

Mô hình thủy động lực ba chiều và vận chuyển bùn cát để tính toán diễn biến lòng dẫn xung quanh các công trình kè mỏ hàn. Phần I: Cơ sở lý thuyết

Nguyễn Đức Hạnh^{1,*}, Trần Ngọc Anh^{1,2}, Shinichiro Onda³

¹Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học,
Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQGHN, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Trung tâm Động lực học Thủy khí Môi trường,
Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQGHN, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

³Trường Đại học Kyoto, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Nhật Bản

Nhận ngày 26 tháng 6 năm 2015

Chỉnh sửa ngày 28 tháng 7 năm 2015; Chấp nhận đăng ngày 6 tháng 8 năm 2015

Tóm tắt: Cùng với sự phát triển của công nghệ máy tính, hiện nay các mô hình thủy động lực ba chiều không gian đầy đủ đang dần được phát triển và ứng dụng. Bài báo này trình bày cơ sở lý thuyết về một mô hình thủy động lực ba chiều tính toán trường dòng chảy và các mô đun tính toán vận chuyển bùn cát di đáy và lơ lửng, phù hợp cho các bài toán đánh giá tác động và hiệu quả của các công trình kè mỏ hàn chỉnh trị sông (mô hình này hiện đang được GS Hosoda và các cộng sự xây dựng và phát triển) với các hệ phương trình cơ bản, cách rời rạc hóa các thành phần của hệ phương trình và thuật giải được áp dụng. Đồng thời bài báo này cũng trình bày về các hướng tiếp cận, xử lý được áp dụng trong tính toán vận chuyển bùn cát lơ lửng và di đáy, từ đó có thể tính toán được quá trình biến đổi lòng dẫn.

Từ khóa: Mô hình 3D, kè mỏ hàn, chỉnh trị sông.

1. Đặt vấn đề

Sạt lở bờ sông đã và đang là vấn đề lớn gây bức xúc hiện nay ở nhiều nước trên thế giới cũng như ở Việt Nam. Sạt lở bờ diễn ra ở hầu hết các triền sông và ở hầu hết các địa phương có sông, sạt lở bờ sông gây ảnh hưởng trực tiếp đến kinh tế và xã hội của địa phương. Chính vì vậy con người thường phải có các biện pháp

công trình nhằm phòng, chống và hạn chế tác hại của quá trình sạt lở. Kè mỏ hàn là một trong những loại công trình chỉnh trị sông được sử dụng phổ biến. Tuy nhiên gắn liền với sự có mặt của các kè mỏ hàn là các vấn đề về xói xung quanh chân công trình, đôi khi nghiêm trọng có thể gây phá hủy công trình. Chính vì vậy việc nghiên cứu hiệu quả của các công trình kè mỏ hàn cũng như quá trình biến đổi đáy và hiện tượng xói xung quanh các kè mỏ hàn có ý nghĩa hết sức quan trọng.

* Tác giả liên hệ. ĐT.: 84-986598601
Email: hanhnd@vnu.edu.vn

Quá trình xói, bồi, biến hình lòng dẫn, sạt lở bờ sông trong các điều kiện tự nhiên và có tác động của công trình vô cùng phức tạp và chịu tác động trực tiếp bởi các quá trình dòng chảy. Đặc biệt là đối với khu vực xung quanh các kè mô hàn thì trường dòng chảy mang tính chất ba chiều nổi trội. Chính vì vậy cần có những mô phỏng ba chiều trường dòng chảy xung quanh các công trình kè mô hàn để có thể có được những đánh giá đầy đủ hơn về quá trình diễn biến lòng dẫn xung quanh các công trình kè mô hàn. Sau đây sẽ trình bày chi tiết về một mô hình thủy động lực giải hệ phương trình Navier Stock trung bình Reynold ba chiều không gian đầy đủ đã và đang được GS Hosoda và các cộng sự xây dựng, phát triển [1, 2, 3, 4, 5]. Cùng với đó, những hướng tiếp cận tính toán các quá trình vận chuyển bùn cát di đáy và lơ lửng, cũng như tính toán quá trình biến đổi đáy

đã được nhóm nghiên cứu xây dựng thành các mô đun tích hợp vào trong mô hình cũng được trình bày trong Mục 3.

2. Mô hình thủy động lực ba chiều

2.1. Hệ phương trình cơ bản trong hệ tọa độ cong khớp biên

Để mô phỏng lại quá trình dòng chảy vốn mang tính chất ba chiều rõ rệt đặc biệt là trường dòng chảy xung quanh các công trình thủy lực, hệ phương trình Navier-Stokes viết dưới dạng trung bình Reynold (RANS – Reynold Avaraged Navier Stokes) ba chiều đầy đủ và phương trình liên tục trong hệ tọa độ cong khớp biên di động đã được sử dụng. Cụ thể viết ở dạng véc-tơ:

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{U^j}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

Phương trình động lượng:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{U^i}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{(U^j - U_G^j) U^i}{J} \right) - \frac{(U^j - U_G^j) \mathbf{u}}{J} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi^j} (\nabla \xi^i) - \frac{\mathbf{u}}{J} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \xi^j) \\ & = -\frac{g^{ij}}{\rho J} \frac{\partial p}{\partial \xi^j} + \frac{\mathbf{f}}{J} \cdot \nabla \xi^j + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi^j}{\partial x^m} \frac{\partial \xi^i}{\partial x^l} \frac{\partial}{\partial \xi^j} (\tau^{lm} - u'^l u'^m) \end{aligned} \quad (2)$$

trong đó:

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x^1}, \frac{\partial}{\partial x^2}, \frac{\partial}{\partial x^3} \right)$$

$$g^{ij} = \nabla \xi^i \cdot \nabla \xi^j$$

$$U^i = \left(\frac{\partial \xi^i}{\partial x^j} \right) u^j$$

$$U_G^i = \left(\frac{\partial \xi^i}{\partial x^j} \right) u_G^j$$

$$\tau^{ij} = \nu \left(\frac{\partial \xi^m}{\partial x^j} \frac{\partial u^i}{\partial \xi^m} + \frac{\partial \xi^m}{\partial x^i} \frac{\partial u^j}{\partial \xi^m} \right)$$

và: t : thời gian; (x^1, x^2, x^3) : hệ tọa độ Đề các (x^3 biểu thị trục tọa độ thẳng đứng); (ξ^1, ξ^2, ξ^3) : hệ tọa độ cong, khớp biên; ρ : mật độ chất lỏng (nước); ν : hệ số nhớt động học; p : áp suất; J : Jacobian; g^{ij} : tensor metric phản biến; U^i : thành phần phản biến của véc tơ vận tốc; U_G^i : thành phần phản biến của vận tốc lưới; \mathbf{u} : véc tơ vận tốc

$[\mathbf{u} = (u^1, u^2, u^3)]$; u^i : thành phần véc tơ vận tốc trong hệ tọa độ Đề các; u_G^i : thành phần của véc tơ vận tốc lưới trong hệ tọa độ Đề các; \mathbf{f} : véc tơ trọng lực $[\mathbf{f} = (0, 0, g)]$; g : gia tốc trọng trường; τ^{ij} : tensor ứng suất nhớt; và $-\overline{u^i u^j}$: tensor ứng suất Reynold.

Để khép kín hệ phương trình nói trên, cần phải thêm các phương trình mô tả ứng suất rối Reynold. Nhằm mục đích dự báo được dòng chảy bất ổn định ba chiều, chú trọng đến xoáy Karman và xoáy quy mô lớn hình thành trong kênh hỗn hợp (có bãi) vốn có quy mô thời gian

lớn hơn là các thành phần dao động rối, một mô hình k-ε phi tuyến chứa các hàm thực nghiệm đã được sử dụng và cho thấy được khả năng mô phỏng tương đối tốt [1, 3]. Mô hình rối phi tuyến này, bao gồm thành phần bậc hai, đã được chứng tỏ là tương đương với mô hình nhớt rối hiện phi tuyến trong mô hình ứng suất Reynold đại số [6, 7].

Năng lượng rối động học k và hệ số khuếch tán rối ε nhận được từ các phương trình vận chuyển sau đây trong hệ tọa độ khớp biên di động:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{k}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{(U^j - U_G^j)k}{J} \right) = \frac{-\overline{u^i u^j}}{J} \frac{\partial \xi^l}{\partial x^j} \frac{\partial u^i}{\partial \xi^l} - \frac{\varepsilon}{J} + \frac{\partial}{\partial \xi^l} \left[\left(\nu + \frac{D_t}{\sigma_k} \right) \frac{g^{lm}}{J} \frac{\partial k}{\partial \xi^m} \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varepsilon}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{(U^j - U_G^j)\varepsilon}{J} \right) &= C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{-\overline{u^i u^j}}{J} \right) \frac{\partial \xi^l}{\partial x^j} \frac{\partial u^i}{\partial \xi^l} \\ &- \frac{C_{\varepsilon 2}}{J} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial \xi^l} \left[\left(\nu + \frac{D_t}{\sigma_k} \right) \frac{g^{lm}}{J} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi^m} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

trong đó: $\sigma_k = 1,00$, $\sigma_\varepsilon = 1,30$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ và $C_{\varepsilon 2} = 1,92$.

Tensor ứng suất Reynold có thể được biểu diễn như sau:

$$-\overline{u^i u^j} = D_t \left(\frac{\partial \xi^m}{\partial x^j} \frac{\partial u^i}{\partial \xi^m} + \frac{\partial \xi^m}{\partial x^i} \frac{\partial u^j}{\partial \xi^m} \right) - \frac{2}{3} k \delta^{ij} - \frac{k}{\varepsilon} D_t \sum_{\beta=1}^3 C_\beta \left(S_\beta^{ij} - \frac{1}{3} S_\beta^{\alpha\alpha} \delta^{ij} \right) \quad (5)$$

trong đó:

$$S_1^{ij} = \frac{\partial u^i}{\partial x^r} \frac{\partial u^j}{\partial \xi^r}$$

$$S_2^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^r}{\partial x^i} \frac{\partial u^j}{\partial x^r} + \frac{\partial u^r}{\partial x^j} \frac{\partial u^i}{\partial x^r} \right)$$

$$S_3^{ij} = \frac{\partial u^r}{\partial x^i} \frac{\partial u^r}{\partial x^j}$$

$$D_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_\mu = \min \left(0,09; \frac{0,3}{1+0,09M^2} \right)$$

$$C_1 = \frac{0,4}{1+0,01M^2}$$

$$C_2 = 0$$

$$C_3 = \frac{-0,13}{1+0,01M^2}$$

Hệ số nhớt rối D_t và các thông số C_μ , C_1 , C_2 , C_3 có thể được biểu diễn theo Nagata và nnk [5] như sau:

Thông số M trong các phương trình ở trên được xác định thông qua tham số sức căng S và số xoáy Ω :

$$M = \max (S ; \Omega)$$

$$S = \left(\frac{k}{\varepsilon} \right) \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^j} + \frac{\partial u^j}{\partial x^i} \right)^2}$$

$$\Omega = \left(\frac{k}{\varepsilon} \right) \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^j} - \frac{\partial u^j}{\partial x^i} \right)^2}$$

2.2. Rời rạc hóa hệ phương trình và thuật giải

Phương trình động lượng và phương trình chuyển động của k và ε được rời rạc hóa bằng phương pháp thể tích hữu hạn trên hệ thống lưới so le. Để thỏa mãn tính liên tục cục bộ, nghiên cứu này sử dụng phương pháp Mark-and-Cell đơn giản hóa (HSMAC) (Hirt and Cook 1972) vì cả vận tốc và áp suất có thể tính đồng thời trong khi trong phương pháp MAC nguyên bản (Harlow and Welch, 1965) thì phương trình Poisson của biến áp suất phải được giải trước. Thành phần đối lưu được rời rạc hóa bằng phép nội suy ngược bậc 2 (quadratic upstream interpolation) sơ đồ động học đối lưu QUICK (Leonard, 1979) và thành phần khuếch tán được rời rạc hóa bằng sơ đồ sai phân trung tâm. Trong khi xác định vận tốc cho các bước thời gian tiếp theo khi đã biết vận tốc và áp suất cục bộ, phương trình liên tục được sử dụng để tính áp suất thông qua phép lặp số (SOLA), đồng thời giá trị mực nước cũng được xác định theo điều kiện động lực ở mặt thoáng. Khi giá trị mực nước này được xác định, thì sơ đồ lưới trong mặt phẳng thẳng đứng được xây dựng bằng cách biến đổi khoảng cách lưới. Lưu ý không có sự thay đổi lưới trong mặt phẳng (x_1-x_2) trong nghiên cứu này. Các điều kiện biên của động năng dòng chảy rối k_b , và tốc độ tiêu hao động năng dòng chảy rối ε_b

được xác định ở biên cố định sử dụng hàm biên (wall function) sau (Rodi 1993):

$$k_b = \frac{u_{\tau}^2}{\sqrt{C_{\mu}}}; \varepsilon_b = \frac{u_{\tau}^3}{\kappa \Delta l} \quad (6)$$

trong đó Δl là khoảng cách từ biên. Có một vài phương pháp (ví dụ, Naot và Rodi 1982; Gibson và Rodi 1989; Naot và cộng sự. 1993) được đưa ra để tính tác động tắt dần của hiện tượng chảy rối do sự xuất hiện của các mặt thoáng. Vận tốc trượt xác định từ profin vận tốc loga được sử dụng để xác định k_b và ε_b . Trong nghiên cứu hiện nay, một số phương pháp tính toán được Kimura và Hosoda sử dụng: (1) độ nhớt rối được biến đổi bằng hàm tắt dần Isawa và Hosoda đưa ra (1990); và (2) tốc độ tiêu tán ở mặt thoáng được xác định bằng công thức Siguyama và cộng sự đề xuất (1997), tương tự với quan niệm của Naot và Rodi (1982). Rõ ràng cường độ rối theo hướng thẳng đứng giảm theo hướng mặt thoáng. Để tính toán tác động này, nhân độ nhớt rối với hàm tắt dần f_d được Iwasa và Hosoda đưa ra (1990):

$$f_d = 1 - \exp \left(-B \frac{(z_s - x^3) z_s}{k_s^2 / \varepsilon_s} \right) \quad (7)$$

trong đó z_s là mực nước; B là hằng số (=10); k_s là động năng của dòng rối ở bề mặt; ε_s là tốc độ tiêu tán động năng dòng rối ở mặt thoáng; và x^3 là tọa độ thẳng đứng.

3. Mô phỏng quá trình vận chuyển bùn cát và biến đổi đáy

3.1. Tính toán vận chuyển bùn cát di đáy

Trong tính toán vận chuyển bùn cát di đáy thì dòng chảy sát đáy và độ dốc đáy là hai yếu tố có ảnh hưởng quan trọng đến chuyển động của bùn cát. Đặc biệt khi có mặt của các công trình và gắn liền với đó là hiện tượng xói cục bộ xung quanh công trình thì hai yếu tố này lại biến đổi rất nhanh xung quanh công trình. Do đó giả thiết về sự cân bằng vận chuyển bùn cát

không còn được đảm bảo nữa. Trong nghiên cứu này đã xét đến ảnh hưởng của sự bất cân bằng vận chuyển bùn cát đáy bằng cách tính (1) thể tích bùn cát đáy bị lấy đi; (2) quỹ đạo của chuyển động bùn cát và (3) thể tích bùn cát bồi tụ lại. Thể tích bùn cát bị lấy đi và bồi tụ lại có thể nhận được bằng cách sử dụng một mô hình thống kê về chuyển động bùn cát. Chuyển động của bùn cát được tính bằng một phương trình chuyển động của các hạt bùn cát.

Thể tích bùn cát bị lấy đi trong một đơn vị thời gian từ một ô lưới trên mặt đáy, V_p , được tính bằng:

$$V_p = \frac{A_3 d}{A_2} p_s S_p \quad (8)$$

trong đó p_s là tốc độ lấy bùn cát đáy đi; d là đường kính của hạt bùn cát; A_2, A_3 là các hệ số hình dạng của hạt cát đối với các thuộc tính hình học hai và ba chiều ($A_2 = \pi/4, A_3 = \pi/6$); S_p là diện tích của hình chiếu ô lưới sát đáy lên mặt phẳng ngang ($x^1 - x^2$). Tốc độ lấy bùn cát đáy đi p_s được tính từ phương trình của Nakagawa và các cộng sự (1986), trong đó có bao gồm ảnh hưởng của độ dốc đáy cục bộ đến chuyển động bùn cát đáy:

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\frac{\sigma}{\rho} - 1)g}} = F_0 G_s \tau_* \left(1 - \frac{k_p \Phi \tau_{*c}}{\tau_*} \right)^{m_p} \quad (9)$$

$$G_s = \frac{\cos \Psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (10)$$

$$\Phi = \left(\frac{\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \alpha}{\cos \Psi + k_L \mu_s} \right) \left(\frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \right) \quad (11)$$

trong đó τ_* là cường độ của véc tơ ứng suất kéo phi thứ nguyên $[=u_*^2 / (\frac{\sigma}{\rho} - 1)gd]$; u_* là vận tốc tiếp đáy được xác định sử dụng một profile vận tốc dạng logarit dựa trên độ cao nhám đáy bằng $2.5d$ (Engelund 1966); τ_{*c} là cường độ của véc tơ ứng suất kéo tới hạn không

thứ nguyên được đề xuất bởi Iwagaki (1956); G_s là hệ số lệch hướng giữa các véc tơ vận tốc sát đáy và chuyển động bùn cát; Φ là hệ số dốc sườn – bờ; σ là mật độ bùn cát; μ_s là hệ số ma sát tĩnh (=0.7); k_L là tỷ số của lực nâng và lực kéo (=0.85); θ_b là góc dốc đáy địa phương; Ψ là góc giữa véc tơ vận tốc sát đáy và hướng chuyển động bùn cát; α là góc giữa hướng của độ dốc đáy địa phương cực đại và hướng chuyển động bùn cát; F_0, k_p , và m_p là các hằng số (tương ứng bằng 0.03, 0.7 và 3). Vận tốc tiếp tới hạn được đưa ra bởi Iwagaki (1956) được chỉ ra dưới đây là dựa trên các phân tích lý thuyết và thực nghiệm về chuyển động khởi động của các hạt bùn cát; và ứng suất tiếp tới hạn không thứ nguyên được lấy phù hợp với lấy từ sơ đồ của Shields (Vanoni 1975)

$$0.303 \leq d; \quad u_{*c}^2 = 80.9d$$

$$0.118 \leq d \leq 0.303; \quad u_{*c}^2 = 134.6d^{31/22}$$

$$0.0565 \leq d \leq 0.118; \quad u_{*c}^2 = 55.0d$$

$$0.0065 \leq d \leq 0.0565; \quad u_{*c}^2 = 8.41d^{11/32}$$

$$d \leq 0.0065; \quad u_{*c}^2 = 226d$$

trong đó u_{*c} là ứng suất tiếp tới hạn và d là đường kính hạt trầm tích.

Để thiết lập công thức chuyển động bùn cát, cần xác định các véc tơ đơn vị, \mathbf{p}_{b1} và \mathbf{p}_{b2} , là song song với một mặt đáy địa phương, trên các mặt phẳng ($x^1 - x^3$) và ($x^2 - x^3$) tương ứng, sao cho

$$\mathbf{p}_{b1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{b1} \\ 0 \\ \sin \theta_{b1} \end{pmatrix} \quad (12a)$$

$$\mathbf{p}_{b2} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \theta_{b2} \\ \sin \theta_{b2} \end{pmatrix} \quad (12b)$$

trong đó θ_{b1}, θ_{b2} là các góc dốc theo phương x^1 và x^2 tương ứng. Phương trình mô men của hạt bùn cát theo hướng \mathbf{p}_{bi} ($i = 1, 2$) là

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_m \right) (A_3 d^3) \frac{\partial u_{ssbi}}{\partial t} = D_i + W_i - F_i \quad (13)$$

$$D_1 = D \left(\frac{u_{b1} - u_{sed1}}{\sqrt{(u_{b1} - u_{sed1})^2}} \right) \quad (14a)$$

$$D_2 = D \left(\frac{u_{b2} - u_{sed2}}{\sqrt{(u_{b2} - u_{sed2})^2}} \right) \quad (14b)$$

$$W_1 = -W \left(\frac{\sin\theta_{b1} \cos^2\theta_{b1}}{\sin^2\theta_p} \right) \quad (14c)$$

$$W_2 = -W \left(\frac{\sin\theta_{b2} \cos^2\theta_{b2}}{\sin^2\theta_p} \right) \quad (14d)$$

$$F_1 = F \left(\frac{u_{sed1}}{\sqrt{u_{sed1}^2}} \right) \quad (14e)$$

$$F_2 = F \left(\frac{u_{sed2}}{\sqrt{u_{sed2}^2}} \right) \quad (14f)$$

$$D = \frac{\rho C_D}{2} (u_{bi} - u_{sed i})^2 A_2 d^2 \quad (15a)$$

$$W = (\sigma - \rho) g A_3 d^3 \quad (15b)$$

$$F = \mu_k \left(W \frac{\cos\theta_{b1} \cos\theta_{b2}}{\sin\theta_p} - k_L D \right) \quad (15c)$$

trong đó C_m là hệ số của khối lượng gia tăng; $u_{sed i}$ là vận tốc hạt; D là lực kéo chất lỏng tác dụng lên một hạt bùn cát; W là trọng lượng ngập của hạt bùn cát; F là lực ma sát giữa các hạt bùn cát và đáy; u_{bi} là vận tốc chất lỏng sát đáy tại khoảng cách $k_d d$ từ đáy; k_d là hằng số (=0.8); C_D là hệ số kéo (=0.4); μ_k là hệ số ma sát động học (=0.35); θ_p là góc giữa \mathbf{p}_{b1} và \mathbf{p}_{b2} ; chỉ số i biểu thị hướng của mỗi thành phần của \mathbf{p}_{bi} . Cần chú ý rằng khía cạnh những sự xuất hiện đột ngột rời gián đoạn gắn liền với các chỗ nước xoáy bùn cát lơ lửng trong hố xói đã không được xem xét trong mô hình này. Khi xói phát triển, vận tốc trung bình và ứng suất tiếp đáy giảm; do đó chuyển động vật liệu đáy dọc theo mặt đáy trở nên chiếm ưu thế. Do đó việc sử dụng phương trình lấy bùn cát đi (8) và phương trình chuyển động cho hạt bùn cát (12) không mâu thuẫn trong khuôn khổ khảo sát được trình bày ở đây.

Sử dụng véc tơ vận tốc hạt bùn cát \mathbf{u}_{sed} nhận được từ phương trình (12), véc tơ vị trí của hạt bùn cát sau bước thời gian thứ n sau khi bị lấy đi $\mathbf{p}_{sed(n)}$ và khoảng cách của chuyển động bùn cát $s_{(n)}$ có thể được tính lần lượt bằng

$$\mathbf{p}_{sed(n)} = \mathbf{p}_{sed(n-1)} + \Delta t \mathbf{u}_{sed} \quad (16)$$

$$s_{(n)} = \sum \Delta t |\mathbf{u}_{sed}| \quad (17)$$

Thể tích bồi lắng $V_{d(j,n)}$ của bùn cát chuyển động từ điểm j tại thời gian nó tới vị trí của $\mathbf{p}_{sed(n)}$ có thể nhận được từ

$$V_{d(j,n)} = V_{p(j)} f_s(s_{(n)}) |\mathbf{u}_{sed(n)}| \Delta t \quad (18)$$

$$f_s(s_{(n)}) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{s_{(n)}}{\lambda}\right) \quad (19)$$

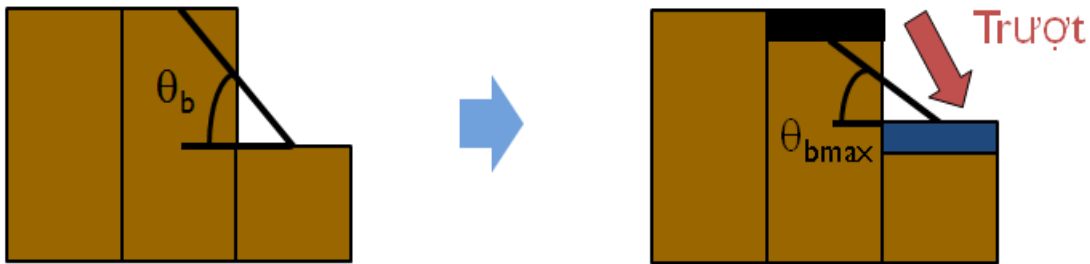
trong đó $V_{p(j)}$ là thể tích bùn cát lấy đi tại điểm j ; $f_s(s_{(n)})$ là hàm mật độ xác suất của độ dài bước; và λ là độ dài bước trung bình. Để ước lượng λ , phương trình của Einstein (1950) sau được áp dụng:

$$\lambda = \frac{\lambda_0 d}{\int_{\frac{B_*}{\tau_*} - 1/\eta_0}^{\frac{B_*}{\tau_*} - 1/\eta_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) dr} \quad (20)$$

trong đó η_0 là hệ số biến đổi của lực nâng = 0.5; B_* là hằng số = 0.156 và λ_0 là hằng số = 100. Cần phải chỉ ra rằng trong khi các tính toán lấy phần tử bùn cát đi được làm tại bốn điểm lưới tính toán; một điểm về sự bồi lắng bùn cát bên trong lưới đó đã phải được xác định dựa trên vị trí điểm bồi lắng, liên quan tới các điểm lưới. Thể tích bồi lắng tổng cộng được tính sử dụng Phương trình (18) sau đó được phân bổ cho mỗi điểm lưới theo tỷ lệ dựa trên vị trí tương đối của nó so với điểm bồi lắng [4]. Ta cần chú ý rằng các giá trị đối với nhiều hằng số khác nhau trong mô hình biến hình đáy hiện nay đã được áp dụng và được sử dụng thành công bởi Nagata và nnk (2000) [4].

Mô hình vận chuyển bùn cát bất cân bằng được đưa ra bởi Nakagawa và nnk (1986) giả thiết rằng một nhóm các hạt bùn cát bị lấy đi tại một vị trí nhất định lắng chìm ngay phía hạ lưu theo hàm mật độ xác suất mà không có tính toán những thay đổi tạm thời về vị trí của nhóm các hạt bùn cát đó. Nagata và nnk (2000) giả thiết rằng các hạt bùn cát mà bị lấy đi chìm lắng ngay dựa trên phương trình mật độ xác suất theo Phương trình (17). Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, thời gian cần thiết cho một nhóm các hạt bùn cát bồi lắng và vị trí của nó đã được tính toán sử dụng các Phương trình (13) – (16).

Liên quan đến xói cục bộ do sự có mặt của công trình thủy lực, độ dốc đáy cục bộ trong hồ xói trở nên dốc. Như đã được trình bày trong một số nghiên cứu (ví dụ, Melville 1975;



Hình 1. Mô phỏng tính toán hiện tượng trượt của bùn cát.

Góc dốc tới hạn $\theta_{b \max}$ được xét có giá trị gần với góc nghỉ θ_r của vật liệu đáy. Tuy nhiên, ta nhận thấy rằng góc dốc tới hạn $\theta_{b \max}$ trở nên lớn hơn góc nghỉ θ_r khi một xoáy mạnh phát triển xung quanh công trình, chẳng hạn như xoáy hình móng ngựa xung quanh một trụ cầu, như đã được chỉ ra bởi Melville (1975). Do đó trong trường hợp mà hướng của lực kéo là lên trên dốc của hồ xói, góc dốc tới hạn $\theta_{b \max}$ được xác định là cân bằng với lực tác động lên các hạt bùn cát theo hướng e_b như sau

$$W \sin \theta_{b \max} = (W \cos \theta_{b \max} - k_f D) (\tan \theta_r) (\cos \beta_1) + D \cos \beta_2 \quad (21)$$

Michiue và Hinokidani 1992) rằng việc trượt của vật liệu đáy diễn ra xung quanh công trình khi độ dốc đáy địa phương vượt quá một giá trị $\theta_{b \max}$ nhất định. Vì vậy cần phải đưa sự kiện trượt của bùn cát vào trong mô hình biến hình đáy. Vì mục đích đó hướng tiếp cận sau được sử dụng (xem Hình 1): (1) góc dốc đáy tới hạn $\theta_{b \max}$ được ước lượng tại mỗi lưới số; (2) góc dốc đáy địa phương θ_b được tính bằng cách sử dụng cao trình đáy của các ô lưới lân cận; (3) khi độ dốc đáy địa phương θ_b lớn hơn $\theta_{b \max}$, thể tích bùn cát trượt cần thiết để giữ độ dốc đáy tại giá trị tới hạn của nó được tính; và (4) giả thiết rằng sự kiện trượt diễn ra ngay tức thời, thể tích bùn cát trượt được thêm vào cho thể tích bị lấy đi tại ô lưới mà có sự kiện trượt xảy ra.

trong đó β_1 là góc giữa hướng e_b và lực ma sát; β_2 là góc giữa hướng e_b và lực kéo. Trong các trường hợp khác, $\theta_{b \max}$ là góc nghỉ θ_r .

Sử dụng các thể tích lấy đi và bồi lắng đã được tính bằng các Phương trình (8) và (18), những thay đổi tạm thời về cao trình đáy do bùn cát đi đáy có thể nhận được từ:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2 (V_a - V_p)}{A_3 S_d} \quad (22)$$

trong đó z_b là cao trình đáy; A_j là hệ số hình dạng của hạt cát đối với các tính chất hình học một chiều (=1.0); và S_d là diện tích của lưới mặt đáy chiếu lên mặt phẳng nằm ngang (x^1-x^2) nơi mà diễn ra sự bồi lắng bùn cát.

3.2. Tính toán vận chuyển bùn cát lơ lửng

Nồng độ bùn cát lơ lửng được tính theo phương trình sau:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{c}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{(U^j - U_G^j - W_f)c}{J} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi^l} \left(\varepsilon_s \frac{g^{lm}}{J} \frac{\partial c}{\partial \xi^m} \right) \quad (23)$$

trong đó: c là nồng độ bùn cát lơ lửng; ε_s là hệ số khuếch tán; W_f là thành phần phản biến của vận tốc chìm lắng. Phương trình (23) cũng tương tự như phương trình (3) và cũng được rời rạc hóa và giải giống như trong mô hình thủy động lực ba chiều.

Biến đổi theo thời gian của cao trình đáy được tính sử dụng phương trình sau

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} (q_{su} - w_f c_b) = 0 \quad (24)$$

trong đó z_b là cao trình đáy; w_f là vận tốc chìm lắng; c_b là nồng độ tham khảo của bùn cát lơ lửng; q_{su} là thông lượng bùn cát lơ lửng đi lên được tính bằng phương trình sau được đề xuất bởi Itakura và Kishi (1980):

$$q_{su} = K \left(\alpha_s \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{gd}{u_*} \Phi - w_f \right) \quad (25)$$

với:

$$\Phi = \frac{\tau_* \int_0^\infty \zeta \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\zeta^2) d\zeta}{B_* \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\zeta^2) d\zeta} + \frac{\tau_*}{B_* \eta_0} - 1 \quad (26a)$$

$$d' = \frac{B_*}{\tau_*} - \frac{1}{\eta_0} \quad (26b)$$

trong đó τ_* là lực kéo không thứ nguyên; d là đường kính của hạt bùn cát; u_* là vận tốc ma sát; ρ_s là mật độ bùn cát; K , α_s , B_* , η_0 là các hằng số. Vận tốc chìm lắng được tính sử dụng công thức của Rubey:

$$w_f = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{sgd}{d^2} + \frac{36v^2}{d^2}} - \frac{6v}{d} \quad (27)$$

Phương trình (22) và (24) là những phương trình sử dụng để tính biến đổi đáy do bùn cát di đáy và bùn cát lơ lửng. Trong từng trường hợp cụ thể có thể áp dụng một trong hai phương trình (giả thiết bùn cát di đáy hay lơ lửng là chiếm chủ yếu) hoặc cả hai phương trình.

4. Kết luận

Vấn đề tính toán diễn biến lòng dẫn xung quanh các công trình kè mô hàn chỉnh trị sông là một vấn đề mang ý nghĩa thực tiễn cao nhưng cũng hết sức phức tạp, đã và đang được nhiều nhà nghiên cứu trong và ngoài nước quan tâm. Quá trình diễn biến lòng dẫn chịu tác động chủ yếu bởi các quá trình dòng chảy, trong khi đó do tác động của các công trình kè mô hàn nên các quá trình dòng chảy xung quanh các kè mô hàn thường rối loạn, diễn biến phức tạp và biến đổi rõ rệt theo cả ba chiều không gian. Chính vì vậy, cùng với sự phát triển của công nghệ máy tính, xu hướng hiện nay để nghiên cứu diễn biến lòng dẫn xung quanh các công trình là xây dựng các mô hình thủy động lực có khả năng mô phỏng trường dòng chảy theo ba chiều không gian đầy đủ và từ đó áp dụng các hướng tiếp cận đánh giá vận chuyển bùn cát (đi đáy, lơ lửng, tổng cộng) phù hợp để có thể tính toán diễn biến lòng dẫn xung quanh các công trình kè mô hàn. Bài báo này đã trình bày cơ sở lý thuyết, các cách sử lý và tiếp cận của một mô hình thủy động lực ba chiều và các mô đun tính toán vận chuyển bùn cát di đáy và lơ lửng đang được GS Hosoda và các cộng sự phát triển cùng với sự tham gia của các tác giả bài báo. Mô hình cũng đã được lập trình trên ngôn ngữ FORTRAN và thuận tiện cho người sử dụng.

Một số các ứng dụng cụ thể của mô hình này đối với vấn đề tính toán diễn biến lòng dẫn xung quanh các công trình kè mỏ hàn sẽ được công bố ở các bài báo tiếp theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này đã được thực hiện nhờ sự tài trợ kinh phí của đề tài cấp Đại học Quốc gia Hà Nội (mã số QGTĐ.12.07) và đề tài DANIDA (mã số: 11-P04-VIE), nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn những sự hỗ trợ quý báu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Hosoda, T., Sakurai, T., Kimura, I., and Muramoto, Y. (1999). "3-D computations of compound open channel flows with horizontal vortices and secondary currents by means of non-linear k-epsilon model". J. Hydrosci. Hydr. Eng., 17(2), 87-96.
- [2] Kimura, I. & Hosoda, T. (2000). "Numerical simulation of flows around a surface-mounted cube by means of a non-linear k- ϵ model". Proc. Of 9th International Symposium on Flow visualization, Paper No.388, (CDROM).
- [3] Kimura, I., Hosoda, T., Onda, S. & Tominaga, A. (2004). "Computations of 3D turbulent flow structures around submerged spur dikes under various hydraulic conditions". Greco, M., Carravetta, A. & Della Morte, R. (eds), Napoli: Balkema, River Flow 2004 (1), pp. 543-553.
- [4] Nagata, N., Hosoda, T., and Muramoto, Y. (2000). "Numerical analysis of river channel processes with bank erosion." J. Hydraul. Eng., 126(4), 243-252.
- [5] Nagata et al. (2005). "Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No. 12, pp. 1074-1087.
- [6] Pope, S. B. (1975). "A more general effective viscosity hypothesis". J. Fluid Mech., 72, 331-340.
- [7] Gatski, T. B., and Speziale, C. G. (1993). "On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows". J. Fluid Mech., 254, 59-78.

3D Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Simulating Bed Deformation Progress around Spur-dikes Part I: Governing Equations and Techniques

Nguyễn Đức Hạnh¹, Trần Ngọc Anh^{1,2}, Shinichiro Onda³

¹*Faculty of Hydrology Meteorology and Oceanography,
VNU University of Science, 334 Nguyễn Trãi, Hanoi, Vietnam*

²*Center for Environmental Fluid Dynamics,
VNU University of Science, 334 Nguyễn Trãi, Hanoi, Vietnam*

³*Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan*

Abstract: With the development of computer technology, nowadays three dimensional (3D) hydrodynamic models have been widely developed and applied in practice. This paper discusses the theoretical background of a 3D hydrodynamic model which is used to simulate flow field, and two modules of bed load and suspended sediment transportation which are used to calculate bed deformation. This program can be used to simulate bed deformation progress around spur dikes and estimate the effectiveness of these structures in river training. The basic equations, the discretizations of these equations and algorithm for solving are reported. The approaches and techniques used for calculating bed load and suspended sediment transportation of this program are also presented in this paper.

Keywords: 3D Model, Spur dike, river training.