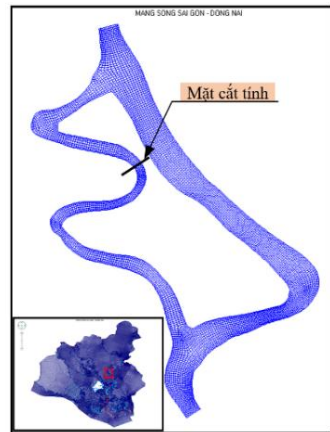
Một bài toán thử nghiệm được tính toán cho đoạn sông Đồng Nai khu vực cù lao Rùa. Dữ liệu phục vụ tính toán tham khảo từ kết quả nghiên cứu của Viện Thủy Công thực hiện năm 2017 (Dũng, 2018). Các dữ liệu gồm các bản đồ địa hình lòng sông; số liệu quan trắc thủy văn; số liệu khảo sát bùn cát.

3.1. Xây dựng mô hình

Tương ứng với phương pháp được phát triển trình bày ở trên, hai mô hình đã được thiết lập: mô hình 3D dòng chảy và tốc độ xói đáy, tốc độ bào mòn bờ cho đoạn sông tại Cù lao Rùa và mô hình diễn biến bồi xói, sạt lở lòng dẫn của mặt cắt ngay tại cù lao. Nghiên cứu này giới hạn xem xét chi duy nhất một mặt cắt. Trong trường hợp cần thiết có thể xem xét nhiều mặt cắt hơn và các mặt cắt là độc lập với nhau một cách tương đối.

a. Mô hình 3D dòng chảy và tốc độ xói đáy, tốc độ bào mòn bờ

Hình 8 giới thiệu lưới tính của mô hình 3D đoạn sông tại cù lao. Trên mặt bằng đoạn sông được chia thành 7.261 phần tử tứ giác. Theo chiều ngang sông, số phần tử trên nhánh chính là 16 còn trên nhánh phụ là 8. Kích thước của các phần tử khoảng 12 – 27 m. Theo chiều sâu, mô hình được chia thành 10 lớp. Lưới tính là khá mịn, đủ để mô phỏng một cách chi tiết cấu trúc dòng chảy và vận tải bùn cát khu vực nghiên cứu. Để lấy điều kiện biên, mô hình 3D được tích hợp vào mô hình 1D2D của hệ thống sông Đồng Nai (Giang, 2017) thành mô hình tích hợp 1D2D3D. Thông số của mô hình là thông số nhám, được hiệu chỉnh và trình bày chi tiết trong Giang và ctv. (2022).



Hình 8. Lưới tính mô hình 3D sông Đồng Nai đoạn Cù lao Rùa

Trong “Nghiên cứu đánh giá hiện trạng sạt lở đất ở Cù Lao Rùa (Thạnh Hội) trong thời gian qua, nguyên nhân, dự báo và đề xuất giải pháp khắc phục” (Báo cáo khoa học tổng kết đề tài của Viện Thủy Công) đường kính hạt trung bình (d50) của 7 trong 10 mẫu bùn cát đáy là 0,3-0,5 mm. Ba mẫu khác có d50 lớn hơn. Vì vậy trong tính toán d50 được lấy là 0,5 mm. Tương ứng với đường kính này vận tốc lắng là 7,22 cm/s.

Bảng 1. Thành phần hạt bùn cát đáy khu vực (%)

Đường kính (mm)	Số hiệu mẫu thí nghiệm										
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	
>10	2.1	10.0	10.6		32.8	18.2	4.8				4.0
5-10	2.0	8.7	0.6		14.1	10.5	0.3	2.2	1.0		4.8
2-5	2.7	12.3	5.7	3.5	13.6	9.5	1.2	6.5	3.5		10.8
1-2	5.4	17.3	10.1	5.8	13.4	12.6	4.8	15.3	11.2		17.6
0.5-1	18.8	14.8	12.9	8.2	13.3	9.4	10.7	15.8	16.2		15.4
0.25-0.5	21.3	9.3	15.3	5.0	5.6	6.1	20.8	4.2	15.7		7.8
0.1-0.25	7.1	7.4	9.0	23.8	2.3	6.3	9.9	5.7	8.1		7.4
<0.1	40.7	20.2	35.6	53.7	5.0	27.4	47.7	50.3	44.3		32.3

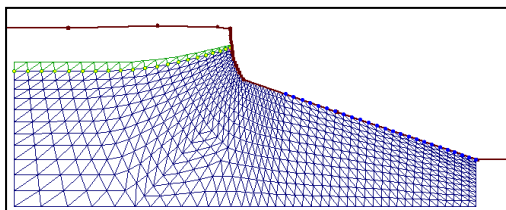
(Nguồn: Viện Thủy Công, 2018)

Báo cáo phân tích cấp phối hạt bùn cát đáy của Viện Thủy Công cũng cho thấy vật liệu đáy và bờ sông là loại hỗn hợp (Bảng 1). Tuy nhiên, do tỷ lệ hạt kết dính tương đối lớn nên theo Van Rijn (1993) hoặc theo Van Ledden et al. (2004), mô hình xói và bồi trong tính toán sẽ phải là mô hình của vật liệu kết dính. Cụ thể, trong nghiên cứu này, các công thức của Hayter and Mehta (1986) và Krone (1962) được sử dụng.

Do kết quả khảo sát chỉ có d₅₀, tỷ trọng hạt và độ rỗng, các thông số còn lại là suất xói, ứng suất ngưỡng xói và ứng suất ngưỡng bồi đã phải được xác định dựa theo nghiên cứu của Kreitenitis et al. (2007) và Hung et al. (2014). Các thông số của vật liệu như sau: d₅₀=0,5mm; s=2,67; P=0,464; w_s=7,22.10⁻²m/s; ε=3,60.10⁻⁵kg/m².s; τ_e=3,6.10⁻²N/m²; τ_d=2,50.10⁻² N/m².

b. Mô hình diễn biến bồi xói, sạt lở lòng dẫn

Vị trí của mặt cắt tính toán được chỉ ra trên Hình 8. Lòng sông và lưới tính dòng thấm của mô hình diễn biến bồi xói, sạt lở lòng dẫn tại mặt cắt tính toán được giới thiệu trên Hình 9. Lưới tính dòng thấm gồm 1.384 phần tử tam giác. Theo kết quả khảo sát của Viện Thủy Công (Dũng, 2018) hệ số thấm của bờ là k=2,0m/nđ; khối lượng riêng tự nhiên ρ=1,878g/cm³; độ rỗng P=46,4%; góc ma sát φ=11°26'; lực dính C=0,179kgf/cm².

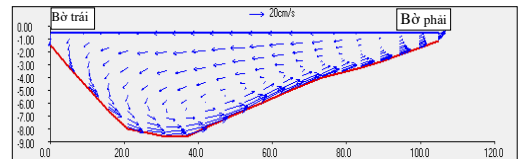


Hình 9. Lưới tính mô hình diễn biến bồi xói, sạt lở lòng dẫn

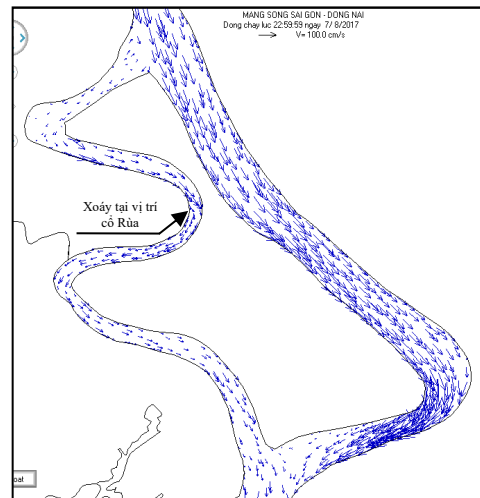
3.2. Kết quả tính toán

3.2.1. Dòng chảy

Từ kết quả mô phỏng của chương trình tính toán, dòng chảy ở tầng mặt tại đoạn sông vào lúc triều xuống được trình bày trong Hình 10. Ta có thể thấy có 2 vị trí dòng chảy xoáy rất mạnh, đặc biệt là đoạn sông phụ tại vị trí cổ rùa. Hình 11 biểu diễn trường vận tốc trên các trong khu vực áp dụng tính toán.



Hình 10. Thành phần vận tốc tiếp tuyến với mặt cắt ngang sông tại cổ Rùa

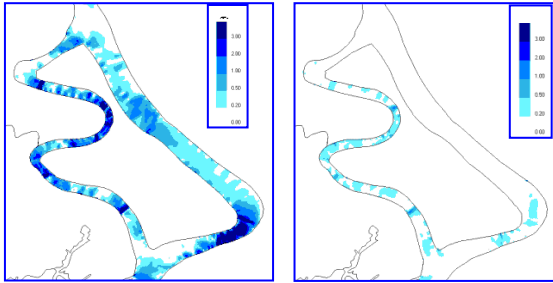


Hình 11. Trường vận tốc trên mặt thoáng tại Cù lao Rùa

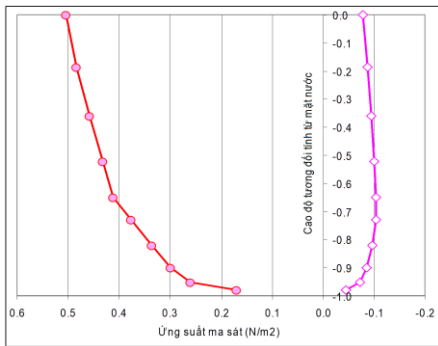
a. Ứng suất ma sát

Ứng suất ma sát trên đáy sông và trên mái bờ sông được tính sau khi có kết quả tính trường vận

tốc. Hình 12 giới thiệu ứng suất ma sát trên đáy sông khi triều lên và triều xuống mạnh nhất. Các giá trị ứng suất ma sát mạnh nhất cụ thể trong trường hợp triều lên và xuống được trình bày trong hình Hình 13.



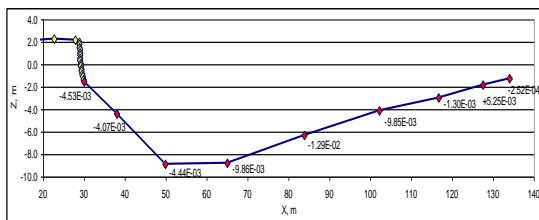
Hình 12. Ứng suất ma sát đáy khi dòng triều xuống và lên mạnh nhất (N/m²)



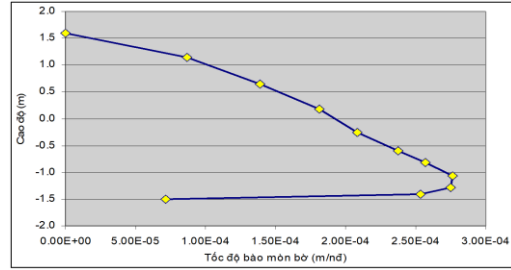
Hình 13. Ứng suất ma sát trên bờ sông lúc triều lên và xuống mạnh nhất

b. Tốc độ bồi xói, bào mòn lòng dẫn

Diễn biến bồi xói đáy và diễn biến bào mòn bờ sông tại mặt cắt tính toán trong 1 tháng mùa lũ và 1 tháng mùa kiệt được tính từ ứng suất bề mặt. Kết quả tính của 2 mùa được xử lý để cho tốc độ bồi xói đáy theo phương đứng và xói bờ theo phương ngang trung bình trong năm. Hình 14 và Hình 15 giới thiệu các kết quả tính toán này.



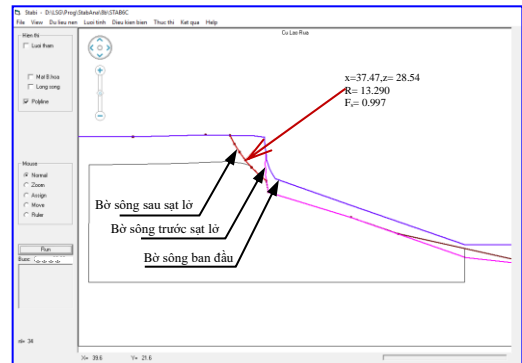
Hình 14. Tốc độ bồi xói đáy (giá trị dương: bồi; giá trị âm: xói. Đơn vị: m/nd)



Hình 15. Tốc độ xói ngang bờ sông tại mặt cắt tính toán

c. Diễn biến bồi xói, sạt lở lòng dẫn

Sau khi có tốc độ bào mòn đáy và bào mòn bờ tại mặt cắt tính toán, thông số này được nhập vào mô hình diễn biến bồi xói, sạt lở lòng dẫn để dự báo sạt lở. Để tăng tốc độ tính toán dự báo, tốc độ bào mòn đáy và bờ được nhân lên 96 lần. Với bước tính của mô hình là dt=0,25 giờ, mức độ xói sau một bước thời gian tính tương đương với mức độ xói sau 1 ngày.



Hình 16. Sạt lở bờ Cù lao Rùa

Sau 321 bước tính, dưới tác dụng bào mòn bởi dòng chảy, trạng thái ổn định của bờ sông đã chạm giới hạn nguy hiểm, $F_s < 1$ và sạt lở đã xảy ra. Hình 16 là sơ đồ mặt cắt bờ sông trước và sau khi sạt lở.

Tính toán thử nghiệm trên máy PC với lõi i7, tốc độ xung 3,2GHz cho thấy tốc độ tính toán của mô hình khá tốt. Đối với mô hình 3D dòng chảy và tốc độ xói đáy, tốc độ bào mòn bờ 1 giờ chạy máy tính toán mô phỏng được 3 giờ. Đối với mô hình diễn biến bồi xói, sạt lở lòng dẫn, diễn biến sạt lở bờ trong 30 ngày được tính trong 12 phút. Với tốc độ tính toán này, mô hình hoàn toàn có khả năng áp dụng để tính toán các bài toán thực tế.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một mô hình toán số kết hợp tính toán diễn biến lòng dẫn và sạt lở bờ sông trong đó đã tính toán xói đáy, xói ngang bờ và sạt lở. Xói đáy, xói ngang bờ được tính bằng mô hình dòng chảy 3D kết hợp với mô hình vận tải bùn cát. Ổn định bờ được tính toán bằng phương pháp cung trượt

tròn có xét đến áp lực khe rỗng được tính toán bằng cách giải phương trình dòng chảy thấm. Với cách tiếp cận mới được xây dựng trong nghiên cứu này cho phép gia tăng tốc độ tính toán dự báo diễn biến lòng dẫn. Một bài toán thử nghiệm được áp dụng tại khu vực Cù lao Rùa. Kết quả tính toán đã cho thấy khả năng ứng dụng của mô hình khá tốt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Bishop, A. W. (1955). The Use of Slip Surface in The Stability of Analysis Slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Bulle, H. (1926). Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen (*Investigations on the sediment diversion at the division of channels*). Berlin (in German): VDI Verlag.
- Darby, S. E., & Thorne, C. R. (1996). Development and testing of riverbank-stability analysis. *J Hydraul Eng*, 122(8), 443-454. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:8\(443\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:8(443))
- Darby, S. E., Rinaldi, M., & Dapporto, S. (2007). Coupled simulations for fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks. *J. Geophys. Res*, 112(F3), 1-15. doi:DOI10.1029/2006JF000722
- Dũng, N. Q. (2018). *Nghiên cứu đánh giá hiện trạng sạt lở đất ở Cù Lao Rùa (Thạnh Hội) trong thời gian qua, nguyên nhân, dự báo và đề xuất giải pháp khắc phục*. Báo cáo khoa học tổng kết đề tài, Viện Thủy Công.
- Fu, J., & Jin, Sh. (2009). A Study on Unsteady Seepage Flow Through Dam. *J. of Hydrodynamics*, 21(4), 499-504.
- GEO-SLOPE International, Ltd. (2012). *Seepage Modeling with SEEP/W An Engineering Methodology*. Edition.
- Giang, L. S. (2011). *Development of an integrated software for calculation of urban flood flow*. HCM: Report B2007-20-13TĐ. VNU-HCM .
- Giang, L. S. (2017). *Nghiên cứu đề xuất lựa chọn chiến lược quản lý ngập lụt thích hợp trên cơ sở các dự án đã, đang và dự kiến triển khai tại Tp.HCM: Báo cáo khoa học tổng kết đề tài NCKH cấp Sở KHCN-TpHCM*. HCM: Sở KHCN-TpHCM.
- Giang, L. S. (2020). *Nghiên cứu diễn biến bồi xói và sạt lở lòng dẫn sông Đồng Nai đoạn Cù lao Rùa*. HCM: Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp ĐHQG-HCM, Mã số đề tài: C2019-20-35.
- Gupta C. S, Bruch J C Jr., Comincioli, V. (1989). *Three-dimensional unsteady seepage through an earth dam with accretion*. *Eng. Comput*, 3, 2-10.
- Harr, M. (1962). *Groundwater and Seepage*. McGraw-Hill.
- Hayter, E. J., & Mehta, A. J. (1986). Modelling cohesive sediments transport in estuarine waters. *Applied Mathematical Modelling*, 51, 765-778.
- Hung et al. (2014). Sedimentation in the floodplains of the Mekong Delta, Vietnam Part II: deposition and erosion. *Hydrol. Process*, 28, 3145–3160.
- Jia, Y., Zhang, Y., Yeh, K. C., & Liao, C. T. (2019). *Modeling River Morphodynamic Process Using a Depth-Averaged Computational Model and an Application to a Mountain River* (Vols. Fluvial Processes and Forms - Dynamics, Delineation and Conservation). IntechOpen. doi:<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.86692>
- Kreistenitis, Y. N., Kombiadou, K. D., & Savvidis, Y. G. (2007). Modelling the cohesive sediment transport in the marine environment: the case of Thermaikos Gulf. *Ocean Sci.*, 3, 91-104.
- Krone, R. (1962). *Flume studies of the transport of sediment in estuarine shoaling processes*. Washington D.C: Final report to San Fransico District U.S. Army Corps of Engineers.
- Lai, Y. (2017). Modeling Stream Bank Erosion: Practical Stream Results and Future Needs. *Water*, 9, 950. doi:doi:10.3390/w9120950.
- Lai, Y. G., Yang, C. T., Wang, L. K., (Eds). (2014). Advances in geofluvial modeling: Methodologies and applications”. In *Advances in Water Resources Engineering, Handbook of Environmental Engineering*. In *Handbook of Environmental Engineering* (pp. 407–470). Humana Press: New York, NY, USA. doi: 10.1007/978-3-319-11023-3_9
- Lai, Y. G., Thomas, R., Ozeren, Y., Simon, A., Greimann, B. P., & Wu, K. (2015). Modeling of multi-layer cohesive bank erosion with a coupled bank stability and mobile-bed model. *Geomorphology*, 243, 116–129.
- Lane, E. W. (1937). Stable channels in erodible materials. *Transactions. ASCE*, 102, 123-142.
- Giang, L. S., & Hồng, T. T. M. (2019). Mô hình tính toán dòng chảy và vận tải bùn cát ba chiều trong sông và kênh hở. *Phát triển Khoa học và Công nghệ - Khoa học Trái đất và Môi trường*, 3(1), 23-26.

- Leopold, L. B., & Maddock, T. J. (1953). *Hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*. U.S. Geological Survey Professional.
- Luppi L., Rinaldi, M., Teruggi, L. B, Darby, S. E., & Nardi, L. (2008). *Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (central Italy)*. Earth surface processes & landforms, Italy. doi: 10.1002/esp.175
- Giang, N. M., Hồng, T. T. M., Phú, V. L., & Giang, L. S. (2022). Nghiên cứu dòng chảy khu vực Cù lao Rùa trên sông Đồng Nai bằng mô hình toán số 3 chiều. *Phát triển Khoa học và Công nghệ - Khoa học Trái đất và Môi trường*, 6(1), 536-542.
- Giang, N. M., Hồng, T. T. M., Hoa, N. T. T., & Giang, L. S. (2020). Một phương pháp tính dòng thấm không ổn định tại bờ sông. *Tuyển tập công trình Hội nghị Khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ 23*, 151.
- Osman, M. a. (1988). Riverbank stability analysis: I. Theory. *J. Hydraul. Eng.*, 114, 134–150.
- Rinaldi, M., Mengoni, B., Luppi L. and Darby, S.E. (2008). Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend. *Water Resource Research*, 44(W09428), 1-17. doi:10.1029/2008WR007008
- Simon, A., Curini, A., Darby, S.E., Langendoen, E.J. (2000). Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*, 35, 183–217.
- Thorne, C. R., & Osman, A. M. (1988). Riverbank stability analysis, II: Application. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 114(2), 151-172.
- Tokaldany, E. A., & Samadi, A. (2007). A model of river bank stability analysis. *32nd IAHR Congress, 1-6 July*. Venice, Italy.
- Wolman, M. G. (1955). *The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania*. U. S. Washington, D. C: Geological Survey Professional.
- Van Ledden, M., Van Kesteren, W. G. M., & Winterwerp, J. C. (2004). A conceptual framework for the erosion behaviour of sand-mud mixtures. *Cont. Shelf Res.* 24, 1–11.
- Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas* (Vol. 1006, pp. 11-3). Amsterdam: Aqua publications