

## MÔ HÌNH SỐ MÔ PHÒNG SỰ XÓI LỞ MÁI DỐC DO NƯỚC TRÀN BỜ

Huỳnh Công Hoàì

Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG – HCM

(Bài nhận ngày 08 tháng 01 năm 2009, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 24 tháng 09 năm 2009)

**TÓM TẮT:** Mô hình toán được xây dựng bằng cách kết hợp mô hình dòng chảy một chiều và mô hình biến đổi đáy để mô phỏng sự xói lở khi nước tràn qua bờ đê. Phương pháp cộng trực tiếp được ứng dụng để xác định đường mặt nước và phương pháp sai phân hữu hạn theo sơ đồ cải tiến Lax-Scheme được dùng để giải phương trình biến đổi đáy. Công thức chuyển tải bùn cát của Meyer-Peter và Muller được ứng dụng để xác định lưu lượng bùn cát cho thấy thích hợp với hiện tượng xói lở do nước tràn qua bờ đê. Mô hình được hiệu chỉnh và kiểm nghiệm bằng những số liệu thực đo trong phòng thí nghiệm và kết quả mô phỏng diễn biến xói lở phù hợp với số liệu từ thí nghiệm.

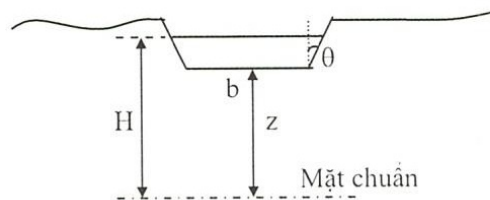
**Từ khóa:** mô hình dòng chảy, mô hình biến đổi đáy, mô phỏng sự xói lở.

### 1. GIỚI THIỆU

Khi mực nước dâng cao tràn qua đỉnh các cồn cát, bờ đê, dòng chảy trên mái dốc phía hạ lưu là dòng chảy xiết có vận tốc rất lớn, do đó đỉnh và mái dốc hạ lưu hầu hết đều bị xói lở nghiêm trọng. Trong nghiên cứu này giới thiệu mô hình toán 2D mô phỏng diễn biến sự thay đổi hình dạng profile mái dốc khi nước tràn qua đỉnh bờ đê. Kết quả từ mô hình toán được so sánh với kết quả thí nghiệm trên mô hình vật lý.

### 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Khi nước tràn qua đỉnh bờ đê lưu lượng dòng chảy sẽ thay đổi do đỉnh bờ tràn bị xói lở, cột nước tràn tăng nhanh, dòng chảy thực chất là dòng không ổn định. Tuy nhiên do dòng chảy trên bề mặt chủ yếu là dòng chảy xiết nên có thể đơn giản xem là chuyển động ổn định từng thời đoạn (quasi – steady flow).



Hình 1. Mặt cắt ngang đỉnh bờ

Lưu lượng tràn qua đỉnh bờ đê xem như lưu lượng tràn qua bờ tràn có mặt cắt ngang

hình thang, lưu lượng được xác định theo Singh và Scarlatos (1989):

$$Q = [C_1 b + C_2 (H - z) \tan \theta] (H - z)^{3/2} \quad (1)$$

Trong đó:

$C_1, C_2$  : hằng số không thứ nguyên

$z$  : cao trình đỉnh bờ đê

$\theta$  : góc cạnh hình thang

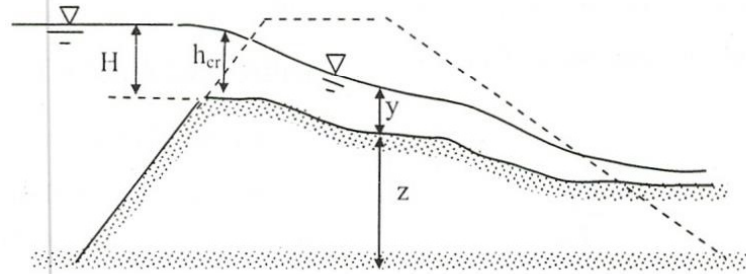
$H$  : độ sâu tràn qua đỉnh

Trường hợp mặt cắt hình chữ nhật, (1) trở thành:

$$Q = Kb(H - z)^{3/2} \quad (2)$$

trong đó  $K$  là hệ số lưu lượng xác định bằng thực nghiệm

Dòng chảy trên mái dốc được xem là dòng ổn định từng thời đoạn và chuyển động không đều. Theo thí nghiệm của Pugh và Cray (1984)



Hình 2. Dòng chảy tràn bờ

Để xác định sự xói lở trên đỉnh bờ đê và mái dốc, phương trình liên tục bùn cát được áp dụng:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + (1-p) \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

Trong đó:

$Q_s$  : lưu lượng bùn cát di chuyển

$p$  : độ rỗng

$A_d$  : thể tích bùn cát đáy bị xói trên một đơn vị chiều dài dòng chảy

mặt nước trên đỉnh ứng với độ sâu phân giới do đó đường mặt nước trên mái dốc là đường nước hạ và phương trình đường mặt nước được xác định:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{Q^2}{2gA^2} + y + z \right) + S_f = 0 \quad (3)$$

Trong đó  $S_f$  độ dốc thủy lực

$$S_f = \frac{C^2 Q^2}{A^2 R} \quad (4)$$

Với:  $C$ : hệ số Chezy, xác định theo Manning  $C = R^{1/6}/n$

$n$ : hệ số nhám

$R$ : bán kính thủy lực

$A_s$  : thể tích bùn cát lơ lửng trên một đơn vị chiều dài dòng chảy

Nếu xem mặt cắt bị xói dạng hình chữ nhật và bỏ qua phần bùn cát lơ lửng, phương trình (5) đơn giản thành

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + (1-p) \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Trong đó

$q_s$  : lưu lượng bùn cát đáy đơn vị

$z$  : cao trình đáy

Lưu lượng bùn cát đáy  $Q_s$  hay  $q_s$  đã được nhiều nhà khoa học nghiên cứu và đề xuất nhiều công thức tính toán, trong đó có những công thức được sử dụng nhiều như Meyer Peter & Muller (MPM, 1948), Einstein – Brow, Engelund – Hansen (EH, 1967), Van Rijn (1984) hay của Nakagawa và Tsujimoto (1980) có xét thêm ảnh hưởng của sự không bão hòa nồng độ bùn cát, hay của Koch (1980) có xét đến ảnh hưởng của độ dốc đáy. Tuy nhiên việc sử dụng công thức nào hoàn toàn phải dựa vào điều kiện ứng dụng và phải kiểm tra với kết quả thực tế. Trong nghiên cứu này đã sử dụng nhiều dạng công thức khác nhau nhưng công thức của Meyer Peter & Muller cho kết quả hợp lý nhất. Công thức của Meyer Peter & Muller có dạng sau:

$$\phi = 8(\mu\psi - \psi_c)^{1.5} \quad (7)$$

trong đó :

$$\phi = \frac{S}{\sqrt{\Delta g d^3}} \quad \text{và}$$

$$\psi = \frac{hi}{\Delta d}$$

với :

$S$ : lưu lượng bùn cát đáy

$\Delta$ : tỉ trọng tương đối bùn cát

$$\Delta = \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)$$

$\rho_s$  và  $\rho$  : là khối lượng riêng của bùn cát và của nước

$d$  : đường kính hạt

$\mu$  : hệ số mặt đáy, được xác định bởi

$$\mu = \left( \frac{c}{c'} \right)$$

$c$  : độ nhám tuyệt đối

$c'$  : độ nhám do kích thước hạt bùn cát

$$c' = 18 \log \frac{12h}{D_{90}}$$

$h$  : độ sâu nước

$D_{90}$  : đường kính hạt ứng với cấp phối hạt 90%

$\psi_c$  : giá trị phân giới của  $\psi$ , xác định dựa vào đồ thị Shields.

Phương trình (1), (3) và (5) được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn cho diễn biến sự xói lở trên đỉnh bờ đê và trên mái dốc.

### 3. PHƯƠNG PHÁP SỐ

#### 3.1. Sơ đồ sai phân

Phương pháp sai phân hữu hạn sơ đồ hiện được sử dụng để giải các phương trình vi phân (5) hay (6). Sơ đồ sai phân của Lax biến đổi bởi Vreugdenhil và De Veries được áp dụng như sau:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left[ f_i^{i-1} - \left( (1-\alpha)f_i^j + \alpha \frac{f_{i+1}^j + f_{i-1}^j}{2} \right) \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lambda \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_{i-1}^{j+1}}{2\Delta x} + (1-\lambda) \frac{f_{i+1}^j - f_{i-1}^j}{2\Delta x} \quad (9)$$

Trong đó:

$\Delta x, \Delta t$ : bước không gian và thời gian

$i, j$ : chỉ vị trí  $i$  và thời điểm  $j$

$\alpha, \lambda$  : trọng số sai phân

Áp dụng (8) và (9) vào phương trình (5)

cho dạng sai phân như sau:

$$\lambda \frac{Q_{si+1}^{j+1} - Q_{si-1}^{j+1}}{2\Delta x} + (1-\lambda) \frac{Q_{si+1}^j - Q_{si-1}^j}{2\Delta x} - \frac{1-p}{\Delta t} \left[ A_{di}^{j+1} - \left( (1-\alpha)A_{di}^j + \alpha \frac{A_{di+1}^j + A_{di-1}^j}{2} \right) \right] = 0 \quad (10)$$

Suy ra

$$A_{di}^{j+1} = (1-\alpha)A_{di}^j + \alpha \frac{A_{di+1}^j + A_{di-1}^j}{2} - \frac{\Delta t}{2(1-p)\Delta x} \left[ \lambda (Q_{si+1}^{j+1} - Q_{si-1}^{j+1}) + (1-\lambda)(Q_{si+1}^j - Q_{si-1}^j) \right] = 0 \quad (11)$$

Độ sâu xói lở trên đỉnh và mái dốc đê được xác định bởi:

$$\Delta z_i^{j+1} = \frac{A_{di}^{j+1} - A_{di}^j}{\chi} \quad (12)$$

Trong đó:

$\Delta z_i^{j+1}$  : độ sâu bị xói

$\chi$  : chu vi ướt

Nếu cho mặt cắt bị xói có dạng hình chữ nhật thì (11) trở thành:

$$z_i^{j+1} = (1-\alpha)z_i^j + \alpha \frac{z_{i+1}^j + z_{i-1}^j}{2} - \frac{\Delta t}{2(1-p)\Delta x} \left[ \lambda (q_{si+1}^{j+1} - q_{si-1}^{j+1}) + (1-\lambda)(q_{si+1}^j - q_{si-1}^j) \right] = 0 \quad (13)$$

và (12) thành

$$\Delta z_i^{j+1} = z_i^{j+1} - z_i^j \quad (14)$$

Để xác định  $Q_s$  hay  $q_s$  trong (11) và (13), công thức (7) được áp dụng nhưng cần phải biết độ sâu và vận tốc của dòng chảy. Dựa vào (1) xác định lưu lượng tràn qua đê và giải (3) bằng phương pháp cộng trực tiếp xác định được mặt nước và từ đó suy ra vận tốc dòng chảy.

### 3.2. Điều kiện biên

Điều kiện biên đối với dòng chảy (phương trình 3): độ sâu tại mặt cắt đầu tiên trên đỉnh bờ

được lấy bằng độ sâu phân giới  $h_{cr}$ , và được xác định từ lưu lượng tràn đã biết.

Điều kiện biên đối với chuyển động bùn cát (phương trình 5, 6):

Tại mặt cắt đầu tiên ( $i = 1$ ) ở thời điểm  $j+1$ , không thể xác định cao trình đáy do đó được giả thiết như sau:

$$z_1^{j+1} = z_{1+1/2}^{j+1} \quad (15)$$

với:  $z_{1+1/2}^{j+1}$  : cao trình đáy giữa mặt cắt 1

và 2

Áp dụng (15) vào (13) cho

$$z_1^{j+1} = z_1^j + \alpha \frac{z_2^j + z_1^j}{2} - \frac{\Delta t}{2(1-p)\Delta x} \left[ \lambda (q_{s2}^{j+1} - q_{s1}^{j+1}) + (1-\lambda)(q_{s2}^j - q_{s1}^j) \right] = 0 \quad (16)$$

Tại mặt cắt cuối ở hạ lưu ( $i = N$ ) ở thời điểm  $j+1$  cũng không thể xác định cao trình đáy do đó được chấp nhận:

$$z_N^{j+1} = z_{N-1/2}^{j+1} \quad (17)$$

$$z_1^{j+1} = z_1^j + \alpha \frac{z_2^j + z_1^j}{2} - \frac{\Delta t}{2(1-p)\Delta x} \left[ \lambda (q_{s2}^{j+1} - q_{s1}^{j+1}) + (1-\lambda)(q_{s2}^j - q_{s1}^j) \right] = 0 \quad (18)$$

### 3.3. Điều kiện ban đầu

Điều kiện ban đầu cho lưu lượng bùn cát được lấy bằng không và cao trình đáy là hình dạng ban đầu của bờ đê. Đối với dòng chảy để xác định mặt nước không cần điều kiện ban đầu.

### 3.4. Trình tự tính toán

Mô hình tính toán theo các bước sau

*Bước 1:* Đặt giá trị  $H$  trong (1) bằng giá trị ban đầu hay bằng giá trị của thời điểm trước và xác định  $Q$

*Bước 2:* Từ (3) xác định đường mặt nước, suy ra độ sâu và vận tốc chảy tràn trên đỉnh và mái dốc

*Bước 3:* Dùng (12), (14) xác định độ sâu bị xói

Kết quả bước 3 được dùng để xác định các giá trị cho bước 1 và lập lại chu kỳ tính mới.

Mô hình toán được lập trình bằng ngôn ngữ Fortran 90.

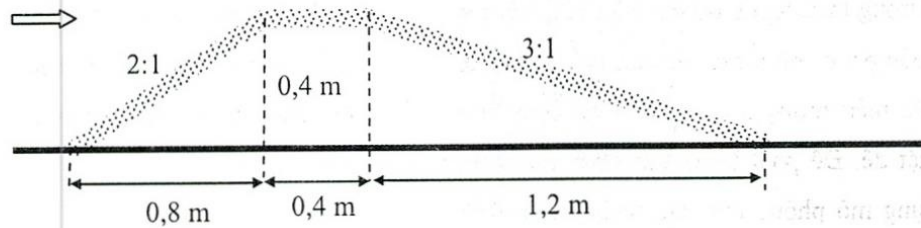
với:  $z_{N-1/2}^{j+1}$  : cao trình đáy giữa mặt cắt  $N$  và  $N-1$

Tương tự áp dụng (17) vào (13) cho

## 4. KIỂM NGHIỆM MÔ HÌNH

Để kiểm nghiệm, mô hình được áp dụng tính cho một mô hình thí nghiệm của Tawatchai và Hoai [3] thực hiện trong phòng thí nghiệm. Mô hình thí nghiệm là một bờ đê làm bằng cát đường kính  $d_{50} = 0,50$  mm, có mặt cắt hình thang với kích thước như sau:

- Chiều cao đỉnh bờ đê : 0,4 m
- Bề rộng ở đỉnh : 0,40 m
- Bề rộng ở chân : 2,40 m
- Bờ đê dài : 0,45 m
- Mái dốc thượng lưu : 2:1
- Mái dốc hạ lưu : 3:1



Hình 3. Kích thước mô hình

Thí nghiệm được thực hiện với hai cấp lưu lượng  $Q_1 = 3,134$  lít/s và  $Q_2 = 4,01$  lít/s tràn qua đỉnh bờ đê. Diễn biến xói lở trên đỉnh và mái dốc hạ lưu được ghi lại bằng camera và sau đó được phân tích thành số liệu số dùng cho nghiên cứu. Kết quả thí nghiệm cho trường hợp  $Q_1$  được dùng để hiệu chỉnh mô hình toán và trường hợp  $Q_2$  được dùng để kiểm nghiệm mô hình toán.

Lưới tính toán cho mô hình số có  $\Delta x = 5$  cm, tổng số nút trên đỉnh bờ đê và mái dốc hạ lưu là 33 nút. Bước thời gian tính  $\Delta t = 0,05$ s.

#### 4.1. Hiệu chỉnh mô hình

Các thông số trong mô hình được hiệu chỉnh dựa vào kết quả thí nghiệm với lưu lượng  $Q_1 = 3,134$  lít/s. Kết quả hiệu chỉnh cho các thông số như sau:

- Hệ số lưu lượng  $K = 1,1$  trong (2)
- Hệ số nhám  $n = 0,025$
- Trọng số  $\lambda = 0,5$  và  $\alpha = 0,01$  trong (8) và (9)

Kết quả mô phỏng diễn biến xói lở trên mặt đê sau khi hiệu chỉnh tại các thời điểm được trình bày trên hình 4. Hình 5, hình 6 là kết quả giữa tính toán và thí nghiệm tại thời điểm 30s và 60s.

#### 4.2. Kiểm nghiệm mô hình

Sau khi các thông số được hiệu chỉnh, mô hình toán được ứng dụng mô phỏng cho một trường hợp khác để kiểm nghiệm độ tin cậy và tính đúng đắn của các thông số hiệu chỉnh. Thí nghiệm ứng với lưu lượng  $Q_2 = 4,01$  lít/s được dùng để kiểm nghiệm lại mô hình. Kết quả mô phỏng diễn biến đỉnh và mái dốc bờ đê cho từng thời điểm được trình bày trên hình 7. So sánh hình dạng bờ đê giữa tính toán và thí nghiệm tại thời điểm 30s và 60 s được trình bày trên hình 8 và 9.

Kết quả cho thấy với các thông số hiệu chỉnh được lựa chọn, mô hình cho kết quả kiểm nghiệm khá tốt, hình dạng mặt đê mô phỏng bằng mô hình tại các thời điểm khá phù hợp với thí nghiệm.

#### 5. KẾT LUẬN

Mô hình toán mô phỏng sự sạt lở đỉnh và mái dốc bờ đê đã được hiệu chỉnh và kiểm nghiệm dựa vào các số liệu thí nghiệm thực đo. Kết quả mô phỏng từ mô hình phản ánh đúng với diễn biến xảy ra trong thí nghiệm, đặc biệt sự xói lở ở đỉnh và mái dốc bờ đê tại các thời điểm rất phù hợp giữa tính toán và thí nghiệm. Mặc dù ứng dụng tính toán cho trường hợp khá lý tưởng trong phòng thí nghiệm, nhưng vẫn hội đủ các yếu tố thủy lực gây tác động đến sự

xói lở trong thực tế, do đó có thể nhận thấy mô hình toán phản ánh được các bản chất vật lý cơ bản của hiện tượng xói lở do dòng chảy tràn qua mặt đê. Để phát triển, mô hình cần được ứng dụng mô phỏng cho các trường hợp thực tế.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này đã nhận được sự hỗ trợ của chương trình nghiên cứu cơ bản của bộ Khoa học Công nghệ và Môi trường.

## NUMERICAL MODEL TO SIMULATE THE EROSION ON THE SLOPE DUE TO OVERTOPPING

Huynh Cong Hoai

University of Technology, VNU-HCM

**ABSTRACT:** The numerical model is developed by combining the 1D flow model with the morphological model to simulate the erosion due to the water overtopping. The step method is applied to solve the water surface on the slope and the finite difference method of the modified Lax Scheme is applied for bed change equation. The Meyer-Peter and Muller formulae is used to determine the bed load transport rate. The model is calibrated and verified based on the data in experiment. It is found that the computed results and experiment data are in good agreement.

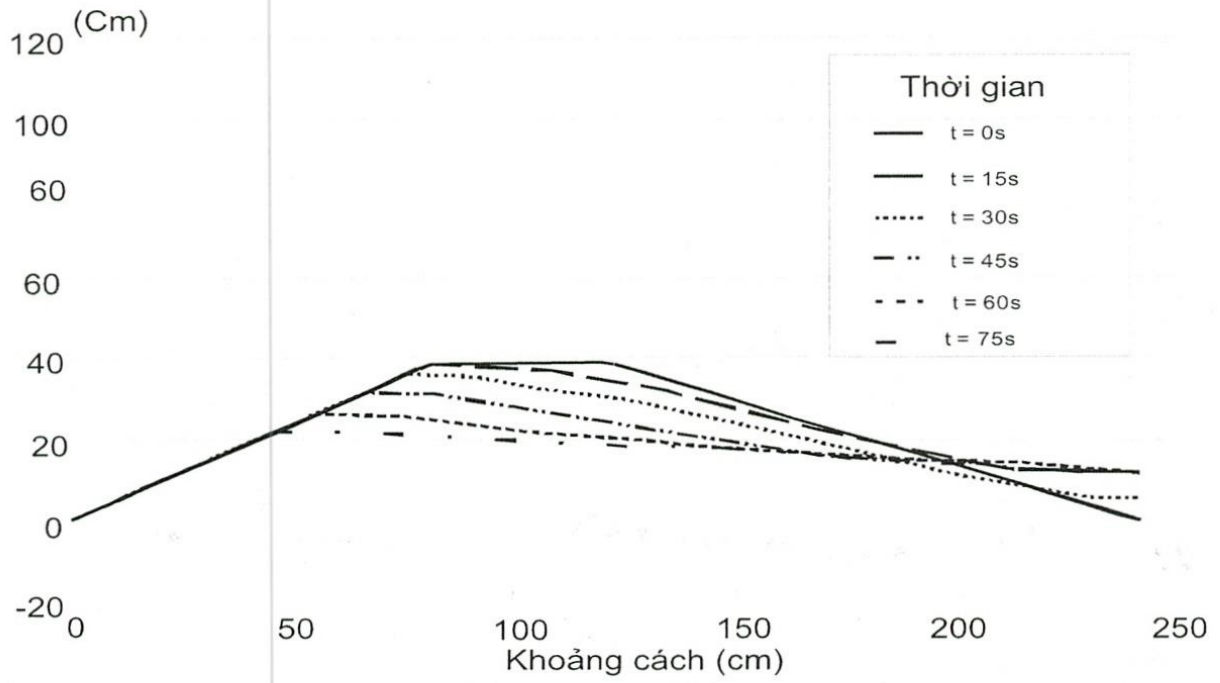
**Keywords:** numerical model, flow model, the morphological model.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

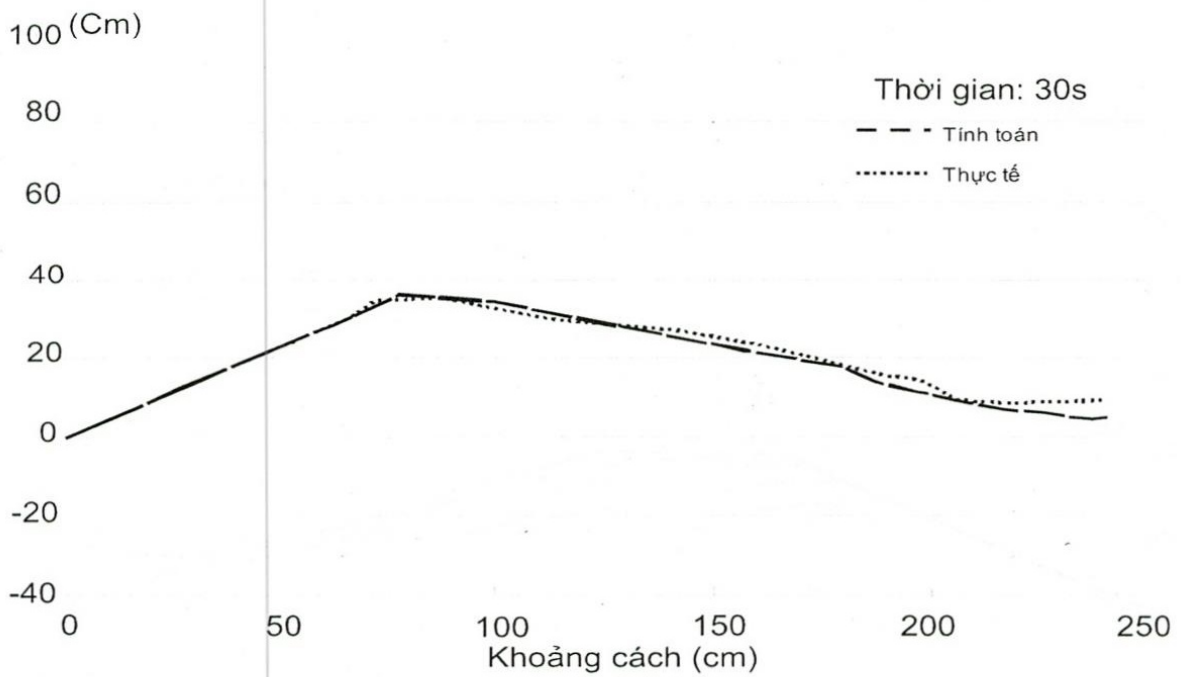
- [1].C.A. Pugh, E.W. Gray, *Fuse Plug Embankments in auxiliary spillway developing design guidelines and parameter, Report Hydraulics Branch Bureau of Reclamation*, (1984).
- [2].V.P. Singh, C.A. Quiroga, *A dam – breach Erosion model, Water Resources Management*, Vol. 1, No.3, (1987).
- [3].Tawatchai Tingsachali, Huynh Cong Hoai, *Numerical modeling of dam surface erosion due to flow overtopping*,

*Proceeding International Conference on Hydrosience and Engineering. Organized by the University of Mississippi. Washington DC, USA, 7-11, June, (1993).*

- [4].M De Vries, *Morphological Computation, Lecture note, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering*, (1976).

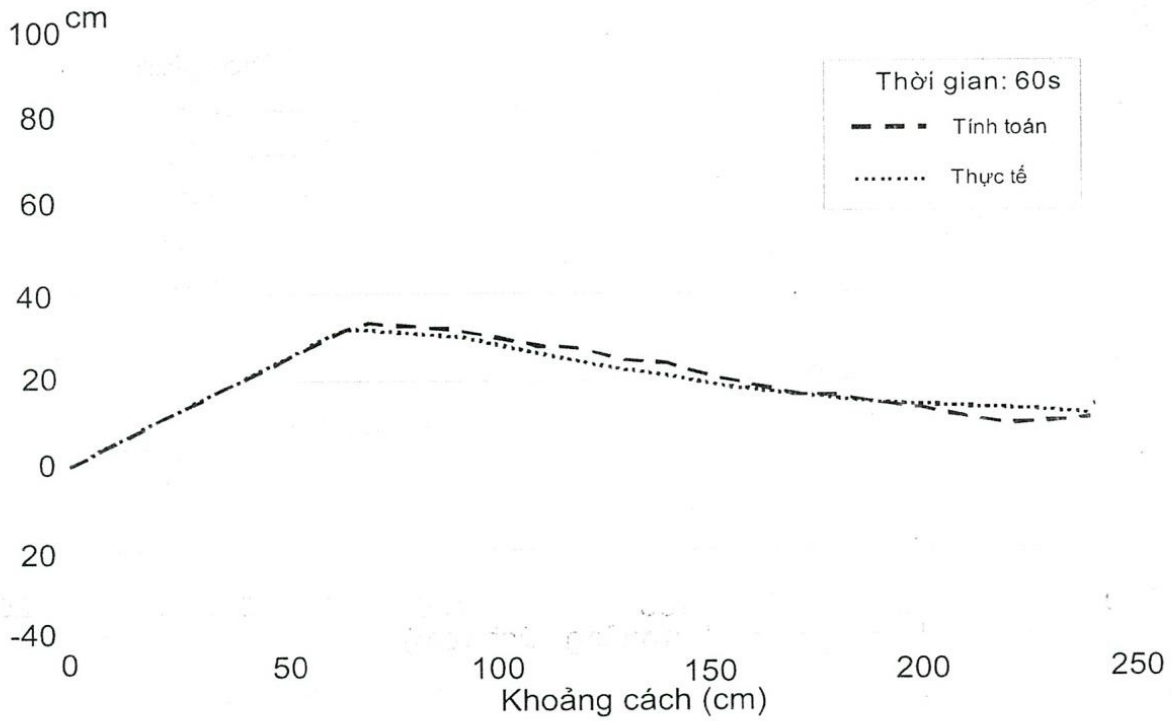


Hình 4. Trường hợp hiệu chỉnh mô hình - Diễn biến mái dốc bờ đê theo thời gian mô phỏng bởi mô hình

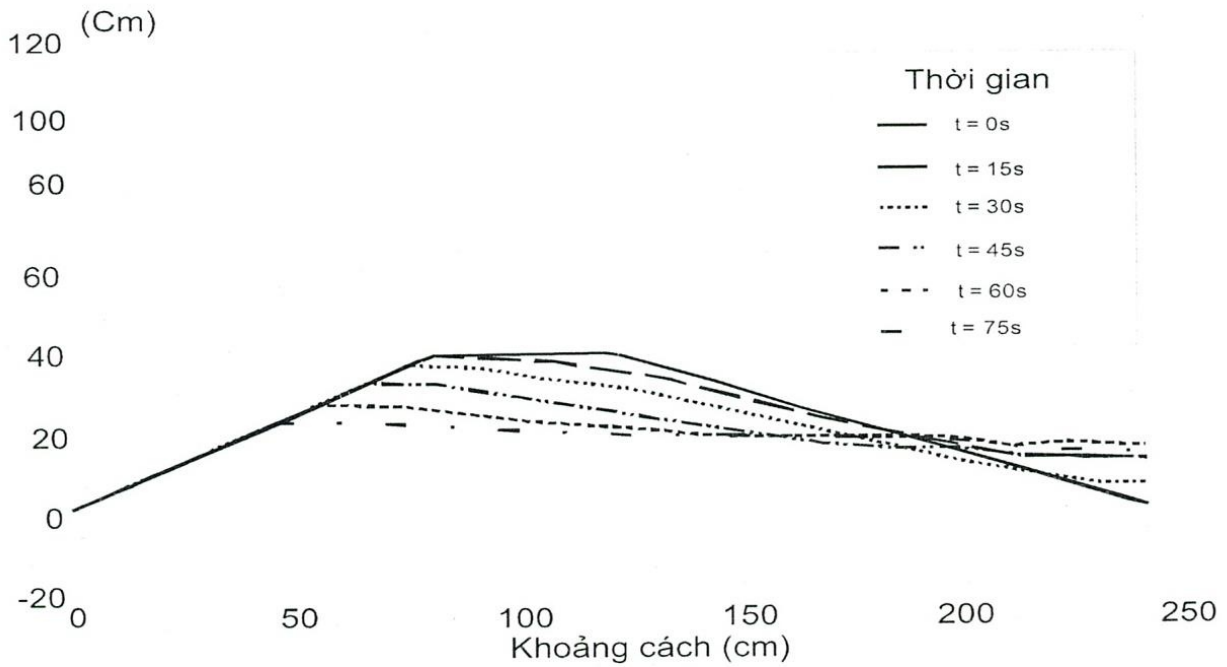


Hình 5. Trường hợp hiệu chỉnh mô hình - Mái dốc giữa tính toán và thí nghiệm tại thời điểm t= 30 s

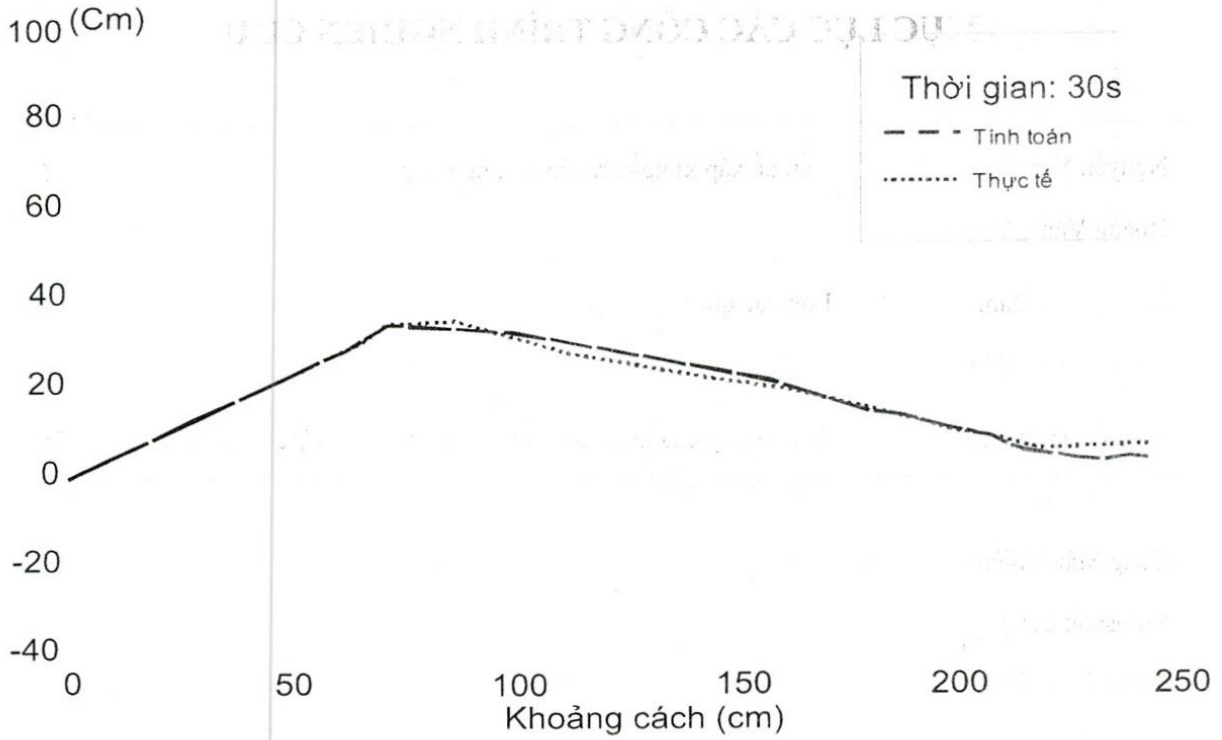




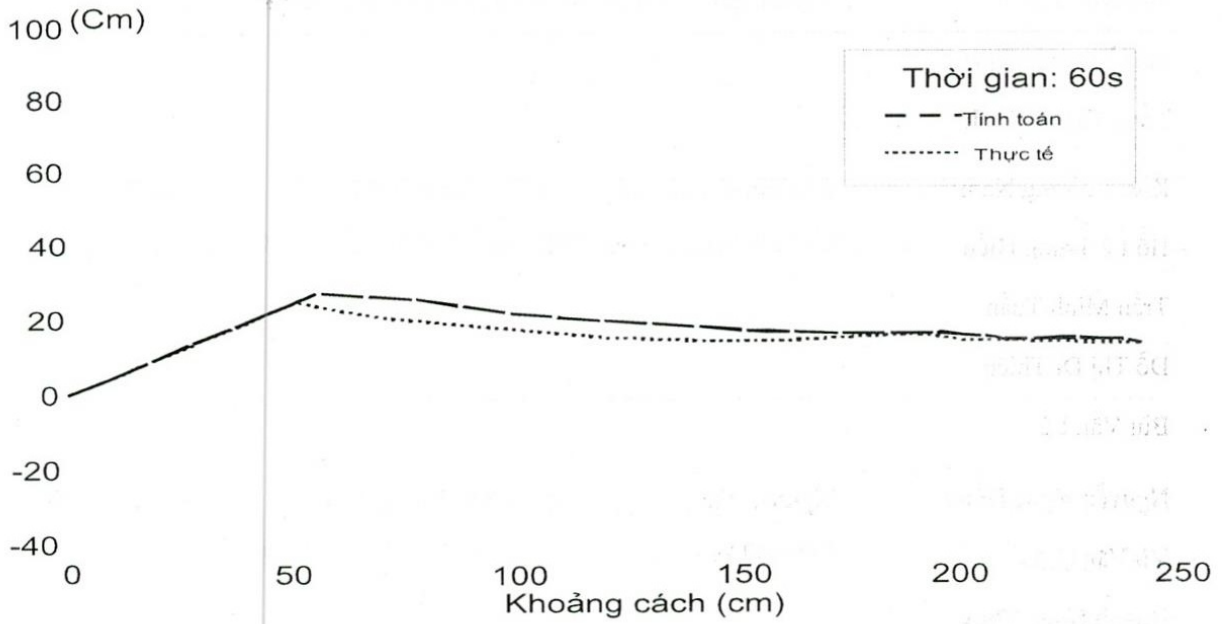
Hình 6. Trường hợp hiệu chỉnh mô hình . Mái dốc giữa tính toán và thí nghiệm tại thời điểm  $t = 60$  s



Hình 7. Trường hợp kiểm nghiệm mô hình - Diễn biến mái dốc bờ đê theo thời gian mô phỏng bởi mô hình



Hình 8. Trường hợp kiểm nghiệm mô hình - Mái dốc giữa tính toán và thí nghiệm tại thời điểm  $t = 30$  s



Hình 9. Trường hợp kiểm nghiệm mô hình - Mái dốc giữa tính toán và thí nghiệm tại thời điểm  $t = 60$  s