

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ PTNT
TRƯỜNG ĐẠI HỌC THỦY LỢI**

PHẠM THỊ HƯƠNG

**NGHIÊN CỨU CƠ CHẾ XÓI MẶT CỦA ĐẬP ĐẤT KHI NƯỚC
TRÀN ĐỈNH**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI, NĂM 2018

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ PTNT
TRƯỜNG ĐẠI HỌC THỦY LỢI

PHẠM THỊ HƯƠNG

**NGHIÊN CỨU CƠ CHẾ XÓI MẶT CỦA ĐẬP ĐẤT KHI NƯỚC
TRÀN ĐỈNH**

Chuyên ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình thủy

Mã số: 62.58.02.02

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

1. PGS.TS Nguyễn Cảnh Thái

2. GS.TS Nguyễn Chiến

HÀ NỘI, NĂM 2018

LỜI CAM ĐOAN

Tác giả xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của bản thân tác giả. Các kết quả nghiên cứu và các kết luận trong luận án là trung thực, không sao chép từ bất kỳ một nguồn nào và dưới bất kỳ hình thức nào. Việc tham khảo các nguồn tài liệu (nếu có) đã được thực hiện trích dẫn và ghi nguồn tài liệu tham khảo đúng quy định.

Tác giả luận án

Phạm Thị Hương

LỜI CẢM ƠN

Có được kết quả nghiên cứu như hôm nay ngoài sự cố gắng của bản thân, tác giả xin trân trọng gửi lời cảm ơn sâu sắc đến PGS.TS Nguyễn Cảnh Thái, GS.TS Nguyễn Chiền đã hướng dẫn tận tình.

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn Ban Giám hiệu nhà trường, Bộ môn Thủy công, Khoa Công trình, Phòng Đào tạo Đại học và sau đại học, Phòng Khoa học công nghệ Trường Đại học Thủy Lợi và các đồng nghiệp đã giúp đỡ tác giả để hoàn thành luận án.

Tác giả xin được cảm ơn Vụ Giáo dục Đại học - Bộ Giáo dục và Đào tạo, Bộ Nông nghiệp và PTNT đã tạo điều kiện cho tác giả trong quá trình thực hiện luận án.

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn tới gia đình luôn sát cánh, động viên tác giả vượt qua mọi khó khăn khi thực hiện luận án.

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH	vi
DANH MỤC BẢNG BIỂU	ix
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT.....	x
MỞ ĐẦU.....	1
1. Tính cấp thiết của đề tài.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu.....	2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	2
4. Phương pháp nghiên cứu	3
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài	3
6. Cấu trúc của luận án	4
CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU XÓI ĐẬP ĐẤT VÀ CƠ CHẾ VỠ ĐẬP KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH.....	5
1.1 Tổng quan về an toàn của đập vật liệu địa phương khi nước tràn đỉnh	5
1.1.1 Tổng quan chung.....	5
1.1.2 Một số ví dụ điển hình về sự cố vỡ đập do tràn đỉnh.....	6
1.2 Tổng quan về cơ chế xói và vỡ đập	12
1.2.1 Cơ chế xói.....	12
1.2.2 Cơ chế vỡ đập đất.....	14
1.3 Tình hình nghiên cứu cơ chế vỡ đập.....	15
1.3.1 Nghiên cứu trên thế giới.....	15
1.3.2 Nghiên cứu ở Việt Nam	29
1.4 Những vấn đề đặt ra và hướng nghiên cứu.....	32
1.5 Kết luận chương 1	33
CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ THỰC NGHIỆM VỀ TỐC ĐỘ XÓI ĐẤT VÀ CƠ CHẾ VỠ ĐẬP KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH.....	34
2.1 Các khái niệm cơ bản	34
2.2 Các công thức tính tốc độ xói	36
2.3 Các phương pháp nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng suất cắt tới hạn và tốc độ xói của đất	42
2.3.1 Phương pháp thí nghiệm xói HET [27].....	43
2.3.2 Phương pháp thí nghiệm xói JET [27].....	44
2.3.3 Thí nghiệm xói mẫu đất trên máng thủy lực [28].....	45
2.3.4 Nhận xét.....	47
2.4 Mô hình toán EMBANK	48
2.5 Kết luận chương 2	52

CHƯƠNG 3	NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM KẾT HỢP VỚI MÔ HÌNH TOÁN	
XÁC ĐỊNH THỜI GIAN VỠ CỦA ĐẬP KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH		54
3.1 Đặt vấn đề		54
3.2 Phân loại đất theo khả năng chống cắt		54
3.3 Nghiên cứu thực nghiệm cơ chế vỡ của đập đất khi nước tràn đỉnh		59
3.3.1 Xây dựng mô hình.....		59
3.3.2 Phân tích kết quả.....		63
3.4 Nghiên cứu thực nghiệm xây dựng công thức tính tốc độ xói của đất		65
3.4.1 Chế tạo thiết bị thí nghiệm		65
3.4.2 Chuẩn bị mẫu thí nghiệm		71
3.4.3 Tiến hành thí nghiệm		72
3.4.4 Xây dựng công thức thực nghiệm.....		76
3.5 Xây dựng biểu đồ xác định thời gian bắt đầu vỡ của đập (T_v) khi nước tràn đỉnh		78
3.5.1 Nghiên cứu ảnh hưởng của độ dốc mái hạ lưu đến thời gian bắt đầu vỡ đập....		78
3.5.2 Xây dựng đồ thị		79
3.6 Kết luận chương 3		82
CHƯƠNG 4	ÁP DỤNG MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH VỠ CỦA ĐẬP ĐÀM HÀ	
ĐỘNG – QUẢNG NINH KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH		84
4.1 Giới thiệu công trình		84
4.2 Sự cố xói mái đập chính và vỡ đập phụ số 2 mùa lũ năm 2014		85
4.2.1 Nguyên nhân sự cố.....		85
4.2.2 Thời điểm, diễn biến lũ gây sự cố công trình.....		86
4.2.3 Hiện trạng công trình sau lũ		86
4.3 Tính toán xói và mô phỏng quá trình vỡ đập		88
4.3.1 Mặt cắt tính toán		88
4.3.2 Mực nước tính toán.....		92
4.3.3 Kết quả tính toán xói và vỡ đập.....		93
4.4 Kết luận chương 4		108
KẾT LUẬN		110
I. Kết quả đạt được của luận án.....		110
1. Nghiên cứu tổng quan.....		110
2. Nghiên cứu thực nghiệm.....		110
3. Nghiên cứu ứng dụng vào công trình thực tế.....		111
II. Những đóng góp mới của luận án.....		112
III. Tồn tại và hướng phát triển		112
1. Tồn tại		112
2. Hướng phát triển.....		113
DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ.....		114
TÀI LIỆU THAM KHẢO		115
PHỤ LỤC.....		119

Phụ lục A. Hình ảnh thí nghiệm nghiên cứu cơ chế vỡ đập	119
Phụ lục A – 1. Đập đập bằng đất A – Trường hợp cột nước tràn $H = 15\text{cm}$	119
Phụ lục A – 2. Đập đập bằng đất C – Trường hợp cột nước tràn $H = 7\text{cm}$	122
Phụ lục B. Kết quả thí nghiệm đo tốc độ xói đất	124
Phụ lục B - 1. Kết quả đo tốc độ xói đất A.....	124
Phụ lục B - 2. Kết quả đo tốc độ xói đất B	126
Phụ lục B - 3. Kết quả đo tốc độ xói đất C	129
Phụ lục C. Số liệu và kết quả tính toán diễn biến sự cố Đầm Hà Động bằng mô hình toán EMBANK.....	131
Phụ lục C – 1. File số liệu đập chính.....	131
Phụ lục C – 2. File số liệu đập phụ 2.....	133
Phụ lục C – 3. Kết quả tính toán cho đập chính.....	135
Phụ lục C – 4. Kết quả tính toán cho đập phụ 2.....	143

DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH

Hình 1. 1. Đập Tous sau khi vỡ.....	7
Hình 1. 2. Đập Delhi bị vỡ và dòng nước cuộn cuộn chảy về hạ lưu.	8
Hình 1. 3. Phần đập đất bị xói hết, chỉ còn lại phần bê tông	8
Hình 1. 4. Đập Bản Kiều ngày nay và tràn xả lũ đã được khôi phục lại.....	9
Hình 1. 5. Vỡ đập Đồng Đáng – Thanh Hóa, ngày 1/10/2013 (nguồn Internet).....	10
Hình 1. 6. Vỡ đập Phân Lân – Vĩnh Phúc, ngày 3/8/2013 (nguồn Internet).....	11
Hình 1. 7. Vỡ đập phụ số 2, Đầm Hà Động – Quảng Ninh, ngày 30/10/2014 (nguồn Internet).....	11
Hình 1. 8. Xói mái hạ lưu đập chính, Đầm Hà Động – Quảng Ninh, ngày 30/10/2014 (nguồn Internet).....	12
Hình 1. 9. Lực và áp lực tác động lên hạt [11]	13
Hình 1. 10. Cơ chế xói của đất hạt rời [11]	13
Hình 1. 11. Sự di chuyển của điểm Froude giới hạn.....	18
Hình 1. 12. Kết quả thí nghiệm xói đập đất ít dính của C. Chinnarasri và các cộng sự, năm 2003 [23]	18
Hình 1. 13. Kết quả thí nghiệm xói đập đất dính của Powledge và đồng nghiệp, năm 1989 [24].....	19
Hình 1. 14. Kết quả thí nghiệm xói theo 2 phương pháp HET và JET thực hiện tại Bureau of Reclamation, năm 2007 [27].....	22
Hình 1. 15. Chiều cao mất đi của mẫu đất thí nghiệm theo thời gian [28]	23
Hình 1. 16. Quan hệ giữa tốc độ xói đất và ứng suất cắt sinh ra do dòng chảy [28]....	24
Hình 1. 17. Các thiết bị phục vụ thí nghiệm tại trường đại học Colorado [25].....	27
Hình 1. 18. Thi công đập đất thí nghiệm (tỷ lệ 1:1) [25]	28
Hình 1. 19. Biểu đồ so sánh tốc độ xói tính toán bằng phần mềm EMBANK và tốc độ xói đo đạc từ thí nghiệm [25].....	29
Hình 1. 20. Cơ chế xói vỡ ban đầu của tràn sự cố Sông Hinh- Phú Yên [36].....	31
Hình 1. 21. Cơ chế xói vỡ của tràn sự cố thủy điện Trung Sơn – Thanh Hóa [37].....	31
Hình 2. 1. So sánh giữa tốc độ xói đo đạc và số liệu tính toán theo công thức của Wiggert & Contractor [39].....	37
Hình 2. 2. So sánh giữa tốc độ xói đo đạc và tốc độ xói tính toán theo công thức của Cristofano [40]	38
Hình 2. 3. So sánh giữa tốc độ xói đo đạc và tốc độ xói tính toán theo công thức của Ariathurai & Arulanandan [41].....	38
Hình 2. 4. Biểu đồ quan hệ giữa ứng suất cắt tới hạn và chỉ số dẻo [48].....	42
Hình 2. 5. Thiết bị thí nghiệm xói tiêu chuẩn HET [27]	43
Hình 2. 6. Thiết bị thí nghiệm xói JET [27]	45
Hình 2. 7. Thiết bị thí nghiệm xói của Fujisawa [28]	46
Hình 2. 8. Thiết bị điều khiển mẫu đất [28].....	46
Hình 2. 9. Sơ đồ thí nghiệm xói của Fujisawa [28].....	47

Hình 2. 10. Sơ đồ khối chương trình EMBANK	50
Hình 3. 1. Thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý của đất	58
Hình 3. 2. Đường cong cấp phối hạt của đất A.....	58
Hình 3. 3. Đường cong cấp phối hạt của đất B.....	58
Hình 3. 4. Đường cong cấp phối hạt của đất C.....	59
Hình 3. 5. Sơ đồ khu thí nghiệm	61
Hình 3. 6. Mô hình đập đất và các thiết bị quan sát.....	61
Hình 3. 7. Hình ảnh mô hình đập sau khi thi công xong.....	62
Hình 3. 8. Hình ảnh diễn biến mặt cắt đập sau mỗi phút – Trường hợp cột nước tràn 15cm.....	63
Hình 3. 9. Hình ảnh diễn biến mặt cắt đập sau mỗi phút – Trường hợp cột nước tràn 18cm.....	64
Hình 3. 10. Hình ảnh diễn biến mặt cắt đập sau mỗi phút – Trường hợp cột nước tràn 7cm.....	64
Hình 3. 11. Hình ảnh diễn biến mặt cắt đập sau mỗi phút – Trường hợp cột nước tràn 10cm.....	64
Hình 3. 12. Sơ đồ bố trí tổng thể thiết bị thí nghiệm tại khu thí nghiệm thủy lực ngoài trời của Trường Đại học Thủy lợi	67
Hình 3. 13. Bố trí tổng thể thiết bị đo đạc, quan sát.....	68
Hình 3. 14. Bố trí thiết bị đo vận tốc dòng chảy trên dốc nước.....	69
Hình 3. 15. Bố trí thước đo chiều cao xói.....	71
Hình 3. 16. Công tác chuẩn bị trước khi thí nghiệm	72
Hình 3. 17. Thí nghiệm đo ứng suất cắt tới hạn τ_c	74
Hình 3. 18. Thí nghiệm đo tốc độ xói.....	75
Hình 3. 19. Mẫu đất sau khi thí nghiệm	75
Hình 3. 20. Đường thực nghiệm quan hệ giữa tốc độ xói E và hiệu ứng suất $\tau - \tau_c$ của 3 loại đất.....	77
Hình 3. 21. Đồ thị xác định T_v khi nước tràn đỉnh (trường hợp H = 5m)	80
Hình 3. 22. Đồ thị xác định T_v khi nước tràn đỉnh (trường hợp H = 10m)	80
Hình 3. 23. Đồ thị xác định T_v khi nước tràn đỉnh (trường hợp H = 15m)	81
Hình 3. 24. Đồ thị xác định T_v khi nước tràn đỉnh (trường hợp H = 20m)	82
Hình 4. 1. Toàn cảnh hồ đập Đầm Hà Động (thời điểm chưa xảy ra sự cố).....	84
Hình 4. 2. Hạ lưu tràn xả lũ.....	85
Hình 4. 3. Đập chính bị hư hại nặng do nước tràn qua	87
Hình 4. 4. Đập phụ số 2 bị vỡ	88
Hình 4. 5 Mặt cắt đập chính tại vị trí xói sâu nhất.....	90
Hình 4. 6. Mặt cắt đập phụ số 2 tại vị trí vỡ	91
Hình 4. 7. Đường quá trình mực nước trong hồ.....	93
Hình 4. 8. Mặt cắt ngang đập phụ số 2 - Đầm Hà Động theo các bước thời gian.....	94
Hình 4. 9. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm đập chưa vỡ	95

Hình 4. 10. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm đập chưa vỡ	95
Hình 4. 11. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm vỡ đập.....	96
Hình 4. 12. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm đập đã bị vỡ	96
Hình 4. 13. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm đập đã bị vỡ	97
Hình 4. 14. Mặt cắt ngang đập chính - Đầm Hà Động theo các bước thời gian 0,1 giờ	99
Hình 4. 15. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói trên đập chính tại thời điểm đập phụ chưa vỡ ($t = 0,5$ giờ)	100
Hình 4. 16. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói trên đập chính tại thời điểm đập phụ chưa vỡ ($t = 1,0$ giờ)	100
Hình 4. 17. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói trên đập chính tại thời điểm vỡ đập phụ ($t = 1,1$ giờ)	101
Hình 4. 18. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói trên đập chính tại thời điểm $t = 1,2$ giờ	101
Hình 4. 19. Mặt cắt hiện trạng của đập chính sau sự cố [63]	104
Hình 4. 20. So sánh kết quả tính toán xói trên đập chính theo EMBANK và mặt cắt thực tế sau sự cố	105

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1. 1. Giá trị vận tốc tới hạn và ứng suất cắt tới hạn của đất tương ứng với các biện pháp bảo vệ mái hạ lưu [25]	20
Bảng 2. 1. Các công thức tính tốc độ xói đất	36
Bảng 2. 2. Vận tốc tới hạn của đất theo đề nghị của Fortier và Scobey và giá trị ứng suất cắt tới hạn được chuyển đổi theo U.S Bureau of Reclamation [44]	40
Bảng 2. 3. Các công thức thực nghiệm tính τ_c [45], [46], [47]	41
Bảng 3. 1. Thống kê các tính chất của đất đắp đập ở Việt Nam và phân loại đất theo lực dính đơn vị	56
Bảng 3. 2. Tính chất của đất thí nghiệm	59
Bảng 3. 3. Các trường hợp thí nghiệm	63
Bảng 3. 4. Kết quả tính toán lưu lượng qua tràn và máng	70
Bảng 3. 5. Bảng thông số xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c của đất A	73
Bảng 3. 6. Bảng thông số xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c của đất B	73
Bảng 3. 7. Bảng thông số xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c của đất C	73
Bảng 3. 8. Bảng kết quả đo tốc độ xói đất A	75
Bảng 3. 9. Bảng kết quả đo tốc độ xói đất B	76
Bảng 3. 10. Bảng kết quả đo tốc độ xói đất C	76
Bảng 3. 11. Thống kê kết quả tính toán T_v khi nước tràn đỉnh	78
Bảng 3. 12. Các trường hợp tính toán	79
Bảng 3. 13. Thời gian bắt đầu vỡ đập tính toán cho trường hợp đập cao 5m	79
Bảng 3. 14. Thời gian bắt đầu vỡ đập tính toán cho trường hợp đập cao 10m	80
Bảng 3. 15. Thời gian bắt đầu vỡ đập tính toán cho trường hợp đập cao 15m	81
Bảng 3. 16. Thời gian bắt đầu vỡ đập tính toán cho trường hợp đập cao 20m	81
Bảng 4. 1. Kết quả tính toán điều tiết lũ	92
Bảng 4. 2. So sánh độ sâu xói mái đập chính Đầm Hà Động giữa thực tế và tính toán (thời điểm $t = 1,2$ giờ)	102
Bảng 4. 3. Bảng so sánh mặt cắt đập chính và đập phụ số 2 tại các thời điểm	106

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

ARL	Agricultural Research Lab (Phòng thí nghiệm nghiên cứu nông nghiệp Hoa Kỳ)
FHWA	Federal Highway Administration (Cục đường bộ Hoa Kỳ)
HET	Hole Erosion Test (Thí nghiệm xói ống)
HSPF	Hydrological Simulation Program-Fortran (Chương trình tính toán thủy văn – ngôn ngữ Fortran)
ICOLD	International Commission on Large Dams (Hội Đập lớn thế giới)
JET	Jet Erosion Test (Thí nghiệm xói tia)
NSTL	National Soil Testing Lab (Phòng thí nghiệm địa kỹ thuật quốc gia – Hoa Kỳ)
OSEDSB	Office of the State Engineer Dam Safety Branch (Văn phòng an toàn đập Hoa Kỳ)
QCVN	Quy chuẩn Việt Nam
SWAT	Soil and Water Assessment Tool (Công cụ đánh giá đất và nước)
TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
USDA	US Department of Agriculture (Bộ Nông nghiệp Hoa Kỳ)
USFS	United States Forest Service (Sở Lâm nghiệp Hoa Kỳ)
VLDP	Vật liệu địa phương
WEPP	Water Erosion Prediction Project (Dự án dự báo xói mòn đất do nước)
T_v	Thời gian kể từ khi nước tràn đỉnh đập đến khi đập bắt đầu vỡ

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

An toàn cho các đập hiện hữu đã, đang và sẽ là mối quan tâm của nhiều quốc gia trên thế giới, trong đó có Việt Nam. Theo số liệu thống kê của Tổng cục Thủy lợi năm 2015 [1], Việt Nam hiện có 6.886 hồ chứa thủy lợi – thủy điện. Trong số đó thì số lượng hồ chứa thủy điện là 238 hồ (chiếm 3,5%), hồ chứa thủy lợi là 6.648 hồ (chiếm 96,5%, kể cả hồ chứa thủy lợi có công trình thủy điện), hơn 90% số đập tạo hồ thủy lợi ở nước ta hiện nay là đập đất.

Phần lớn các đập đất ở nước ta được thiết kế, thi công trong khoảng 30 đến 40 năm trước đây nên yêu cầu về thiết kế thấp (lũ nhỏ). Ngày nay, do ảnh hưởng của nhiều yếu tố (biến đổi khí hậu, thay đổi thảm phủ thực vật trên lưu vực, v.v...) làm cho thời tiết cực đoan, mưa lớn, lũ lớn dẫn đến dễ gây ra nước tràn đỉnh đập. Hầu hết các đập nhỏ không đáp ứng được tiêu chuẩn lũ hiện nay, khả năng nước tràn qua đỉnh đập khi có lũ là rất lớn. Trong những năm gần đây, nước tràn đỉnh đập xảy ra liên tục gây ra các sự cố vỡ đập, điển hình như: vỡ đập Phân Lân – Vĩnh Phúc ngày 03/8/2013; vỡ đập Đồng Đáng, Thung Cối – Thanh Hóa ngày 01/10/2013; vỡ đập phụ Đàm Hà Động – Quảng Ninh ngày 31/10/2014; và gần đây nhất là trong đợt mưa lũ đầu tháng 10 năm 2017, một loạt các đê, đập đất đã bị nước lũ tràn đỉnh gây vỡ như đập Cỏ Châu – Hà Tĩnh, đê bao sông Cầu Chày - Thanh Hóa, v.v... Tuy nhiên, một số đê, đập đất cũng bị nước tràn đỉnh nhưng chưa vỡ mà chỉ bị xói một phần thân đập như đập Ea Đrăng – Đắk Lắk tháng 9 năm 2013, đập chính Đàm Hà Động – Quảng Ninh ngày 31/10/2014, đập Gà ở Nghệ An tháng 10 năm 2017.

Đập dù lớn hay nhỏ khi bị vỡ đều gây ra tổn thất nặng nề cho bản thân công trình và cho vùng hạ du. Ở các đập mà hạ du là khu dân cư hoặc kinh tế, văn hóa thì thiệt hại do vỡ đập gây ra ở hạ du lớn hơn gấp nhiều lần so với thiệt hại đối với bản thân công trình và phải mất nhiều năm sau mới có thể khắc phục được. Trước những diễn biến bất lợi của khí hậu, sự xuống cấp của công trình và thiệt hại do vỡ đập gây ra đối với kinh tế xã hội đã đặt ra yêu cầu cấp bách là nghiên cứu các giải pháp công nghệ để ứng

phó với các sự cố có thể xảy ra khi nước tràn đỉnh đập, đặc biệt là việc cảnh báo nguy cơ vỡ đập cho vùng hạ du.

Đối với các đập tràn sự cố kiểu đập đất tự vỡ, nguyên lý làm việc của loại công trình này là chủ động gây vỡ đập do dòng nước tràn qua đỉnh. Tuy nhiên, sau một thời gian sử dụng, do nhiều yếu tố tác động mà công trình không còn làm việc theo đúng thiết kế ban đầu (khả năng tự vỡ khi nước tràn qua). Việc đập tràn sự cố không thể tự vỡ cũng là một mối nguy hiểm ảnh hưởng đến an toàn của đập chính trong cụm công trình đầu mối. Vì vậy, việc dự đoán khả năng tự vỡ của đập tràn sự cố kiểu đập đất tự vỡ cũng là một công việc quan trọng trong đánh giá an toàn cụm công trình đầu mối khi có lũ vượt thiết kế.

Sự phát triển của xói trên bề mặt đập dưới tác dụng của dòng chảy là nguyên nhân chủ yếu dẫn đến vỡ đập. Hiểu được cơ chế xói là chìa khóa để giải thích hiện tượng xói lở và có thể dự báo sự cố vỡ đập đất khi nước tràn đỉnh. Vì vậy đề tài “Nghiên cứu cơ chế xói mặt của đập đất khi nước tràn đỉnh” là rất cần thiết góp phần đánh giá an toàn và cảnh báo khả năng vỡ của đập đất cũng như dự đoán khả năng tự vỡ của các đập tràn sự cố kiểu đập đất tự vỡ trong mùa mưa lũ.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Xây dựng được công thức thực nghiệm tính tốc độ xói của đất dưới tác dụng của dòng chảy cho một số loại đất thường dùng để đắp đập ở Việt Nam. Các công thức này làm dữ liệu đầu vào cho chương trình tính toán mô phỏng vỡ đập đất khi nước tràn đỉnh – chương trình EMBANK.

Giải thích cơ chế vỡ đập và xây dựng các biểu đồ xác định thời gian bắt đầu vỡ của đập khi nước tràn đỉnh cho một số loại đất đắp đập với cột nước tràn đỉnh thay đổi, nhằm phục vụ cảnh báo nguy cơ vỡ đập cho vùng hạ du.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng: Luận án tập trung nghiên cứu hiện tượng nước tràn đỉnh của các đập đất trong điều kiện Việt Nam.

Phạm vi nghiên cứu:

- Các loại đất đắp đập có tính dính khác nhau, từ ít dính (lực dính $C = 0,16 \div 0,19$ kG/cm²) đến đất có tính dính lớn (lực dính $C = 0,24 \div 0,30$ kG/cm²).
- Các đập đất có chiều cao phổ biến ở Việt Nam $H_d = 5 \div 30$ m.
- Cột nước tràn trên đỉnh đập đất có khả năng xảy ra ở Việt Nam $H_t = 0,2 \div 1,4$ m.
- Bài toán phẳng: nghiên cứu vỡ đập theo phương đứng, không xét theo phương ngang.
- Chỉ nghiên cứu giai đoạn xói bề mặt cho đến khi đập bắt đầu bị vỡ (giai đoạn đầu của quá trình vỡ đập).

4. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp kế thừa: Tìm hiểu các nghiên cứu đã có trong và ngoài nước về vấn đề xói đất và vỡ đập do dòng chảy tràn trên đỉnh có lưu tốc cao (lý thuyết, mô hình thí nghiệm, kết quả nghiên cứu). Đưa ra cơ sở khoa học về các vấn đề có liên quan để định hướng nghiên cứu thực nghiệm.

Phương pháp thực nghiệm: Dựa vào các phương pháp thí nghiệm mô hình đã được thực hiện bởi các tác giả trước, phân tích, lựa chọn phương pháp thí nghiệm phù hợp cho luận án. Phát triển thí nghiệm để tìm ra các kết quả mới áp dụng cho các loại đất đắp đập ở Việt Nam.

Phương pháp mô hình toán: Ứng dụng các phần mềm tính toán để phân tích, đánh giá cơ chế vỡ đập đất do nước tràn đỉnh và rút ra các kết luận có giá trị.

Phương pháp chuyên gia: Tổ chức hội thảo thu thập ý kiến từ các chuyên gia thuộc các đơn vị nghiên cứu, thiết kế, thi công, quản lý, vận hành để vận dụng cho các vấn đề trong nội dung nghiên cứu.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học: Lần đầu tiên ở Việt Nam đã tiến hành nghiên cứu xói mái đất trên máng thủy lực kiểu Fujisawa. Từ đó đưa ra kết quả xác định tốc độ xói mái đập đất.

Ý nghĩa thực tiễn: Từ kết quả nghiên cứu giúp xác định quá trình vỡ đập để quản lý an toàn đập, cảnh báo ngập lụt hạ du và tính toán thiết kế tràn sự cố kiểu đập đất tự vỡ trên ngưỡng tràn.

6. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần mở đầu, phân kết luận và kiến nghị, luận án được trình bày trong 4 chương bao gồm:

Chương 1: TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU XÓI ĐẬP ĐẤT VÀ CƠ CHẾ VỠ ĐẬP KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH

Chương 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ THỰC NGHIỆM VỀ TỐC ĐỘ XÓI ĐẤT VÀ CƠ CHẾ VỠ ĐẬP

Chương 3: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM KẾT HỢP VỚI MÔ HÌNH TOÁN XÁC ĐỊNH THỜI GIAN VỠ CỦA ĐẬP KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH

Chương 4: ÁP DỤNG MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH VỠ CỦA ĐẬP ĐÀM HÀ ĐỘNG – QUẢNG NINH KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU XÓI ĐẬP ĐẤT VÀ CƠ CHẾ VỠ ĐẬP KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH

1.1 Tổng quan về an toàn của đập vật liệu địa phương khi nước tràn đỉnh

1.1.1 Tổng quan chung

Rất rõ ràng, nước là tài nguyên quan trọng nhất đối với đời sống của con người nói riêng và của muôn loài nói chung, nước quyết định đến sự tồn vong của các sinh vật, là động lực chính để hình thành và phát triển các vùng kinh tế v.v... Do đó, dọc theo chiều dài lịch sử đã có rất nhiều các biện pháp, nghiên cứu được đề xuất để quản lý, khai thác và sử dụng hiệu quả nguồn nước. Đập đập tạo ra các hồ chứa được biết đến như là phương pháp hiệu quả nhất để quản lý, khai thác tổng hợp và sử dụng hiệu quả nguồn nước, phương pháp này đã có những đóng góp lớn và tích cực cho sự phát triển của xã hội.

Theo thống kê của ICOLD cho 58.519 đập trên toàn thế giới [2] thì đập VLĐP chiếm 76%, trong đó 63% là đập đất. Không cần tính đến một khối lượng khổng lồ các đê sông, đê biển cũng có thể nhận thấy vai trò vô cùng quan trọng của đập đất trong việc quản lý, khai thác và sử dụng hiệu quả tài nguyên nước. Tuy nhiên, có một thực tế được ghi nhận rằng trong quá trình hoạt động của các đập đã xuất hiện một số lượng không nhỏ các hư hỏng, điều này dẫn đến phải đầu tư một khoản kinh phí lớn để duy tu bảo dưỡng các đập, hoặc trong trường hợp vỡ đập sẽ gây ra những thiệt hại vô cùng to lớn về tài sản, con người, và môi trường. Một vài ví dụ về hậu quả của các sự cố đập có thể được tìm thấy trong [3].

Các thống kê khác nhau trên thế giới đều thống nhất chỉ ra rằng những hư hỏng xuất hiện ở đập VLĐP chiếm phần lớn trong tổng số các hư hỏng đập đã được thống kê, ví dụ: thống kê các hư hỏng của đập ở Trung Quốc từ năm 1954 đến năm 2006 cho thấy có 3.498 đập bị hư hỏng, trong đó các hư hỏng của đập VLĐP chiếm 90% (85% các hư hỏng xuất hiện ở đập đất đồng chất) [4]; hoặc tổng kết của hơn 900 hư hỏng đập trên thế giới cho thấy 65% các hư hỏng này xuất hiện ở đập VLĐP [5].

Các nguyên nhân chính dẫn đến hư hỏng của đập đất bao gồm: các nguyên nhân do dòng thấm gây nên, sụt lún biến dạng, nước tràn đỉnh đập, v.v., trong đó nước tràn đỉnh đập là nguyên nhân chiếm tỷ lệ lớn nhất trong tổng số các nguyên nhân gây ra sự cố đập (ICOLD 1995, Foster 2000, Costa 1985) [6]. Không nằm ngoài quy luật đó, nước tràn đỉnh đập đã được chỉ ra là nguyên nhân phổ biến nhất gây ra vỡ đập đất ở Việt Nam. Theo thống kê trong “tiêu chí đánh giá an toàn đập đất” của Phạm Ngọc Quý, trong tổng số các đập đất ở Việt Nam bị vỡ, thì vỡ do mực nước lũ vượt thiết kế tràn qua đỉnh đập chiếm tới 59% [7].

Đặc biệt trong thời gian gần đây, do sự biến đổi khí hậu mà Việt Nam là một trong những nước chịu ảnh hưởng nặng nề nhất, đã làm cho thời tiết trở nên rất cực đoan. Mưa to trên diện rộng, mưa cực đoan đã xuất hiện thường xuyên hơn làm tăng nguy cơ nước tràn đỉnh đập. Khi tính toán kiểm tra an toàn về tháo lũ của các hồ chứa thủy lợi, rất nhiều hồ chứa đã không đảm bảo khả năng tháo.

Phần trình bày bên trên đặt ra một yêu cầu là phải có những nghiên cứu chuyên sâu về hiện tượng nước tràn qua đỉnh đập đất gây ra vỡ trong điều kiện các đập ở Việt Nam.

1.1.2 Một số ví dụ điển hình về sự cố vỡ đập do tràn đỉnh

1.1.2.1 Trên thế giới

- Vỡ đập Tous [8]

Tous là một đập đất lớn nằm gần Valencia, Tây Ban Nha. Đập được thiết kế và xây dựng với mục tiêu phòng chống lũ kết hợp tưới tiêu trong nông nghiệp. Năm 1958, đập được thiết kế là một đập bê tông trọng lực cao 80m, nhưng trong quá trình khảo sát nền móng không cho phép nên dự án đã tạm dừng vào năm 1964. Dự án được khởi động lại năm 1974 với thiết kế thay đổi là một đập đất đầm nén có tường lõi đất sét chống thấm cao 70m, chiều dài đập 400m, tràn xả lũ có cửa van với lưu lượng xả lên tới $7.000\text{m}^3/\text{s}$, cửa xả đáy với lưu lượng $250\text{m}^3/\text{s}$. Ngày 19, 20 tháng 10 năm 1982, mưa lớn diễn ra trên toàn lưu vực Júcar gần đập Tous. Lượng mưa lớn nhất được báo cáo tại khu vực Cofrentes, khoảng 25 km về phía tây bắc của đập Tous. Tổng lượng mưa tại Cofrentes lên tới 550mm và đạt 285mm chỉ trong 3 giờ. Dòng chảy lũ ước tính lên tới $5.000\text{m}^3/\text{s}$, cửa van trên tràn xả lũ được mở ra. Không may là hệ thống điện

không hoạt động do điều kiện thời tiết, hai máy phát điện dự phòng cũng không thể khởi động, những nỗ lực để nâng cửa van bằng tay không có kết quả. Nước bắt đầu tràn qua đỉnh đập lúc 17 giờ và cao hơn đỉnh đập 1,1m lúc 19 giờ 15 phút. Đập đã bị xói và vỡ một phần bên vai; hậu quả là 8 người chết, 100.000 người phải sơ tán, thiệt hại về kinh tế ước tính lên tới 400 triệu đô la. Đập Tous đã được xây dựng lại tại vị trí của đập cũ, sử dụng lại một phần tường lõi đất sét vì đây là bộ phận thể hiện khả năng kháng xói cao trong nước nên được tái sử dụng trong kết cấu của đập mới.



Hình 1. 1. Đập Tous sau khi vỡ

- Vỡ đập Belci [8]

Belci là một đập đất có thiết bị chống thấm là tường lõi đất sét xây dựng năm 1962 trên sông Tazlaur, Slobozia ở Romania. Đập cao 18,5m, chiều dài đỉnh đập là 432m, dung tích 12,7 triệu m³. Ngày 28 tháng 7 năm 1991, mưa lớn đã xảy ra trên lưu vực hồ, do hỏng đường dây điện thoại liên lạc và mất điện nên không thể thông tin dự báo lũ từ trạm đo đạc ở phía thượng lưu đập cho đội quản lý cũng như không thể mở cửa van xả đáy lên quá 40cm. Vào lúc 2 giờ 15 phút ngày 29 tháng 7, nước bắt đầu tràn qua đỉnh đập với lưu lượng đỉnh lũ lên tới 1200 m³/s, thấp hơn lưu lượng lũ thiết kế của hồ là 1515 m³/s, đập bị vỡ với vết vỡ dài 112m, sâu tới 15m. Đến 7 giờ 15 phút thì toàn bộ nước trong hồ đã chảy về hạ lưu làm 25 người chết, 119 ngôi nhà bị phá hủy.

- Vỡ đập Delhi, bang Iowa, Mỹ [9]



Hình 1. 2. Đập Delhi bị vỡ và dòng nước cuộn cuộn chảy về hạ lưu.



Hình 1. 3. Phần đập đất bị xói hết, chỉ còn lại phần bê tông

Delhi là đập đất nhỏ trên sông Maquoketa, một phụ lưu của sông Missisipi, tại đông bắc bang Iowa, Hoa Kỳ. Đập cao 12m, dài 34m, được xây dựng từ năm 1922 đến năm 1929, tạo hồ chứa có bề mặt trải rộng trên diện tích 218ha. Trạm thủy điện có công suất 1.5MW vận hành trong những năm 1929 ÷ 1973. Hồ có nhiệm vụ chủ yếu là cấp nước và nghỉ dưỡng. Ngày 24/7/2010, sau trận mưa lớn với lượng mưa 250mm trong 12 giờ liền, nước sông dâng cao, mực nước hồ cao hơn mức lũ thiết kế tới 3m và tràn qua đường giao thông tại đỉnh đập. Đập bị vỡ, dòng lũ và nước trong hồ xói trôi toàn

bộ đập đất. Tuy là đập nhỏ nhưng khi bị vỡ đã gây thiệt hại đáng kể cho khu vực hạ du, nhất là hai thành phố Hopkinton và Monticello. Khoảng 8000 người phải chạy lụt; 50 ngôi nhà và 20 cơ sở kinh doanh bị ngập nặng; các nhà máy xử lý nước không hoạt động và thiệt hại đến hàng triệu đô la. Hiện các chuyên gia và các nhà quản lý đang tranh luận phương án phục hồi đập, nên phục hồi nguyên dạng hay nâng cấp qui mô công trình.

- Vỡ đập Bản Kiều, Trung Quốc [10]

Đập Bản Kiều là loại đập đất, có chiều cao 25m, dung tích thiết kế của hồ chứa là 492 triệu m³, đập tràn có khả năng tháo lớn nhất với lưu lượng 1.720m³/s. Tháng 8 năm 1975, mưa đặc biệt lớn ở thượng nguồn sông Hoài dẫn đến một trận đại hồng thủy. Hai trong tổng số 10 hồ chứa nước lớn (hồ chứa nước Bản Kiều và hồ chứa nước Thạch Mạn Than) cùng với 58 hồ chứa nước vừa và nhỏ khác vùng Zhumadian (Trú Mã Điểm) thuộc tỉnh Henan (Hà Nam) - Trung Quốc bị vỡ đập do nước tràn đỉnh, 11 triệu mẫu đất nông nghiệp bị phá hoại, 11 triệu người bị ảnh hưởng, hơn 26 nghìn người chết, 5.96 triệu ngôi nhà bị phá hủy, cuốn trôi 3.743 triệu con gia súc gia cầm, 102 km tuyến đường Bắc Kinh – Quảng Châu dọc tuyến Nam Bắc Trung Quốc bị phá hoại, ách tắc giao thông 18 ngày, thiệt hại kinh tế gần 10 tỉ nhân dân tệ, trở thành một trong những thảm họa vỡ đập lớn nhất trên thế giới. Sự kiện này được thế giới gọi chung là “Sự kiện vỡ đập hồ chứa nước Bản Kiều”.



Hình 1. 4. Đập Bản Kiều ngày nay và tràn xả lũ đã được khôi phục lại

Nguyên nhân vỡ đập do mưa lớn liên tục trong nhiều ngày, hồ không có dung tích dự phòng, mực nước tăng lên rất nhanh vượt qua cả mực nước cảnh giới, nước tràn đỉnh đập dẫn đến vỡ đập

1.1.2.2 Ở Việt Nam

- Vỡ đập Đồng Đáng và Khe Luồn tại Tỉnh Gia, Thanh Hóa

Trong đợt mưa bão tháng 10 năm 2013, do mưa lớn trên toàn bộ lưu vực làm lượng nước từ thượng nguồn đổ về rất lớn. Hai hồ đập lớn nhất huyện Tĩnh Gia là Đồng Đáng (xã Trường Lâm) và Khe Luồn (xã Tân Trường) có sức chứa hơn 600.000 m³ nước có mực nước vượt quá mực nước lũ thiết kế và tràn qua đỉnh đập dẫn đến vỡ đập. Hậu quả là 300 hộ dân phải sơ tán, thiệt hại về kinh tế lên đến hàng tỷ đồng.



Hình 1. 5. Vỡ đập Đồng Đáng – Thanh Hóa, ngày 1/10/2013 (nguồn Internet)

- Vỡ đập Phân Lân, Vĩnh Phúc

Hồ chứa nước Phân Lân có dung tích hiệu dụng theo thiết kế là 200.000 m³. Hồ có nhiệm vụ trữ nước để phục vụ sản xuất nông nghiệp, tạo cảnh quan du lịch và điều hòa môi trường sinh thái. Đập tạo hồ chứa là đập đất còn có nhiệm vụ phục vụ việc đi lại cho người dân địa phương.

Lúc 19 giờ ngày 3/8/2013, trên lưu vực hồ chứa nước Phân Lân có mưa lớn; nước ở các khe suối dồn về nhanh, trong khi đó công tác xả lũ không kịp thời khiến mực nước hồ dâng cao tràn qua đỉnh đập, gây vỡ một đoạn đập có chiều dài khoảng 20m. Hậu

quả đã gây nhiều thiệt hại cho sản xuất nông nghiệp và đời sống người dân, thiệt hại ban đầu ước tính khoảng 500 triệu đồng.



Hình 1. 6. Vỡ đập Phân Lĩnh – Vĩnh Phúc, ngày 3/8/2013 (nguồn Internet)

- Vỡ đập Đầm Hà Động, Quảng Ninh.

Trong trận mưa lũ ngày 29, 30 tháng 10 năm 2014, đập đất Đầm Hà Động đã bị nước dâng cao tràn đỉnh đập gây sự cố nghiêm trọng. Tại phần thân đập chính, nước lũ tràn qua đỉnh đập từ 1 ÷ 1,5m nên toàn bộ thân đập bị bào mòn, sạt vỡ nhiều điểm và phía 2 vai đập, cắt đứt một đoạn đường dẫn lên đập chính khoảng 20m. Dòng chảy tràn đã cuốn trôi khoảng 300m³ đất đá thân đập, có nhiều chỗ khoét sâu tới 4 ÷ 5m. Ở phần đập phụ, lũ làm vỡ một đoạn đập dài tới 50m. Mưa lũ lớn là nguyên nhân chính gây vỡ đập, tuy nhiên còn có nguyên nhân nữa do quy trình vận hành, xả lũ chậm.



Hình 1. 7. Vỡ đập phụ số 2, Đầm Hà Động – Quảng Ninh, ngày 30/10/2014 (nguồn Internet)



Hình 1. 8. Xói mái hạ lưu đập chính, Đầm Hà Động – Quảng Ninh, ngày 30/10/2014
(nguồn Internet)

1.2 Tổng quan về cơ chế xói và vỡ đập

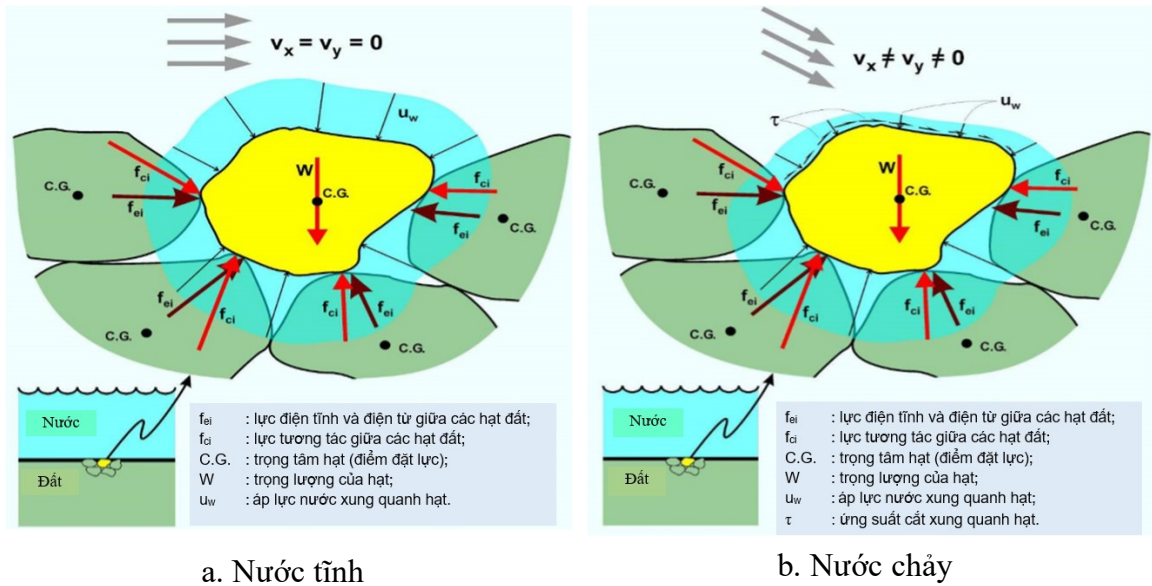
1.2.1 Cơ chế xói

Trong trường hợp đập đất bị nước tràn qua đỉnh, dòng chảy lưu tốc lớn trên bề mặt mái hạ lưu đập sẽ gây ra xói. Xói bắt đầu xảy ra khi ứng suất cắt sinh ra do dòng chảy vượt quá ứng suất cắt tới hạn của vật liệu. Ứng suất cắt tăng do vận tốc dòng chảy tăng và phụ thuộc vào mực nước thượng hạ lưu. Một thông số quan trọng khác ảnh hưởng đến cơ chế xói chính là tính chất của đất, đất dính hoặc đất có đường kính hạt lớn có khả năng kháng xói lớn hơn đất ít dính và đất hạt mịn. Cuối cùng, thời gian nước tràn qua đỉnh đập cũng là nhân tố ảnh hưởng lớn đến khối lượng đất bị xói đi.

Theo J.L.Briaud và các cộng sự 2007 [11], đối với đất dính lực tác dụng lên một hạt đất bao gồm trọng lượng của hạt, lực điện từ và lực điện tĩnh, lực tương tác giữa các hạt đất, và áp lực nước xung quanh hạt, trong trường hợp nước chảy với vận tốc nào đó sẽ có thêm ứng suất cắt xung quanh hạt đất (Hình 1. 9).

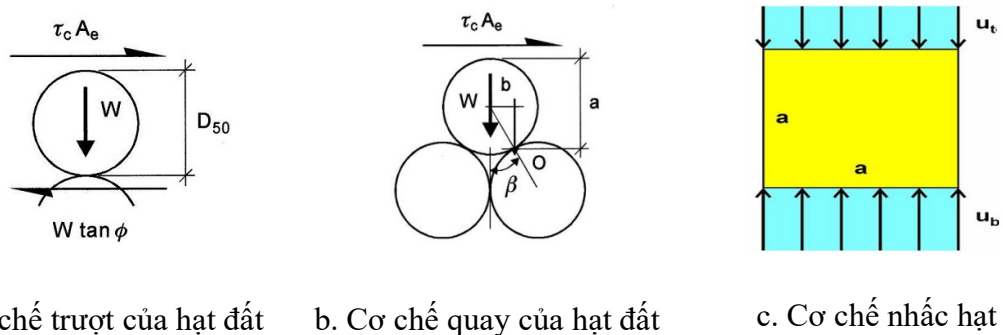
Lực điện tĩnh là lực đẩy bởi các hạt sét mang điện tích âm, lực điện từ tương đối yếu thu hút các phân tử với nhau, mặc dù trung hòa về điện, các phân tử tạo thành lưỡng cực thu hút nhau như nam châm. Các lực điện từ là lực giữ các phân tử H₂O với nhau trong nước. Chính vì vậy cơ chế xói của đất dính có thể là sự bào mòn dần của các lớp

hạt, cũng có thể là sự hình thành vết cắt và dòng chảy đưa đi cả một khối đất, giới hạn của các khối đất này được hình thành tự nhiên trong môi trường đất từ các vết nứt nhỏ do hiện tượng kéo và nén.



Hình 1. 9. Lực và áp lực tác động lên hạt [11]

Theo J.L.Briaud và các cộng sự 2007 [11], đối với đất ít dính và đất rời, các hạt đất bị xói đi do bị dịch chuyển, được giải thích bởi ba cơ chế xói chủ yếu là trượt, quay và nhấc lên.



Hình 1. 10. Cơ chế xói của đất hạt rời [11]

Cơ chế trượt đơn giản giả thiết rằng các hạt đất hình cầu, lực tác dụng bởi nước lên hạt đất là lực cắt song song với mặt chịu xói, và các hạt đất xung quanh không tác dụng lực lên hạt đất đang xét bởi vì chúng di chuyển cùng tốc độ. Bỏ qua lực điện từ và điện tĩnh giữa các hạt bởi vì đây là đất hạt rời. Khi tăng vận tốc, ứng suất sinh ra do dòng chảy τ_c trở nên đủ lớn, lực sinh ra do ứng suất vượt qua lực ma sát giữa hai hạt đất $\tau_c A_e$

> $W \tan \phi$ (với τ_c là ứng suất cắt do dòng chảy sinh ra trên bề mặt tiếp xúc với hạt đất, A_c là diện tích mặt tiếp xúc, W là trọng lượng của hạt đất, ϕ là góc ma sát trong của đất), khi đó đất bị trượt (Hình 1. 10a).

Cơ chế quay đơn giản giả thiết rằng các hạt đất hình cầu, lực tác động của nước lên các hạt đất theo phương song song với mặt chịu xói, bỏ qua tác động của các hạt đất bên cạnh và sự quay diễn ra xung quanh điểm tương tác với hạt đất bên dưới. Bỏ qua lực điện tĩnh và điện từ giữa các hạt. Tại thời điểm chuyển động ban đầu, cân bằng moment quanh điểm O: $\tau_c A_c a = Wb$ (với a là cánh tay đòn của lực đến điểm O, và b là cánh tay đòn của W đến điểm O); khi $\tau_c A_c a > Wb$ hạt đất bắt đầu bị xói (Hình 1. 10b).

Cơ chế nhấc hạt đơn giản là giả thiết hạt đất hình khối, áp suất nước trên đỉnh của khối là u_t và áp suất dưới đáy là u_b . Chênh lệch áp suất $u_b - u_t$ là tổng của chênh lệch áp suất thủy tĩnh $(u_b - u_t)_0$ và chênh lệch áp suất tạo ra bởi dòng chảy Δu : $u_b - u_t = (u_b - u_t)_0 + \Delta u$; khi $u_b - u_t > 0$, hạt đất bắt đầu bị xói (Hình 1. 10c).

Chính vì vậy cơ chế xói của đất ít dính và đất rời chỉ có thể là sự bào mòn dần của các lớp hạt theo một tốc độ nào đó phụ thuộc vào tính chất của đất.

1.2.2 Cơ chế vỡ đập đất

Vỡ đập đất do nước tràn đỉnh là một quá trình phức tạp có mối liên hệ tổng hợp của nhiều yếu tố. Đập đất bắt đầu bị vỡ khi một phần thân đập bị nước mang đi và toàn bộ cao trình đỉnh đập bị hạ thấp so với ban đầu. Vết vỡ có thể hình thành đột ngột hay từ từ qui định bởi các cơ chế xói bề mặt hoặc xói hố. Xói bề mặt xuất hiện ở giai đoạn đầu khi mà lưu tốc dòng chảy đủ lớn vượt qua lưu tốc tới hạn của đất. Khi xói bề mặt phát triển hoàn toàn sẽ chuyển sang giai đoạn xói hố. Đối với đập đất dính, giai đoạn đầu của quá trình vỡ đập là hiện tượng xói bề mặt, sau đó hố xói hình thành ở chân đập và phát triển dần lên mái hạ lưu và đỉnh đập. Trong một số trường hợp, một chuỗi các vết xói nhỏ được hình thành theo dạng bậc thang trên bề mặt mái hạ lưu, nguyên nhân liên quan đến cơ chế hình thành hố xói ban đầu và sự phát triển của hố xói qui định bởi năng lượng dòng chảy và tính chất khối đất.

Theo Ralston (1987) [12], Fread (1988) [13] và Zhu (2006) [14], xói thành các hố xói đóng vai trò rất quan trọng trong quá trình vỡ của đập đất dính. Tuy nhiên cơ chế tạo

hố xói vẫn chưa được hiểu một cách đầy đủ để đánh giá quá trình vỡ đập. Các công cụ nghiên cứu về cơ chế vỡ đập thường được thực hiện bằng thực nghiệm kết hợp với các mô hình toán.

Các nghiên cứu trên cho thấy rằng tính dính của đất là một nhân tố có ảnh hưởng quan trọng đến cơ chế xói của đất và cơ chế vỡ đập đất khi nước tràn đỉnh.

1.3 Tình hình nghiên cứu cơ chế vỡ đập

1.3.1 Nghiên cứu trên thế giới

Hiện nay, trên thế giới chủ yếu sử dụng phương pháp thực nghiệm để nghiên cứu về cơ chế xói và vỡ đập. Đối với việc nghiên cứu xói trong điều kiện nước tràn đỉnh đập, phương pháp mô hình vật lý được áp dụng bằng việc nghiên cứu hiện tượng xói trên các mô hình thu nhỏ của đập. Từ việc quan sát, đo đạc, thu thập, phân tích số liệu để đưa ra các đánh giá về xói của đất, về sự hình thành và phát triển của lỗ vỡ, về ảnh hưởng của vận tốc dòng chảy đến quá trình vỡ, v.v... Một số nghiên cứu tiêu biểu có sử dụng mô hình vật lý được trình bày như phân tiếp theo:

P. K. Bhattarai và các cộng sự (2014) [15] đã thực hiện 12 thí nghiệm cho 4 loại đất đắp đập có cấp phối khác nhau, mỗi loại đất được làm lặp lại 3 lần. Thí nghiệm này khảo sát sự ảnh hưởng của kích thước hạt đến tốc độ xói của đất (tốc độ mở rộng của vết vỡ) dưới tác động của dòng chảy ổn định (lưu lượng không thay đổi theo thời gian). Kết quả của nghiên cứu cho thấy, trong phạm vi các loại đất nghiên cứu, quá trình xói của đất có đường kính trung bình d_{50} lớn hơn diễn ra nhanh hơn. Ở giai đoạn đầu, hiện tượng xói xảy ra mạnh mẽ hơn ở phần đỉnh và chân của mô hình (đập), cuối cùng phần giữa của mô hình bị sụt xuống gây ra phá hoại hoàn toàn đập. Khi vỡ đập, lưu lượng xả rất nhanh đạt đến lưu lượng xả lớn nhất, sau đó từ từ giảm xuống đến giá trị bằng với lưu lượng đến. Nghiên cứu này cũng đã đề xuất đường phá hoại cho việc xác định trước đỉnh lũ trong trường hợp xảy ra vỡ đập do tràn đỉnh, đây là công cụ quan trọng cho việc giảm nhẹ thiệt hại ở phía hạ lưu đập.

Coleman và các cộng sự (2002) [16] đã thí nghiệm trên mô hình thu nhỏ của đập đất đồng chất với vật liệu có lực dính đơn vị nhỏ. Đập được gây vỡ bằng cách cho nước tràn qua đỉnh đập trong điều kiện mực nước phía thượng lưu đập được giữ cố định. Kết

qua quan sát chỉ ra rằng đầu tiên quá trình xói diễn ra ở mặt đập hạ lưu với một mặt xói song song với mặt hạ lưu đập, mặt xói này sau đó được phát triển theo phương ngang bằng việc xoay quanh một điểm cố định dọc theo chân đập, vị trí của điểm xoay cố định phụ thuộc vào cỡ hạt của vật liệu đập đập. Bên cạnh đó, tác giả cũng đã đề xuất rằng vết vỡ của đập có hình dạng của parabol và đồng thời đề xuất công thức để dự đoán sự phát triển của lỗ vỡ.

G. Pickert và các cộng sự (2011) [17] đã tiến hành thí nghiệm vỡ do tràn nước của đập đất ít dính. Từ việc phân tích vết vỡ trên dạng mặt cắt ngang, thí nghiệm phân chia quá trình vỡ đập làm hai giai đoạn (cắt và kéo), kết quả thí nghiệm cũng cho thấy sự ảnh hưởng của tính chất đất đến việc mở rộng vết vỡ theo phương ngang và áp lực nước lỗ rỗng trong đất gây nên lực dính có ảnh hưởng đến sự ổn định của mái dốc vết vỡ và quá trình vỡ cuối cùng.

Visser (1998) [18] đã trình bày mô hình toán để mô phỏng sự phát triển của lỗ vỡ khi nước tràn qua đỉnh đập và vận tốc dòng chảy qua lỗ vỡ. Mô hình này được xây dựng dựa trên các dữ liệu thu thập được từ việc quan trắc các thí nghiệm trong phòng và thí nghiệm hiện trường. Theo mô hình này, quá trình vỡ đập được phân làm 5 giai đoạn, và được hiệu chỉnh, kiểm định với các dữ liệu từ thí nghiệm của Caan (1997). Visser đã chỉ ra rằng việc áp dụng công thức của Bagnold-Visser (1998) hay Wilson (1987) đều đưa ra kết quả tính toán của quá trình vỡ đập ở giai đoạn 1, 2, 3 phù hợp với dữ liệu thí nghiệm. Trong khi đó đối với giai đoạn 4, 5 công thức của Van Rijin (1984 a, b) hoặc Engelund-Hansen nên được áp dụng.

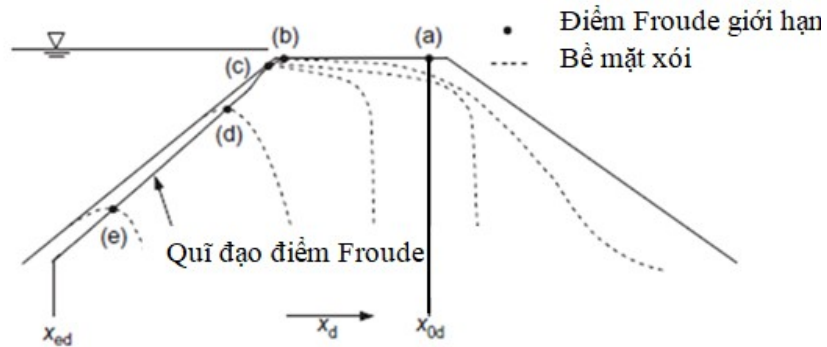
Hanson và các cộng sự (2005) [19] thực hiện thí nghiệm nước tràn đỉnh đập có kích thước lớn, đập được đắp bằng đất cát mịn và sét (đất dính). Tác giả chia quá trình vỡ đập thành bốn giai đoạn: giai đoạn 1 là quá trình xói của mái hạ lưu và tạo thành các hố xói cục bộ, giai đoạn 2 là sự mở rộng của các hố xói này, giai đoạn 3 là sự hạ thấp của đỉnh đập và vỡ đập, giai đoạn 4 là sự mở rộng vết vỡ theo phương ngang. Các tác giả đề nghị rằng việc tạo thành các hố xói mở rộng dần trên mái hạ lưu là đặc trưng riêng cho quá trình xói và vỡ của đập đắp bằng đất dính.

Fujisawa Azunori và các cộng sự (2007) [20] đã tiến hành thí nghiệm trên mô hình vật lý nghiên cứu cơ chế vỡ đập và tác dụng của thiết bị bảo vệ mái hạ lưu. Kết quả đã giải thích cơ chế vỡ đập là do sự xuất hiện, mở rộng và di chuyển dần về phía thượng lưu của vết xói trên bề mặt mái hạ lưu, vết xói mở rộng dần thành hố xói do bào mòn và mất ổn định mái dốc hố xói. Hình dạng vết xói phụ thuộc vào vận tốc dòng chảy theo phương đứng. Thiết bị bảo vệ đỉnh đập có tác dụng làm chậm quá trình xói theo phương đứng, thiết bị bảo vệ phần trên mái hạ lưu có khả năng làm chậm sự phát triển của lỗ vỡ, thiết bị bảo vệ phần dưới của mái hạ lưu làm giảm khả năng xói đất và làm chậm quá trình đạt đến đáy hố xói.

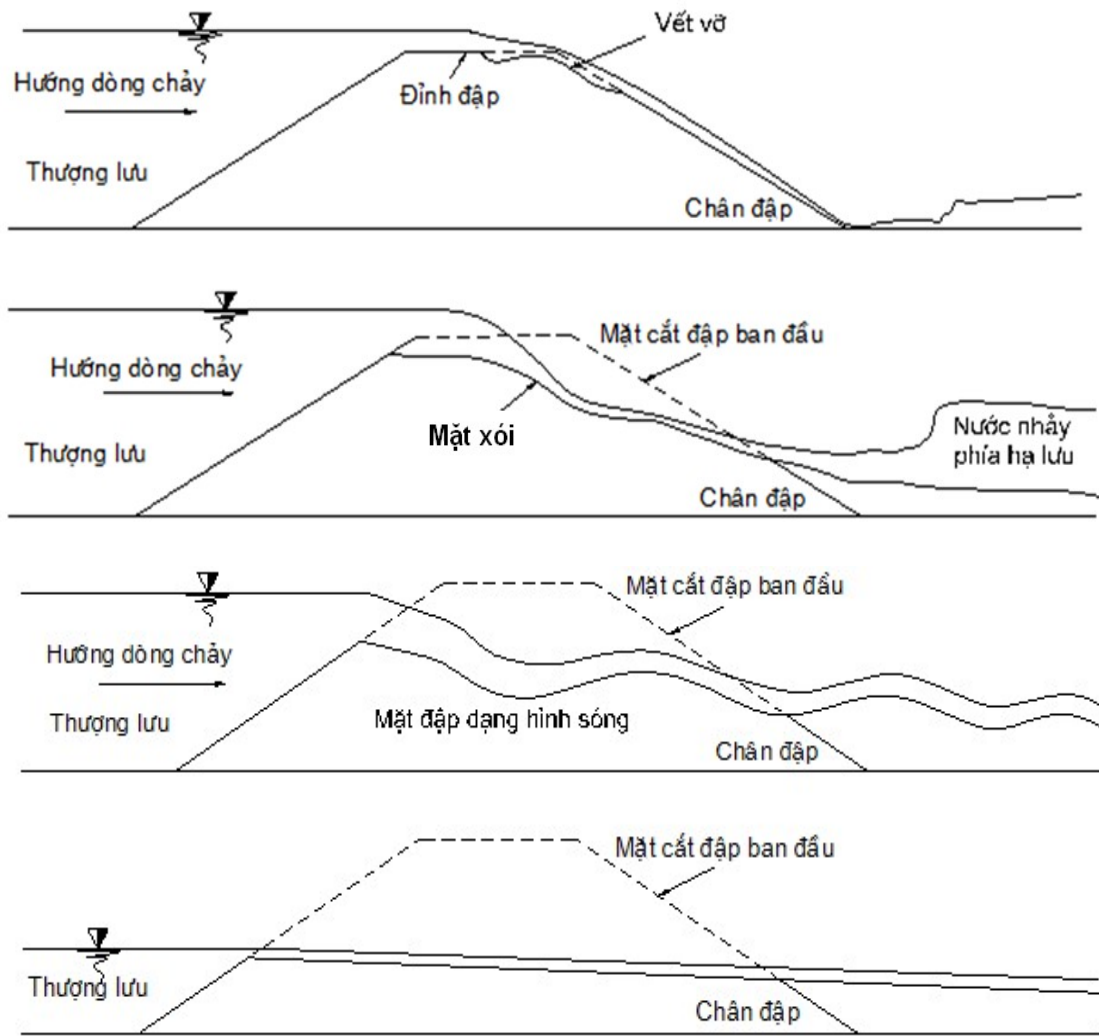
Hunt và các cộng sự (2005) [21] đã thực hiện thí nghiệm trên một số mô hình vật lý tỷ lệ lớn tại NSTL để tìm hiểu cơ chế vỡ đập và các yếu tố ảnh hưởng đến vết vỡ. Kết quả nghiên cứu đã miêu tả cơ chế xói và vỡ đập đập bằng đất dính khi nước tràn đỉnh thành bốn giai đoạn, trong khi các kết quả nghiên cứu trước đã không đề cập đến giai đoạn 4 là giai đoạn mở rộng vết vỡ. Trong nghiên cứu của mình Hunt chỉ ra rằng giai đoạn 4 là do sự phát triển xói ở thành bên và tạo thành các hang xói làm mất ổn định cả khối đất và mở rộng vết vỡ. Kết quả thí nghiệm cũng khẳng định tính chất của đất là nhân tố ảnh hưởng lớn nhất đến cơ chế xói và vỡ đập. Việc sử dụng hàm ứng suất cắt sinh ra do dòng chảy là cách tiếp cận hợp lý nhất cho việc giải thích sự mở rộng vết vỡ của đập đập bằng đất dính giai đoạn 4. Các nghiên cứu là nền tảng cho các chương trình tính toán mô phỏng vỡ đập đất dính do nước tràn đỉnh sau này.

Fujisawa và các cộng sự (2009) [22] đã đề xuất phương pháp đánh giá xói cho đập đất ít dính bị tràn đỉnh dựa trên sự dịch chuyển của điểm Froude giới hạn - điểm giới hạn để dòng chảy chuyển từ trạng thái chảy êm sang chảy xiết trong quá trình vỡ đập. Sự dịch chuyển của điểm Froude giới hạn đã được chứng minh là quan trọng trong việc mô tả các giai đoạn phá hủy đập gây ra bởi hiện tượng xói. Giai đoạn 1 được biểu thị bởi sự dịch chuyển ngang của điểm Froude giới hạn dọc theo đỉnh đập, giai đoạn 2 là hiện tượng điểm Froude giới hạn tạm dừng tại mái thượng lưu, và giai đoạn 3 là giai đoạn điểm Froude di chuyển dọc theo mái thượng lưu (Hình 1. 11). Thời gian vỡ đập có thể được ước lượng bởi việc xem xét, đánh giá quỹ đạo và tốc độ di chuyển của điểm Froude giới hạn. Tuy nhiên, với các đập đập bằng đất dính, lúc này điểm Froude

giới hạn sẽ không di chuyển, vì vậy nên sử dụng phương pháp khác để dự đoán vỡ đập.



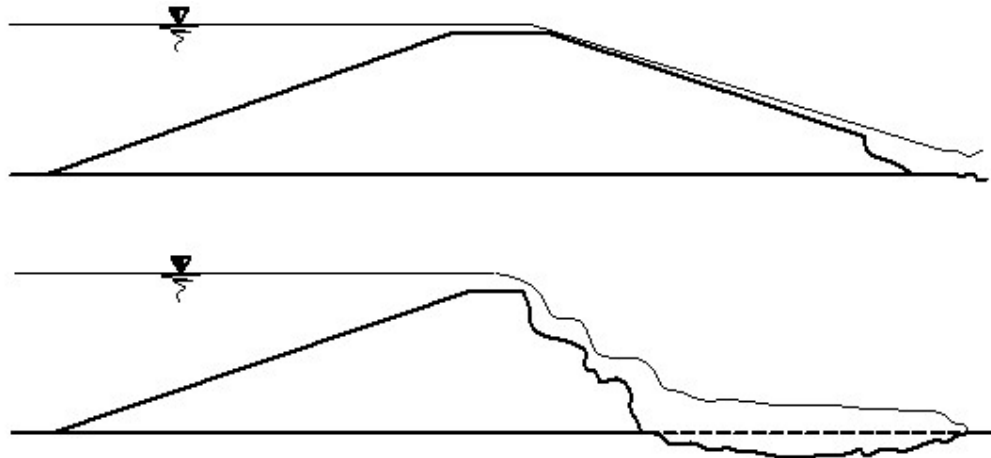
Hình 1. 11. Sự di chuyển của điểm Froude giới hạn



Hình 1. 12. Kết quả thí nghiệm xói đập đất ít đỉnh của C. Chinnarasri và các cộng sự, năm 2003 [23]

Chaiyuth Chinnarasri và các cộng sự (2003) [23] đã nghiên cứu thực nghiệm tập trung vào quan sát vị trí vết vỡ xuất hiện phía hạ lưu. Từ các kết quả thí nghiệm nghiên cứu vết đập do nước tràn đỉnh của hai đập đất cao 0,8m, đập được đắp bằng hai loại đất cát ít dính có $d_{50} = 0,36\text{mm}$ và $d_{50} = 0,86\text{mm}$ đã kết luận rằng vết vỡ phát triển từ đỉnh đập. Hình 1. 12 thể hiện kết quả thí nghiệm của Chaiyuth Chinnarasri.

Powledge và đồng nghiệp (1989b) [24] đã đưa ra mô tả về cơ chế xói của đập đắp bằng đất dính. Sự hình thành vết vỡ bắt đầu bằng các hố xói, một hố xói nhỏ xuất hiện ở chân đập phía hạ lưu sau đó phát triển dần về phía thượng lưu và đỉnh đập cho đến khi tạo thành vết vỡ. Hình 1. 13 thể hiện cơ chế xói và vỡ của đập đất dính, theo đó vết vỡ phát triển từ dưới chân đập.



Hình 1. 13 Kết quả thí nghiệm xói đập đất dính của Powledge và đồng nghiệp, năm 1989 [24]

Y.H. Chen và các cộng sự (1987) [25] đã tiến hành thí nghiệm trên mô hình vật lý xác định sự ảnh hưởng của thiết bị bảo vệ mái hạ lưu (bao gồm đất, thảm cỏ, đá đổ trong các khung thép, cỏ trồng trong hệ thống lưới thép, thảm rọ đá, xi măng đất) đến khả năng vỡ của đập khi nước tràn đỉnh. Kết quả nghiên cứu đã khẳng định rằng vận tốc tới hạn cũng như ứng suất tới hạn của đất (giá trị vận tốc và ứng suất do dòng chảy sinh ra làm cho đất bắt đầu bị xói) thay đổi theo biện pháp và tình trạng lớp bảo vệ (xem Bảng 1. 1).

Bảng 1. 1. Giá trị vận tốc tới hạn và ứng suất cắt tới hạn của đất tương ứng với các biện pháp bảo vệ mái hạ lưu [25]

TT	Biện pháp bảo vệ mái	Tình trạng lớp bảo vệ	Theo hệ đơn vị Mỹ		Theo hệ đơn vị quốc tế SI	
			Vận tốc tới hạn (ft/s)	Ứng suất cắt tới hạn (lb/ft ²)	Vận tốc tới hạn (m/s)	Ứng suất cắt tới hạn (N/m ²)
1	Đá đổ trong các khung thép		6,0	0,7	1,8	34,2
2	Cỏ trồng trong hệ thống lưới thép		10,0	2,0	3	97,6
3	Xi măng đất		> 20	-	> 6,1	-
4	Thảm rọ đá		15,0	4,0	4,6	195,3
5	Trồng cỏ	A		3,7		180,6
		B		2,1		102,5
		C		1,0		48,8
		D		0,6		29,3
		E		0,35		17,1

Ghi chú: A, B, C, D, E thể hiện loại cỏ và chất lượng cỏ trên mái hạ lưu, được mô tả chi tiết trong [25].

Từ các kết quả thực nghiệm và lý thuyết thủy lực, các tác giả đã xây dựng mô hình tính toán xói và mô phỏng cơ chế vỡ đập EMBANK.

Về ảnh hưởng của mái cỏ đến công thức tính tốc độ xói, Chen và các cộng sự đã đưa ra kết luận rằng đối với đất mái đập có trồng cỏ, các hệ số K_d và α của công thức tính tốc độ xói nên lấy giống với loại đất bên dưới (phần không có cỏ), chỉ có giá trị ứng suất cắt tới hạn τ_c thay đổi.

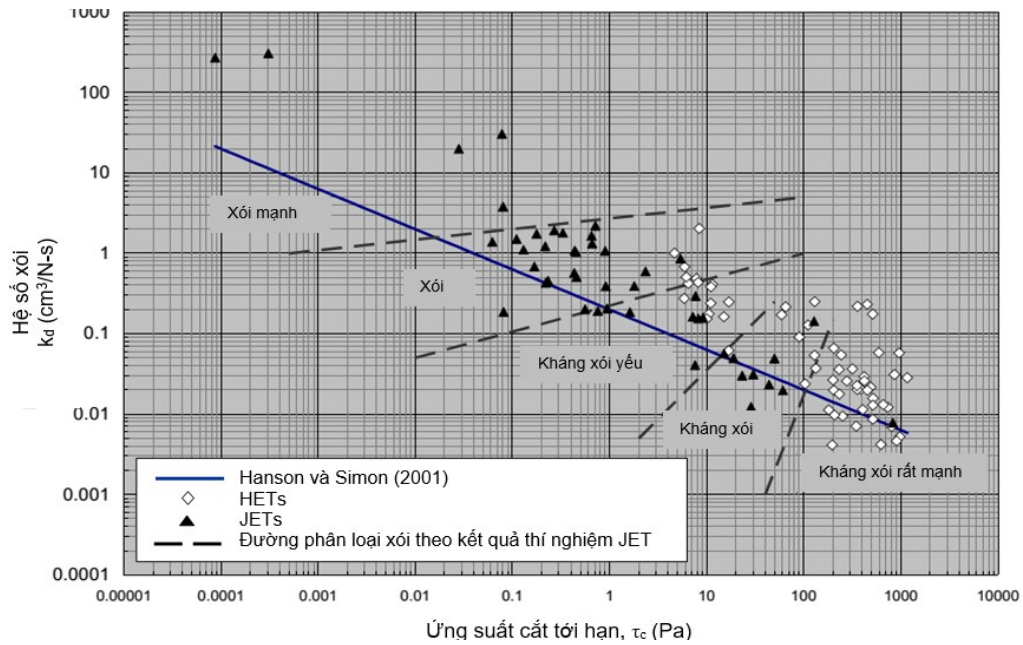
Theo H. M. Rasel và các cộng sự, 2013 [26], ứng suất cắt tới hạn τ_c của đất tăng phụ thuộc vào chất lượng cỏ trồng trên mái. Với mái cỏ chất lượng trung bình lấy τ_c tăng 40% so với τ_c của đất đắp đập.

Cơ chế vỡ đập do nước tràn đỉnh rất phức tạp, bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, tuy nhiên có thể tóm lại và mô tả thông qua sự tương tác qua lại của ba yếu tố đất, nước và công trình. Vì vậy, cơ chế vỡ sẽ thay đổi theo tải trọng nước, tính chất đất và tình trạng công trình. Theo hầu hết các tác giả, vỡ đập do nước tràn đỉnh được phân chia thành nhiều giai đoạn, trong đó giai đoạn đầu tiên là quá trình xói của mái hạ lưu và tạo thành các hố xói, sau đó các hố xói này phát triển dần từ chân hạ lưu lên phía đỉnh đập và tiến về thượng lưu đỉnh đập cho đến khi vết xói ăn vào mép thượng lưu đỉnh đập. Trong luận án giới hạn nghiên cứu cho giai đoạn đầu này của quá trình vỡ đập.

Sử dụng mô hình vật lý để nghiên cứu xói do nước tràn đỉnh là phương pháp cho kết quả với độ tin cậy cao, tuy nhiên phương pháp này yêu cầu phải đắp các mô hình với khối lượng tương đối lớn, do đó việc tiến hành thí nghiệm lặp đi lặp lại cho nhiều loại đất khác nhau sẽ yêu cầu một lượng nhân công lớn và thời gian nghiên cứu dài do đó sẽ nâng giá thành của thí nghiệm. Sử dụng kết quả thí nghiệm của các mẫu đất để đánh giá xói do nước tràn đỉnh là một lựa chọn tốt có thể khắc phục được hạn chế của thí nghiệm mô hình vật lý.

Về nghiên cứu cơ chế xói của mẫu đất, các phương pháp thí nghiệm khá phổ biến hiện nay như: thiết bị thí nghiệm xói ống (HET) phát minh bởi hai nhà khoa học Wan, C.F và Fell, R năm 2004; thiết bị thí nghiệm xói tia (JET) phát minh bởi Hanson, G.J và Cook, K.R năm 2004 tại Mỹ; tại Nhật Bản, phương pháp thí nghiệm xói mẫu đất trên máng kính được sử dụng bởi tính đơn giản và khả năng thành công với nhiều loại đất. Đây là ba phương pháp thí nghiệm phổ biến dùng cho đánh giá khả năng xói mẫu đất.

Hình 1. 14 thể hiện kết quả của 61 thí nghiệm xói HET và 47 thí nghiệm xói JET thực hiện tại Bureau of Reclamation, năm 2007 [27]. Kết quả thí nghiệm đã phân đất thành năm loại dựa theo tiêu chí kháng xói.

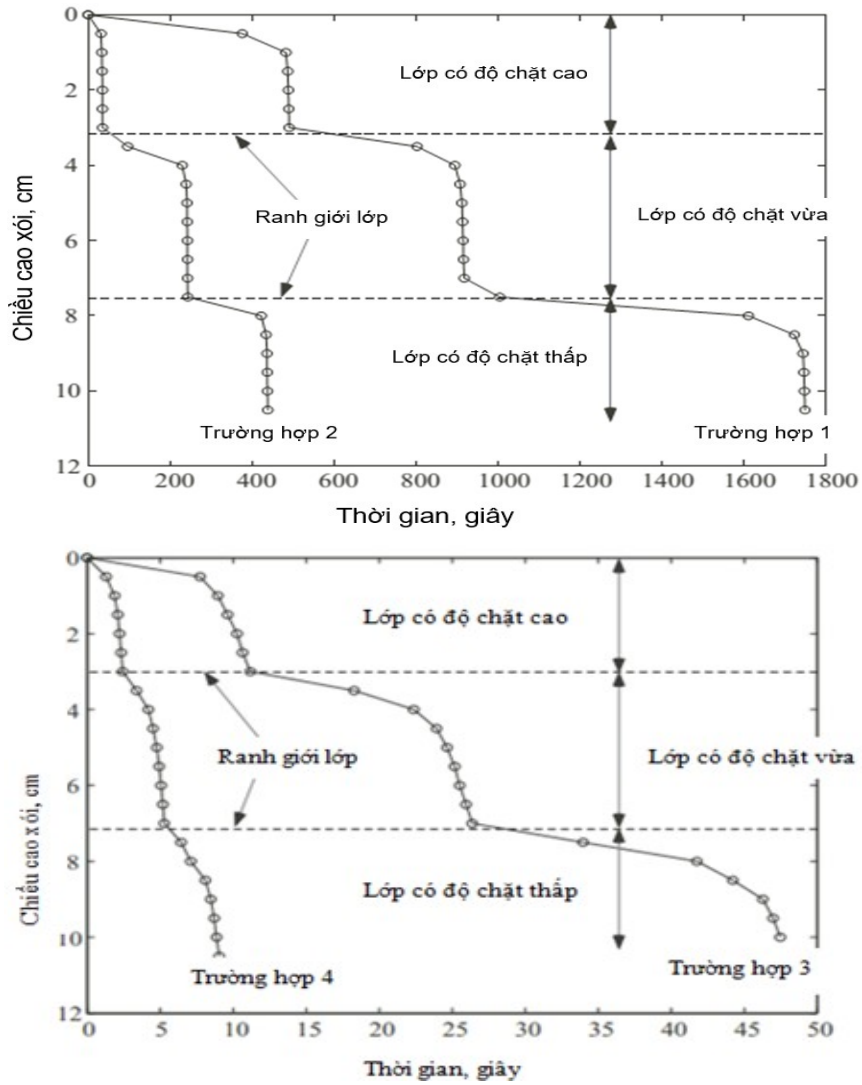


Hình 1. 14. Kết quả thí nghiệm xói theo 2 phương pháp HET và JET thực hiện tại Bureau of Reclamation, năm 2007 [27]

Fujisawa và các cộng sự, 2008 [28] đã sử dụng phương pháp thí nghiệm xói mẫu đất trên máng kính, tiến hành thí nghiệm cho 28 mẫu đất để nghiên cứu sự ảnh hưởng của độ đầm chặt và trọng lượng riêng của đất đến khả năng xói.

Về ảnh hưởng của độ đầm chặt, thí nghiệm tiến hành đo chiều cao mất đi của mẫu đất do xói với một nửa số mẫu đất được đầm nện với năng lượng đầm là 270 kJ/m^3 - trường hợp thí nghiệm 1 và 2, nửa còn lại đầm với năng lượng là 140 kJ/m^3 - trường hợp thí nghiệm 3 và 4. Kết quả thí nghiệm thể hiện trên đồ thị Hình 1. 15.

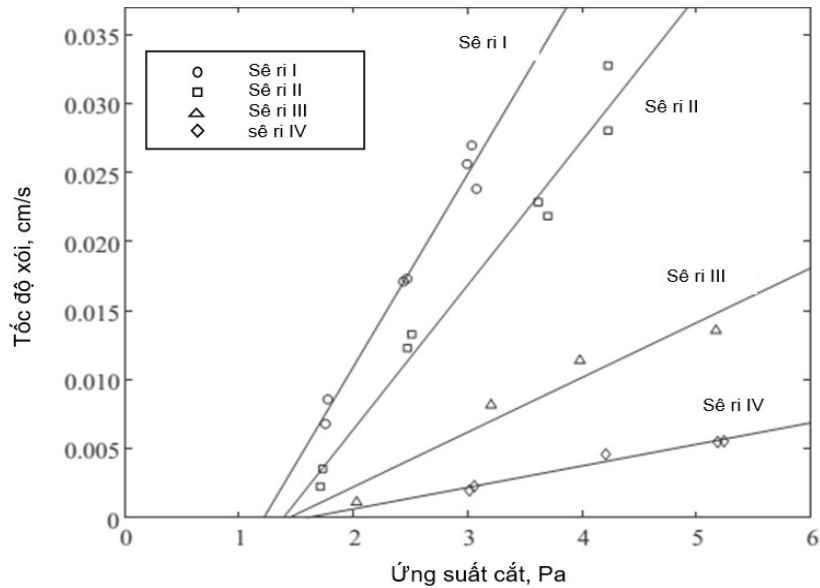
Kết quả thí nghiệm cho thấy phần trên của mỗi lớp đầm có khả năng kháng xói cao hơn phần dưới và những mẫu đất có năng lượng đầm nhỏ (độ chặt kém hơn) – các mẫu thí nghiệm trường hợp 3, 4 bị xói nhanh hơn những mẫu có năng lượng đầm lớn hơn - các mẫu thí nghiệm trường hợp 1, 2.



Hình 1. 15. Chiều cao mất đi của mẫu đất thí nghiệm theo thời gian [28]

Về nghiên cứu ảnh hưởng của trọng lượng riêng đến khả năng xói, thí nghiệm thực hiện đo tốc độ xói của 28 mẫu đất chia làm 4 nhóm mẫu, mỗi nhóm có trọng lượng riêng gần tương tự nhau. Kết quả thí nghiệm vẽ được biểu đồ quan hệ giữa tốc độ xói đất và ứng suất cắt sinh ra do dòng chảy (Hình 1. 16).

Kết quả cho thấy với các mẫu có trọng lượng riêng gần như nhau, quan hệ giữa tốc độ xói và ứng suất cắt là quan hệ tuyến tính. Khi ứng suất cắt không thay đổi, tốc độ xói giảm tuyến tính với sự tăng của trọng lượng riêng. Ứng suất cắt tới hạn của đất gần như không đổi khi trọng lượng riêng thay đổi và có giá trị nhỏ hơn một chút so với tính toán từ đồ thị của Shields.



Hình 1. 16. Quan hệ giữa tốc độ xói đất và ứng suất cắt sinh ra do dòng chảy [28]

Dựa trên những cơ sở khoa học nghiên cứu về vết vỡ, qua những thí nghiệm trên mô hình vật lý và những số liệu quan trắc trong lịch sử, một số mô hình toán đã được ra đời nhằm tính toán và mô phỏng quá trình phát triển của lở vỡ.

Đối với phân tích vỡ đập, kết quả cuối cùng là tình trạng ngập lụt và thiệt hại phía hạ du, vì vậy các mô hình toán thường chủ yếu tập trung vào phân tích điều kiện dòng chảy lũ sau vỡ đập. Từ những năm 1970, các mô hình phân tích vỡ đập và dòng chảy lũ sau vỡ đập phát triển theo ba hướng chính [29].

Thứ nhất là dự đoán trực tiếp dòng chảy trên vết vỡ, sau đó sử dụng các công cụ mô phỏng lũ lụt phía hạ lưu. Vào đầu những năm 90, một số mô hình phổ biến như DAMBRK, FLDWAV, SMPDBK của National Weather Service (trung tâm thời tiết quốc gia Hoa Kỳ); HEC-RAS của Army Corps of Engineers (hiệp hội các kỹ sư quân đội Hoa Kỳ). Các mô hình này được thiết kế với cách tiếp cận và giao diện khác nhau để mô phỏng quá trình vỡ đập, nhưng không có mô hình nào tiếp cận theo hướng mô phỏng cơ chế xói dẫn đến vỡ đập. Để mô tả chi tiết cơ chế vỡ đập yêu cầu sử dụng một công cụ đặc biệt mô phỏng cơ chế xói của đất để cung cấp dữ liệu đầu ra cho sự phát triển vết vỡ theo thời gian [29].

Cách tiếp cận thứ hai là tham số hóa các thông số vỡ đập, sự phát triển vỡ đập theo thời gian được mô tả bằng các thuật ngữ toán học đơn giản, cho phép xác định dòng chảy qua vết vỡ bằng phương pháp kết hợp mô tả quá trình phát triển của vết vỡ với các phương trình thủy lực hoặc các mô hình thủy lực thích hợp. Các thông số vết vỡ cần xác định như kích thước vết vỡ lớn nhất, tốc độ phát triển vết vỡ, hình dạng vết vỡ, công thức toán học thể hiện sự gia tăng vết vỡ theo thời gian, v.v.. Theo cách tiếp cận này, các thông số vết vỡ có thể xác định bằng nhiều cách khác nhau và không thuộc mô hình toán, nhưng việc tính toán dòng chảy vết vỡ diễn ra trong mô hình toán. Các mô hình như MIKE11, HEC-RAS, DAMBRK thường mô phỏng vết vỡ phát triển theo không gian và thời gian bởi quy định của người dùng thông qua dữ liệu dạng file. Có nghĩa là khi thiết lập mô hình, người sử dụng có thể quy định về các thông số của lỗ vỡ như thời gian vỡ, kích thước của lỗ vỡ (dưới dạng mặt cắt ngang phát triển theo thời gian) theo các công thức kinh nghiệm của MacDonald và Langridge Monopolis (1984) hoặc Froehlich (1995b). Thực tế thì trong MIKE11 cũng có module để tính toán quá trình phát triển của lỗ vỡ nhưng yêu cầu về số liệu và sự hỗ trợ cũng như phát triển các công thức toán học chưa cao dẫn đến khó sử dụng và qua một vài thí nghiệm cho thấy nó không đáp ứng được các yêu cầu của thực tế [30].

Cách tiếp cận thứ ba là kết hợp mô tả quá trình xói và dòng chảy qua vết vỡ phát triển theo thời gian gây ra do xói để tính toán dòng chảy lũ. Trước đây, một số mô hình chạy độc lập cung cấp dữ liệu dòng thủy văn cho phân tích vỡ đập. Ngày nay, đã có những mô hình tích hợp các quá trình này trong một mô hình duy nhất. Các mô hình tiêu biểu thuộc dạng này như:

Mô hình BREACH của Fread, 1988 [13] là mô hình phân tích vỡ đập dựa theo cơ chế xói của đất. Quá trình xói đất liên quan đến dòng chảy qua vết vỡ, vì vậy mà rất cần thiết để dự đoán dòng chảy qua vết vỡ. Tuy nhiên, BREACH chưa kể tới ảnh hưởng của mực nước hạ lưu, sự biến đổi của mực nước thượng lưu đến quá trình phát triển vết vỡ. Nếu những ảnh hưởng này là đáng kể, sẽ có sai số lớn trong kết quả tính toán.

WinDAM B là chương trình tính toán mô phỏng vỡ đập được phát triển bởi USDA dựa trên các dữ liệu thực nghiệm tại ARL ở Stillwater, Oklahoma [29]. Chương trình này kết hợp với chương trình tính toán xói đường tràn SITES để mô phỏng cơ chế vỡ

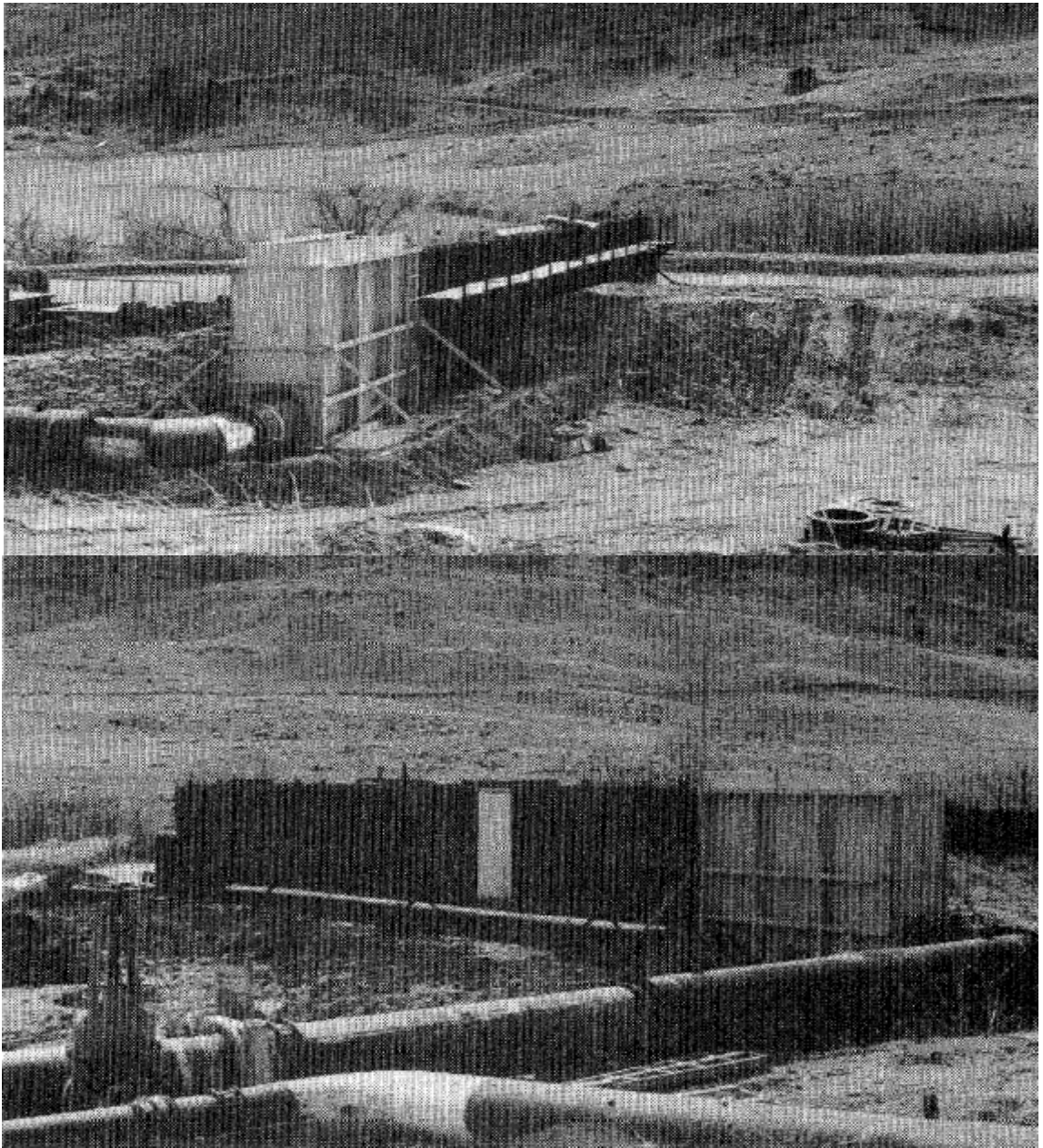
đập VLĐP khi nước tràn đỉnh. WinDAM B mô phỏng cơ chế vỡ đập qua bốn giai đoạn như sau:

1. Sự phát triển của vết xói và phá hoại mái cỏ bảo vệ hạ lưu.
2. Vết xói phát triển lên đỉnh đập
3. Vết vỡ phát triển về phía thượng lưu
4. Sự mở rộng vết vỡ

WinDAM B có khả năng mô phỏng đồng thời quá trình xói của đập và tràn, chỉ ra được cấu trúc nào bị vỡ trước trong trường hợp nước tràn qua đỉnh. Nếu tràn bị vỡ trước, WinDAM B không trả lời được điều gì xảy ra đối với đập, đập có thể sẽ bị vỡ hoặc sẽ an toàn do tràn đã vỡ làm mực nước hồ hạ xuống. Chương trình này thích hợp để nghiên cứu sự phá vỡ của đập có tràn sự cố kiểu đập đất tự vỡ.

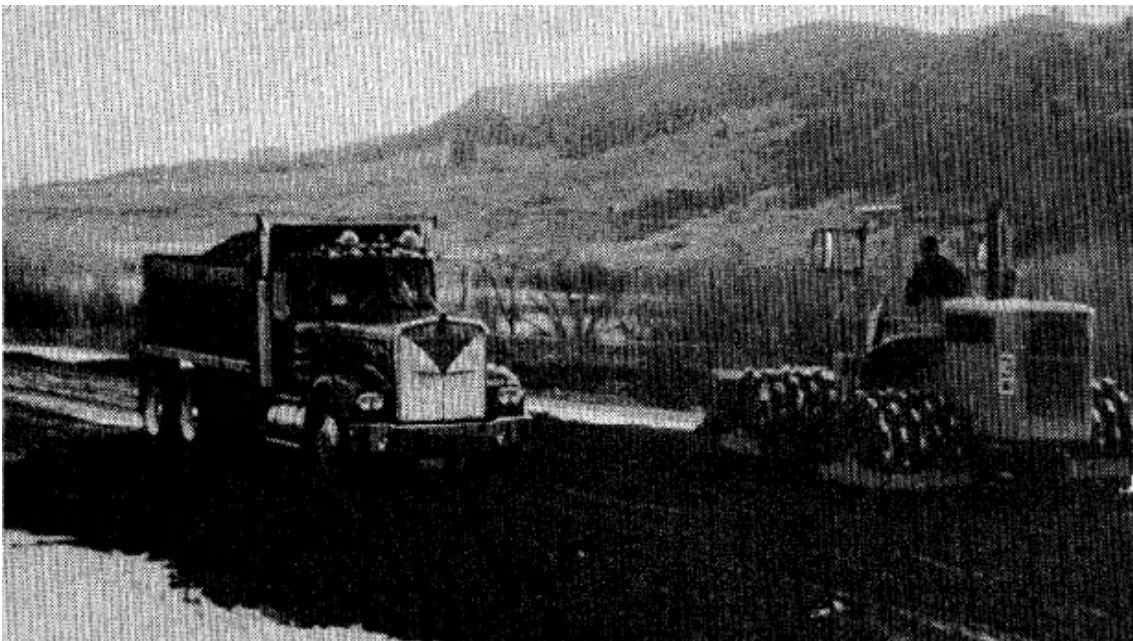
Y. H. Chen và các cộng sự (1987) [25] đã phát triển mô hình tính toán xói và mô phỏng cơ chế vỡ đập đất khi nước tràn đỉnh EMBANK bằng cách tích hợp các phương trình thủy lực, quan hệ thực nghiệm và công thức tốc độ xói của đất. Các thí nghiệm để xây dựng các công thức, biểu đồ thực nghiệm sử dụng trong mô hình toán đã được thực hiện tại trung tâm nghiên cứu công trình của trường đại học Colorado (Mỹ). Nhóm nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm với công trình có qui mô lớn, tỷ lệ 1:1 (Hình 1. 17, Hình 1. 18).

Chương trình EMBANK đã được các tác giả kiểm chứng bằng cách so sánh giữa kết quả tính toán và số liệu đo đạc thí nghiệm. FHWA và USFS đã tiến hành thí nghiệm cho hai loại đất có tính chất khác nhau, đo đạc thể tích đất bị xói trong một giờ đầu của thí nghiệm. Hình dạng đập, tính chất đất, chiều sâu mực nước thượng và hạ lưu của công trình thí nghiệm được đưa vào chương trình EMBANK để tính toán thể tích vật liệu bị xói trong một giờ đầu. Hình 1. 19 thể hiện sai số giữa số liệu đo tốc độ xói từ thí nghiệm và kết quả tính toán bằng phần mềm. Nhìn chung, kết quả tính có sai số nhỏ có thể chấp nhận được.



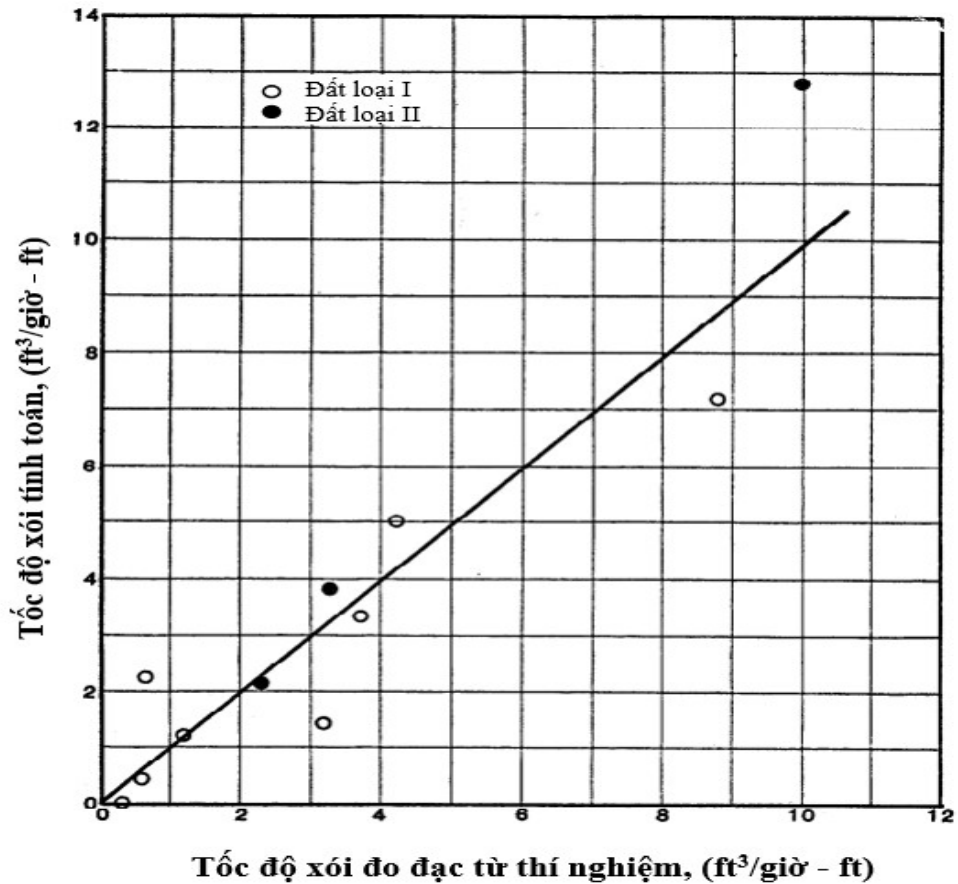
Hình 1. 17. Các thiết bị phục vụ thí nghiệm tại trường đại học Colorado [25]

Chương trình EMBANK có thể dùng để tính toán vận tốc dòng chảy tràn trên mái dốc, ứng suất sinh ra của dòng chảy và tốc độ xói của bề mặt mái dốc, từ đó vẽ được đường bao mặt cắt đập theo các bước thời gian và dự đoán thời điểm vỡ đập khi nước tràn đỉnh. Dữ liệu đầu vào của chương trình là các thông số về hình dạng công trình và tính chất đất đắp rất phù hợp với hướng nghiên cứu thực nghiệm trên mô hình vật lý của luận án.



Hình 1. 18. Thi công đập đất thí nghiệm (tỷ lệ 1:1) [25]

Mặt khác chương trình đã được kiểm định qua một chuỗi các dữ liệu thí nghiệm của FHWA và USFS cho kết quả đáng tin cậy. EMBANK cũng khắc phục được điểm hạn chế của BREACH là đã kể đến ảnh hưởng của hạ lưu và sự thay đổi của mực nước thượng lưu trong mô hình tính toán. Vì vậy, tác giả lựa chọn mô hình EMBANK làm công cụ tính toán mô phỏng vỡ đập đất khi nước tràn đỉnh trong các tính toán sau này của luận án.



Hình 1. 19. Biểu đồ so sánh tốc độ xói tính toán bằng phần mềm EMBANK và tốc độ xói đo đạc từ thí nghiệm [25]

1.3.2 Nghiên cứu ở Việt Nam

Quá trình nghiên cứu, qui hoạch, xây dựng, khai thác vận hành hệ thống bậc thang thủy điện trên sông Đà đã có nhiều nghiên cứu về vỡ đập Sơn La, Hoà Bình. Các kết quả nghiên cứu về vỡ đập hệ thống bậc thang Sơn La - Hoà Bình và một số lưu vực khác như sông Mã, Sông Hương, sông Vu Gia - Thu Bồn đã được nghiên cứu khá chi tiết thu được các kết quả cụ thể, các nghiên cứu trong nhóm này chủ yếu là sử dụng các mô hình toán hiện đại để mô phỏng quá trình truyền lũ trên hệ thống sông, lập bản đồ ngập lụt, quá trình phát triển lũ vỡ thường được giả thiết mà chưa có nghiên cứu nào cụ thể, điển hình là các nghiên cứu:

1. Lê Trần Chương (trường Đại học Xây dựng), [31] dùng phương pháp đường đặc trưng để giải hệ phương trình Saint-Vernant và lập chương trình máy tính mang tên

VODASL dùng cho nghiên cứu truyền sóng gián đoạn. Tác giả đã ứng dụng chương trình này để nghiên cứu vỡ đập công trình thủy điện Sơn La.

2. Nghiên cứu của Nguyễn Hữu An và cộng sự (Trường Đại học Xây dựng), năm 1998 [30]. Các tác giả ứng dụng chương trình HEC-1 để mô phỏng bài toán truyền sóng lũ và bài toán vỡ đập. Sự hình thành và phát triển vết vỡ lấy theo kinh nghiệm được dùng phổ biến ở Mỹ.

3. Trần Thục và các cộng sự (viện Khí tượng thủy văn kết hợp Trường Đại học Xây dựng) [33], nghiên cứu ứng dụng chương trình FLDWAV và DHM để giải bài toán vỡ đập của công trình thủy điện Sơn La trong hệ thống hồ chứa bậc thang Lai Châu – Sơn La – Hoà Bình.

4. Trần Đình Hợi và cộng sự (Viện Khoa học Thủy lợi), năm 2004 [34], đã nghiên cứu tính toán nhiều phương án về vỡ đập Sơn La, Hoà Bình qua đó xác định được tình trạng ngập lụt ở đồng bằng Bắc Bộ. Mô hình toán được lựa chọn để mô phỏng đó là các mô hình FLDWAV và DHM. Trong đó mô hình FLDWAV được sử dụng để mô phỏng quá trình vỡ đập và truyền lũ ở vùng thượng lưu. Còn mô hình DHM được sử dụng để mô phỏng quá trình ngập lụt vùng đồng bằng sông Hồng - sông Thái Bình .

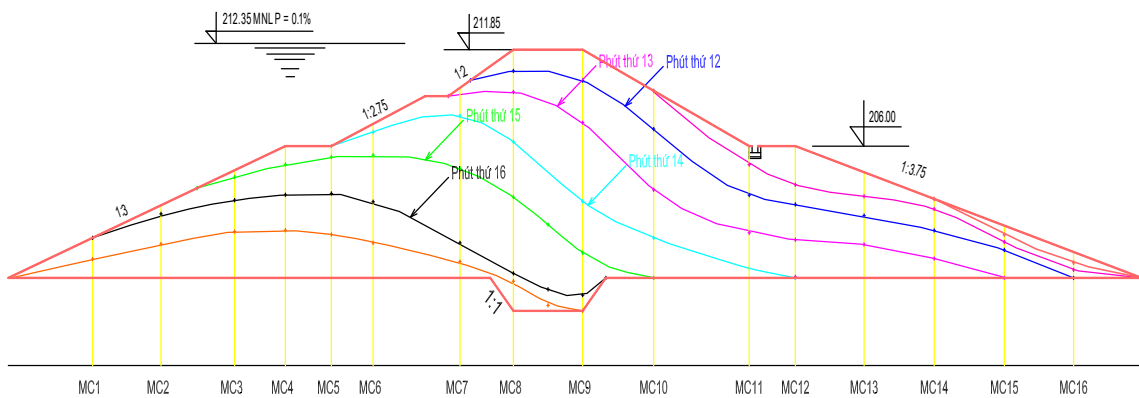
5. Nguyễn Văn Hạnh và các cộng sự (Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam), năm 2004 [35] trong khuôn khổ dự án DANIDA do chính phủ Đan Mạch tài trợ, đã nghiên cứu, mô phỏng lũ do vỡ đập đối với vùng đồng bằng sông Hồng - sông Thái Bình. Trong nghiên cứu này, đã thiết lập mô hình thủy lực cho hệ thống sông Hồng - sông Thái Bình, tính toán vỡ đập theo các kịch bản lũ, kịch bản vỡ đập (riêng lẻ hoặc liên hoàn) bằng phần mềm MIKE 11 và xây dựng các bản đồ ngập lụt ứng với từng kịch bản bằng phần mềm MIKE 11 GIS.

6. Lê Mạnh Hùng, năm 2004 [30] đã thực hiện đề tài cấp Bộ trong đó có một hạng mục nghiên cứu về vỡ đập hệ thống sông Hương. Nội dung chính của nghiên cứu mới chỉ dừng lại ở việc mô phỏng lũ do vỡ đập trong trường hợp vỡ đập Tả Trạch hoặc vỡ đập Bình Điền và trong trường hợp vỡ cả 2 đập, đưa ra một bức tranh tổng quát về ngập lụt vùng hạ lưu hệ thống sông Hương trong các trường hợp vỡ đập. Đề tài cũng

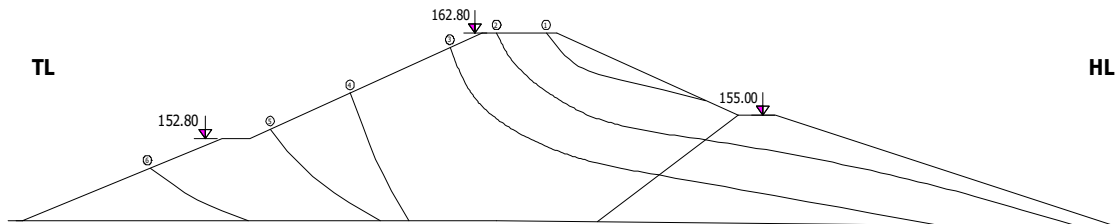
sử dụng công cụ MIKE11 và MIKE11 GIS để tiến hành tính toán và mô phỏng quá trình vỡ đập và lũ do vỡ đập.

Trong lĩnh vực nghiên cứu thí nghiệm về mô hình vỡ đập và vỡ đê chủ yếu được thực hiện bởi hai đơn vị là Viện Năng lượng (Trung tâm Thủy điện) và Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam (Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về động lực học sông biển). Các nghiên cứu điển hình liên quan đến đề tài có thể được kể đến bao gồm:

1. Đề tài “Nghiên cứu cơ chế thủy lực và tính toán vỡ đập cầu chì trong các công trình thủy điện, dự án thủy điện Sông Hinh” [36]; “Báo cáo kết quả nghiên cứu thí nghiệm mô hình thủy lực tràn sự cố dự án thủy điện Trung Sơn” [37] do Viện Năng Lượng thực hiện. Dự án đã tiến hành thí nghiệm mô hình vật lý nghiên cứu hiện tượng vỡ các đập tràn sự cố kiểu đập đất tự vỡ khi nước tràn đỉnh đập như tràn sự cố của thủy điện Sông Hinh và thủy điện Trung Sơn.



Hình 1. 20. Cơ chế xói vỡ ban đầu của tràn sự cố Sông Hinh- Phú Yên [36]



Hình 1. 21. Cơ chế xói vỡ của tràn sự cố thủy điện Trung Sơn – Thanh Hóa [37]

Kết quả thí nghiệm đã xác định thời gian vỡ và hình dạng đường viền xói theo thời gian (Hình 1. 20 và Hình 1. 21). Tuy nhiên, tràn sự cố kiểu đập đất tự vỡ là công trình chủ động cho vỡ khi nước tràn đỉnh đập. Vì vậy, kết quả thí nghiệm của loại công trình

này không thích hợp để áp dụng đánh giá an toàn cho các đập vật liệu địa phương khi nước tràn đỉnh đập.

2. Đề tài “Nghiên cứu cơ sở khoa học và đề xuất các giải pháp khoa học công nghệ đảm bảo sự ổn định và độ bền của đê biển hiện có trong trường hợp sóng, triều cường tràn qua đê” do Ngô Trí Viêng làm chủ nhiệm [38]. Đề tài đã tiến hành nghiên cứu sự gia tăng khả năng kháng xói của mái đê biển do tác dụng của các loại rễ cỏ dưới tác dụng của sóng tràn. Tuy nhiên, sóng tràn qua đê là sóng gián đoạn, cơ chế này khác với cơ chế phá hoại đập vật liệu địa phương dưới tác dụng của dòng chảy tràn liên tục.

3. Đề tài “Nghiên cứu đánh giá rủi ro đối với thượng, hạ du khi xảy ra sự cố các đập trên hệ thống bậc thang thủy điện sông Đà” do Lê Văn Nghị làm chủ nhiệm [30]. Liên quan đến lĩnh vực nghiên cứu vỡ đập, đề tài có một phần nội dung xây dựng mô hình vật lý và đánh giá hiện tượng vỡ của đập đá đổ công trình thủy điện Hòa Bình khi cho nước tràn đỉnh đập, xác định các đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy khi đập bị vỡ. Tuy nhiên, đập Hòa Bình là đập đá đổ có lõi đất, cơ chế vỡ khi nước tràn sẽ khác so với cơ chế vỡ của đập đất.

1.4 Những vấn đề đặt ra và hướng nghiên cứu

Ở Việt Nam, trong bối cảnh hiện tại do khả năng kinh tế còn hạn hẹp, các đập thủy lợi phần lớn là đập đất vừa và nhỏ đã được đưa vào khai thác, vận hành khoảng 30, 40 năm nhưng chưa có kinh phí tu bổ, nâng cấp. Do tình hình lũ bão gia tăng, rất nhiều đập đã phải làm việc trong điều kiện có nguy cơ nước tràn đỉnh đập. Việc nghiên cứu đánh giá an toàn đập đất trong điều kiện này bằng mô hình vật lý và mô hình toán cần nhận được sự quan tâm nhiều hơn của các nhà khoa học, đặc biệt trong bối cảnh hiện tại khi an toàn đập đang là một vấn đề thời sự.

Nghiên cứu an toàn của đập đất khi nước tràn đỉnh thường phải gắn liền với nghiên cứu cơ chế xói của đất đắp đập. Các nhà khoa học trên thế giới đã có rất nhiều công trình nghiên cứu về lĩnh vực này và thường chủ yếu bằng các nghiên cứu thực nghiệm, các nghiên cứu này đã đạt được thành công nhất định từ nghiên cứu cơ bản đến công nghệ xây dựng. Tuy nhiên, trong lĩnh vực này ở Việt Nam còn rất hạn chế cả về nghiên cứu lý thuyết và nghiên cứu thực nghiệm.

Việc sử dụng kết quả thí nghiệm của các mẫu đất, kết hợp với mô hình toán tạo thành công cụ để phân tích và mô phỏng vỡ đập đất là biện pháp khả thi và mang lại hiệu quả cao trong nghiên cứu thực nghiệm, khi mà điều kiện làm thí nghiệm các mô hình đập tỷ lệ lớn rất khó thực hiện (do kinh phí và điều kiện thí nghiệm).

Nghiên cứu về vỡ đập đất và những rủi ro liên quan, trên thế giới đã đạt được nhiều thành tựu to lớn, góp phần hạn chế các rủi ro do vỡ đập đất gây ra. Các mô hình toán mô phỏng sóng lũ, ngập lụt đã đạt nhiều thành công, cho phép mô phỏng bài toán vỡ đập một cách liên hoàn bao gồm phát triển lỗ vỡ đến mô phỏng ngập lụt. Tuy nhiên, các phần mềm tính toán chủ yếu là dựa trên giả thiết về sự phát triển và mở rộng vết vỡ theo các công thức thực nghiệm của một số tác giả. Qua phân tích, đánh giá tác giả nhận thấy mô hình toán EMBANK là mô hình tính toán vỡ đập dựa theo cơ chế xói của đất. Vì vậy, hướng phát triển của luận án là nghiên cứu thực nghiệm xói mẫu đất để xác định tốc độ xói của đất kết hợp với mô hình toán EMBANK để mô phỏng quá trình vỡ đập đất khi nước tràn đỉnh.

1.5 Kết luận chương 1

Đập đất là loại đập được xây dựng phổ biến nhất từ trước đến nay ở Việt Nam cũng như trên toàn thế giới. Theo thống kê của nhiều tổ chức đều thống nhất chỉ ra rằng đập đất cũng là loại đập có tần suất xảy ra sự cố lớn nhất so với các hình thức đập khác. Trong đó nước tràn đỉnh đập là nguyên nhân chiếm tỷ lệ lớn nhất trong tổng số các nguyên nhân gây ra sự cố đập. Chính vì vậy cần có những nghiên cứu chuyên sâu về hiện tượng nước tràn qua đỉnh đập đất gây ra vỡ trong điều kiện các đập ở Việt Nam.

Với những loại đất có tính dính khác nhau (đất dính nhiều và đất ít dính), cơ chế xói sẽ khác nhau. Tuy nhiên, ở giai đoạn đầu tiên của quá trình vỡ đập đất, hiện tượng xói bề mặt xảy ra chung cho các đập được đắp bằng đất có lực dính khác nhau.

Qua phân tích, đánh giá các nghiên cứu trước đây về lĩnh vực này ở cả trên thế giới và Việt Nam, tác giả đã lựa chọn được phương pháp thí nghiệm xói mẫu đất kết hợp với mô hình toán EMBANK để nghiên cứu mô phỏng cơ chế xói và vỡ của đập đất khi nước tràn đỉnh.

CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ THỰC NGHIỆM VỀ TỐC ĐỘ XÓI ĐẤT VÀ CƠ CHẾ VỠ ĐẬP KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH

2.1 Các khái niệm cơ bản

Vỡ đập là hiện tượng thân đập bị phá vỡ tính toàn khối, trên thân đập hình thành lỗ vỡ liên thông từ thượng về hạ lưu làm cho đập không còn thực hiện được chức năng chắn nước nữa. Có nhiều nguyên nhân gây ra vỡ đập như đã trình bày ở Mục 1.1. Trong phạm vi của luận án này chủ yếu tập trung nghiên cứu hiện tượng vỡ đập đất do tác động của dòng nước tràn đỉnh đập gây ra (vì vậy các nghiên cứu, kết luận sau này được viết cho đập đất). Trong trường hợp này vỡ đập có thể hiểu là hiện tượng nước tràn qua đỉnh đập, mang theo đất và làm cho cao trình đỉnh đập bị hạ thấp hơn so với hiện trạng trước khi dòng nước chảy qua, đỉnh đập bắt đầu xuất hiện “lỗ vỡ” liên thông từ thượng lưu về hạ lưu.

Tràn đỉnh là hiện tượng mực nước vượt qua đỉnh đập (hoặc đỉnh tường chắn sóng) đi về phía hạ lưu. Các hình thức tràn đỉnh bao gồm:

- Tràn đỉnh do mực nước hồ dâng cao: do lũ lớn vượt thiết kế, do sự cố công trình tháo lũ, hoặc các nguyên nhân khác làm cho mực nước trong hồ tăng lên, đến thời điểm mà mực nước trong hồ cao hơn phần thấp nhất của đỉnh đập và tràn qua đỉnh đập, lúc này đập bị tràn đỉnh.
- Tràn đỉnh do sóng: khi mực nước trong hồ thấp hơn đỉnh đập, nhưng do tác dụng của sóng làm nước vượt qua đỉnh đập, trường hợp này thường xảy ra dòng chảy tràn đỉnh không liên tục. Tràn đỉnh do sóng thường xảy ra đối với các đê biển và không thuộc phạm vi nghiên cứu của đề tài.

Khả năng xói của đất là thuộc tính vốn có của đất có thể bị xói do tác động của dòng chảy mặt. Xói phụ thuộc vào điều kiện địa hình và tính chất của đất. Khả năng xói bị ảnh hưởng bởi khả năng hấp thụ nước của đất và khả năng chống lại tác động của dòng chảy (kéo các hạt dọc theo bề mặt) của đất.

Tốc độ xói là đại lượng đặc trưng cho khả năng xói của đất, nó được biểu thị bằng khối lượng đất bị cuốn rời khỏi vị trí ban đầu trên một đơn vị diện tích, trong một đơn vị thời gian (đơn vị là $m^3/s.m^2$). Thông thường đại lượng này được xác định thông qua các thí nghiệm sẽ được trình bày ở phần sau.

Vận tốc tới hạn tạo ra ứng suất tới hạn τ_c là ứng suất khi đất bắt đầu bị xói. Khi vận tốc cũng như ứng suất của dòng chảy thấp hơn giá trị tới hạn thì không có xói, ngược lại xói sẽ diễn ra với một tốc độ xác định. Giá trị giới hạn xói này rất cần thiết trong xây dựng, nhưng nó không tồn tại một cách tự nhiên, ví dụ như đá granite có giá trị ứng suất tới hạn rất cao. Để tạo thành một cái hồ trên loại đá này dưới tác dụng của dòng chảy nhỏ giọt mất khoảng 20 triệu năm. Trong trường hợp này, ứng suất chưa đạt giá trị tới hạn nhưng đá vẫn bị xói. Lý do giải thích cho việc này là không có một giới hạn ứng suất lặp lại cho vật liệu, và ứng suất lặp lại thậm chí rất nhỏ cũng có thể phá vỡ được liên kết vật liệu, chỉ có điều là số chu kỳ cần thiết để phá vỡ liên kết. Vì vậy, người ta đã chấp nhận một định nghĩa cụ thể về ứng suất tới hạn, đó là ứng suất tương ứng với tốc độ xói 1mm/giờ trong hàm xói [11].

Quá trình xói mặt là hiện tượng đất thân đập bị cuốn đi do dòng chảy mặt có lưu tốc lớn vượt quá lưu tốc tới hạn của đất. Đối với đập đất bị tràn đỉnh, hiện tượng xói lở nghiêm trọng thường bắt đầu tại những vị trí xung yếu như các lỗ khoét, rễ cây mục trên mái hạ lưu hoặc khi dòng chảy gặp vật cản ở trên mái dốc (ví dụ như là các kết cấu, các cây to, những vị trí làm cho hướng dòng chảy thay đổi đột ngột, v.v...). Quá trình xói diễn ra liên tục và mở rộng về phía thượng lưu dẫn đến vỡ đập.

Thời gian bắt đầu vỡ đập là khoảng thời gian tính từ khi nước tràn qua đỉnh đập đến khi vết xói phát triển tới điểm mép thượng lưu đỉnh đập, đỉnh đập bắt đầu xuất hiện “lỗ vỡ” liên thông từ thượng lưu về hạ lưu làm một phần đỉnh đập bị hạ thấp.

Cơ chế vỡ đập là diễn biến của quá trình tương tác giữa dòng chảy với đỉnh và mái đập đất từ lúc nước tràn đỉnh đập cho đến khi hình thành lỗ vỡ liên thông từ thượng lưu về hạ lưu đập.

2.2 Các công thức tính tốc độ xói

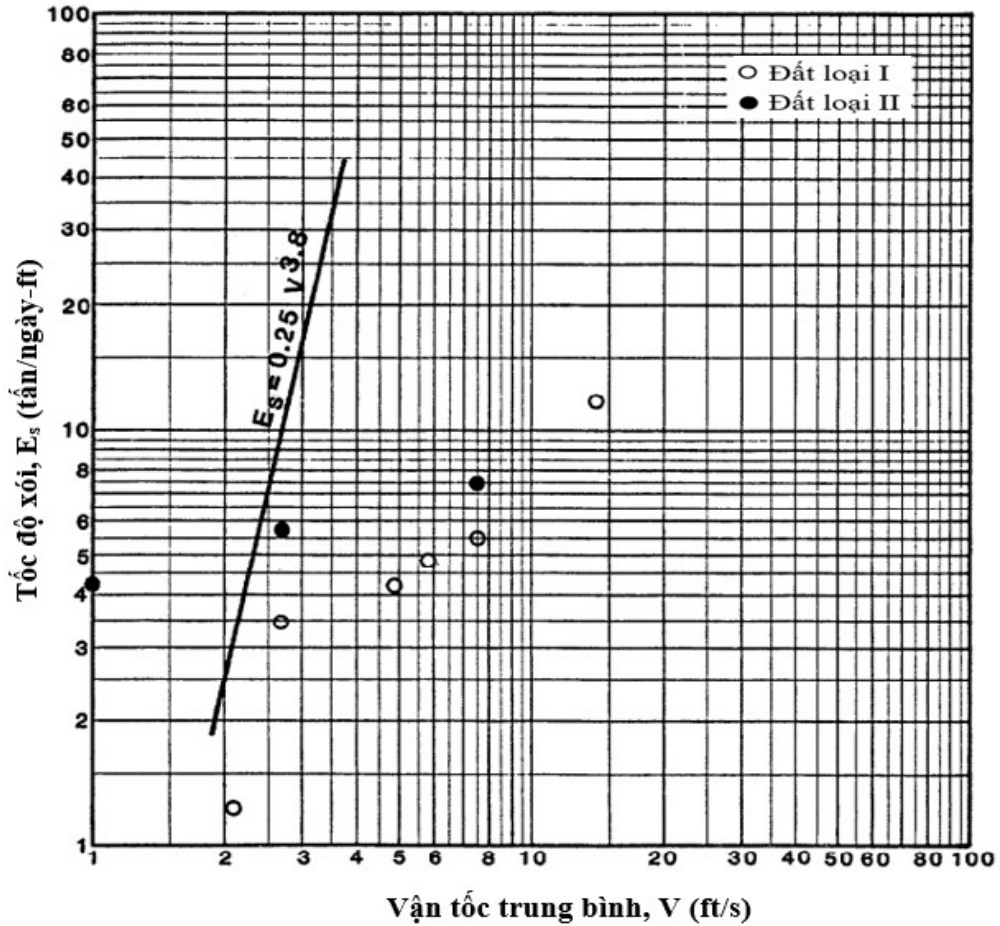
Từ các nghiên cứu trước đây, rất nhiều các công thức tính tốc độ xói đã được đề cập. Các công thức này chủ yếu thể hiện mối quan hệ giữa tốc độ xói của đất với ứng suất cắt hiệu quả và vận tốc dòng chảy. Bảng 2. 1 tập hợp các công thức của một số nhà nghiên cứu.

Bảng 2. 1. Các công thức tính tốc độ xói đất

TT	Tác giả	Công thức	Số hiệu	Giải thích
1	Wiggert & Contractor [39]	$E_s = \alpha v^\beta$	(2-1)	Công thức này được xây dựng từ các con đập vật liệu địa phương bị xói do nước tràn đỉnh. Trong đó E_s là tốc độ xói (Tấn/ngày/mét); v là vận tốc dòng chảy trên mái hạ lưu (mét/giây); $\alpha = 0,25$ và $\beta = 3.8$ cho cả đất rời và đất dính.
2	Cristofano [40]	$\frac{Q_s}{Q_w} = Ke^{-x}$	(2-2)	Công thức tính tốc độ xói cho đập đất bị vỡ do nước tràn đỉnh. Trong đó Q_s là tốc độ xói; Q_w là lưu lượng dòng chảy tràn; K là hệ số; $x = (b/H)\tan\phi$; b là chiều dài đáy vết vỡ; H là chiều cao cột nước tràn và ϕ là góc ma sát.
3	Ariathurai & Arulanandan [41]	$E = M \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)$	(2-3)	Công thức dùng để tính toán xói đất dính. Trong đó M là hệ số tốc độ xói, có giá trị thay đổi từ 0,00012 đến 0,0012 (lb/ft ² /s); τ là ứng suất cắt do dòng chảy và τ_c là ứng suất cắt tới hạn của đất.
4	ARL [25]	$E = K_d (\tau - \tau_c)^\alpha$	(2-4)	Công thức dùng để tính tốc độ xói của đất dính. Trong đó K_d là hệ số xói; τ là ứng suất cắt do dòng chảy và τ_c là ứng suất cắt tới hạn của đất; α là một hệ số. K_d , τ_c , α là các thông số phụ thuộc vào tính chất đất và được xác định thông qua thí nghiệm.

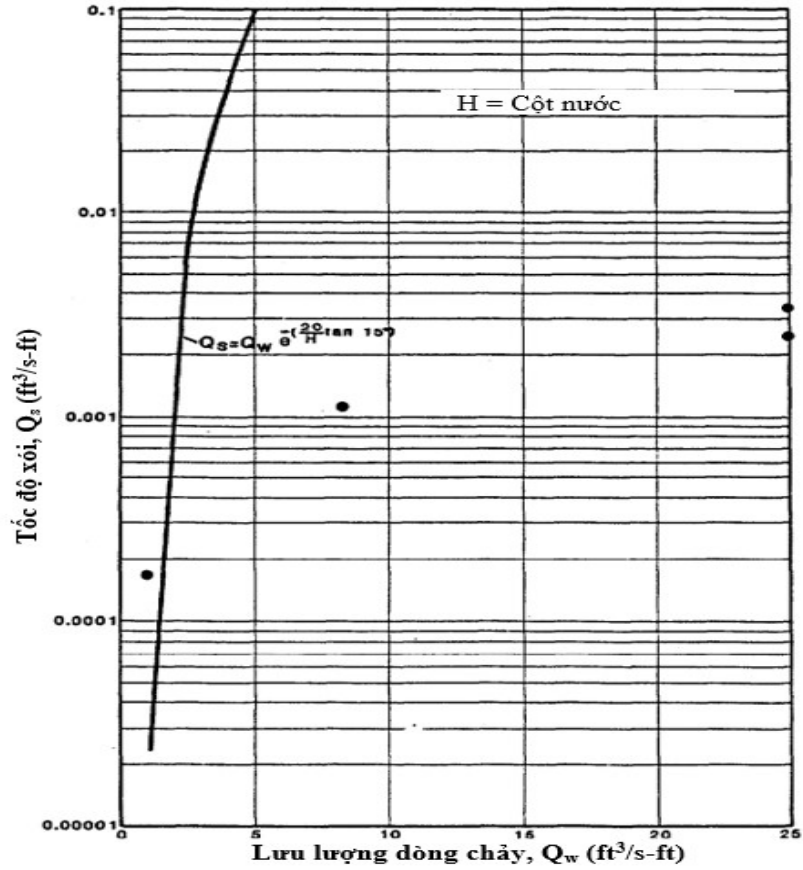
Hình 2. 1 thể hiện sự so sánh giữa kết quả tính toán theo công thức của Wiggert & Contractor với số liệu đo đạc từ thí nghiệm. Vận tốc dòng chảy trung bình đo đạc tại điểm giữa mái đập hạ lưu và vận tốc xói là khối đất bị xói đo đạc trong khoảng thời

gian một giờ đầu tiên của quá trình thí nghiệm. Hình 2. 1 cho thấy rằng ở hầu hết các thí nghiệm, tốc độ xói tính theo công thức của Wiggert & Contractor có kết quả lớn hơn giá trị thực đo. Với đất rời, tốc độ xói của đất phụ thuộc vào vận tốc với lũy thừa từ ba đến năm, đối với đất dính là lũy thừa từ một đến ba, nghĩa là độ nhạy của vận tốc lên tốc độ xói của đất dính kém hơn so với đất rời. Vì vậy, công thức của Wiggert & Contractor thích hợp hơn với đất hạt rời (đất ít dính) [39].

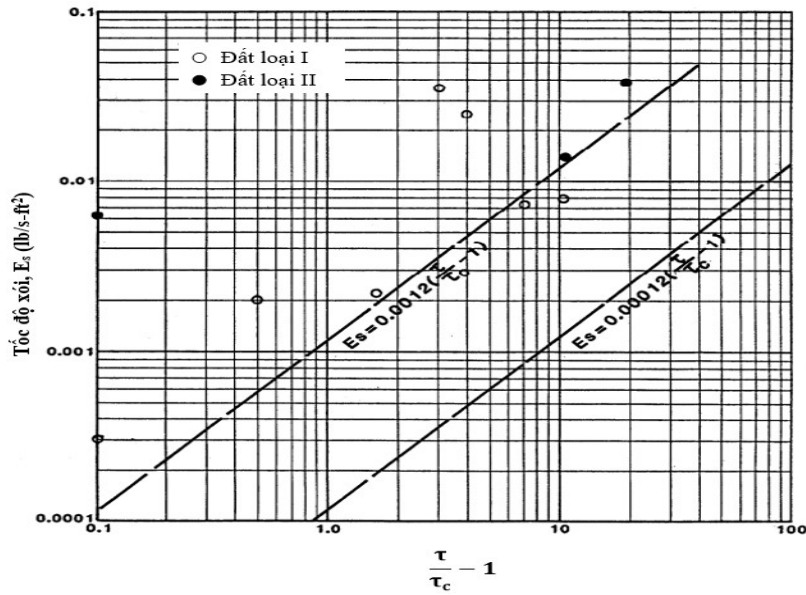


Hình 2. 1. So sánh giữa tốc độ xói đo đạc và số liệu tính toán theo công thức của Wiggert & Contractor [39]

Công thức của Cristofano thành lập để tính toán tốc độ xói của đập đất bị vỡ do nước tràn đỉnh. Công thức thể hiện rằng tốc độ xói phụ thuộc đáng kể vào chiều sâu tràn nước. Hình 2. 2 thể hiện kết quả so sánh giữa tốc độ xói đo đạc và tính toán theo công thức. Nhận thấy rằng các kết quả tính theo công thức của Cristofano có giá trị lớn hơn số liệu thực đo [40].



Hình 2. 2. So sánh giữa tốc độ xói đo đạc và tốc độ xói tính toán theo công thức của Cristofano [40]



Hình 2. 3. So sánh giữa tốc độ xói đo đạc và tốc độ xói tính toán theo công thức của Ariathurai & Arulanandan [41]

Hình 2. 3 cho thấy, kết quả tính theo công thức của Ariathurai & Arulanandan gần sát với kết quả thí nghiệm đất loại I của FHWA (đất có tính dính lớn), điều này chứng tỏ công thức của Ariathurai & Arulanandan là tương đối phù hợp cho đất dính [41].

Tuy nhiên, mối quan hệ giữa tốc độ xói và tỷ lệ ứng suất có thể không phải luôn luôn là tuyến tính. Vì vậy, một công thức phù hợp hơn (có dạng phi tuyến) được đề xuất bởi phòng thí nghiệm nghiên cứu nông nghiệp Hoa Kỳ (ARL) [25]:

$$E = K_d(\tau - \tau_c)^\alpha \quad (2 - 4)$$

trong đó E là tốc độ xói của đất trên một đơn vị diện tích ($m^3/s.m^2$);

τ là ứng suất cắt tại vị trí xói phụ thuộc vào điều kiện dòng chảy, N/m^2 ;

τ_c là ứng suất cắt tới hạn của đất, N/m^2 ;

K_d và α là các hệ số xói.

Mặc dù đây chỉ là công thức thực nghiệm nhưng nó đã được sử dụng trong rất nhiều các nghiên cứu như Clark và Wynn, 2007; Hanson và Simon, 2001; Wynn và Mostaghimi, 2006. Trong thí nghiệm, Hanson và Cook, 2004 đã chứng minh sự phù hợp của công thức bằng số liệu đo đạc thực nghiệm. Công thức này cũng được sử dụng trong các mô hình toán như Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF, Bicknell và các cộng sự, 1997), Soil and Water Assessment Tool (SWAT, Arnold và các cộng sự, 1998), và Water Erosion Prediction Project (WEPP, Nearing và các cộng sự, 1989). Trong công thức này, hệ số phụ thuộc vào tính chất của đất cần phải xác định đó là K_d , τ_c và α [20].

Ứng suất cắt trung bình τ sinh ra bởi dòng chảy được xác định theo công thức [25]:

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho v^2 \quad (N/m^2) \quad (2 - 5)$$

trong đó: ρ là khối lượng riêng của nước, kg/m^3 ;

v là vận tốc dòng chảy được đo tại vị trí sát đáy, m/s ;

f là hệ số Darcy-Weibach (phụ thuộc vào tính chất bề mặt của đất).

Ứng suất cắt tới hạn τ_c là đại lượng đặc trưng cho khả năng kháng xói của đất dưới tác dụng của dòng chảy. τ_c phụ thuộc vào rất nhiều chỉ tiêu tính chất của đất như lực dính kết C, góc ma sát ϕ ; trọng lượng riêng γ , thành phần hạt, đường kính hạt, chỉ số dẻo, v.v.. Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu về vấn đề xác định τ_c trong công thức tính tốc độ xói của đất, điển hình như:

Biểu đồ của Shields xác định τ_c cho đất rời hạt mịn, đối với đất dính biểu đồ này không phù hợp vì thường tính toán giá trị τ_c lớn hơn thực tế theo số liệu thí nghiệm của Hanson và Simon, 2001 [42].

Với đất rời, đất ít dính, giá trị ứng suất cắt tới hạn có thể xác định theo công thức của J. Gessler, 1971 [43]:

$$\tau_c = 0,05(\gamma_s - \gamma)d_{50} \quad (2 - 6)$$

trong đó: γ_s là dung trọng của đất (kG/m^3);

γ là dung trọng của nước (kG/m^3);

d_{50} là đường kính hạt trung bình của đất (m).

Fortier và Scobey [44] đã thực hiện một loạt các thí nghiệm và đề nghị giá trị ứng suất cắt và vận tốc tới hạn của một số loại đất rời và đất dính như trong Bảng 2. 2.

Trong các nghiên cứu về lưu tốc khởi động của hạt ở dòng chảy trong sông, Smerdon và Beasley, 1959 [45][46] ; Julian và Torres, 2006 [47]; đã đề xuất một số công thức thực nghiệm tính ứng suất cắt tới hạn (xem Bảng 2. 3).

Bảng 2. 2. Vận tốc tới hạn của đất theo đề nghị của Fortier và Scobey và giá trị ứng suất cắt tới hạn được chuyển đổi theo U.S Bureau of Reclamation [44]

TT	Vật liệu	Theo hệ đơn vị Mỹ		Theo hệ đơn vị quốc tế SI	
		V_c (ft/s)	τ_c (lb/ft ²)	V_c (m/s)	τ_c (N/m ²)
1	Cát mịn, có tính dính	1,5	0,027	0,46	1,32
2	Sét pha cát, không dính	1,75	0,037	0,53	1,81
3	Sét pha bùn, không dính	2	0,048	0,61	2,34
4	Đất bùn bồi tích, không dính	2	0,048	0,61	2,34

TT	Vật liệu	Theo hệ đơn vị Mỹ		Theo hệ đơn vị quốc tế SI	
		V _c (ft/s)	τ _c (lb/ft ²)	V _c (m/s)	τ _c (N/m ²)
5	Đất sét pha rắn chắc nguyên khối	2,5	0,075	0,76	3,66
6	Đất tro nham thạch	2,5	0,075	0,76	3,66
7	Đất sét cứng, rất dính	3,75	0,26	1,14	12,69
8	Đất bùn bồi tích, có dính	3,75	0,26	1,14	12,69
9	Đá phiến sét, tầng đất cứng	6	0,67	1,83	32,71
10	Cuội sỏi hạt mịn	2,5	0,075	0,76	3,66
11	Sét pha cuội sỏi, không dính	3,75	0,38	1,14	18,55
12	Bùn pha cuội sỏi, có dính	4	0,43	1,22	20,99
13	Cuội sỏi thô, không dính	4	0,3	1,22	14,65
14	Đá cuội	5	0,91	1,52	44,43

Bảng 2. 3. Các công thức thực nghiệm tính τ_c [45], [46], [47]

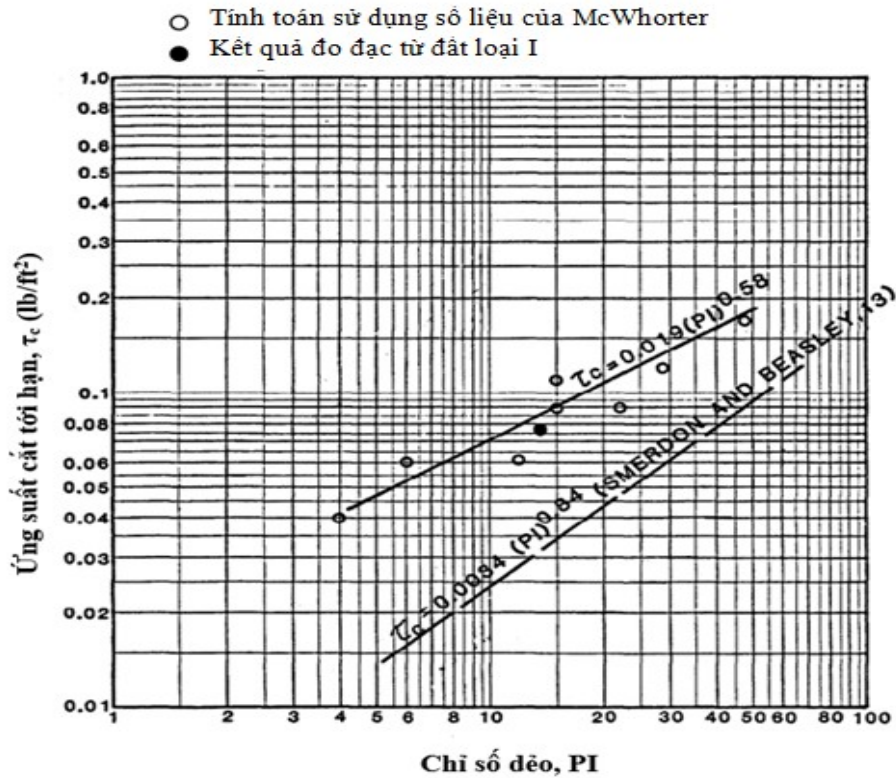
Công thức	Số hiệu	Chú thích
$\tau_c = 10,2(D_r)^{-0,63}$	(2-7)	D _r : tỷ số phân tán
$\tau_c = 3,54 \times 10^{-28,1D_{50}}$	(2-8)	D ₅₀ : đường kính hạt trung bình
$\tau_c = 0,493 \times 10^{0,0182 P_c}$	(2-9)	P _c : phần trăm sét theo khối lượng
$\tau_c = 0,1 + 0,18(SC) + 0,002(SC)^2 - 0,0000234(SC)^3$	(2-10)	SC: phần trăm hạt mịn và sét
$\tau_c = 0,0034(PI)^{0,84}$	(2-11)	PI: chỉ số dẻo

Theo nghiên cứu của McWhorter, 1968 [48], thực hiện thí nghiệm với 11 loại đất từ đất cát hạt thô không dính đến đất sét rất dính. Từ kết quả thí nghiệm, các tác giả đã đề nghị công thức tính ứng suất cắt tới hạn của đất dính:

$$\tau_c = 0,019(PI)^{0,58} \quad (2-12)$$

Hình 2. 4 thể hiện sự phù hợp giữa số liệu đo đạc và kết quả tính toán τ_c theo công thức của McWhorter và đồng thời cũng phù hợp với kết quả được đề nghị bởi Chow, 1959 [49]. Tuy nhiên, kết quả tính toán theo công thức (2-12) lớn hơn công thức (2-11) vì rằng đất sử dụng trong thí nghiệm của McWhorter được đầm nện tốt (dung trọng đạt từ 1.440 đến 1.682 kG/m³) còn đất trong thí nghiệm của Smerdon và Beasley

là đất có độ chặt kém (dung trọng đạt từ 960 đến 1.202 kg/m³) [25].



Hình 2. 4. Biểu đồ quan hệ giữa ứng suất cắt tới hạn và chỉ số dẻo [48]

Nhận thấy rằng, với mỗi loại đất khác nhau, trong các điều kiện thí nghiệm khác nhau, các tác giả đã đưa ra các công thức thực nghiệm xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c khác nhau. Trong điều kiện Việt Nam, đất đắp đập rất đa dạng và chưa được phân loại chuẩn theo qui định chung của thế giới. Mặt khác, từ trước đến nay cũng chưa có nghiên cứu nào về lĩnh vực này hoặc xác định được công thức thực nghiệm tính ứng suất cắt tới hạn τ_c của đất khi nước tràn cho các loại đất ở Việt Nam. Vì vậy, trong phạm vi đề tài đặt ra yêu cầu cần có nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c cho một số loại đất dính thường được sử dụng để đắp đập ở Việt Nam, nhằm cung cấp dữ liệu cho việc xây dựng công thức thực nghiệm tính tốc độ xói của các loại đất này.

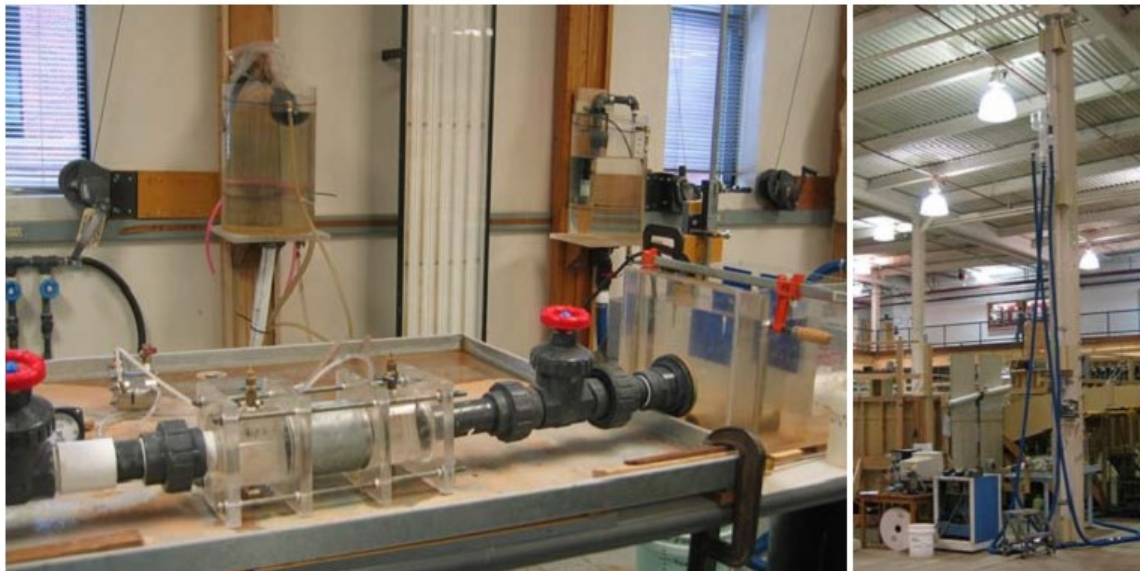
2.3 Các phương pháp nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng suất cắt tới hạn và tốc độ xói của đất

Xói đất thông thường được đánh giá, tính toán bởi ứng suất của dòng chảy sinh ra trên bề mặt vượt quá ứng suất cắt tới hạn của đất τ_c và các hệ số xói của đất K_d , α . Nhìn

chung không có một phương pháp luận nào để xác định ba thông số này dựa trên những tính chất của đất mà cách tiếp cận tốt nhất là bằng con đường thực nghiệm. Trên thế giới hiện nay thường sử dụng ba phương pháp thí nghiệm sau:

2.3.1 Phương pháp thí nghiệm xói HET [27]

Thí nghiệm xói ống (HET) (theo Wan and Fell 2004) được tiến hành trong phòng thí nghiệm. Phương pháp sử dụng một mẫu đất trong ống được đầm nện tiêu chuẩn, một lỗ khoan đường kính 6,35mm xuyên qua mẫu đất. Dòng chảy có thể chảy qua lỗ khoan với một áp lực nào đó, áp lực nước có thể điều khiển tăng dần cho đến khi xảy ra hiện tượng xói. Trong quá trình thí nghiệm, áp lực nước giữ không đổi trong thời gian đủ dài để duy trì dòng chảy. Kết quả đo đặc sự gia tăng tốc độ dòng chảy trong quá trình thí nghiệm, đường kính ban đầu và cuối cùng của lỗ khoan được sử dụng để tính toán đường quá trình ứng suất cắt sinh ra do dòng chảy và tốc độ xói của đất. Mối quan hệ giữa ứng suất cắt và tốc độ xói đo đạc được sẽ giúp xác định các thông số xói cơ bản của đất.



a)

b)

Hình 2. 5. Thiết bị thí nghiệm xói tiêu chuẩn HET [27]

a) Thiết bị cũ có cột nước tối đa 1600mm b) Thiết bị mới cho cột nước tối đa 5400mm

Hình 2. 5a thể hiện thiết bị thí nghiệm HET sử dụng ở Bureau of Reclamation, cột nước lớn nhất là 1600mm. Hình 2. 5b là thiết bị thí nghiệm trong phòng thí nghiệm

thủy lực ở Denver, Colorado, cột nước lớn nhất là 5400mm. Tốc độ dòng chảy qua mẫu đất thí nghiệm được đo bởi một máng chữ V gắn phía hạ lưu của thiết bị. Việc đo đạc cột nước qua mẫu đất và cột nước trên máng chữ V được tự động hóa bằng một đầu dò áp lực và một hệ thống máy tính tự ghi số liệu mỗi 5 giây trong quá trình thí nghiệm.

2.3.2 Phương pháp thí nghiệm xói JET [27]

Thiết bị thí nghiệm xói tia (JET) được phát triển ở trung tâm nghiên cứu kỹ thuật thủy lực và nông nghiệp, Stillwater, Oklahoma bởi Hanson và Cook năm 2004. JET là một thiết bị công nghệ được sử dụng rộng rãi trong rất nhiều các phòng thí nghiệm lớn trên thế giới. Cơ sở của phương pháp dựa trên lý thuyết xung động của tia nước. Độ chính xác của kết quả đo đạc phụ thuộc vào sự nắm vững lý thuyết thủy động lực học và sự đánh giá tin cậy của ứng suất cắt tới hạn sinh ra trên bề mặt mẫu. Thiết bị JET phát triển dựa trên phương pháp Blaisdell của Hanson và Cook, sử dụng dạng đường hyperbolic của Blaisdell và các cộng sự (1981) để xác định độ sâu cân bằng.

Thí nghiệm được thực hiện trên bề mặt đất tiếp xúc ngang hoặc nghiêng (Hanson và các cộng sự, 2002) hoặc ở trong phòng thí nghiệm sử dụng mẫu đất dạng ống hoặc mẫu trong các khuôn đầm nện chặt (theo Hanson và Hunt, 2006). Thí nghiệm này đã thực hiện thành công trên mẫu đất rất nhỏ, đường kính 75mm và được mô tả trong tiêu chuẩn ASTM D5852 [50]. Tia nước tác động lên bề mặt mẫu đất bằng một vòi phun thủy lực chìm, vòi này có đường kính là 6,35mm được đặt cách bề mặt mẫu đất một khoảng cách từ $6 \div 30$ lần đường kính vòi. Vị trí của vòi phun và cột nước áp lực có thể điều chỉnh để thay đổi ứng suất sinh ra trên mẫu đất, mặc dù vậy, cột nước áp lực thường được giữ không đổi trong suốt quá trình thí nghiệm. Hồ xói trên bề mặt mẫu đất được đo đạc theo thời gian (thường lên tới 2 giờ) bằng cách sử dụng một kim đo đi qua vòi phun. Phần trên của thiết bị (ống jet và nắp) có thể được đưa vào trong thùng thép để thuận tiện cho sử dụng. Dữ liệu được tập hợp tự động bởi máy tính trong quá trình thí nghiệm được sử dụng để mô tả quá trình xói bởi Hanson and Cook (2011). Hình 2. 6 thể hiện thiết bị thí nghiệm xói JET ở phòng thí nghiệm Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

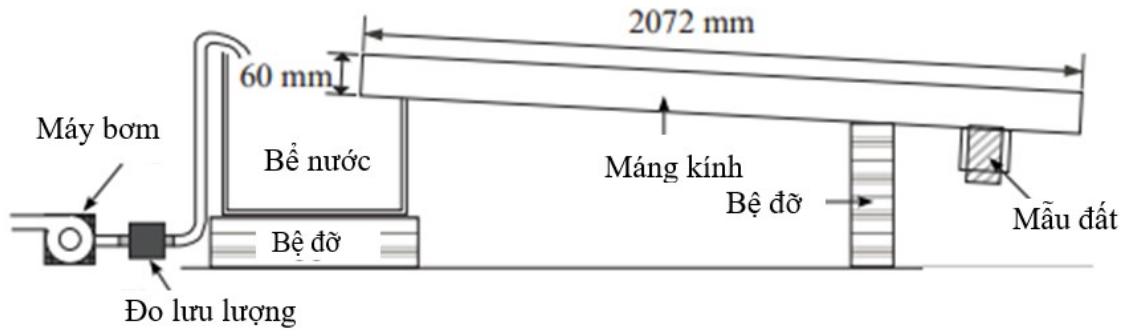
Các nghiên cứu thực nghiệm của Maliheh Karamigolbaghi và các cộng sự, 2016 [51] đã khẳng định rằng phương pháp thí nghiệm JET có thể không tính tất cả các thông số ảnh hưởng đến quá trình xói, nó cũng không đáng tin cậy khi cung cấp số liệu độc lập với điều kiện thí nghiệm và khoảng thời gian tối thiểu để thu thập dữ liệu cũng rất quan trọng vì nó ảnh hưởng lớn đến kết quả tính toán.



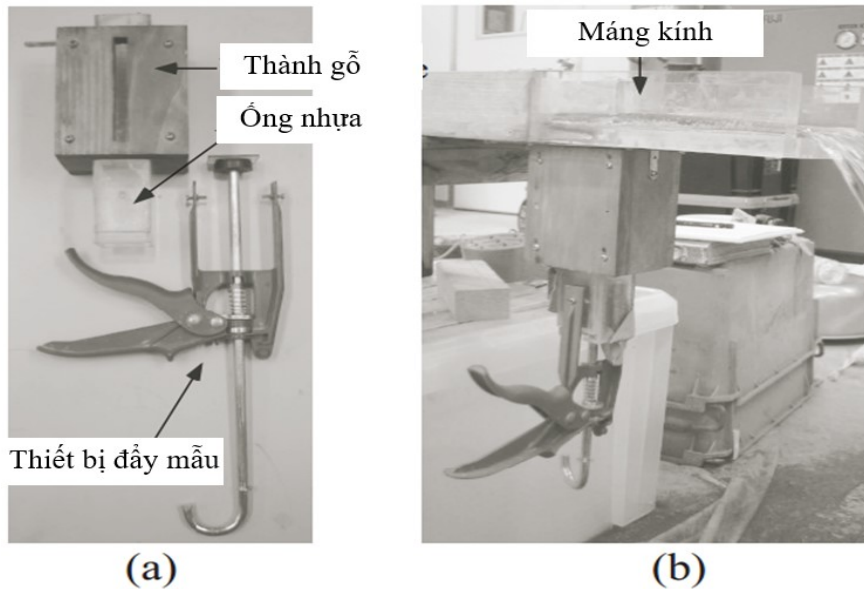
Hình 2. 6. Thiết bị thí nghiệm xói JET [27]

2.3.3 Thí nghiệm xói mẫu đất trên máng thủy lực [28]

Thí nghiệm được phát triển bởi Fujisawa và các cộng sự tại đại học Okayama, Nhật Bản. Để thực hiện thí nghiệm, nhóm tác giả đã xây dựng một máng thủy lực bằng gỗ và nhựa plastic. Một lỗ khoét hình chữ nhật được tạo ra ở đáy máng, đây chính là vị trí đặt mẫu đất thí nghiệm. Tại vị trí lỗ khoét này, thành máng được làm bằng nhựa trong suốt cho phép quan sát quá trình xói của mẫu đất. Bể chứa có gắn máy bơm nước đặt phía thượng lưu máng. Máy đo lưu tốc đặt giữa máy bơm và bể chứa để điều khiển tốc độ dòng chảy và giữ tốc độ không đổi trong suốt quá trình thí nghiệm. Nhiệt độ nước cũng được đo bằng nhiệt kế trong bể chứa và được giữ cố định (Hình 2. 7).



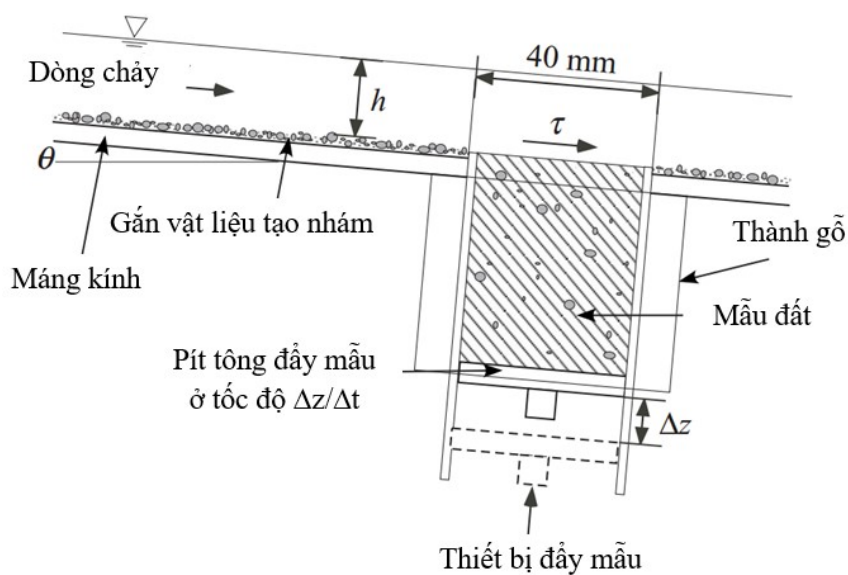
Hình 2. 7. Thiết bị thí nghiệm xói của Fujisawa [28]



Hình 2. 8. Thiết bị điều khiển mẫu đất [28]

Ống chứa mẫu đất bằng nhựa dẻo hình chữ nhật có kích thước cao 20cm, dài 3,8cm và rộng 3,6cm. Ống được lắp vào miệng lỗ dưới đáy máng thủy lực. Trong quá trình thí nghiệm mẫu đất được đẩy từ dưới lên bằng một pittông, bề mặt mẫu đất được phủ bằng một tấm nhựa dẻo để đảm bảo đất không bị xói cho đến khi thí nghiệm bắt đầu (Hình 2. 8).

Hình 2. 9 thể hiện sơ đồ thí nghiệm xói, ΔZ biểu thị sự gia tăng của chiều cao mất đi của mẫu đất trong thời gian Δt . ΔZ tương đương với chiều cao xói của đất do dòng chảy. Mẫu đất được đẩy từ dưới lên với tốc độ $\Delta Z/\Delta t$ đảm bảo bề mặt mẫu trùng với bề mặt đáy máng.



Hình 2. 9. Sơ đồ thí nghiệm xói của Fujisawa [28]

2.3.4 Nhận xét

Phương pháp thí nghiệm HET diễn ra từ điều kiện ứng suất thấp tăng dần lên ứng suất cao. Thí nghiệm được thực hiện trong khoảng ứng suất chỉ lớn hơn rất ít so với giá trị ứng suất tới hạn. Phương pháp này thích hợp với loại đất có cường độ trung bình nhưng rất khó thực hiện cho loại đất yếu và đất có cường độ cao. Đất yếu thường bị sụp xuống trong quá trình thí nghiệm hoặc xảy ra sự xói lở xung quanh cửa vào và cửa ra của ống và dẫn đến sự sạt trượt tại các vị trí này. Đất có khả năng kháng xói cao thì cũng khó thực hiện thí nghiệm bởi thiết bị HET. Phòng thí nghiệm thủy lực tại Reclamation có trang bị thiết bị xói HET cột nước áp lực lên tới 5400mm, gắn trên trần cao trên 25ft (7,62m) tuy nhiên với cột nước này một số loại vật liệu hàm lượng sét cao vẫn không xói. Wan and Fell (2004) xếp loại đất này vào nhóm 6 dựa theo chỉ số I_{HET} , đó là những loại đất không xói ở cột nước lớn hơn 1200mm. Một vấn đề nữa là những đất có khả năng kháng xói cao rất dễ làm tắc ống thí nghiệm, đất có hàm lượng sét cao được đầm nện khô trong điều kiện độ ẩm tối ưu thường bị xói theo cơ chế tách các hạt sét, nếu số lượng hạt đủ lớn sẽ làm tắc ống trong quá trình thí nghiệm.

Phương pháp thí nghiệm JET bắt đầu với điều kiện ứng suất cao và đạt dần đến điều kiện ứng suất thấp, và JET có thể thực hiện được ở điều kiện ứng suất vượt xa giá trị ứng suất tới hạn. Ngược lại với phương pháp HET, phương pháp thí nghiệm JET dễ

dàng áp dụng cho cả đất yếu và đất kháng xói cao. Với một ống JET định hướng theo phương đứng, cơ chế trọng lực giữ cho ống JET và mẫu luôn thẳng dẫn đến quá trình thí nghiệm dễ thành công hơn. Phương pháp JET thực hiện tốt với hầu hết các loại đất dính, trừ một số loại đất chứa hàm lượng hạt thô đáng kể bởi vì các hạt này rất khó vận chuyển ra khỏi ống. [27]

Cũng giống như phương pháp thí nghiệm HET, phương pháp thí nghiệm của Fujisawa diễn ra từ điều kiện ứng suất thấp tăng dần lên ứng suất cao. Tuy nhiên, thí nghiệm có thể thực hiện được trong khoảng ứng suất thay đổi lớn bởi vì máng kính có thể thay đổi độ dốc để tăng vận tốc dòng chảy, tăng ứng suất tiếp của dòng chảy lên bề mặt mẫu đất. Thí nghiệm có thể áp dụng thành công với các loại đất trung bình và đất có khả năng kháng xói cao, đất dính có lẫn nhiều cốt liệu thô vì khả năng vận chuyển bùn cát trong máng kính lớn, đặc biệt khi độ dốc đáy máng lớn. Kết quả thí nghiệm đã được so sánh và được đánh giá là khá phù hợp so với các phương pháp khác [28].

Nhận thấy phương pháp thí nghiệm của Fujisawa phù hợp với nhiều loại đất, mặt khác thiết bị thí nghiệm lại đơn giản, phương pháp đo đạc trực quan, và đặc biệt là có tính khả thi trong điều kiện làm thí nghiệm của luận án (dễ dàng chế tạo và rẻ tiền).

2.4 Mô hình toán EMBANK

Y.H. Chen và Bradley A. Anderson (1987) [25] đã phát triển chương trình tính toán EMBANK để xác định đường mặt nước tràn trên đỉnh đập và bề mặt mái hạ lưu, vận tốc và ứng suất cắt của dòng chảy tràn bằng cách cân bằng phương trình mô men và kết hợp với mối quan hệ thủy lực của dòng chảy qua đập bao gồm: hệ số lưu lượng dòng chảy (đồ thị thực nghiệm), chế độ dòng chảy (đồ thị thực nghiệm), quan hệ của nước nhảy (theo nghiên cứu của Chow, 1959 [49]), mối liên hệ giữa vận tốc và ứng suất cắt (hàm thực nghiệm). Hình 2. 10 thể hiện sơ đồ tính toán của chương trình.

Các bước tính toán cho chương trình cụ thể như sau:

Bước 1: Hình dạng mặt cắt ngang đập được nhập vào file dữ liệu dưới dạng tọa độ (X,Z). Hệ số nhám Manning được nhập cho mỗi điểm tính toán.

Bước 2: Nhập các thông số về vật liệu dưới dạng hàm xói.

Bước 3: Nhập cao trình mực nước thượng hạ lưu theo các bước thời gian

Bước 4: Đặt thời điểm tính toán ban đầu $J=0$

Bước 5: Xác định độ dốc bề mặt tại mỗi điểm tính toán bằng cách sử dụng phương trình:

$$S_{o_i} = \frac{Z_{i-1} - Z_{i+1}}{X_{i+1} - X_{i-1}} \quad (2-13)$$

Trong đó $i+1$ và $i-1$ là điểm kế tiếp phía hạ lưu và thượng lưu của điểm tính toán

Đối với điểm đầu tiên phía thượng lưu:

$$S_{o_1} = \frac{Z_1 - Z_2}{X_2 - X_1} \quad (2-14)$$

Đối với điểm cuối cùng phía hạ lưu

$$S_{o_{NX}} = \frac{Z_{NX-1} - Z_{NX}}{X_{NX} - X_{NX-1}} \quad (2-15)$$

Bước 6: Xác định hệ số lưu lượng cho mỗi mực nước thượng hạ lưu từ đồ thị thực nghiệm và sau đó tính toán lưu lượng theo công thức thực nghiệm.

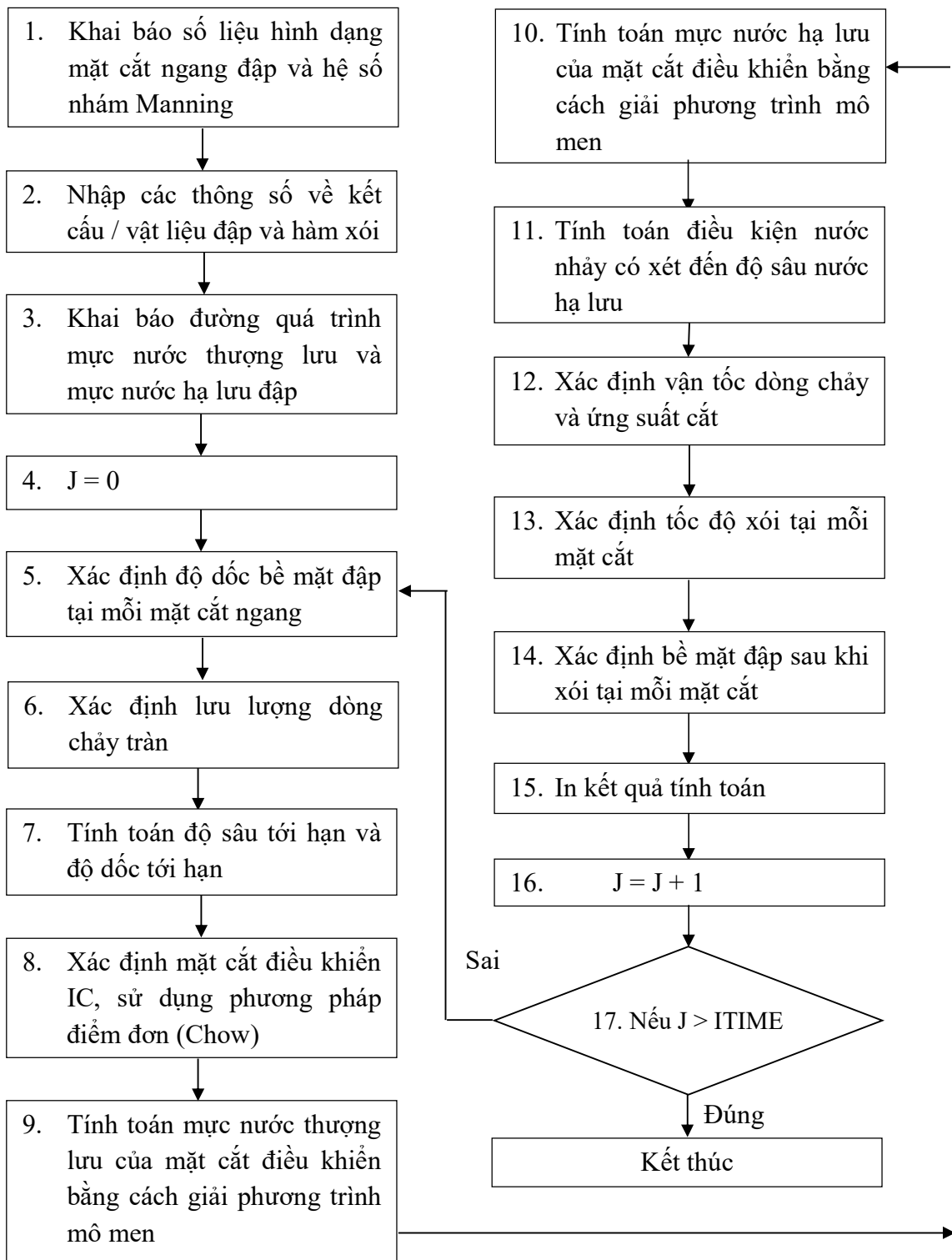
Bước 7: Tính toán chiều sâu tới hạn y_c và mái dốc tới hạn S_c :

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \quad (2-16)$$

$$S_c = \frac{qn^2}{2,2y_c^{1/3}} \quad (2-17)$$

trong đó q là lưu lượng đơn vị và n là hệ số nhám Manning.

Bước 8: So sánh mái dốc với mái dốc tới hạn tại mỗi điểm tính toán, điểm bắt đầu là điểm mép thượng lưu, xác định được điểm điều khiển IC mà tại đó mái dốc vừa bằng hoặc lớn hơn mái dốc tới hạn. Các bước 5,6,7,8 tính toán được cho cả những mô hình đập không xói và có xói.



Ghi chú: J là thời đoạn tính toán
 ITIME là số thời đoạn giới hạn

Hình 2. 10. Sơ đồ khối chương trình EMBANK

Bước 9: Tính toán mực nước thượng lưu điểm điều khiển IC bằng cách giải phương trình mô men sử dụng phương pháp bước chuẩn:

$$h_1 = h_2 + \frac{1}{2g}(V_1 + V_2)(V_2 - V_1) + \frac{\Delta x}{2}(S_{f1} + S_{f2}) \quad (2-18)$$

trong đó h là mực nước, V là lưu tốc trung bình, Δx là số gia theo phương X , S_f là độ dốc ma sát, chỉ số 1 và 2 theo thứ tự thể hiện điểm phía thượng và hạ lưu.

Bước 10: Tính toán mực nước hạ lưu điểm điều khiển IC bằng cách giải phương trình mô men sử dụng phương pháp bước chuẩn:

$$h_2 = h_1 + \frac{1}{2g}(V_1 + V_2)(V_1 - V_2) - \frac{\Delta x}{2}(S_{f1} + S_{f2}) \quad (2-19)$$

Bước 11: Tính toán điều kiện nước nhảy có xét đến ảnh hưởng của mực nước hạ lưu. Thiết lập các quan hệ sau dựa vào điều kiện nước nhảy, công thức và đồ thị xây dựng bởi Bradley and Peterka [52].

(1) Tính toán chiều sâu sau nước nhảy giả định xuất hiện tại điểm tính toán I:

$$y_2 = \frac{y_1}{2 \cos \theta} \left(\sqrt{\frac{8F_1^2 \cos^3 \theta}{1 - 2K \tan \theta} + 1} - 1 \right) \quad (2-20)$$

trong đó y_1 là chiều sâu trước nước nhảy; F_1 là số Froude tương ứng; θ là góc nghiêng của mái dốc ($\tan \theta = S_o$); K là hệ số thực nghiệm tính theo công thức sau:

$$K = 21.98 \tan^2 \theta - 14.40 \tan \theta + 3.74 \quad (2-21)$$

(2) Tính chiều dài nước nhảy:

$$L_1 = y_2 (2.87 + 1.89 S_o) \sqrt{F_1} \quad (2-22)$$

(3) Tính toán cao trình mực nước cuối nước nhảy:

$$TWH = y_2 (1 + 11.2 S_o^{3/2}) + Z_e \quad (2-23)$$

trong đó Z_e là cao trình đập ở cuối nước nhảy

Cao trình mực nước tính toán TWH được so sánh với cao trình mực nước hạ lưu TW, tính toán lặp lại cho các điểm phía hạ lưu cho đến khi tìm thấy điểm có $TW > TWH$, nếu không tìm được điểm này thì có thể kết luận nước nhảy không xảy ra trên bề mặt mái.

(4) Xác định khoảng cách giữa điểm cuối nước nhảy với điểm mép hạ lưu đập

Trường hợp $(TW - Z_{NX}) / y_2 \leq 1,3$

$$\text{thì: } L_2 = 2,05 S_o^{-0,78} [(TW - Z_{NX}) - 0,9 y_2]; \quad (2-24)$$

Trường hợp $(TW - Z_{NX}) / y_2 > 1,3$

$$\text{thì } L_2 = 0,82 S_o^{-0,78} y_2 + [(TW - Z_{NX}) - 1,3 y_2] / S_o \quad (2-25)$$

Bước 12: Xác định điều kiện dòng chảy từ các đồ thị và công thức thực nghiệm.

Bước 13: Xác định xói tại mỗi điểm tính toán.

Bước 14: Xác định bề mặt đập tại mỗi điểm tính toán theo từng bước thời gian.

Dữ liệu đầu vào của chương trình EMBANK gồm kích thước mặt cắt ngang đập, mực nước thượng hạ lưu và công thức tính tốc độ xói của đất (thể hiện tính chất đất). Các tham số trong công thức tính tốc độ xói của đất (công thức 2-4) là K_d , τ_c , α cần được xác định bằng thực nghiệm.

2.5 Kết luận chương 2

Tính chất của đất đắp đập và điều kiện dòng chảy là hai yếu tố chủ yếu ảnh hưởng đến cơ chế vỡ đập khi nước tràn đỉnh. Công thức tính tốc độ xói của đất thể hiện mối liên quan giữa các đại lượng này cho một loại đất cụ thể, đồng thời cũng là thông số đầu vào của một số chương trình tính toán vỡ đập. Qua phân tích, đánh giá và so sánh với kết quả thí nghiệm của các nhà nghiên cứu trước, dạng công thức (2-4) được tác giả lựa chọn để xây dựng công thức thực nghiệm tính tốc độ xói của đất.

Ứng suất cắt tới hạn của đất τ_c là đại lượng thể hiện khả năng chống chịu của đất dưới tác dụng của dòng chảy tràn. Các nghiên cứu trước đây đã đưa ra một số dạng công

thực thực nghiệm hoặc các dấu hiệu nhận biết để dự đoán đại lượng này. Tuy nhiên, với mỗi loại đất, kết quả lại phụ thuộc rất lớn vào điều kiện thí nghiệm. Vì vậy việc nghiên cứu thực nghiệm để xác định τ_c cho các loại đất cụ thể ở Việt Nam là rất cần thiết trong đánh giá cơ chế vỡ đập khi nước tràn đỉnh.

Việc lựa chọn phương pháp thí nghiệm rất quan trọng quyết định sự thành công hay thất bại, cũng như mức độ tin cậy của kết quả. Tác giả nhận thấy phương pháp thí nghiệm của Fujisawa phù hợp với nhiều loại đất, mặt khác thiết bị thí nghiệm lại đơn giản, phương pháp đo đạc trực quan, và đặc biệt là có tính khả thi trong điều kiện làm thí nghiệm của luận án (dễ dàng chế tạo và rẻ tiền). Vì vậy, tác giả dựa theo công trình nghiên cứu của Fujisawa để chế tạo máng thủy lực và tiến hành thí nghiệm để đạt được mục tiêu nghiên cứu thực nghiệm của luận án.

EMBank là chương trình toán được thiết lập dựa trên các quan hệ thực nghiệm, kết quả tính toán của chương trình đã được các tác giả kiểm định độ chính xác bằng cách đánh giá, so sánh với kết quả thí nghiệm trên mô hình tỷ lệ lớn. Có thể sử dụng chương trình EMBank để tính toán xác định ứng suất cắt của dòng chảy, dự báo cơ chế vỡ và thời gian vỡ của đập. Các số liệu đầu vào cần thu thập là hình dạng mặt cắt đập, cột nước tràn, tính chất đất đắp (cụ thể là công thức tính tốc độ xói - thông số này được cung cấp thông qua thí nghiệm), hình thức gia cố trên mái hạ lưu đập.

CHƯƠNG 3 NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM KẾT HỢP VỚI MÔ HÌNH TOÁN XÁC ĐỊNH THỜI GIAN VỠ CỦA ĐẬP KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH

3.1 Đặt vấn đề

Thời gian bắt đầu vỡ đập là khoảng thời gian tính từ khi nước tràn qua đỉnh đập đến khi vết xói phát triển tới điểm mép thượng lưu đỉnh đập, đỉnh đập bắt đầu xuất hiện “lỗ vỡ” liên thông từ thượng lưu về hạ lưu làm một phần đỉnh đập bị hạ thấp. Đây là mốc thời gian quan trọng đánh dấu thời điểm đập bắt đầu bị vỡ. Xói trên bề mặt đập dưới tác dụng của dòng chảy là giai đoạn đầu của quá trình phát triển vỡ đập. Định lượng được quá trình xói sẽ có thể xác định được thời gian bắt đầu vỡ đập.

Cơ chế vỡ đập là diễn biến của quá trình tương tác giữa dòng chảy với đỉnh và mái đập đất từ lúc nước tràn đỉnh đập cho đến khi hình thành lỗ vỡ liên thông từ thượng lưu về hạ lưu đập. Cơ chế vỡ của đập đất dính là sự kết hợp của các quá trình xói mặt, xói cắt đầu và mất ổn định của khối đất. Hiểu rõ được cơ chế vỡ đập để có các biện pháp ngăn chặn sự cố, cảnh báo nguy cơ và đề xuất giải pháp xử lý.

Khi lý thuyết chưa đủ cơ sở để giải thích và mô phỏng cơ chế xói và vỡ đập cũng như xác định thời gian vỡ của đập thì nghiên cứu thực nghiệm là cần thiết và là chìa khóa để giải quyết bài toán. Mục đích của nghiên cứu thực nghiệm là để quan sát và giải thích hiện tượng (định tính), và thiết lập các công thức thực nghiệm thông qua dữ liệu thí nghiệm (định lượng) nhằm cung cấp dữ liệu đầu vào cho mô hình toán để mô phỏng cơ chế vỡ đập.

3.2 Phân loại đất theo khả năng chống cắt

Rất nhiều loại đất đã được sử dụng để đắp đập ở Việt Nam, tính chất đất thay đổi theo mỗi vị trí công trình, mỗi khu vực xây dựng. Bảng 3. 1 thể hiện tính chất đất đắp của một số đập đất đã được xây dựng ở Việt Nam [thống kê theo hồ sơ thiết kế và các báo cáo an toàn đập].

Đất dùng để đắp đập chủ yếu là các loại đất dính, tuy nhiên lực dính thay đổi trong một phạm vi rộng từ đất dính ít đến đất dính nhiều. Tính dính của đất có ảnh hưởng quan trọng đến khả năng xói của đất và cơ chế vỡ đập bên cạnh các thông số khác như thành phần hạt, trọng lượng riêng, v.v.. Từ bảng thống kê tính chất đất của một loạt công trình thực tế đã xây dựng, trong phạm vi nghiên cứu của luận án, phân đất thành ba loại theo sự thay đổi của lực dính.

- Loại I : nhóm đất có tính dính lớn, lực dính $C = (0,24 \div 0,30)\text{kG/cm}^2$;
- Loại II : nhóm đất có tính dính trung bình, lực dính $C = (0,20 \div 0,23)\text{kG/cm}^2$;
- Loại III : nhóm đất có tính dính nhỏ, lực dính $C = (0,16 \div 0,19)\text{kG/cm}^2$.

Với mỗi nhóm đất, tiến hành nghiên cứu thực nghiệm cho một loại đất cụ thể như sau:

- Đất A: thuộc nhóm đất loại I có lực dính lớn, đất được lấy tại bãi vật liệu đắp đập hồ chứa nước Bi Zê Rê thuộc xã Đắc Som, huyện Đăk Glông, tỉnh Đăk Nông.

- Đất B: thuộc nhóm đất loại II có lực dính trung bình, lấy tại mỏ đất dùng để đắp đập chính – hồ chứa Đầm Hà Động, huyện Đầm Hà, tỉnh Quảng Ninh.

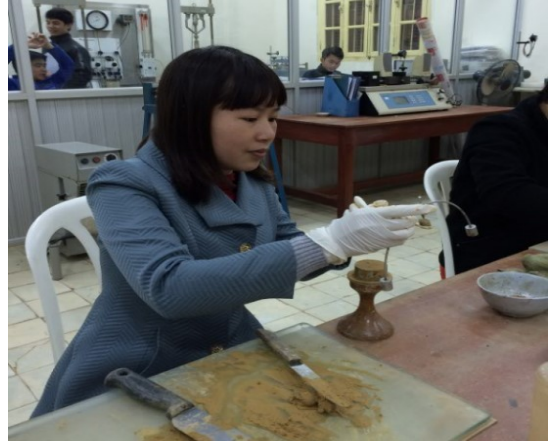
- Đất C: thuộc nhóm đất loại III có lực dính nhỏ, lấy tại mỏ đất dùng để đắp khối II của đập phụ số 2 – hồ chứa Đầm Hà Động, huyện Đầm Hà, tỉnh Quảng Ninh.

Đất được đưa về phòng thí nghiệm Địa Kỹ thuật của Trường Đại học Thủy lợi. Sàng loại bỏ các hạt đường kính lớn hơn 5mm, xác định các chỉ tiêu cơ lý theo các tiêu chuẩn thí nghiệm đất trong phòng [53] [54] [54] [56] [57] [58].

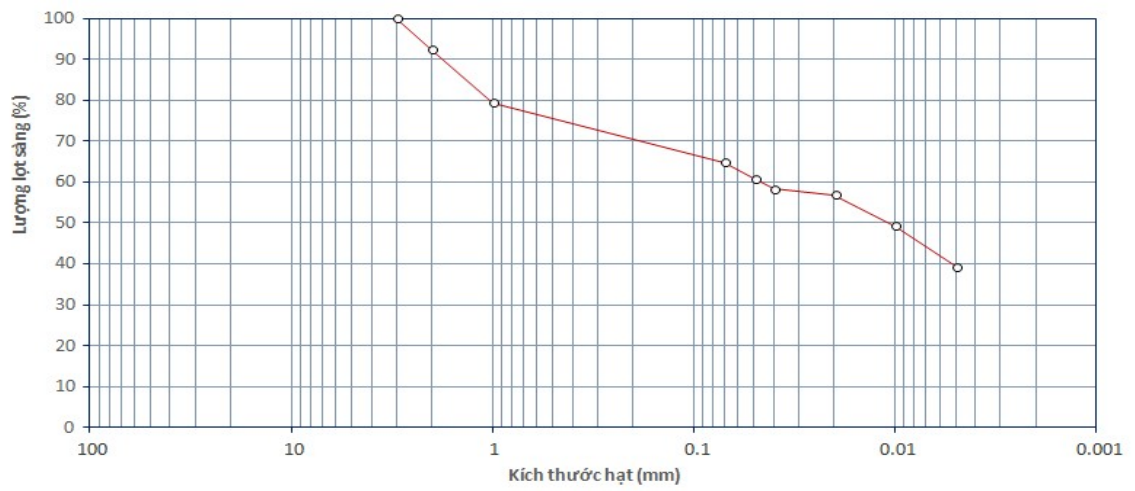
Bảng 3. 1. Thống kê các tính chất của đất đắp đập ở Việt Nam và phân loại đất theo lực dính đơn vị

Loại đất	TT	Tên đập	Tỉnh	Hđ	Thành phần hạt				Tính chất đất									
					Nhóm hạt dăm-sạn	Nhóm hạt cát	Nhóm hạt bụi	Nhóm hạt sét	γ_k	γ_w	ω	ϕ	c	r	W_L	W_p	PI	τ_c
					m	d = (2-20)	d = (0,05-2)	d = (0,005-0,05)	d < 0,005	g/cm ³	g/cm ³	%	độ	kG/cm ²	%	%	%	%
Loại I	1	Bi Zê Ré	Đăk Nông	10	7,67	31,52	21,6	39,2	1,54	1,95	26,98	14,31	0,27	44	45,9	22,5	23,4	5,774
	2	Thôn 3	Đăk Nông	5	16,8	20,29	21,6	41,3	1,5	1,93	28,46	13,4	0,28	45	44,1	20,6	23,5	5,789
	3	Đạ Tẻh	Lâm Đồng	28	13,8	36,1	24,1	26	1,46	1,87	27,99	13,49	0,26	47	38,3	22,8	15,5	4,547
	4	C4	Kon Tum		3,92	48,31	22,5	25,3	1,4	1,82	30	17,57	0,29	48	41,4	28,5	13	4,104
	5	Phú Vinh	Quảng Bình	27	3,16	42,21	26,9	27,7	1,68	1,88	21,9	14,19	0,24	38	38,4	22,4	15,9	4,618
	6	Sông Quao	Bình Thuận	40	1	40	32	27	1,67	1,89	13,3	13,29	0,27	38	28,9	16,6	12,3	3,976
Loại II	7	Ông Hiên	Đăk Nông	6,5	11,8	34,2	17,3	36,6	1,47	1,6	36,3	16,06	0,2	58	53,2	30,9	22,3	5,615
	8	Đăk Bliêng	Đăk Nông	7,5		30,4	11,3	58,2	1,46	1,6	50,9	14,38	0,22	62	74,4	44,6	29,8	6,643
	9	Sa Đa Cô	Đăk Nông	8		31,7	21	47,3	1,44	1,67	46,3	16,58	0,22	59	71,8	42	29,9	6,656
	10	Thôn 7	Đăk Nông	13	13,1	30,3	24,2	32,4	1,42	1,62	44,3	16,36	0,21	59	65,1	40,5	24,7	5,958
	11	Đăk R'lon	Đăk Nông	9,5	6,3	49,5	18,1	26,1	1,59	1,76	37,2	16,57	0,23	55	61,5	35,6	25,9	6,124
	12	Đăk Ha	Đăk Nông	14	22,8	28,9	15,5	32,8	1,43	1,61	43,3	15,3	0,2	60	60,6	35	25,6	6,083
	13	Đầm Hà Động (đập chính)	Quảng Ninh	30	10	40	33	17	1,61	1,92	19,8	16,36	0,21	59	38,5	15,3	23,2	5,746
	14	Đăk Snao 1	Đăk Nông	9	9	31,3	18,8	34,5	1,49	1,69	42,4	15,26	0,2	57	62,4	35,8	26,6	6,220
	15	Suối Đá	Đăk Nông	8,9	49,3	27,13	31,1	17,4	1,43	1,608	33	17,43	0,2	37	50,5	31	19,5	5,192
	16	Nao Ma A	Đăk Nông	12	7,64	26,81	23,6	42	1,56	1,96	25,77	15,4	0,21	43	47,3	23,1	24,2	5,888

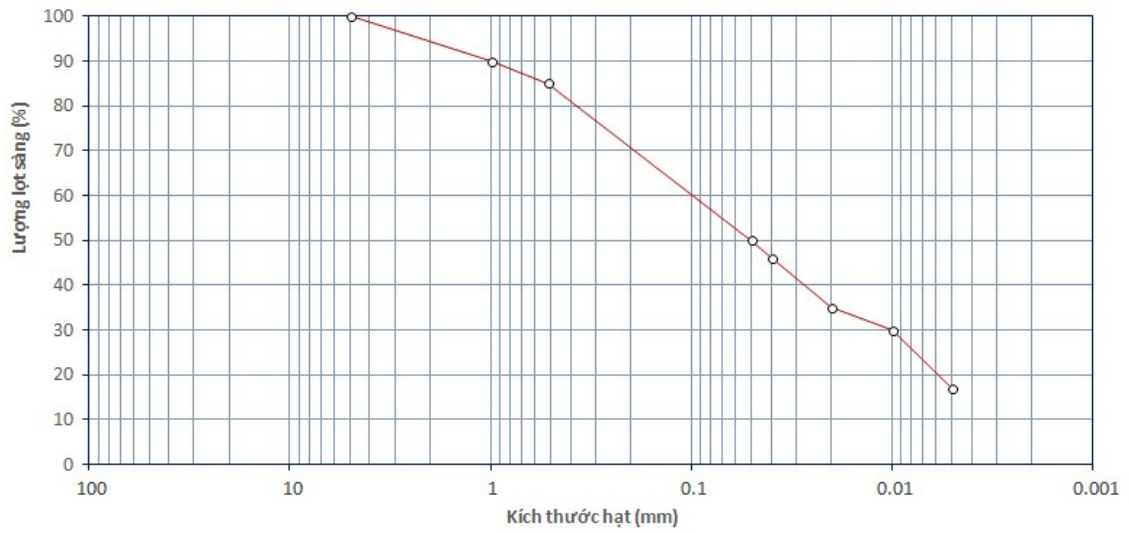
Loại đất	TT	Tên đập	Tỉnh	Hđ	Thành phần hạt				Tính chất đất									
					Nhóm hạt dăm-sạn	Nhóm hạt cát	Nhóm hạt bụi	Nhóm hạt sét	γ_k	γ_w	ω	ϕ	c	r	W _L	W _p	PI	τ_c
					m	d = (2-20)	d = (0,05-2)	d = (0,005-0,05)	d < 0,005	g/cm ³	g/cm ³	%	độ	kG/cm ²	%	%	%	%
Loại II	17	Đắk Ken	Đắk Nông	5	8,62	25,3	23	43,1	1,45	1,9	31,26	13,56	0,21	47	50,3	24,6	25,7	6,097
	18	Đăktin	Kon Tum		2,41	41,95	29	26,6	1,39	1,85	32,9	19,16	0,21	48	41,6	26,8	14,8	4,422
	19	Cà Sấm	Kon Tum		3,92	51,92	21,4	22,8	1,53	1,87	22,74	20,4	0,23	43	32,5	21,8	10,7	3,676
	20	Cha Chạm	Hà Tĩnh	10	8	28,5	32,5	31	1,59	1,93	21,33	17,16	0,22	42	36,9	19,7	17,2	4,830
	21	Khe Cò	Hà Tĩnh	12					1,61	1,98	23,24	18,15	0,2	41	38,9	21,6	17,3	4,846
	22	Sông Biêu	Ninh Thuận	24	17	42,5	13	27,5	1,77	1,95	10,4	14,43	0,23	34	30,1	17,8	12,3	3,976
	23	Đồng Bề	Thanh Hóa		20	20,3	36,3	23,3	1,61	1,93	20,4	16,31	0,22	41	34,2	21	13,2	4,143
Loại III	24	Ba Khe	Hà Tĩnh	9	3,3	73,4	11	12,3	1,65	1,94	17,72	16,35	0,18	39	30,4	16,7	13,6	4,217
	25	Khe Dẻ	Hà Tĩnh	13	1,83	23,48	49,4	25,4	1,52	1,888	24,53	16,59	0,16	44	34,9	22,1	12,8	4,069
	26	Đầm Hà Động (đập phụ 2)	Quảng Ninh	12	16,5	62,4	12	9,1	1,48	1,88	25,6	17,14	0,17	43	32,8	20,5	12,3	3,976
	27	Đập Làng	Quảng Ngãi	13	15,2	42,8	21,9	20,1	1,46	1,86	27,1	17,28	0,17	46	36,8	24,5	12,3	3,976
	28	Chấn Sơn	Quảng Nam	8,2	12	46,25	25,8	15,9	1,56	1,931	23,59	19,13	0,18	42	31,6	21	10,6	3,656



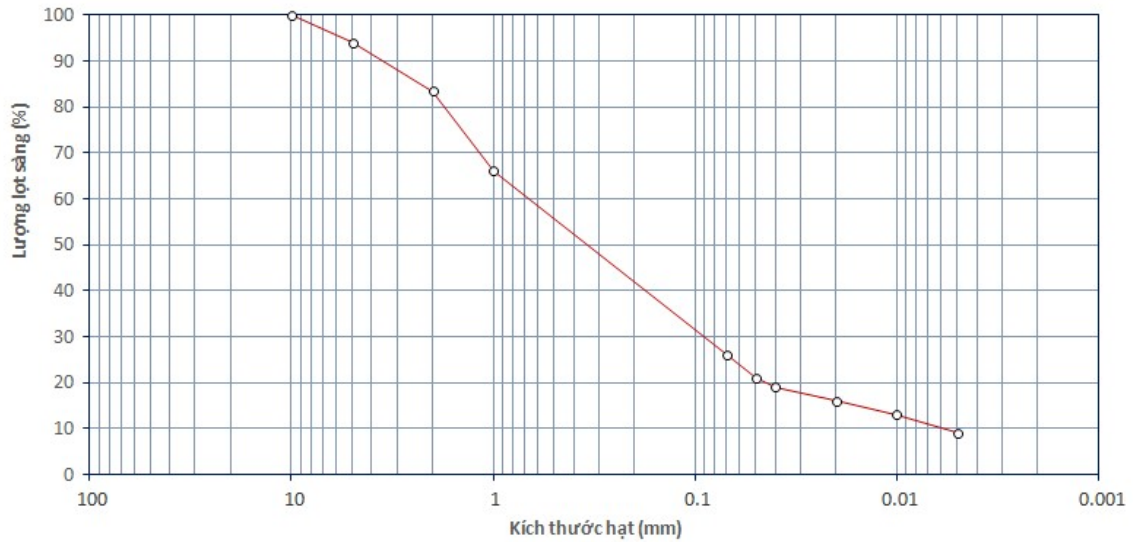
Hình 3. 1. Thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý của đất



Hình 3. 2. Đường cong cấp phối hạt của đất A



Hình 3. 3. Đường cong cấp phối hạt của đất B



Hình 3. 4. Đường cong cấp phối hạt của đất C

Bảng 3. 2. Tính chất của đất thí nghiệm

Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị		
		Đất A	Đất B	Đất C
Độ đầm chặt K		0,95	0,95	0,95
Dung trọng khô	g/cm ³	1,54	1,61	1,48
Dung trọng tự nhiên	g/cm ³	1,95	1,92	1,88
Góc ma sát trong φ	độ	14 ^o 31	16 ^o 36	17 ^o 14
Lực dính C	kG/cm ²	0,269	0,207	0,17
Độ rỗng r	%	44	58,9	42,5
Giới hạn chảy W_L	%	45,9	38,5	32,8
Giới hạn dẻo W_P	%	22,5	15,3	20,5
Chỉ số dẻo PI	%	23,4	23,2	12,3
Độ sệt I_s		0,19	0,17	0,22

3.3 Nghiên cứu thực nghiệm cơ chế vỡ của đập đất khi nước tràn đỉnh

3.3.1 Xây dựng mô hình

Mô hình thí nghiệm nghiên cứu cơ chế vỡ của đập đất khi nước tràn đỉnh đập được xây dựng tại bãi thí nghiệm thủy lực tổng hợp ngoài trời, trường Đại học Thủy lợi. Mô hình bao gồm một máng kính rộng 0,5m, cao 1,5m và dài 2m. Phía thượng lưu là hệ thống kênh dẫn nối với một bể nước được cung cấp nước bằng một máy bơm công suất lớn và có thể thay đổi lưu lượng bằng một van điều khiển, trên đoạn kênh dẫn có

đặt một máng tam giác đo lưu lượng trước khi nước chảy đến đập. Phía hạ lưu là hệ thống kênh thoát nước đưa nước trở về máng qui hồi. Sơ đồ bố trí tổng thể thiết bị thí nghiệm thể hiện trong Hình 3. 5.

Mô hình đập đất được đắp trong máng kính có chiều cao đập $H = 0,5\text{m}$; chiều dài đỉnh đập $L = 0,5\text{m}$; chiều rộng đỉnh đập $B = 0,4\text{m}$; mái thượng lưu $m_1 = 1$; mái hạ lưu $m_2 = 2$ (Hình 3. 6). Tỷ lệ giữa chiều cao mô hình và lưu lượng thí nghiệm được lựa chọn theo điều kiện phải thỏa mãn số Froude, theo Coleman và các cộng sự, (2002) [16].

$$(U / \sqrt{gL})_p = (U / \sqrt{gL})_m \quad (3 - 1)$$

$$\text{hay } \frac{q_m}{q_p} = \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{3/2} \quad (3 - 2)$$

trong đó U là lưu tốc ; L là chiều dài và q là lưu lượng đơn vị.

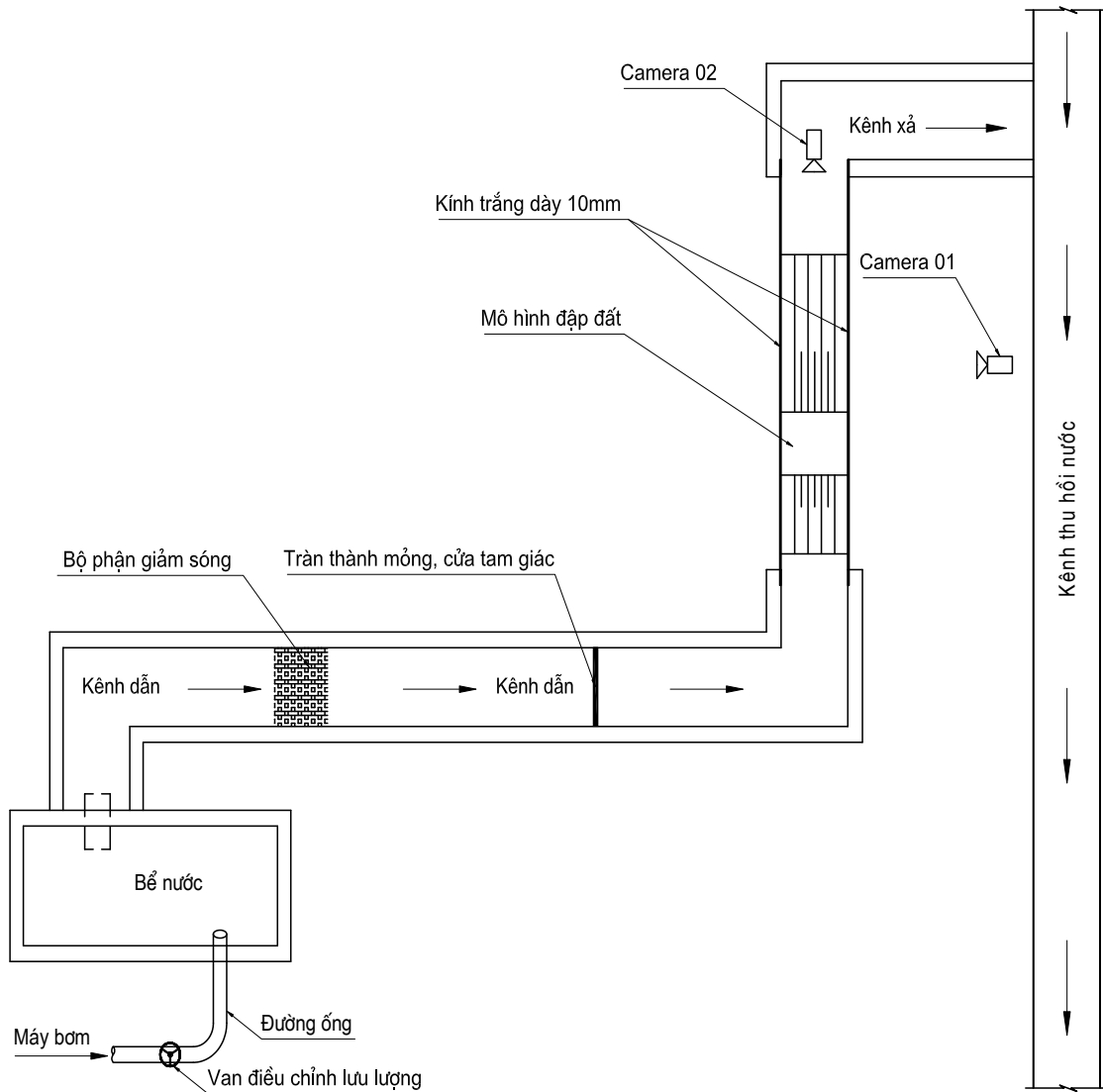
Thí nghiệm của Hanson và các cộng sự, (2005)[19] được thực hiện cho hai đập đất cao 2,3m và 1,5m với lưu lượng đơn vị là $q = 0,22 \div 0,36 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ cho con đập cao 2,3m và $q = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ cho con đập cao 1,5m. Các thí nghiệm này đã được kiểm chứng thỏa mãn điều kiện về số Froude (3 - 2). Tác giả thực hiện thí nghiệm cho đập đất cao 0,5m, ta có tỷ lệ :

$$\left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{3/2} = \left(\frac{0,5}{2,3} \right)^{3/2} = 0,101$$

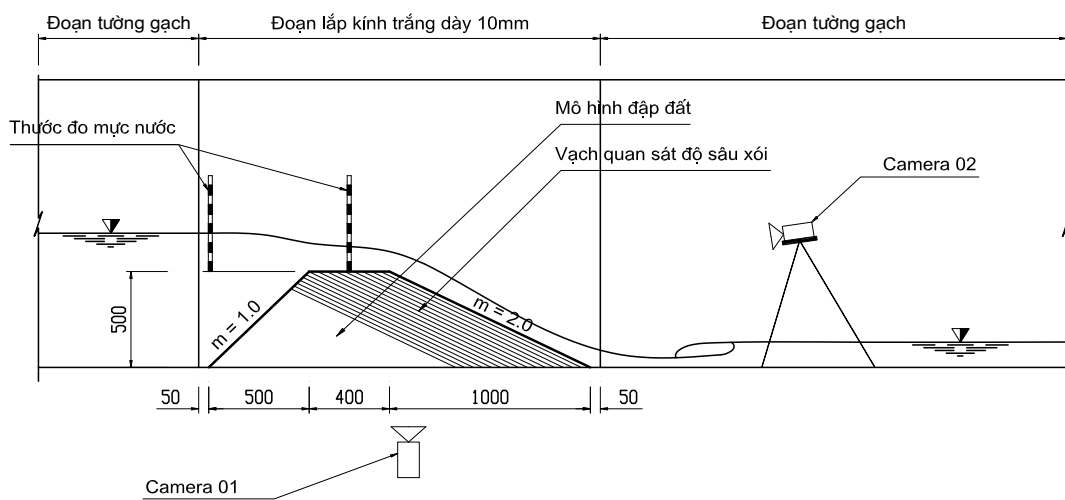
với $q_p = 0,22 \div 0,36 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ thì $q_m = 0,0222 \div 0,0364 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Thí nghiệm được thực hiện theo nguyên tắc không chế cột nước tràn thay đổi từ $H_t = 7\text{cm} \div 18\text{cm}$, tính toán lưu lượng tràn theo sơ đồ thực nghiệm của Y.H. Chen và các cộng sự, (1987) [25] được $q = 0,02 \div 0,038 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Giá trị này đảm bảo q_m yêu cầu.

Đất được sử dụng để đắp đập là đất A (tính dính lớn) và đất C (tính dính nhỏ).



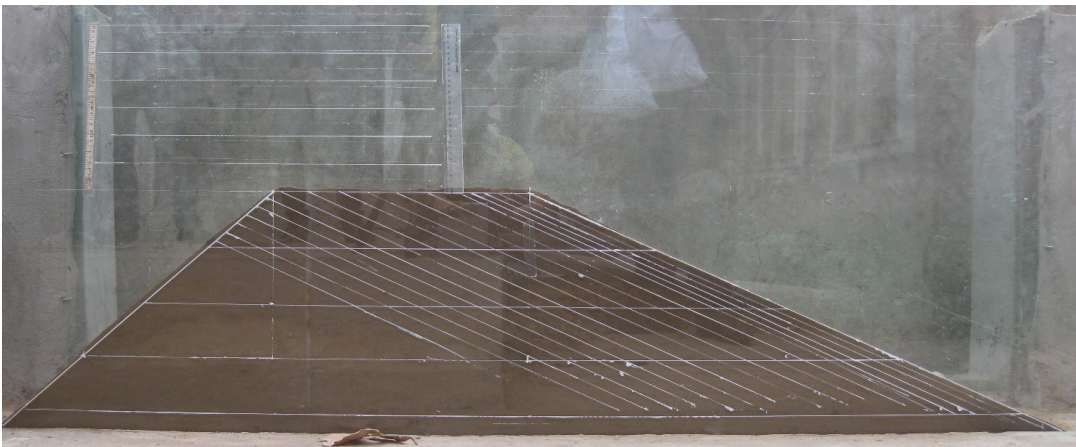
Hình 3. 5. Sơ đồ khu thí nghiệm



Hình 3. 6. Mô hình đập đất và các thiết bị quan sát

Quy trình xử lý đất và đắp đập tại bãi thí nghiệm:

- Sàng đất qua sàng có đường kính mắt lưới 5mm để loại bỏ hạt cốt liệu lớn;
- Xác định độ ẩm hiện tại của đất, xác định lượng nước cần trộn thêm, sau đó tiến hành trộn thêm nước để đưa đất về độ ẩm tối ưu;
- Đắp đất theo từng lớp có chiều dày 10cm, đầm nện với số lần đầm tương đối đều nhau cho mỗi lớp, dung trọng mỗi lớp xác định bằng phương pháp dao vòng;
- Cắt gọt mái thượng lưu và hạ lưu bằng phương pháp thủ công.



Hình 3. 7. Hình ảnh mô hình đập sau khi thi công xong

Để đo mực nước tràn trên đỉnh đập, tiến hành kẻ các đường kẻ ngang từ cao trình đỉnh đập trở lên, khoảng cách giữa các đường là 5cm, đồng thời các thước dài có độ chính xác đến mm cũng được gắn ngay trên đỉnh và phía thượng lưu đập.

Để thuận tiện cho việc theo dõi diễn biến xói của mái hạ lưu và đỉnh đập khi nước tràn, tiến hành vẽ một lưới các đường kẻ song song với bề mặt mái hạ lưu đập. Khoảng cách giữa các đường kẻ này là 1cm đối với đoạn sát mái hạ lưu, và 2cm đối với đoạn phía trong. Các camera quan sát được đặt tại phía vai phải của đập và phía chính diện hạ lưu để ghi lại toàn bộ diễn biến quá trình xói và vỡ đập kể từ khi nước tràn cho đến khi đập bị vỡ hoàn toàn.

Tiến hành xả nước và điều chỉnh máy bơm theo các cấp lưu lượng đã tính toán để đạt được cột nước tràn qui định. Ghi lại toàn bộ quá trình xói vỡ đập của các trường hợp thí nghiệm.

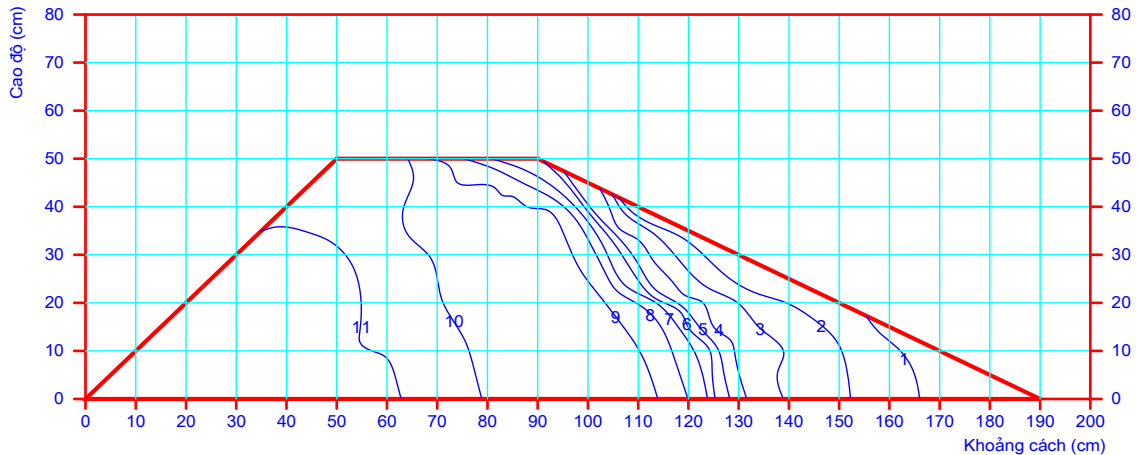
Bảng 3. 3. Các trường hợp thí nghiệm

Cột nước tràn H (cm)	Cấp lưu lượng q (m ³ /s/m)	Đất A	Đất C
7	0,02		x
10	0,025		x
15	0,033	x	
18	0,038	x	

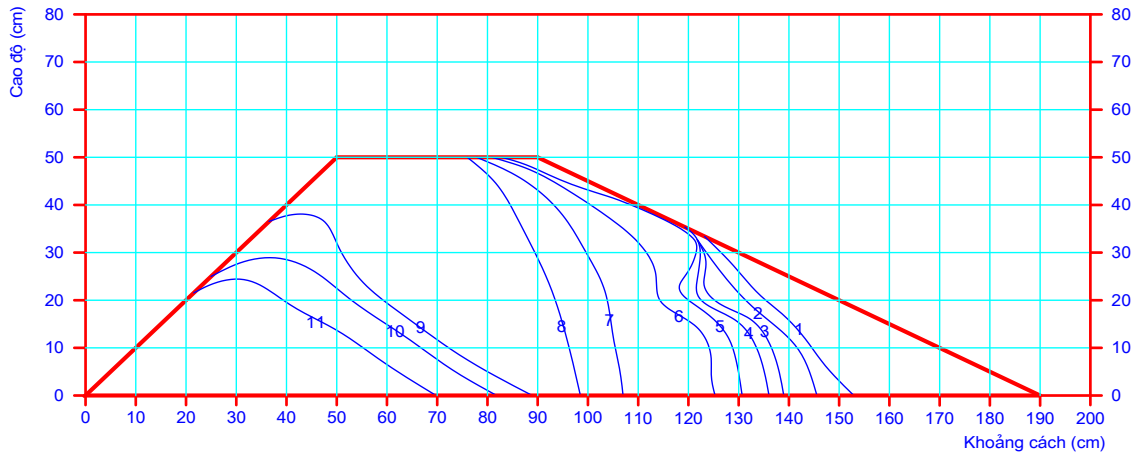
3.3.2 Phân tích kết quả

Quá trình thí nghiệm được ghi lại bởi các camera quan sát đặt hai bên vai đập và chính diện phía hạ lưu. Cắt ảnh từ các video theo bước thời gian $\Delta t = 1$ phút (Phụ lục A). Từ hình ảnh thí nghiệm, tiến hành vẽ lại các đường cong diễn biến mặt cắt đập theo từng bước thời gian, kết quả thể hiện trên Hình 3. 8, Hình 3. 9, Hình 3. 10 và Hình 3. 11.

- Đất A

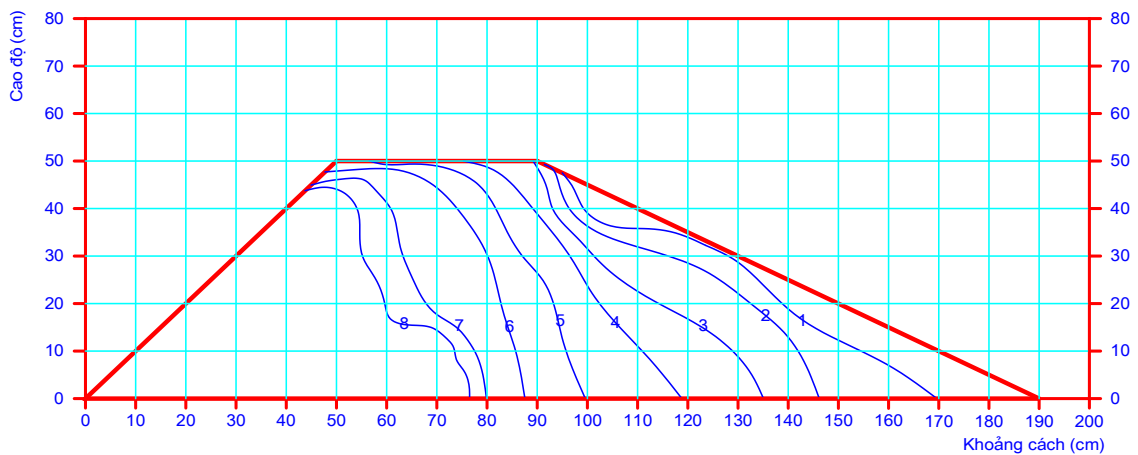


Hình 3. 8. Hình ảnh diễn biến mặt cắt đập sau mỗi phút – Trường hợp cột nước tràn 15cm

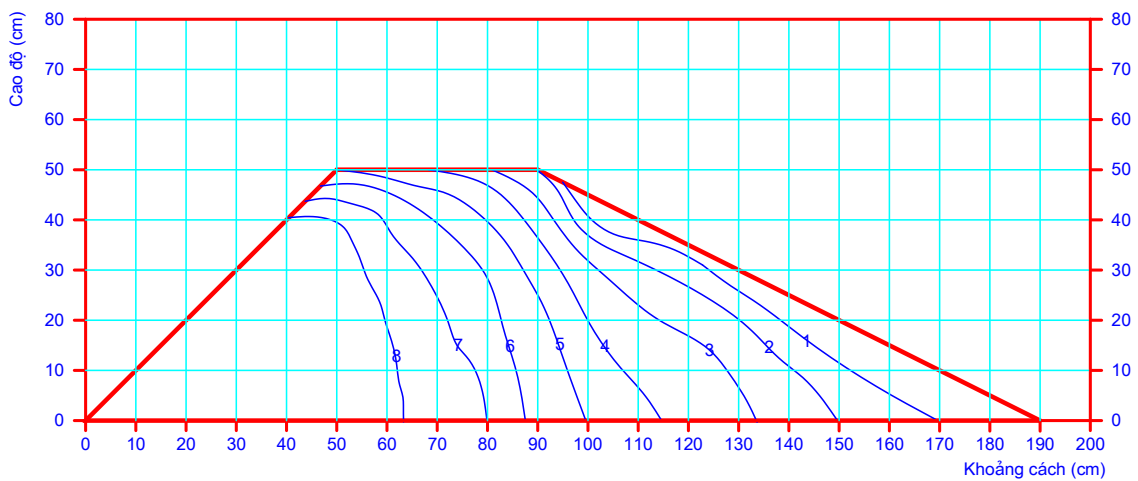


Hình 3. 9. Hình ảnh diễn biến mặt cắt đập sau mỗi phút – Trường hợp cột nước tràn 18cm

- Đất C



Hình 3. 10. Hình ảnh diễn biến mặt cắt đập sau mỗi phút – Trường hợp cột nước tràn 7cm



Hình 3. 11. Hình ảnh diễn biến mặt cắt đập sau mỗi phút – Trường hợp cột nước tràn 10cm

Diễn biến mặt cắt những đập đắp bằng loại đất A (Hình 3. 8 và Hình 3. 9), khi nước tràn qua có xu hướng bị xói dưới chân trước, sau đó phát triển dần lên đến đỉnh. Trong quá trình xói, có trường hợp hình thành hàm ếch trên mái hạ lưu, sau một khoảng thời gian do mất ổn định hàm ếch này sập xuống (Hình 3. 9). Khoảng cách giữa các đường cong không đều nhau, có những lúc các đường cong rất sát nhau nhưng có lúc lại rất xa nhau (bước 9-10, Hình 3. 8 và bước 8-9, Hình 3. 9). Tại những vị trí các đường cong nằm cách xa nhau, quan sát trên video là do hiện tượng mất ổn định và trượt cả một khối đất trên thân đập.

Với những đập đắp bằng loại đất C, diễn biến mặt cắt đập theo thời gian là các đường cong tương đối đều từ đỉnh đến chân đập (Hình 3. 10 và Hình 3. 11). Khoảng cách giữa các đường cũng tương đối đều đặn, không có sự thay đổi đột ngột chứng tỏ quá trình xói là quá trình bào mòn dần trên bề mặt mái hạ lưu và đỉnh đập.

Với những đập đắp bằng đất dính nhiều, quá trình xói thường bắt đầu ở điểm dưới chân hạ lưu đập và sau đó phát triển dần lên đỉnh, cơ chế vỡ ban đầu là xói bề mặt, sau đó là quá trình hình thành vết xói trong thân đập dẫn đến vỡ đập. Với những đập đắp bằng đất ít dính, xói là quá trình bào mòn dần trên toàn bộ mái hạ lưu và đỉnh đập, cơ chế vỡ đập là cơ chế xói bề mặt.

Như vậy, đối với đập đắp bằng cả hai loại đất trên (đất dính nhiều và đất ít dính), cơ chế vỡ đập giai đoạn đầu đều là cơ chế xói bề mặt. Đây là cơ sở cho nghiên cứu thực nghiệm tính tốc độ xói của đất và nghiên cứu giai đoạn đầu của cơ chế vỡ đập – cơ chế xói bề mặt.

3.4 Nghiên cứu thực nghiệm xây dựng công thức tính tốc độ xói của đất

3.4.1 Chế tạo thiết bị thí nghiệm

Xây dựng một hệ thống thiết bị phục vụ thí nghiệm theo sơ đồ Hình 3. 12. Nước được bơm từ bể chứa nước ngầm qua máy bơm vào hệ thống đường ống lên bể chứa tạo cột nước. Một van điều tiết lưu lượng được bố trí trên đoạn ống đẩy trước khi vào bể chứa. Nước từ bể chứa đổ xuống máng kính với vận tốc lớn làm xói mẫu đất được bố trí ở cuối máng kính. Để tăng ổn định của dòng chảy trước khi vào máng, một đoạn cửa vào thu hẹp dần và ngưỡng tràn được bố trí ngay trong lòng bể nước nối tiếp với máng,

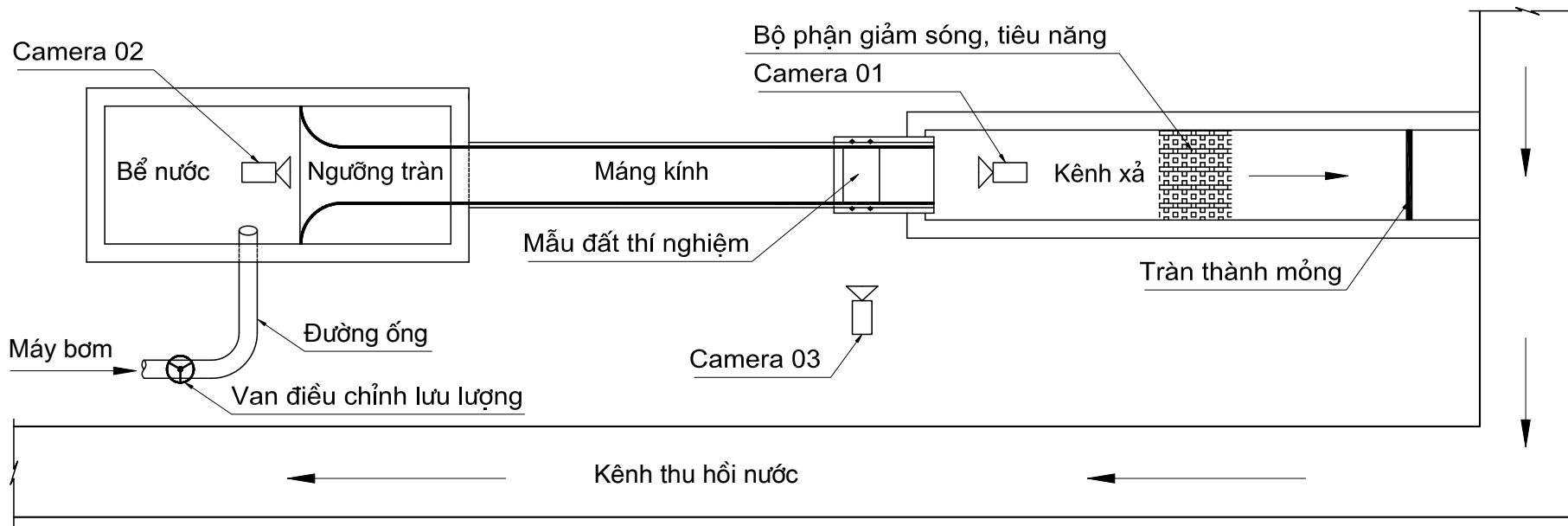
kích thước đoạn cửa vào là $L = 200\text{mm}$, $B = 760 \div 300\text{mm}$, $H = 400\text{mm}$; ngưỡng tràn có kích thước $LxBxH = 600x300x400\text{mm}$. Máng kính có kích thước $LxBxH = 3500x300x400\text{mm}$ (L là chiều dài, B là chiều rộng, H là chiều cao); đầu phía thượng lưu máng được gắn cố định với bể chứa, đầu phía hạ lưu được đỡ bằng một hệ khung đỡ có thể thay đổi độ cao để thay đổi độ dốc của máng. Ở đáy đoạn gần cuối của máng kính có khoét một lỗ khoét kích thước $LxB = 200x300\text{mm}$ là nơi để đưa mẫu đất từ dưới lên. Ống mẫu là một hộp thép rỗng hai đầu, kích thước $LxBxH = 200x300x400\text{mm}$, đầu phía trên bố trí vít để có thể nối với đáy máng kính, đầu dưới bố trí vít me để đẩy mẫu đất lên trong quá trình thí nghiệm. Để đưa nước trở lại kênh thu hồi nước về bể chứa nước ngầm, một đoạn kênh xả được xây dựng để nối hạ lưu máng với kênh thu hồi nước, trên kênh xả bố trí bộ phận cản sóng, tiêu hao năng lượng. Một đập tràn thành mỏng bố trí cuối đoạn kênh xả để đo lưu lượng trong suốt quá trình thí nghiệm.

Thiết bị đo đạc trong quá trình thí nghiệm bao gồm các thiết bị đo mực nước, thiết bị đo vận tốc dòng chảy, thiết bị đo lưu lượng, thước đo chiều cao mẫu đất, các camera quan sát, máy ảnh. Sơ đồ bố trí tổng thể các thiết bị đo đạc, quan sát trình bày trong Hình 3. 13.

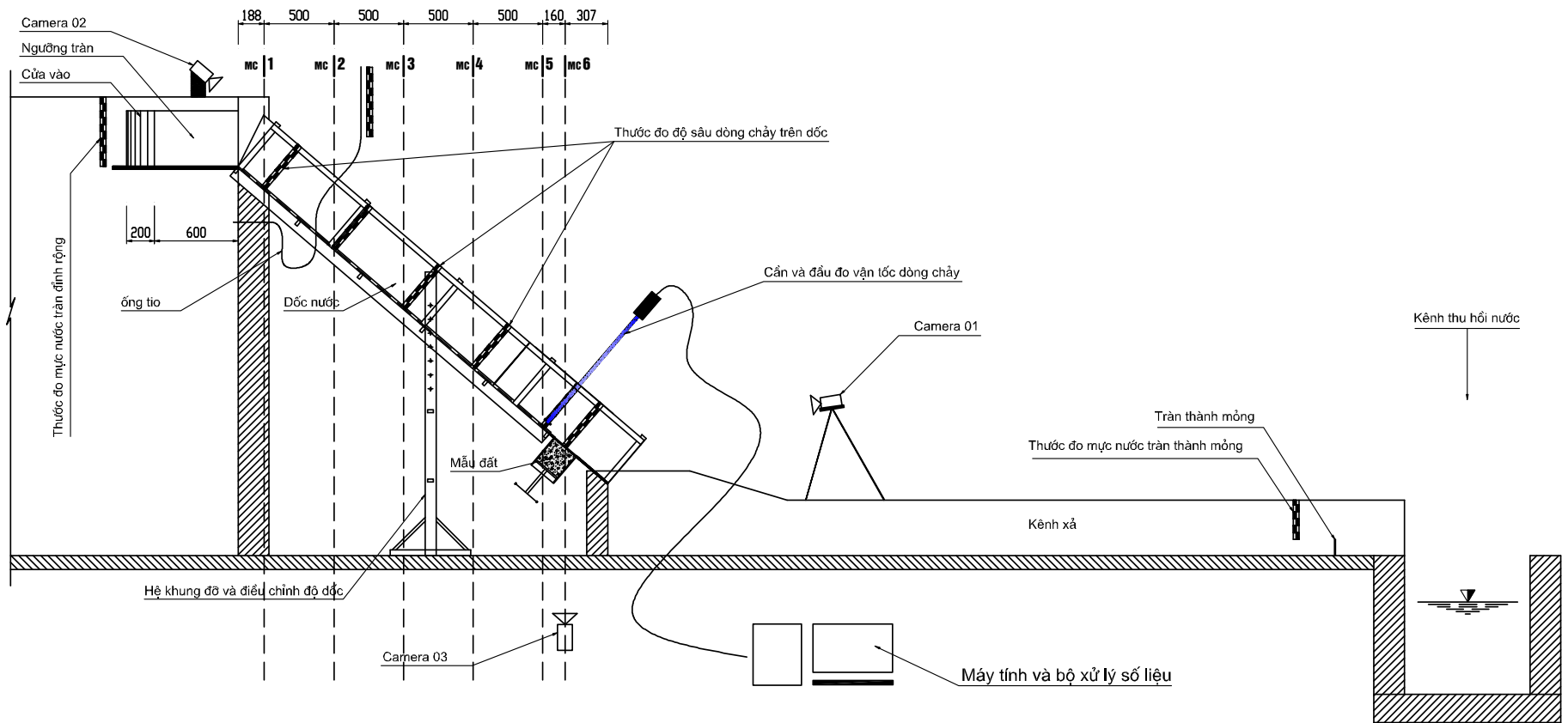
- Thiết bị đo mực nước:

Thiết bị đo mực nước là các thước đo có độ chính xác đến mm bằng mica, nhựa tổng hợp, vải.

- Đo mực nước trên tràn đỉnh rộng: Để đo mực nước tại mặt cắt ngưỡng tràn, một ống ti - ô được đặt luôn bên dưới ngưỡng để dẫn mực nước tĩnh tại mặt cắt ngưỡng tràn ra khỏi máng, đầu phía ngoài của ống ti ô được gắn vào thành ngoài của bể chứa, bên cạnh là thước mét để đọc số đo mực nước trên ngưỡng tràn. Ngoài ra, bên trong bể, phía thượng lưu cửa vào, cũng dán một thước mét đo mực nước.
- Đo mực nước trên dốc nước: Tại các mặt cắt dọc theo máng kính đều có gắn các thước mét đo chiều sâu cột nước. Trên toàn bộ chiều dài dốc bố trí 6 mặt cắt; mặt cắt MC1 tại vị trí ngưỡng tràn, mặt cắt tiếp theo cách nhau 50cm, mặt cắt MC6 bố trí tại tâm mẫu đất.



Hình 3. 12. Sơ đồ bố trí tổng thể thiết bị thí nghiệm tại khu thí nghiệm thủy lực ngoài trời của Trường Đại học Thủy lợi



Hình 3. 13. Bố trí tổng thể thiết bị đo đạc, quan sát

- Đo mực nước trên tràn thành mỏng: Phía thượng lưu tràn thành mỏng, cách ngưỡng tràn 20cm, bố trí một thước mét đo chiều sâu cột nước. Thước đo được gắn trực tiếp lên thành kênh xả.

- Thiết bị đo vận tốc:

Sử dụng máy đo lưu tốc điện tử hai chiều P-EMS, E30 do Hà Lan chế tạo; dải đo từ 0,1m/s đến 2,0m/s, sai số của thiết bị đo là 1% (đã được kiểm định bởi nhà sản xuất), chuyên chạy dữ liệu đo bằng phần mềm chuyên dụng. Bộ thí nghiệm tiêu chuẩn bao gồm đầu đo loại E – 30, bộ xử lý tín hiệu nằm trong hộp nguồn UCC, cáp nối dài 10m. Khi đo, hộp nguồn UCC được kết nối với máy tính có cài đặt phần mềm đo đạc để đọc dữ liệu từ đầu đo. Hình 3. 14 thể hiện hình ảnh máy đo lưu tốc gắn trên máng thí nghiệm.



Hình 3. 14. Bố trí thiết bị đo vận tốc dòng chảy trên dốc nước

- Thiết bị đo lưu lượng

Xây dựng một đập tràn thành mỏng ở cuối đoạn kênh dẫn đưa nước trở về máng thu hồi nước. Đập có chiều cao $P = 11,5\text{cm}$, chiều rộng $B = 49,6\text{cm}$. Một thước mét đo chiều cao cột nước trên ngưỡng tràn được gắn lên tường phía thượng lưu cách ngưỡng

tràn 60cm. Lưu lượng qua tràn cũng chính là lưu lượng qua máng kính được xác định theo công thức Rehbock theo [59], [60]:

$$Q = \frac{2}{3} C_e B \sqrt{2g} H_e^{3/2} \quad (3 - 3)$$

trong đó: $C_e = 0,602 + 0,083 \frac{H_t}{P}$ (3 - 4)

$$H_e = H_t + 0,0012 \quad (3 - 5)$$

H_t : Chiều cao cột nước trên ngưỡng tràn đọc từ thước đo, m;

P : Chiều cao ngưỡng tràn, m;

B : Bề rộng ngưỡng tràn, m.

Giới hạn thực tế áp dụng cho công thức Rehbock như sau:

$$H_t/P \leq 1,0; 0,03 \text{ m} \leq H \leq 0,75\text{m}; B \geq 0,30\text{m}; P \geq 0,10\text{m}.$$

Kiểm định thiết bị đo lưu lượng:

- Tiến hành xả với các cấp lưu lượng khác nhau trên máng kính;
- Dùng máy đo lưu tốc trung bình của dòng chảy trên mặt cắt số 2;
- Đo chiều sâu dòng chảy tại mặt cắt số 2 (đọc số liệu trên thước);
- Đo cột nước trên ngưỡng tràn thành mỏng (đọc số liệu trên thước);
- Tính toán lưu lượng qua tràn và lưu lượng trên máng kính.

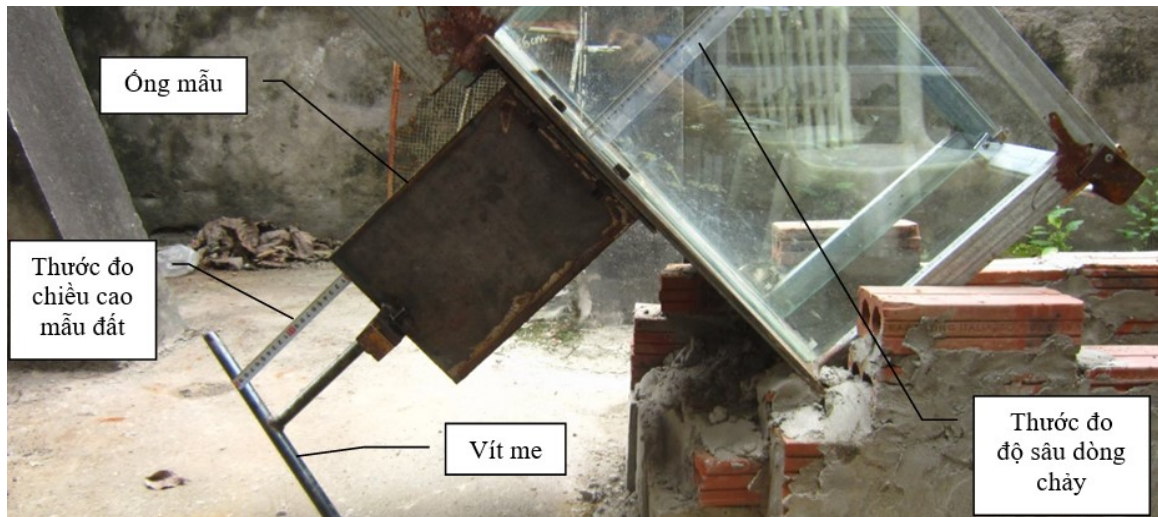
Bảng 3. 4. Kết quả tính toán lưu lượng qua tràn và máng

Cấp lưu lượng	Mực nước tại MC2	Vận tốc tại MC2	Cột nước tràn	Lưu lượng tính tại MC2	Lưu lượng tại tràn (CT Rehbock)	Sai số
	(cm)	(m/s)	(cm)	(l/s)	(l/s)	%
Cấp lưu lượng 1	7,8	1	8,400	23,400	24,136	3,146
Cấp lưu lượng 2	5,7	0,97	6,800	16,587	17,359	4,656
Cấp lưu lượng 3	4,5	0,82	5,200	11,07	11,494	3,83

Từ kết quả trên nhận thấy có thể áp dụng công thức Rebbock để tính lưu lượng qua đập tràn với sai số nhỏ hơn 5%.

- Thiết bị đo chiều cao mẫu đất

Một thước kẹp có vạch đơn vị đo theo chiều dài được gắn vào đầu vít me. Thước di chuyển lên cùng với vít me vì vậy có thể đọc số liệu về chiều sâu bị xói của mẫu đất trên đầu thước kẹp (Hình 3. 15).



Hình 3. 15. Bố trí thước đo chiều cao xói

3.4.2 Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Để xác định các tham số trong công thức tính tốc độ xói của đất (công thức 2-4), ba chuỗi thí nghiệm được thực hiện cho ba loại đất A, B và C.

Xử lý đất trước khi đầm mẫu: đất được sàng qua sàng 5mm, phơi khô, nung để xác định độ ẩm hiện tại, thêm lượng nước vừa đủ để đạt độ ẩm tối ưu; ủ đất 48 tiếng để nước thấm đều trên toàn bộ khối đất, để đảm bảo nước không bị bay hơi trong quá trình ủ, đất được đựng trong các túi giữ ẩm; trước khi đầm mẫu, cần xác định lại độ ẩm, bổ sung lượng nước cần thiết (do bị bốc hơi trong quá trình ủ) để đạt độ ẩm tối ưu.

Chế tạo mẫu: Với kích thước mẫu đất là 200x300x200mm, xác định khối lượng đất dùng cho mỗi mẫu thí nghiệm theo dung trọng của từng loại đất đã được thí nghiệm. Khối lượng đất của từng mẫu được chia thành năm phần đều nhau, ống mẫu cũng được vạch các khoảng chia tương ứng và tiến hành đầm nện để đạt kích thước đã xác định.

3.4.3 Tiến hành thí nghiệm



Hình 3. 16. Công tác chuẩn bị trước khi thí nghiệm

3.4.3.1 Đo đạc xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c

Ống mẫu có chứa đất thí nghiệm được gắn vào lỗ khoét đáy máng kính bằng các bu lông $\Phi 12$, cần đo lưu tốc được đặt tại đầu mặt cắt bố trí mẫu đất, đầu đo điện từ đặt cách đáy máng 1cm, cần được nối với máy tính trung tâm để đọc giá trị vận tốc sát đáy của dòng chảy tại mặt cắt mẫu. Tiến hành xả nước với vận tốc dòng chảy tăng dần bằng cách điều khiển độ mở van, quan sát bằng mắt và camera đến khi nhận thấy mẫu đất bắt đầu bị xói (độ đục của nước thay đổi), đo vận tốc dòng chảy tại thời điểm này và tính toán được giá trị ứng suất cắt tới hạn τ_c theo công thức (2-5):

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho v^2 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Giá trị của hệ số ma sát f phụ thuộc vào tính chất bề mặt của mẫu đất, để xác định chính xác f thì cần phải thông qua thí nghiệm mẫu đất trong phòng. Ở đây, lấy gần đúng $f=0,02$ theo số liệu thí nghiệm của Y.H.Chen [25].

Bảng 3. 5. Bảng thông số xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c của đất A

Giá trị đo Mẫu đất	Cột nước h	Vận tốc V	Ứng suất τ_c
	cm	m/s	N/m ²
Mẫu 1-1	3,20	0,49	6,003
Mẫu 1-2	3,15	0,48	5,760
Mẫu 1-3	3,20	0,48	5,760
Mẫu 1-4	3,20	0,49	6,003
Mẫu 1-5	3,25	0,50	6,250
Trung bình			5,955

Bảng 3. 6. Bảng thông số xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c của đất B

Giá trị đo Mẫu đất	Cột nước h	Vận tốc V	Ứng suất τ_c
	cm	m/s	N/m ²
Mẫu 2-1	2,85	0,43	4,623
Mẫu 2-2	2,90	0,44	4,840
Mẫu 2-3	2,90	0,44	4,840
Mẫu 2-4	2,90	0,43	4,623
Mẫu 2-5	2,95	0,45	5,063
Trung bình			4,798

Bảng 3. 7. Bảng thông số xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c của đất C

Giá trị đo Mẫu đất	Cột nước h	Vận tốc V	Ứng suất τ_c
	cm	m/s	N/m ²
Mẫu 3-1	2,70	0,40	4,000
Mẫu 3-2	2,75	0,41	4,203
Mẫu 3-3	2,70	0,40	4,000
Mẫu 3-4	2,70	0,39	3,803
Mẫu 3-5	2,60	0,39	3,803
Trung bình			3,962

Kết quả đo đạc và số liệu tính toán thể hiện trong Bảng 3. 5, Bảng 3. 6, Bảng 3. 7. Giá trị ứng suất cắt tới hạn τ_c của từng loại đất lấy theo giá trị trung bình của năm mẫu đo đạc được.



Hình 3. 17. Thí nghiệm đo ứng suất cắt tới hạn τ_c

3.4.3.2 Đo đặc tốc độ xói

Lắp ống chứa mẫu đất thí nghiệm lên máng kính, bề mặt mẫu được bảo vệ bằng một tấm nhựa dẻo để đảm bảo cho mẫu không bị xói cho đến khi thí nghiệm bắt đầu. Sau khi điều chỉnh lưu lượng về đúng các cấp lưu lượng đã định, lúc này tiến hành mở tấm nhựa dẻo trên bề mặt mẫu để đo tốc độ xói. Mẫu đất được đẩy lên bằng hệ thống vít me đảm bảo bề mặt mẫu luôn luôn bằng bề mặt đáy máng. Sau mỗi phút lại đọc số liệu về chiều cao còn lại của mẫu trên thước kẹp gắn trên vít me. Với mỗi loại đất, tiến hành thí nghiệm đo tốc độ xói với 5 cấp lưu lượng thay đổi. Kết quả đo đạc thể hiện chi tiết trong phụ lục B.

Theo [28] có công thức tính tốc độ xói từ kết quả đo đạc:

$$E = \frac{\Delta z}{\Delta t}(1 - r) = \dot{z}(1 - r) \quad (3 - 6)$$

với: E là tốc độ xói của đất (cm/s)

Δz là chiều cao bị xói của mẫu (cm) tính trung bình cho 10 phút đầu của thí nghiệm.

Δt là thời gian (s)

r là độ rỗng của mẫu đất.



Hình 3. 18. Thí nghiệm đo tốc độ xói



Hình 3. 19. Mẫu đất sau khi thí nghiệm

Kết quả tính toán tốc độ xói theo công thức (3-6) của ba loại đất thí nghiệm thể hiện trong các bảng tính Bảng 3. 8, Bảng 3. 9, Bảng 3. 10.

Bảng 3. 8. Bảng kết quả đo tốc độ xói đất A

Cột nước tràn H	Lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Vận tốc V	Ứng suất τ	Tốc độ xói E	Hiệu $\tau - \tau_c$
(cm)	(l/s)	(cm)	(m/s)	N/m ²	(cm/s)	N/m ²
3,5	6,33	3,6	0,58	8,410	0,0018	2,455
5,0	10,83	5,6	0,65	10,563	0,0044	4,608
6,5	16,19	7,6	0,71	12,603	0,0065	6,648
7,5	20,21	8,5	0,79	15,603	0,0095	9,648
9,0	26,90	10,7	0,84	17,640	0,0120	11,685

Bảng 3. 9. Bảng kết quả đo tốc độ xói đất B

Cột nước tràn H	Lưu lượng Q	Chiều sâu nước h	Vận tốc V	Ứng suất τ	Tốc độ xói E	Hiệu $\tau - \tau_c$
(cm)	(l/s)	(cm)	(m/s)	N/m ²	(cm/s)	N/m ²
3,0	5,03	3,4	0,50	6,250	0,0017	1,453
4,5	9,23	5,0	0,61	9,303	0,0046	4,505
6,0	14,31	7,1	0,67	11,223	0,0068	6,425
7,0	18,16	8,1	0,75	14,063	0,0105	9,265
8,5	24,59	10,0	0,82	16,810	0,0130	12,013

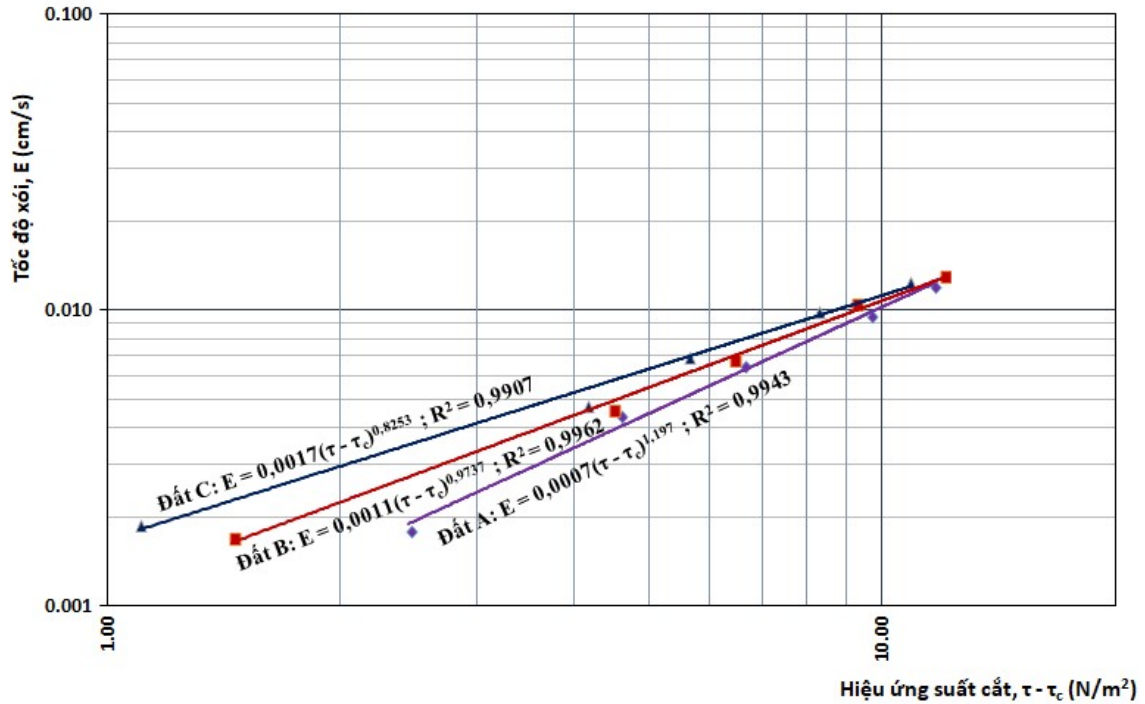
Bảng 3. 10. Bảng kết quả đo tốc độ xói đất C

Cột nước tràn H	Lưu lượng Q	Chiều sâu nước h	Vận tốc V	Ứng suất τ	Tốc độ xói E	Hiệu $\tau - \tau_c$
(cm)	(l/s)	(cm)	(m/s)	N/m ²	(cm/s)	N/m ²
2,5	3,85	2,85	0,45	5,063	0,0019	1,101
4,0	7,73	4,52	0,57	8,123	0,0048	4,161
5,5	12,52	6,73	0,62	9,610	0,0070	5,649
6,5	16,19	7,71	0,70	12,250	0,0099	8,289
8,0	22,36	9,68	0,77	14,823	0,0125	10,861

3.4.4 Xây dựng công thức thực nghiệm

Xây dựng công thức tính tốc độ xói cho ba loại đất thí nghiệm theo các bước sau:

- Xác định ứng suất cắt tới hạn của đất bằng thực nghiệm (xem kết quả Bảng 3. 5, Bảng 3. 6, Bảng 3. 7);
- Xác định tốc độ xói của mẫu đất ứng với các cấp lưu lượng thay đổi (từ kết quả Bảng 3. 8, Bảng 3. 9, Bảng 3. 10);
- Xác định ứng suất cắt τ sinh ra bởi dòng chảy tại vị trí đặt mẫu theo công thức (2-5) (Bảng 3. 8, Bảng 3. 9, Bảng 3. 10);
- Vẽ đường cong quan hệ thực nghiệm của tốc độ xói E với hiệu $\tau - \tau_c$ theo phương pháp đường hồi qui phi tuyến. Từ kết quả thể hiện trên Hình 3. 20 xác định được hệ số K_d và α cho mỗi loại đất.



Hình 3. 20. Đường thực nghiệm quan hệ giữa tốc độ xói E và hiệu ứng suất $\tau - \tau_c$ của 3 loại đất

Từ Hình 3. 20 đề nghị các công thức tính tốc độ xói cho đất như sau:

- Với đất A – đất loại I có tính dính lớn:

$$E = 0,0007 (\tau - 5,955)^{1,197} \quad (3 - 7)$$

- Với đất B – đất loại II có tính dính trung bình:

$$E = 0,0011 (\tau - 4,798)^{0,9737} \quad (3 - 8)$$

- Với đất C – đất loại III có tính dính nhỏ:

$$E = 0,0017 (\tau - 3,962)^{0,8253} \quad (3 - 9)$$

Hệ số tương quan của cả ba công thức $R^2 \approx 1$ cho thấy tính chính xác của việc lựa chọn dạng hàm thực nghiệm.

Nhận thấy rằng cả ba công thức đều có hệ số mũ $\alpha \approx 1$, giá trị này khá phù hợp với nhiều nghiên cứu trước đây đều lấy α gần đúng bằng 1 [19][21][28].

3.5 Xây dựng biểu đồ xác định thời gian bắt đầu vỡ của đập (T_v) khi nước tràn đỉnh

3.5.1 Nghiên cứu ảnh hưởng của độ dốc mái hạ lưu đến thời gian bắt đầu vỡ đập

Dùng chương trình EMBANK và công thức tính tốc độ xói cho đất B để tính toán xác định T_v của một số đập có các thông số :

- Đất đắp đập: đất B có công thức tính tốc độ xói (3-8): $E = 0,0011 (\tau - 4,798)^{0,9737}$;

- Mái hạ lưu trồng cỏ với chất lượng cỏ trung bình, từ công thức (3 -8) biến đổi theo [25], [26] có công thức tính tốc độ xói:

$$E = 0,0011 (\tau - 6,717)^{0,9737} \quad (3-10)$$

- Chiều cao đập $H = 10\text{m}$; bề rộng đỉnh đập $b = 6\text{m}$; đập có kết cấu cứng bảo vệ mái thượng lưu và đỉnh đập dày 15cm ;

- Mái thượng lưu không thay đổi $m_1 = 3$; mái hạ lưu có độ dốc thay đổi cho các trường hợp $m_2 = 2$; $m_2 = 2,5$; $m_2 = 3$; $m_2 = 5$; $m_2 = 10$ và $m_2 = 15$;

- Chiều sâu tràn nước $H_t = 0,2\text{m}$; $H_t = 0,6\text{m}$; $H_t = 1,0\text{m}$;

Kết quả tính toán được tập hợp trong Bảng 3. 11.

Bảng 3. 11. Thống kê kết quả tính toán T_v khi nước tràn đỉnh

TT	Hệ số mái m_2	T_v (phút)		
		$H_t = 0,2\text{m}$	$H_t = 0,6\text{m}$	$H_t = 1,0\text{m}$
1	2	168	132	78
2	2,5	168	132	78
3	3	168	132	78
4	5	168	132	78
5	10	198	156	90
6	15	198	156	90

Từ kết quả tính toán nhận thấy rằng khi độ dốc mái hạ lưu thay đổi trong khoảng $m_2 = 2 \div 5$ thì độ dốc mái không ảnh hưởng đến T_v , khi $m_2 > 5$ lúc này T_v mới có sự thay đổi (vì khi độ dốc mái hạ lưu lớn ($m = 2 \div 5$, hay $i = 0,5 \div 0,2$), độ dốc này lớn hơn độ dốc phân giới nên dòng chảy nhanh chóng chuyển sang trạng thái chảy xiết ngay tại vị trí lân cận điểm mép hạ lưu đỉnh đập. Vận tốc dòng chảy nhanh chóng đạt giá trị lớn

nhất và gây xói trên toàn bộ mái hạ lưu. Vận tốc dòng đều tính theo công thức $V = C\sqrt{Ri}$, có thể thấy rằng V tỷ lệ với lũy thừa bậc 0,5 của i nên trong phạm vi tính toán độ dốc mái có ảnh hưởng rất nhỏ đến thời gian bắt đầu vỡ đập, vì vậy trong kết quả tính toán của EMBANK đã cho thấy thời gian bắt đầu vỡ đập là không đổi khi m thay đổi từ 2 đến 5). Với các đập đất ở Việt Nam, độ dốc mái hạ lưu thường chỉ thay đổi trong phạm vi 2 ÷ 5, vì vậy mà có thể bỏ qua sự ảnh hưởng của độ dốc mái hạ lưu đến thời gian bắt đầu vỡ của đập khi nước tràn đỉnh.

3.5.2 Xây dựng đô thị

Dùng chương trình EMBANK tính toán xác định T_v cho các trường hợp sau:

Các đập đều có tấm bê tông dày 15cm bảo vệ đỉnh, mái hạ lưu trồng cỏ với chất lượng trung bình.

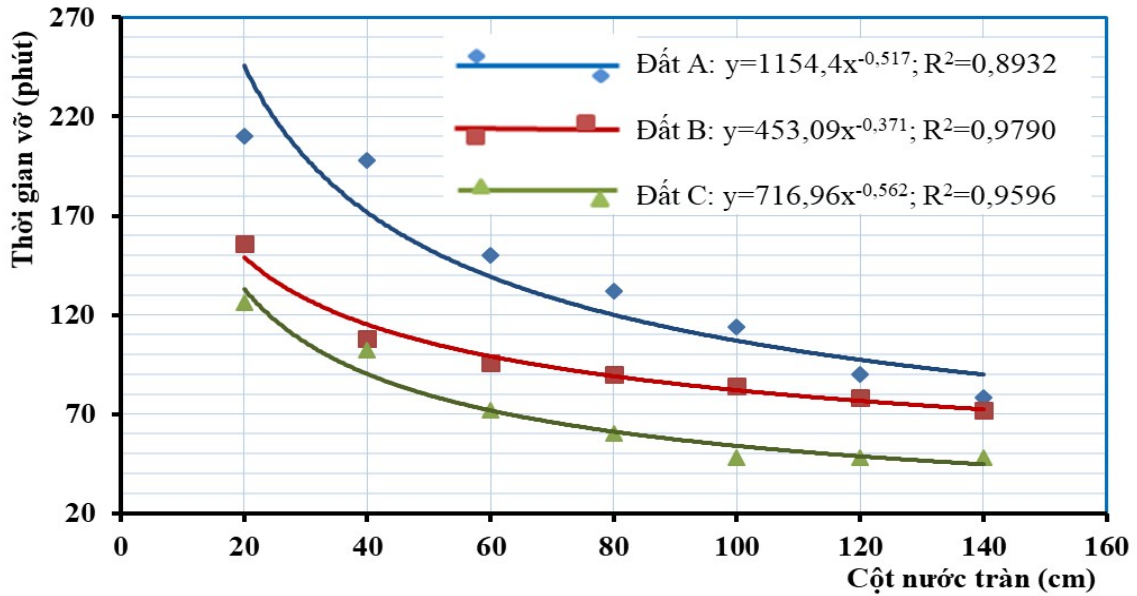
Cột nước tràn trên đỉnh đập thay đổi từ $H_t = 0,2 \div 1,4\text{m}$ (dựa theo thống kê từ thực tế các cột nước tràn đã xảy ra đối với các đập đất ở Việt Nam)

Bảng 3. 12. Các trường hợp tính toán

TT	Chiều cao đập H (m)	Mái TL	Mái HL	Đất A	Đất B	Đất C
1	5	3	2,5	x	x	x
2	10	3	2,5	x	x	x
3	15	3	2,5	x	x	x
4	20	3	2,5	x	x	x

Bảng 3. 13. Thời gian bắt đầu vỡ đập tính toán cho trường hợp đập cao 5m

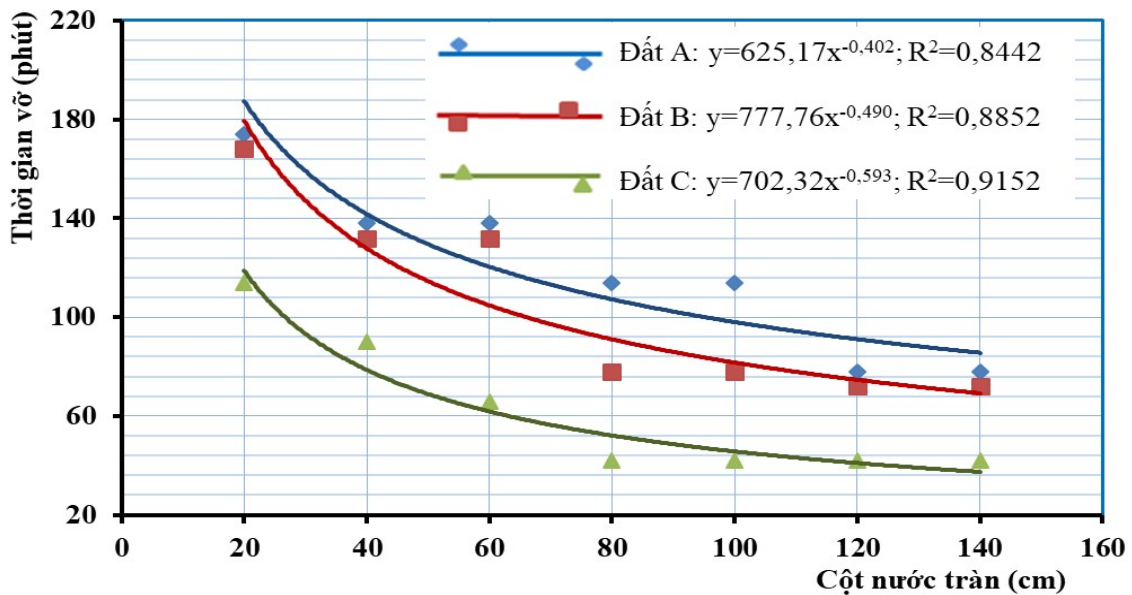
Cột nước tràn Loại đất	T_v (phút)						
	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	140 cm
Đất loại I	210	198	150	132	114	90	78
Đất loại II	156	108	96	90	84	78	72
Đất loại III	126	102	72	60	48	48	48



Hình 3. 21. Đồ thị xác định T_v khi nước tràn đỉnh (trường hợp $H = 5m$)

Bảng 3. 14. Thời gian bắt đầu vỡ đập tính toán cho trường hợp đập cao 10m

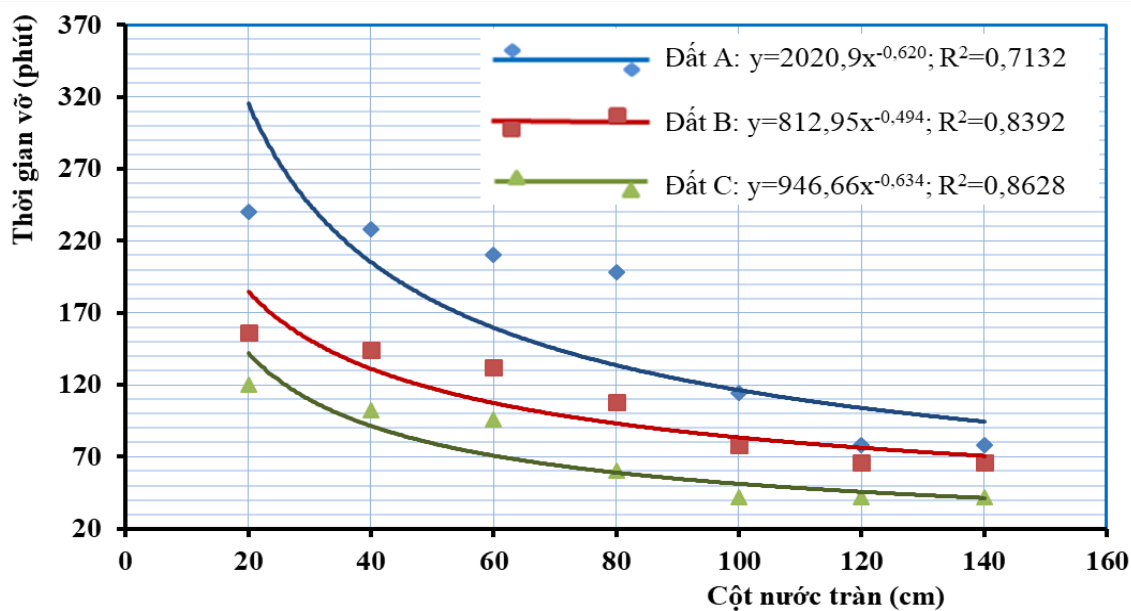
Cột nước tràn	T_v (phút)						
	20	40	60	80	100	120	140
Loại đất	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Đất loại I	174	138	138	114	114	78	78
Đất loại II	168	132	132	78	78	72	72
Đất loại III	114	90	66	42	42	42	42



Hình 3. 22. Đồ thị xác định T_v khi nước tràn đỉnh (trường hợp $H = 10m$)

Bảng 3. 15. Thời gian bắt đầu vỡ đập tính toán cho trường hợp đập cao 15m

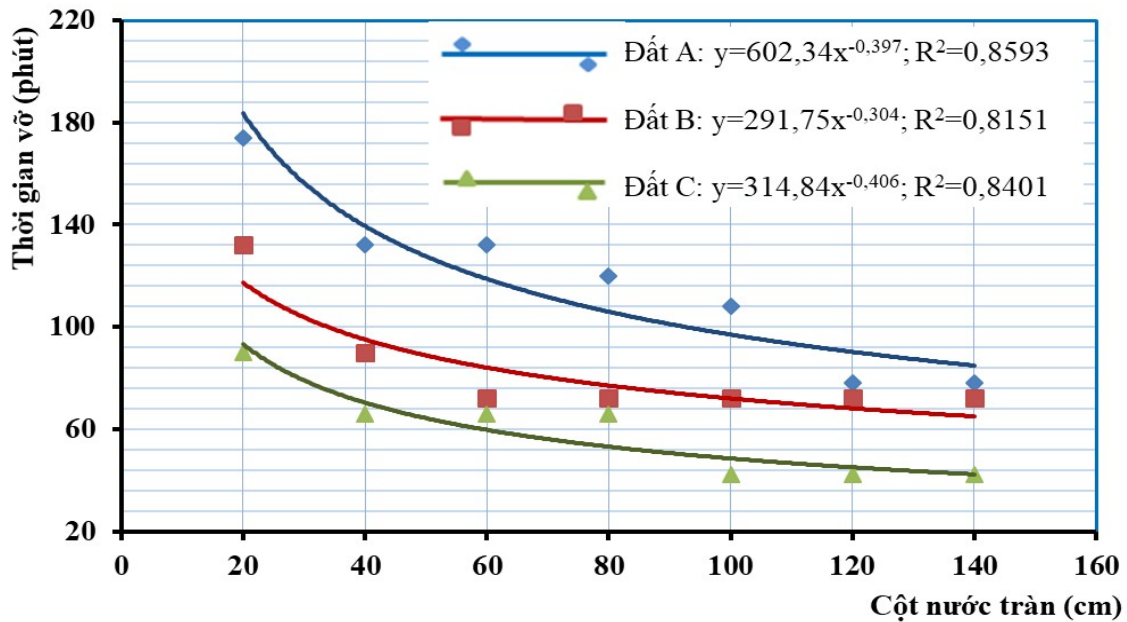
Cột nước tràn	T _v (phút)						
	20	40	60	80	100	120	140
Loại đất	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Đất loại I	240	228	210	198	114	78	78
Đất loại II	156	144	132	108	78	66	66
Đất loại III	120	102	96	60	42	42	42



Hình 3. 23. Đồ thị xác định T_v khi nước tràn đỉnh (trường hợp H = 15m)

Bảng 3. 16. Thời gian bắt đầu vỡ đập tính toán cho trường hợp đập cao 20m

Cột nước tràn	T _v (phút)						
	20	40	60	80	100	120	140
Loại đất	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Đất loại I	174	132	132	120	108	78	78
Đất loại II	132	90	72	72	72	72	72
Đất loại III	90	66	66	66	42	42	42



Hình 3. 24. Đồ thị xác định T_v khi nước tràn đỉnh (trường hợp $H = 20\text{m}$)

Kết quả tính toán T_v thể hiện trên Bảng 3. 13, Bảng 3. 14,)

Bảng 3. 15, Bảng 3. 16. Từ T_v tính toán được, thành lập các đồ thị xác định thời gian bắt đầu vỡ của đập quan hệ với cột nước tràn đỉnh (Đồ thị Hình 3. 21, Hình 3. 22, Hình 3. 23 và Hình 3. 24).

Từ các đồ thị nhận thấy rằng T_v có xu hướng chung là giảm dần (tức là đập bị vỡ nhanh hơn) khi cột nước tràn tăng, điều này đúng cho tất cả các chiều cao đập và ba loại đất tính toán. Khi cột nước tràn lớn ($H_t > 100 \div 120\text{cm}$), mức độ ảnh hưởng của cột nước tràn đến T_v giảm dần (các đường cong trên các đồ thị đều có xu hướng tiệm cận với đường nằm ngang khi cột nước tràn tiếp tục tăng). Đập đắp bằng đất loại I (đất có tính dính lớn nhất) thì T_v lớn nhất, ngược lại đập đắp bằng đất loại III (đất có tính dính nhỏ nhất) thì T_v nhỏ nhất.

3.6 Kết luận chương 3

Từ kết quả thống kê đất của một số công trình thực tế đã xây dựng ở Việt Nam, tác giả đã phân đất thành ba nhóm theo sự thay đổi của lực dính. Với mỗi nhóm đất trên, tiến hành lấy mẫu một đất đặc trưng trong nhóm: đất A (nhóm I), đất B (nhóm II), đất C (nhóm III) và tiến hành thí nghiệm xác định một số tính chất cơ bản của từng loại đất.

Từ kết quả thí nghiệm nghiên cứu cơ chế vỡ của đập (đập bằng đất A và đất C) khi nước tràn đỉnh, tác giả thấy rằng những đập đắp bằng đất dính nhiều, quá trình xói thường bắt đầu ở điểm dưới chân hạ lưu đập và sau đó phát triển dần lên đỉnh, cơ chế vỡ ban đầu là xói bề mặt, sau đó là quá trình hình thành vết cắt trong thân đập dẫn đến vỡ đập; với những đập đắp bằng đất ít dính, xói là quá trình bào mòn dần trên toàn bộ mái hạ lưu và đỉnh đập, cơ chế vỡ đập là cơ chế xói bề mặt.

Tác giả đã tiến hành làm thí nghiệm xói mẫu đất theo hai giai đoạn:

Giai đoạn I: chuỗi thí nghiệm xác định ứng suất cắt tới hạn τ_c của 3 loại đất;

Giai đoạn II: chuỗi thí nghiệm xác định công thức tính tốc độ xói của 3 loại đất.

Kết quả thí nghiệm đã xác định được ứng suất cắt tới hạn τ_c và công thức thực nghiệm tính tốc độ xói của 3 loại đất như các công thức (3-7), (3-8), (3-9). Các công thức này có thể làm dữ liệu đầu vào cho các chương trình tính toán vỡ đập do nước tràn đỉnh như WinDAM hay EMBANK.

Tính toán thời gian vỡ của một số con đập cao 10m đắp bằng đất B, thay đổi hệ số mái hạ lưu m_2 và nhận thấy rằng khi $m_2 = 2 \div 5$ thì hệ số mái m_2 không làm ảnh hưởng đến thời gian bắt đầu vỡ của đập.

Sử dụng chương trình EMBANK để tính toán, đã xây dựng các biểu đồ xác định thời gian bắt đầu vỡ đập phụ thuộc vào cột nước tràn và loại đất đắp đập, kết quả thể hiện trên Hình 3. 21, Hình 3. 22, Hình 3. 23, Hình 3. 24. Các biểu đồ này được dùng để xác định thời gian bắt đầu vỡ đập khi nước tràn đỉnh với các cột nước tràn khác nhau, chiều cao đập khác nhau và đất đắp đập thay đổi (trong phạm vi ba loại đất đã thí nghiệm).

CHƯƠNG 4 ÁP DỤNG MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH VỠ CỦA ĐẬP ĐẦM HÀ ĐỘNG – QUẢNG NINH KHI NƯỚC TRÀN ĐỈNH

4.1 Giới thiệu công trình

Đầu mối hồ Đầm Hà Động được xây dựng trên sông Đầm Hà, tại xã Quảng Lợi, huyện Đầm Hà, tỉnh Quảng Ninh. Hồ có nhiệm vụ cung cấp nước tưới cho 3500ha đất canh tác, tạo nguồn cấp nước sinh hoạt cho 29.000 người, cắt chập lũ, nuôi trồng thủy sản, cải tạo khí hậu, tạo tiềm năng du lịch. Diện tích lưu vực 68,5km², cao trình đáy hồ: +33,0m; cao trình mực nước chết (MNC) +47,5m; dung tích chết 2013.10³m³ ; cao trình mực nước dâng bình thường (MNDBT) +60,7m; dung tích hữu ích 12,3 triệu m³; cao trình mực nước lũ thiết kế +62,69m; cao trình mực nước lũ kiểm tra +63,99m. Cụm công trình đầu mối gồm: một đập chính, 3 đập phụ, một tràn xả lũ, cống lấy nước, khu nhà vận hành và quản lý [61].



Hình 4. 1. Toàn cảnh hồ đập Đầm Hà Động (thời điểm chưa xảy ra sự cố)

Đập chính là loại đập đất hai khối; chân khay cắm qua tầng cuội sỏi để chống thấm, thoát nước ống khói; bảo vệ mái thượng lưu đập là các tấm bê tông đúc sẵn, bảo vệ

mái hạ là trồng cỏ. Đỉnh đập ở cao trình +64,5m, rộng 6m, dài 244m; chiều cao đập ở vị trí hồ sâu nhất là 31,5m; trên đỉnh đập có tường chắn sóng cao 0,8m. Các đập phụ đều là đập đất nhiều khối [61].



Hình 4. 2. Hạ lưu tràn xả lũ

Tràn xả lũ đặt ở vai trái đập. Ngưỡng tràn thấp hơn MNDBT 6,7m. Tràn ngưỡng thực dụng gồm 3 cửa, mỗi cửa rộng 9m; van cung đóng mở bằng xi lanh thủy lực; tiêu năng bằng bể tường kết hợp dài 40m; chiều sâu bể 2,0m, tường 1 cao 0,8m, tường 2 cao 1,4m; sân sau dài 30m [61].

Công lấy nước có áp, phía thượng lưu là hình hộp, phía hạ lưu là ống tròn bằng thép bọc bê tông cốt thép. Cao trình đáy cửa vào thấp hơn MNC là 3m, lưu lượng thiết kế qua công 4,9m³/s được điều chỉnh bằng van côn ở hạ lưu [61].

4.2 Sự cố xói mái đập chính và vỡ đập phụ số 2 mùa lũ năm 2014

4.2.1 Nguyên nhân sự cố

Trong số các nguyên nhân được đề cập trong báo cáo kiểm định thì nguyên nhân quan trọng nhất là do lũ lớn đồng thời bị kẹt một cửa tràn: Do mưa lớn trên thượng nguồn, lưu lượng đỉnh lũ đã vượt lũ kiểm tra ($Q_{kt} = 2068\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{30-10-2014} = 2120\text{m}^3/\text{s}$), kết hợp với kẹt một cửa tràn do đứt ống dẫn dầu vào xi lanh thủy lực tại vị trí nối ống nên nước đã tràn qua đỉnh đập, tràn qua tường chắn sóng chảy về hạ du gây xói mòn thân

đập chính và các đập phụ [62]. Hậu quả là đập phụ số 2 bị vỡ và phá huỷ hoàn toàn, các đập khác bị hư hỏng nặng.

4.2.2 Thời điểm, diễn biến lũ gây sự cố công trình

Theo báo cáo kiểm định nguyên nhân sự cố hồ chứa nước Đầm Hà Động – xã Quảng Lợi huyện Đầm Hà tỉnh Quảng Ninh [62], sau trận mưa lớn trên thượng nguồn sông Đầm Hà đêm hôm trước, vào lúc 7h sáng ngày 30/10/2014, lũ về tràn đập Đầm Hà Động, gây vỡ đập phụ 2, hư hại nặng đập chính. Nước đổ xuống hạ du đã gây thiệt hại lớn về sản xuất, đường giao thông và nhất là ngập nặng tại thị trấn Đầm Hà, không có thiệt hại về người.

Thời điểm và diễn biến trận lũ ngày 30-10-2014 tóm tắt như sau: (theo báo cáo của nhân viên vận hành có xác nhận của Trung tâm Thủy lợi - Giao thông - Môi trường huyện Đầm Hà) [62].

- Thời điểm bắt đầu lũ vào khoảng 2h sáng ngày 30-10-2014, trước khi có lũ mực nước hồ khoảng 59,5m, cửa van số 2 được mở 0,5m.
- Đến 2h30 lũ có diễn biến tăng mực nước hồ khoảng 59,7m, cửa tràn số 02 được mở lên 1m.
- Đến 3h mực nước hồ khoảng 60,3m, tiếp tục mở cửa tràn số 01 và số 03 lên 0,5m.
- Đến 4h mực nước hồ khoảng 61m, tiếp tục mở cửa tràn số 01 lên 2,5m, số 2 được mở hết. Cửa tràn số 3 gặp sự cố đóng lại, tiếp tục mở cửa số 1 lên hết tầm.
- Đến 5h30', mực nước bằng cao trình đỉnh đập 64,5m. Sau đó nước bắt đầu tràn qua đỉnh đập, tràn qua đỉnh tường chắn sóng đổ xuống hạ lưu làm bào mòn thân các đập, đặc biệt là phía hai vai.
- Đến 7h đập phụ số 02 bị vỡ hoàn toàn, đập chính và các đập phụ khác tuy không bị vỡ nhưng cũng bị hư hỏng nặng, mực nước hồ hạ xuống nhanh.

4.2.3 Hiện trạng công trình sau lũ

Đập chính: toàn bộ mái hạ lưu bị nước tràn qua, xói mòn, mức độ tăng dần từ đỉnh đập xuống chân đập phía hạ lưu. Trung bình xói sâu khoảng 1,5m. cục bộ có chỗ sâu 3,5m

tạo thành các hàm ếch gây mất ổn định. Đống đá tiêu nước gần như hoàn toàn bị phá hỏng, phần chân đập nước xói sâu để lộ các lớp đất đắp, lớp lọc ngược. Vai trái và vai phải đập phía hạ lưu bị xói lở nghiêm trọng do dòng nước tập trung qua hai cửa khẩu và đường ven hồ. Mặt cắt đập bị phá hoại khoảng 1/3 phía hạ lưu.

Đập phụ số 1: bị hư hỏng nhẹ, chủ yếu bị sạt lở sâu ở hai vai đập và ở chân đập, đá lát ốp mái hạ lưu bị xói trôi.



Hình 4. 3. Đập chính bị hư hại nặng do nước tràn qua

Đập phụ số 2: bị vỡ hoàn toàn, nước làm xói sâu xuống nền, phá huỷ hạ du, hình thành dòng chảy nổi từ sau đập phụ số 2 đến đuôi tràn, đất đá bồi lấp dọc theo dòng chảy.

Đập phụ số 3a, 3b, 4: tình trạng xói lở tương tự đập chính, phần hạ lưu đập bị xói sâu khoảng 1-2m, chân đập bị xói sâu dạng hàm ếch, đá lát ốp mái bị xói rửa trôi.

Cống lấy nước: phía hạ lưu cống bị xói, mức độ tăng dần từ thượng lưu về hạ lưu, khu vực nhà tháp van bị xói sâu dưới các tấm bê tông gây đổ sập, phần xây đá bị phá huỷ.

Đường quản lý: do nước tràn qua đỉnh đập, theo rãnh tiêu ven đường với lưu lượng lớn nên đã xói, phá huỷ cắt đứt đường lên đập.



Hình 4. 4. Đập phụ số 2 bị vỡ

Đập tràn: bị hư hỏng nhẹ, chủ yếu bị xói trôi các tấm bê tông lát phía hai bên tường cánh hạ lưu, sạt trượt dạng hàm ếch vai phải tràn, cửa tràn số 3 bị kẹt do đứt đường ống dầu xi lanh thủy lực không mở được cửa.

Đập dâng Bình Hồ: nằm tại thượng lưu lòng hồ, cách đập chính khoảng 4,5km. Sau lũ phần đá xây phía bờ phải bê tiêu năng bị hư hỏng khoảng 3,2m, phần đá xây lát mái bờ trái bị xói trôi một đoạn khoảng 15m, xói dạng hàm ếch sâu vào đường. Sân sau bê tiêu năng bằng đá xây đã bị xói nhiều chỗ.

4.3 Tính toán xói và mô phỏng quá trình vỡ đập

4.3.1 Mặt cắt tính toán

Mặt cắt đập chính tại vị trí bị xói sâu nhất và mặt cắt đập phụ số 2 tại vị trí bị vỡ lấy theo hồ sơ thiết kế của Công ty Tư vấn và Chuyển giao công nghệ, Trường ĐH Thủy lợi [61].

- Đập chính:

Thân đập đắp bằng hai khối : khối I là đất lớp 1a và lớp 2c khai thác tại bãi vật liệu A1; khối II là đất lớp 1b và 1c khai thác tại bãi vật liệu A1. Nhìn chung hai khối này đất có tính chất gần tương tự và lấy chung một công thức tính tốc độ xói của đất B (đất có tính dính trung bình):

$$E = 0.0011(\tau - 4,798)^{0,9737} \quad (3-8)$$

Đánh giá mái hạ lưu các đập của Đầm Hà Động được trồng cỏ với chất lượng trung bình. Theo Y.H.Chen [25] và H.M.Rasel [26], công thức tính tốc độ xói của đất cỏ:

$$E = 0.0011(\tau - 6,717)^{0,9737} \quad (3-10)$$

Đỉnh đập được bảo vệ bằng tấm bê tông có chiều dày 14cm, tường chắn sóng cao 0,8m.

- Đập phụ số 2:

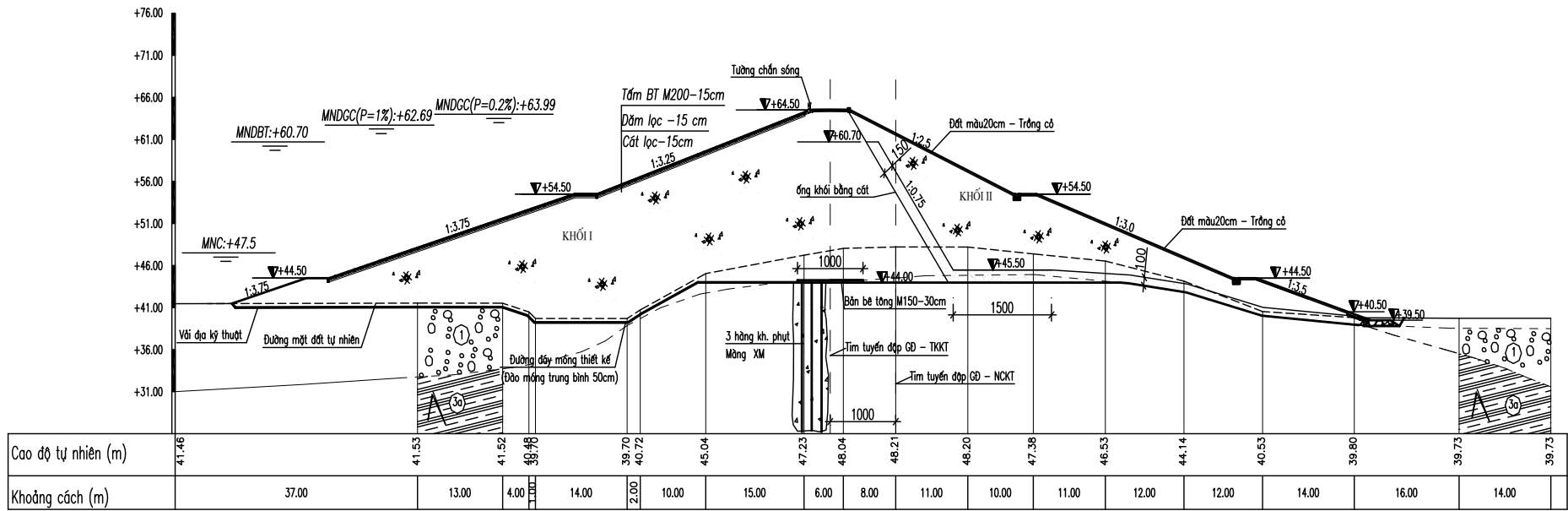
Thân đập đắp bằng hai khối: khối I là đất lớp 2d bãi vật liệu A3 và đất lớp 1a bãi vật liệu A4, hai loại đất này có tính chất tương tự như đất B và cũng lấy chung công thức tính tốc độ xói (3-8); khối II là đất C có tính dính thấp, công thức tính tốc độ xói:

$$E = 0.0017(\tau - 3,962)^{0,8253} \quad (3-9)$$

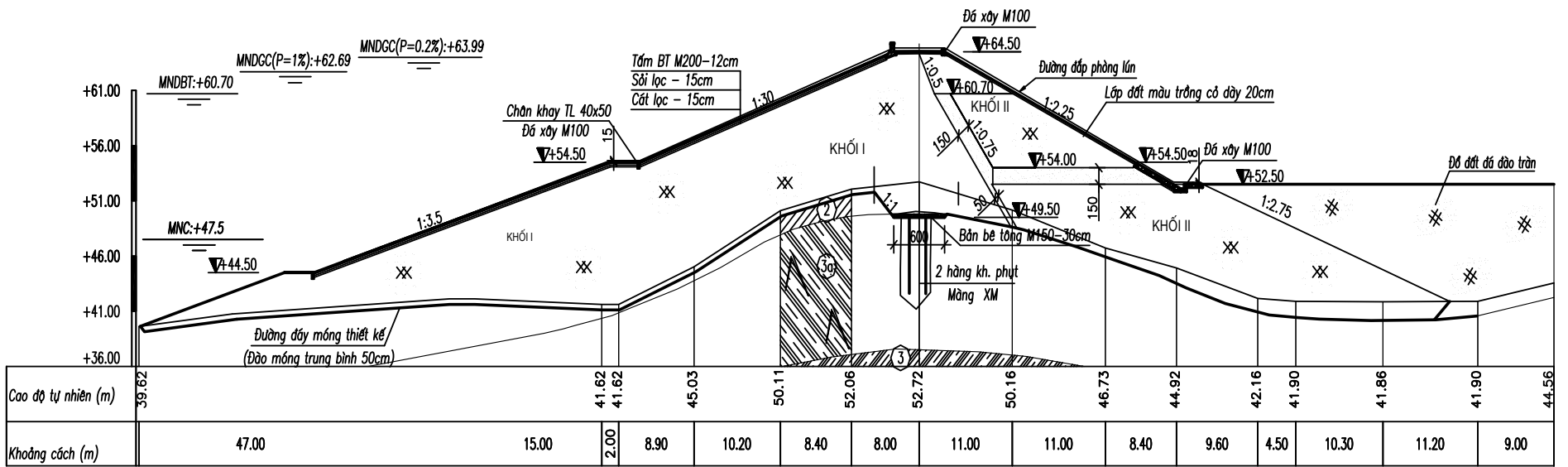
Mái hạ lưu trồng cỏ chất lượng trung bình, công thức tính tốc độ xói của đất cỏ:

$$E = 0.0017(\tau - 5,547)^{0,8253} \quad (4-1)$$

Đỉnh đập phụ có cấu tạo giống như đập chính.



Hình 4. 5 Mặt cắt đập chính tại vị trí xói sâu nhất



Hình 4. 6. Mặt cắt đập phụ số 2 tại vị trí vỡ

4.3.2 Mục nước tính toán

Căn cứ vào số cập nhật và tính toán lưu lượng xả lũ Hồ Đàm Hà Động ngày 30 tháng 10 năm 2014, thời gian từ 02 giờ đến 4 giờ 20 phút ngày 30-10-2014, diễn biến mực nước trong hồ cụ thể như sau [62]:

Lúc 2 giờ: $Z_{\text{hồ}} = 59,5 \text{ m}$

Lúc 2 giờ 30 phút: $Z_{\text{hồ}} = 59,7 \text{ m}$

Lúc 3 giờ: $Z_{\text{hồ}} = 60,3 \text{ m}$

Lúc 4 giờ: $Z_{\text{hồ}} = 61,0 \text{ m}$

Lúc 4 giờ 20 phút: $Z_{\text{hồ}} = 61,7 \text{ m}$

Với các giá trị mực nước này, tính toán phục dựng lại quá trình lưu lượng đến ngày 30-10-2014 (theo báo cáo kiểm định nguyên nhân sự cố hồ chứa Đàm Hà Động – HEC1) và tính toán điều tiết lũ theo kịch bản số 1 (cửa van số 1 và số 2 mở, cửa van số 3 đóng).

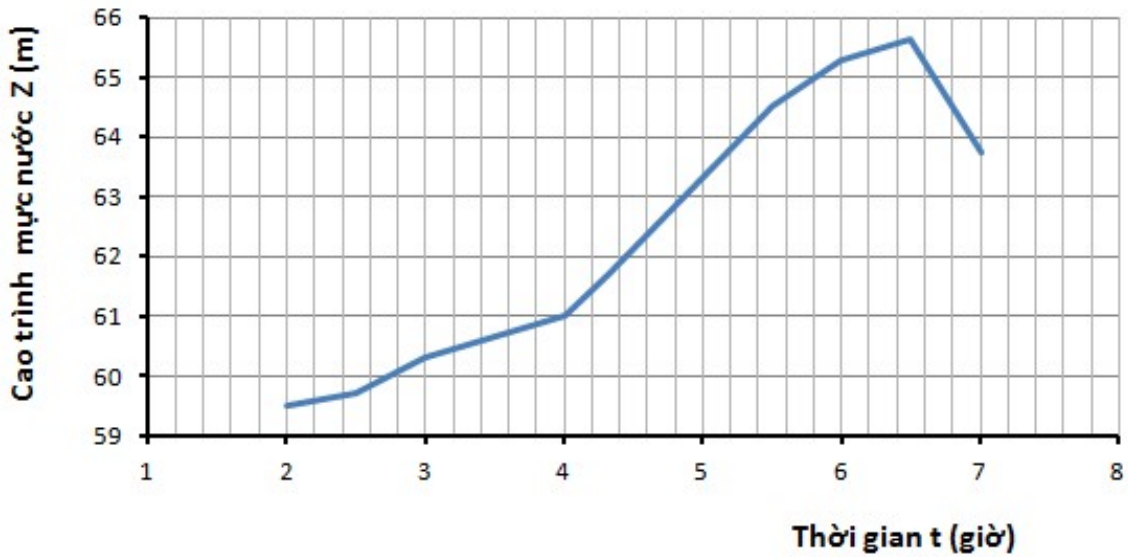
Bảng 4. 1. Kết quả tính toán điều tiết lũ

Giá trị	Kết quả tính toán thời điểm vỡ đập	Vết lũ đo được tại đập chính
Mực nước hồ (m)	65,64	65,65
Q xả (m^3/s)	1657	

Nhận thấy kết quả tính toán điều tiết lũ hoàn toàn phù hợp với vết lũ đo được tại đập chính, vì vậy có thể lấy giá trị mực nước lớn nhất khi vỡ đập tại thượng lưu là 65,65m, cao hơn đỉnh đập 1,15m và cao hơn đỉnh tường chắn sóng 0,35m.

+ 6h30 (thời điểm vỡ đập) mực nước trong hồ đạt giá trị lớn nhất ở cao trình 65,65m.

+ 7h (khi đập phụ số 2 đã vỡ) tính toán thử dân trong EMBANK có mực nước hồ là 63,75m.



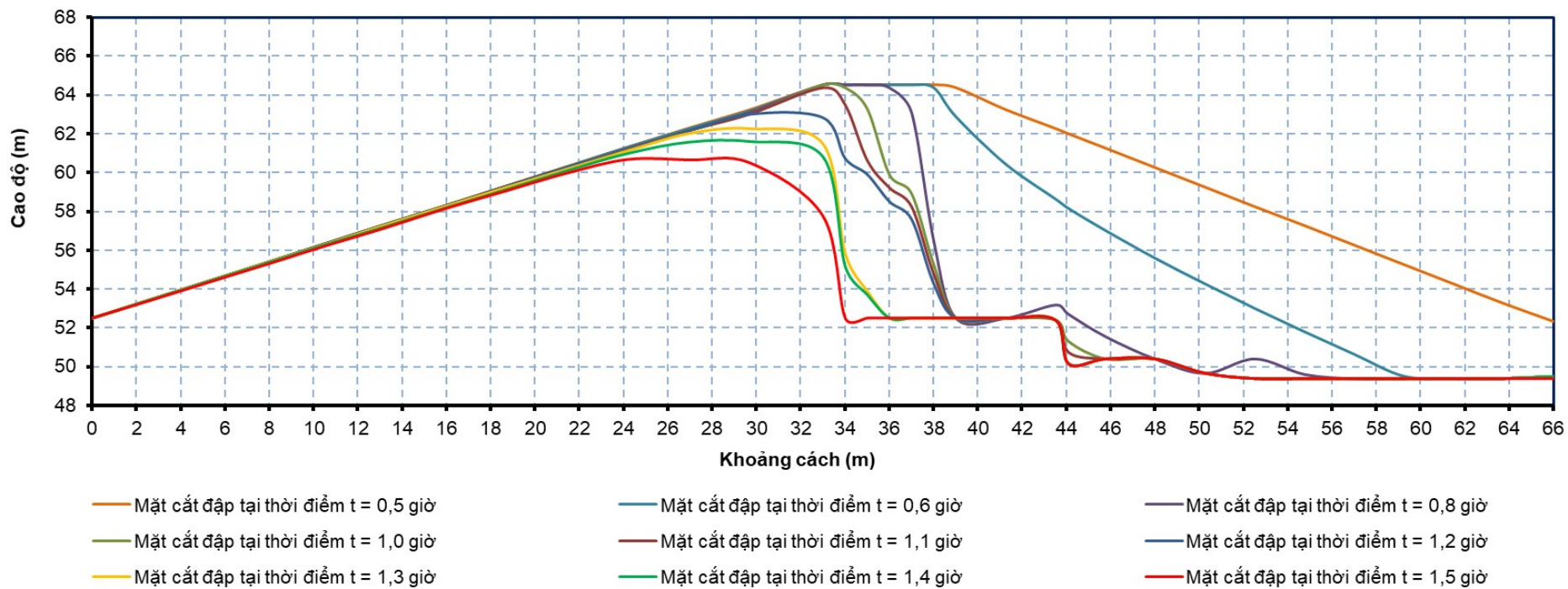
Hình 4. 7. Đường quá trình mực nước trong hồ

4.3.3 Kết quả tính toán xói và vỡ đập

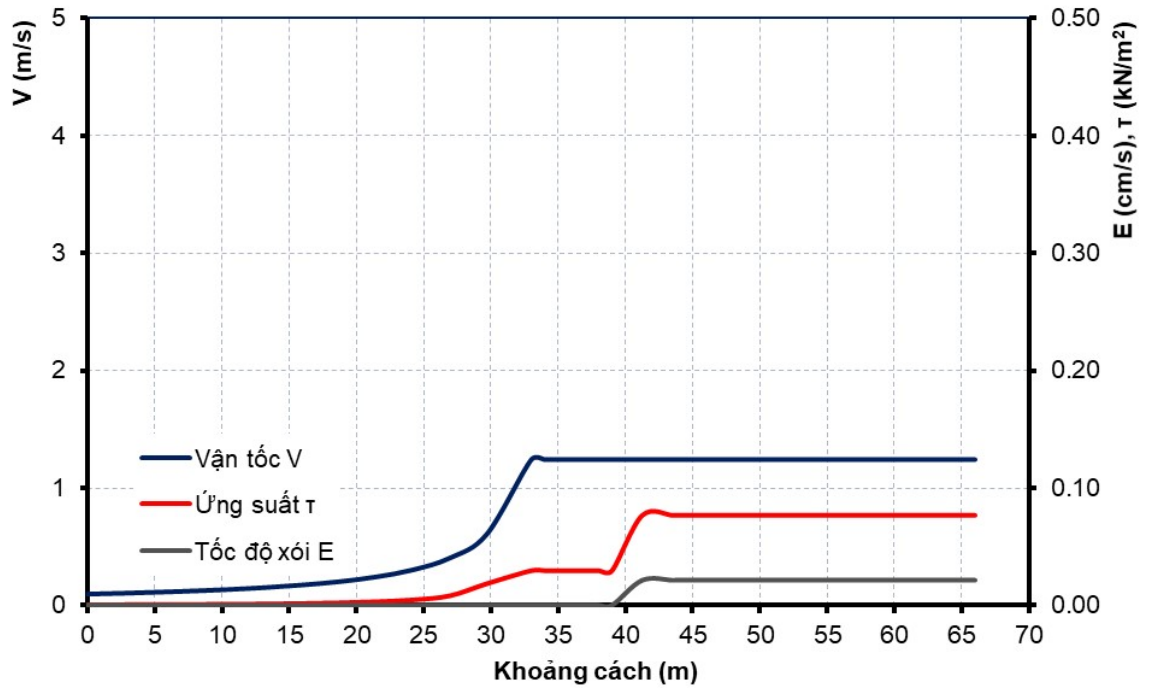
Dùng phần mềm EMBANK để tính toán mô phỏng cơ chế xói và xác định thời gian vỡ của đập Đầm Hà Động. Quá trình mực nước thượng lưu dùng để tính toán cho đập phụ số 2 được lấy dựa theo kịch bản 1. Quá trình mực nước tính toán được từ đập phụ số 2, được chuyển để tính toán cho đập chính. File số liệu và file kết quả tính toán như nêu ở phụ lục C.

4.3.3.1 Các kết quả tính toán cho đập phụ số 2

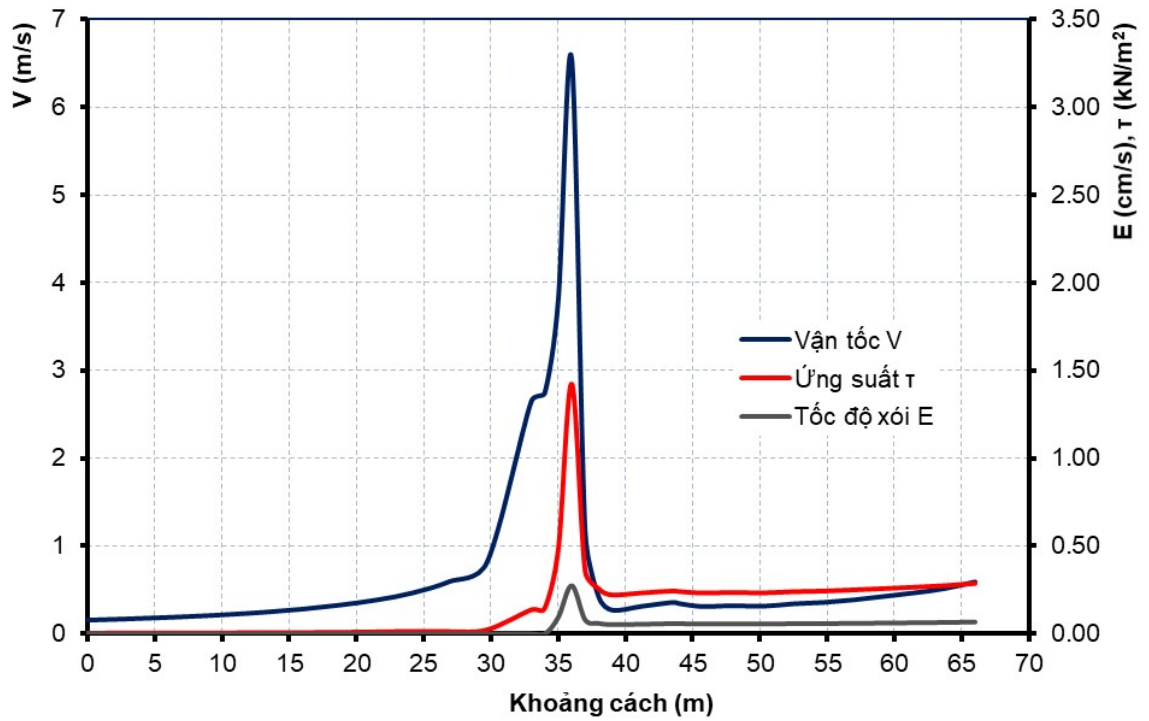
Đập phụ số 2 bắt đầu bị vỡ ở bước thứ 11, tức là sau khi nước vượt đỉnh đập 1,1 giờ và sau khi nước tràn qua tường chắn sóng 0.6 giờ, tức là khoảng 6 giờ 36 phút sáng ngày 30-10-2014. Kết quả này là tương đối phù hợp với thời điểm vỡ đập thực tế (theo báo cáo của nhân viên vận hành có xác nhận của Trung tâm Thủy lợi - Giao thông - Môi trường huyện Đàm Hà, đập bắt đầu bị vỡ sau khoảng 1 giờ kể từ khi nước tràn đỉnh đập, tức là 6 giờ 30 phút, và đập bị vỡ hoàn toàn sau 1 giờ 30 phút, tức là lúc 7 giờ [62]). Nền đập phía hạ lưu cũng bị xói sâu khoảng 3m.



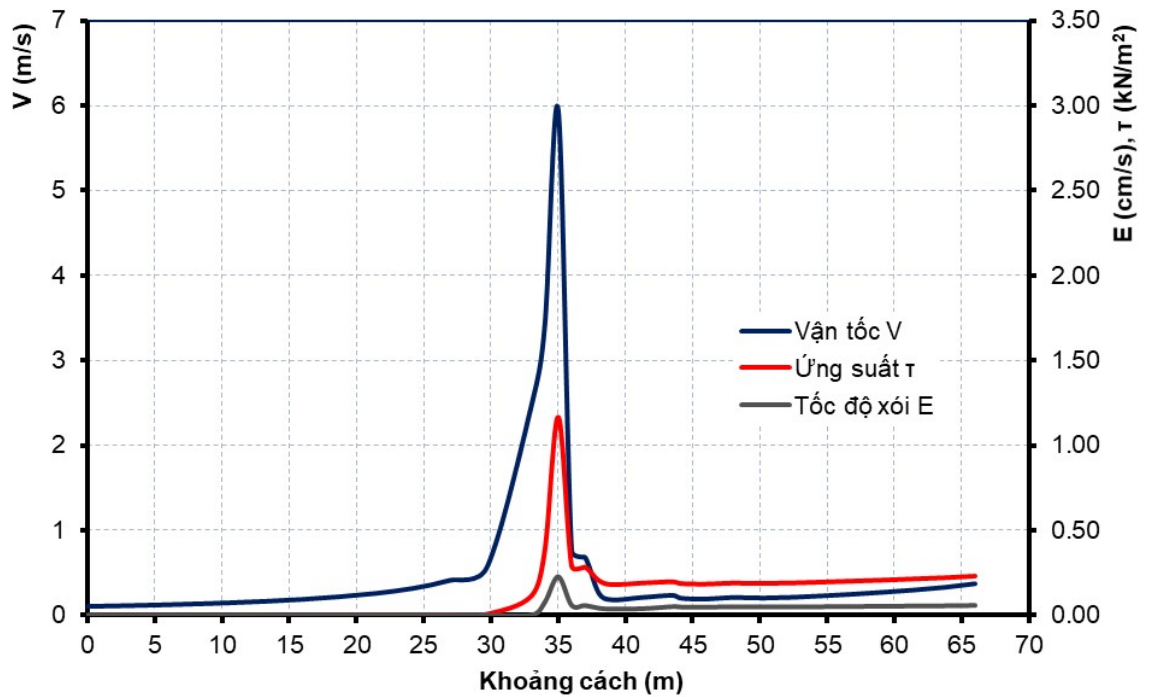
Hình 4. 8. Mặt cắt ngang đập phụ số 2 - Đầm Hà Động theo các bước thời gian



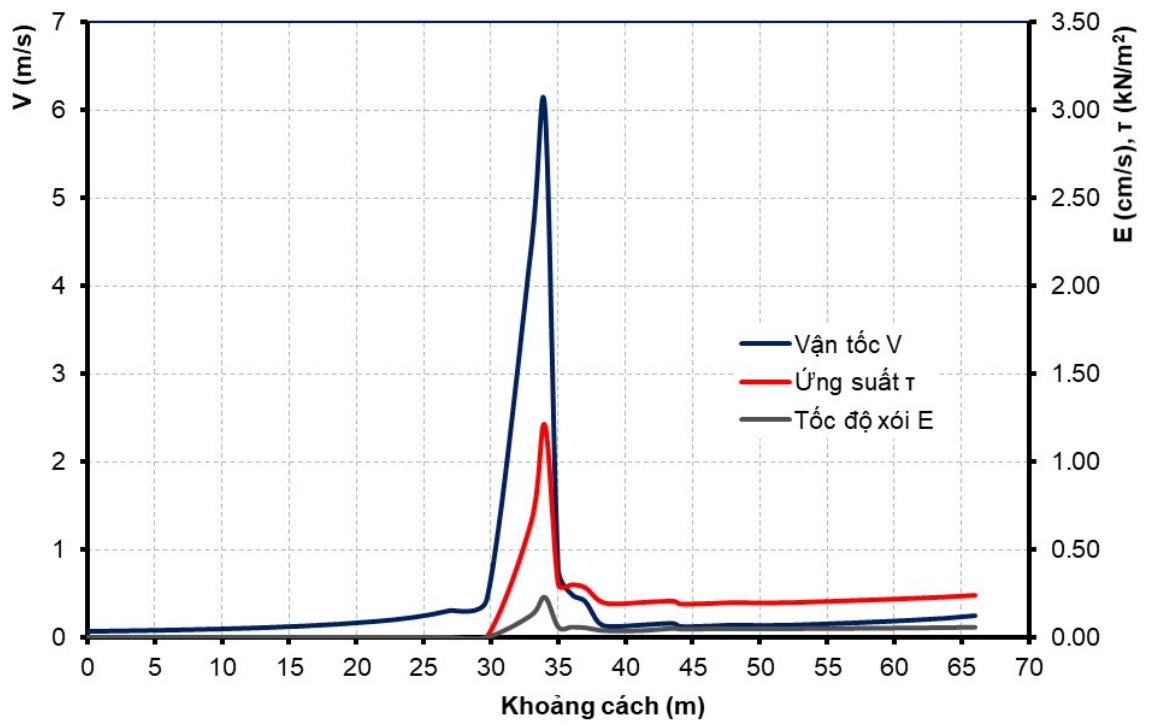
Hình 4. 9. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm đập chưa vỡ
($t = 0,5$ giờ)



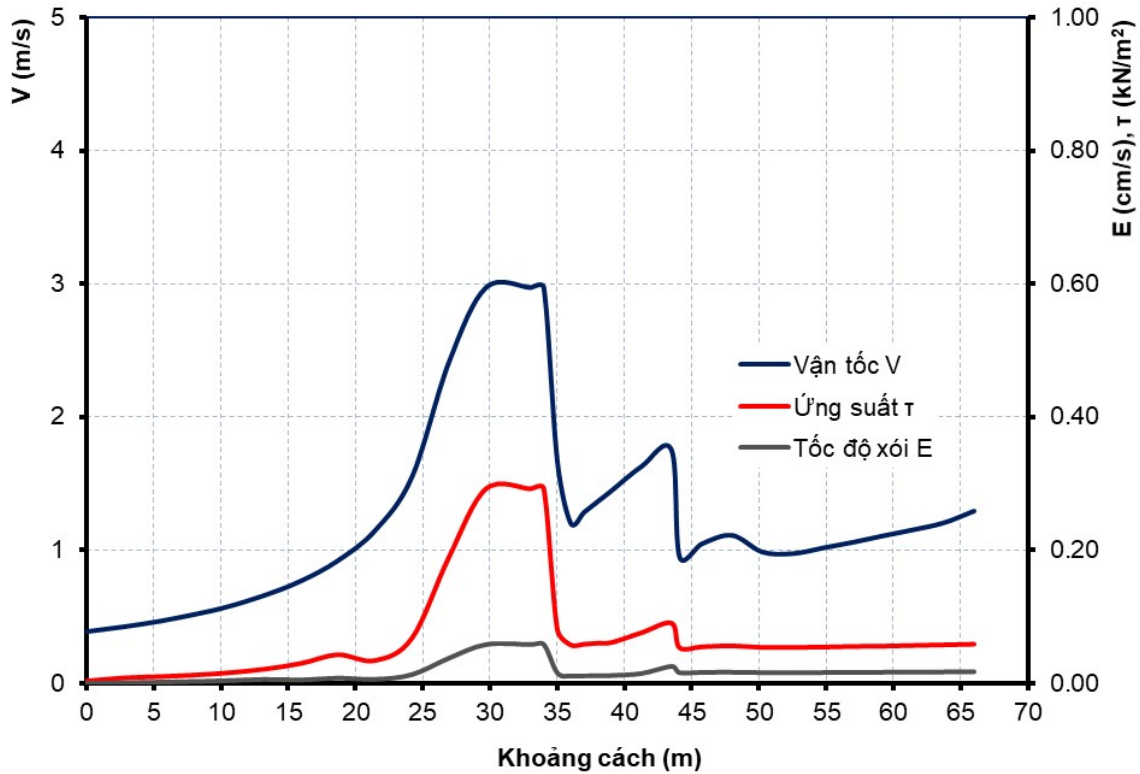
Hình 4. 10. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm đập chưa vỡ
($t = 1,0$ giờ)



Hình 4. 11. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm vỡ đập
($t = 1,1$ giờ)



Hình 4. 12. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm đập đã bị vỡ
($t = 1,2$ giờ)



Hình 4. 13. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói tại thời điểm đập đã bị vỡ
($t = 1,4$ giờ)

Khi đập chưa bị vỡ, nhìn trên biểu đồ Hình 4. 9 thấy rằng đường cong biểu thị giá trị vận tốc dòng chảy, ứng suất cắt và tốc độ xói tại các điểm tính toán biến đổi có qui luật và đều có xu hướng tăng dần. Vận tốc dòng chảy nhanh chóng đạt giá trị lớn nhất tại mép thượng lưu đỉnh đập và giữ không đổi trên toàn bộ mái hạ lưu. Biểu đồ ứng suất cắt có hai vị trí tăng nhanh đột ngột đó là tại mép thượng lưu và mép hạ lưu của đỉnh đập, sau đó giữ giá trị lớn nhất không thay đổi trên toàn bộ mái hạ lưu. Xói bắt đầu xuất hiện tại điểm mép hạ lưu đỉnh đập và tốc độ xói nhanh chóng đạt giá trị lớn nhất trên toàn bộ mái hạ lưu. Như vậy, trên toàn bộ mái hạ lưu đập, các giá trị của vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói là không đổi.

Khi đập bị vỡ, biểu đồ Hình 4. 11 cho thấy vận tốc dòng chảy tăng nhanh từ điểm mép thượng lưu đỉnh đập, đạt cực đại tại điểm giữa đỉnh đập và giảm nhanh tại điểm lân cận ngay sau đó, trên mái hạ lưu hầu như giá trị vận tốc không thay đổi. Biểu đồ của ứng suất cắt và tốc độ xói cũng gần như đồng dạng với biểu đồ vận tốc.

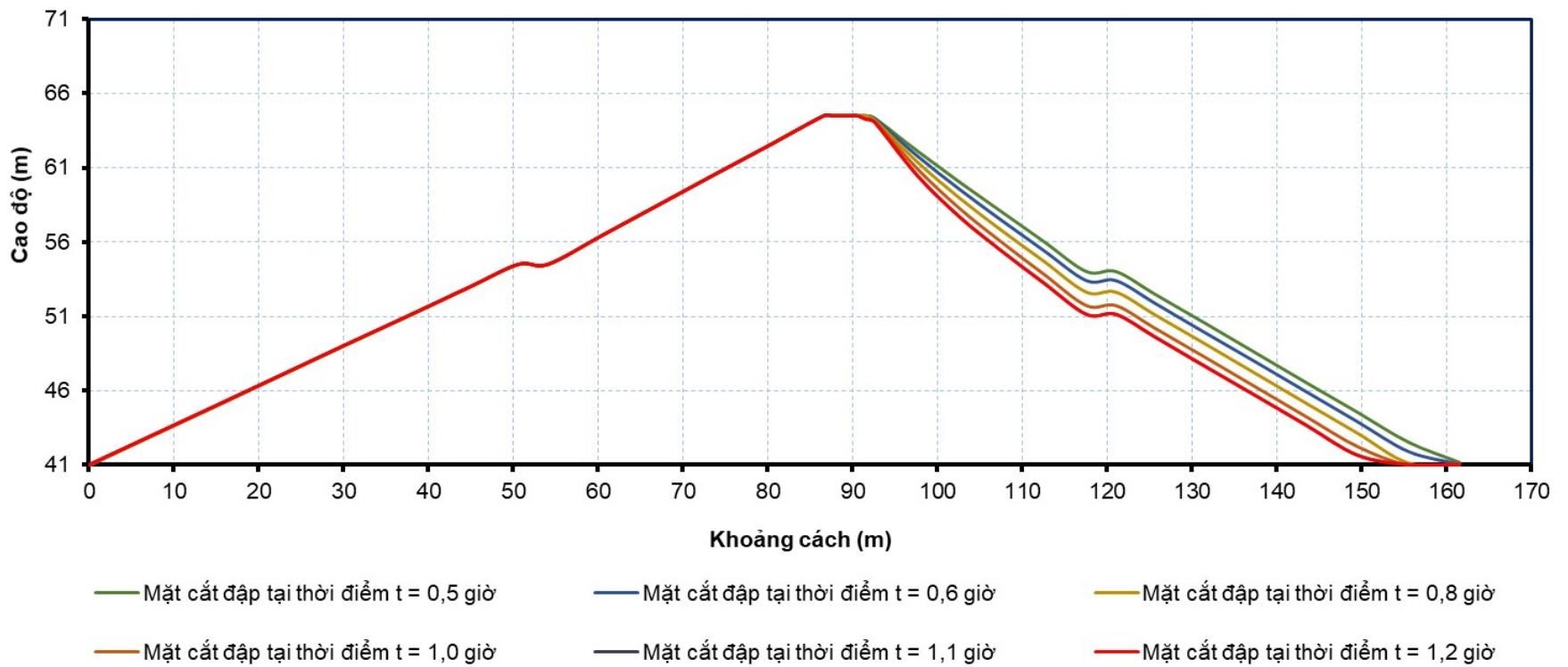
So sánh biểu đồ Hình 4. 10 (thời điểm trước khi vỡ đập 0,1 giờ), Hình 4. 11 (thời điểm bắt đầu vỡ đập) và Hình 4. 12 (thời điểm sau khi vỡ đập 0,1 giờ) thấy rằng hình dạng biểu đồ có sự biến đổi từ từ, điểm đạt giá trị vận tốc lớn nhất trên đỉnh đập tiến dần về phía thượng lưu đập theo các bước thời gian, giá trị vận tốc lớn nhất là 6,55m/s đạt được tại thời điểm ngay trước khi đập bắt đầu bị vỡ ($t = 1,0$ giờ).

Khi đập đã bị vỡ tại thời điểm $t = 1,4$ giờ (Hình 4. 13), giá trị vận tốc dòng chảy, ứng suất cắt và tốc độ xói biến thiên liên tục và không có qui luật trên mặt cắt ngang. Giá trị vận tốc lớn nhất đạt được tại mép thượng lưu đỉnh đập xấp xỉ 3m/s.

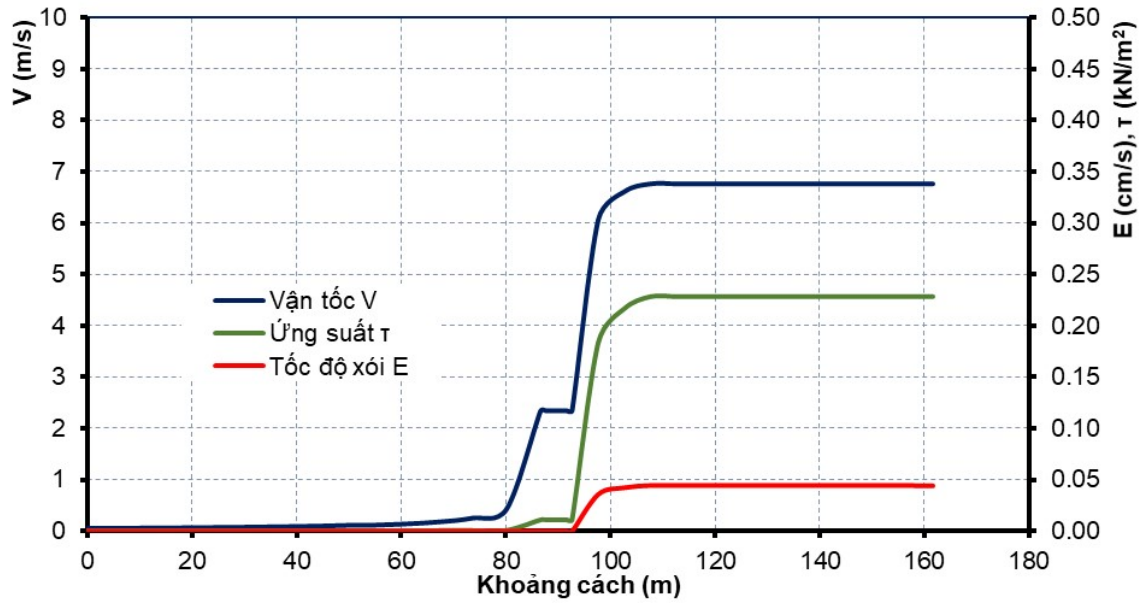
4.3.3.2 Các kết quả tính toán cho đập chính

Đập chính không bị vỡ mà chỉ bị xói trên toàn bộ bề mặt mái hạ lưu với chiều sâu xói trung bình từ $3,5 \div 4\text{m}$ (Hình 4. 14). Kết quả tính toán cho thấy từ sau bước thứ 11 trở đi (khi đập phụ số 2 vỡ), tọa độ mặt cắt ngang đập chính không thay đổi, tức là khi đập phụ bị vỡ, mực nước thượng lưu hạ xuống và đập chính không bị tiếp tục xói nữa.

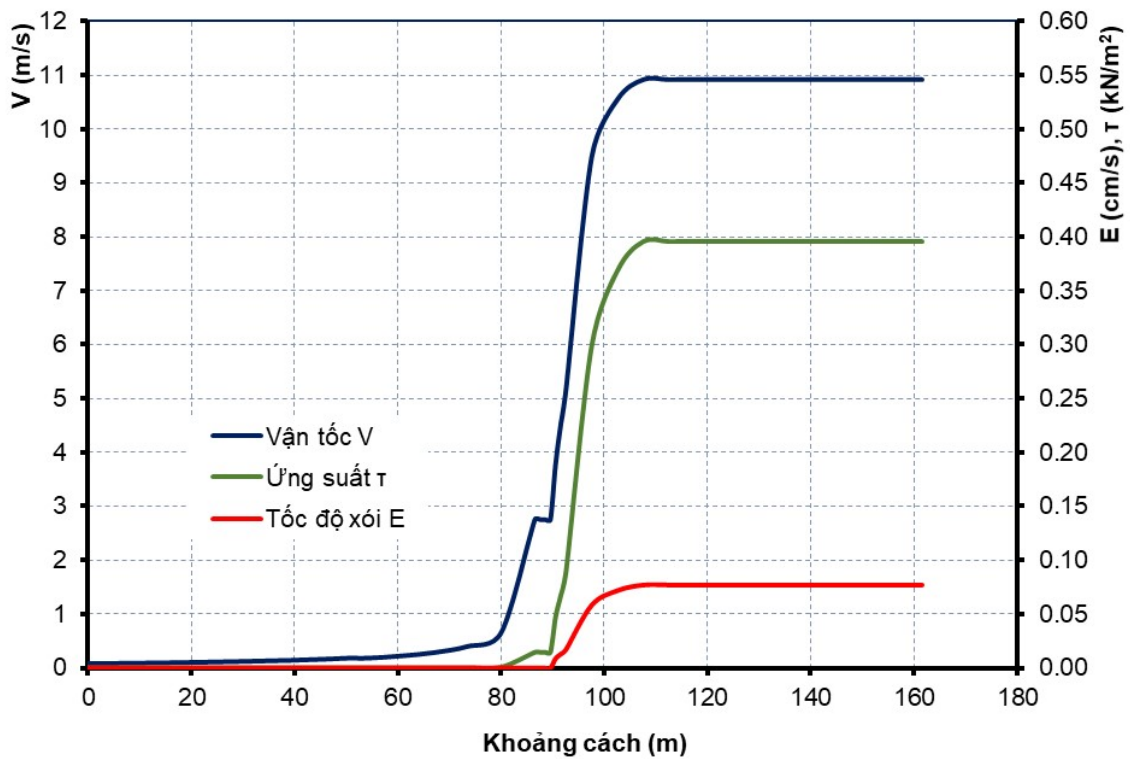
Các biểu đồ vận tốc dòng chảy, ứng suất cắt và tốc độ xói gần như đồng dạng tại mọi thời điểm (Hình 4. 15, Hình 4. 16, Hình 4. 17, Hình 4. 18). Giá trị của các đại lượng này đều có xu hướng tăng nhanh tại khu vực mép thượng lưu đỉnh đập, giữ không đổi trên toàn bộ bề rộng đỉnh đập và tiếp tục tăng rất mạnh tại mép hạ lưu đỉnh đập, dòng chảy nhanh chóng đạt giá trị vận tốc và ứng suất cắt lớn nhất trên toàn bộ mái hạ lưu. Vận tốc lớn nhất của dòng chảy trên mái hạ lưu đập chính là $V = 10,91\text{m/s}$ đạt được tại thời điểm $t = 1,0$ giờ (thời điểm ngay trước khi vỡ đập phụ), sau đó vận tốc giảm dần khi đập phụ bị vỡ do mực nước thượng lưu giảm.



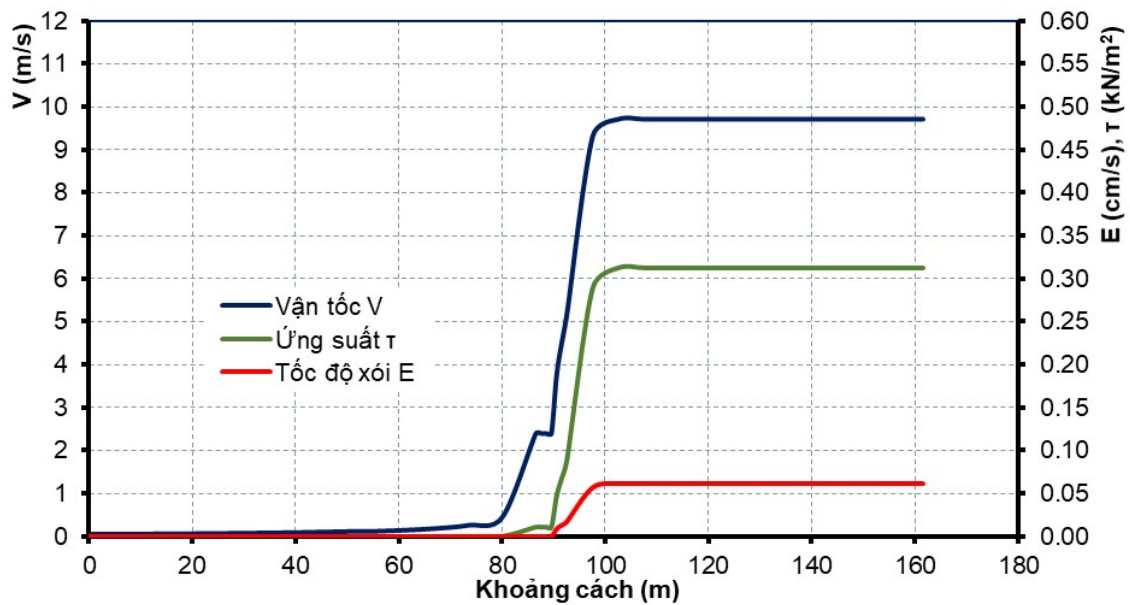
Hình 4. 14. Mặt cắt ngang đập chính - Đầm Hà Động theo các bước thời gian 0,1 giờ



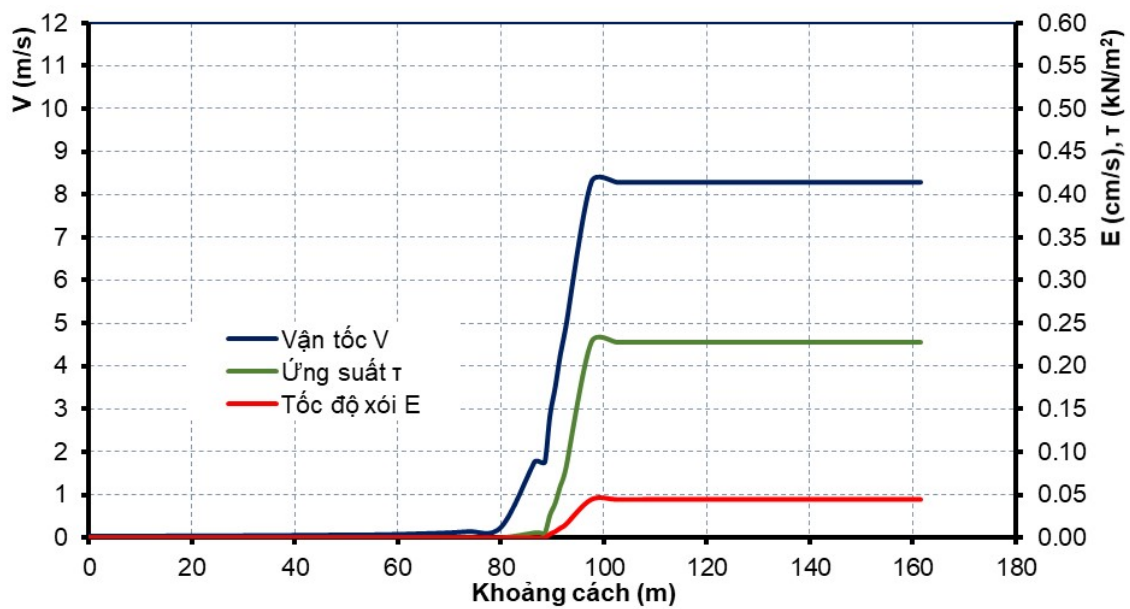
Hình 4. 15. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói trên đập chính tại thời điểm đập phụ chưa vỡ ($t = 0,5$ giờ)



Hình 4. 16. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói trên đập chính tại thời điểm đập phụ chưa vỡ ($t = 1,0$ giờ)



Hình 4. 17. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói trên đập chính tại thời điểm vỡ đập phụ ($t = 1,1$ giờ)



Hình 4. 18. Biểu đồ vận tốc, ứng suất cắt và tốc độ xói trên đập chính tại thời điểm $t = 1,2$ giờ

Hình 4. 20 thể hiện kết quả so sánh tính toán xói trên mặt cắt ngang của đập chính bằng chương trình EMBANK với mặt cắt đập hiện trạng sau sự cố (lấy theo hồ sơ sửa chữa đập chính Đầm Hà Động sau sự cố năm 2014[63]). Nhận thấy rằng mặt cắt đập bị xói tính toán gần trùng với mặt cắt hiện trạng xói của đập. Sai số về độ sâu xói giữa tính toán và thực tế tại các điểm được tổng hợp trên Bảng 4. 2

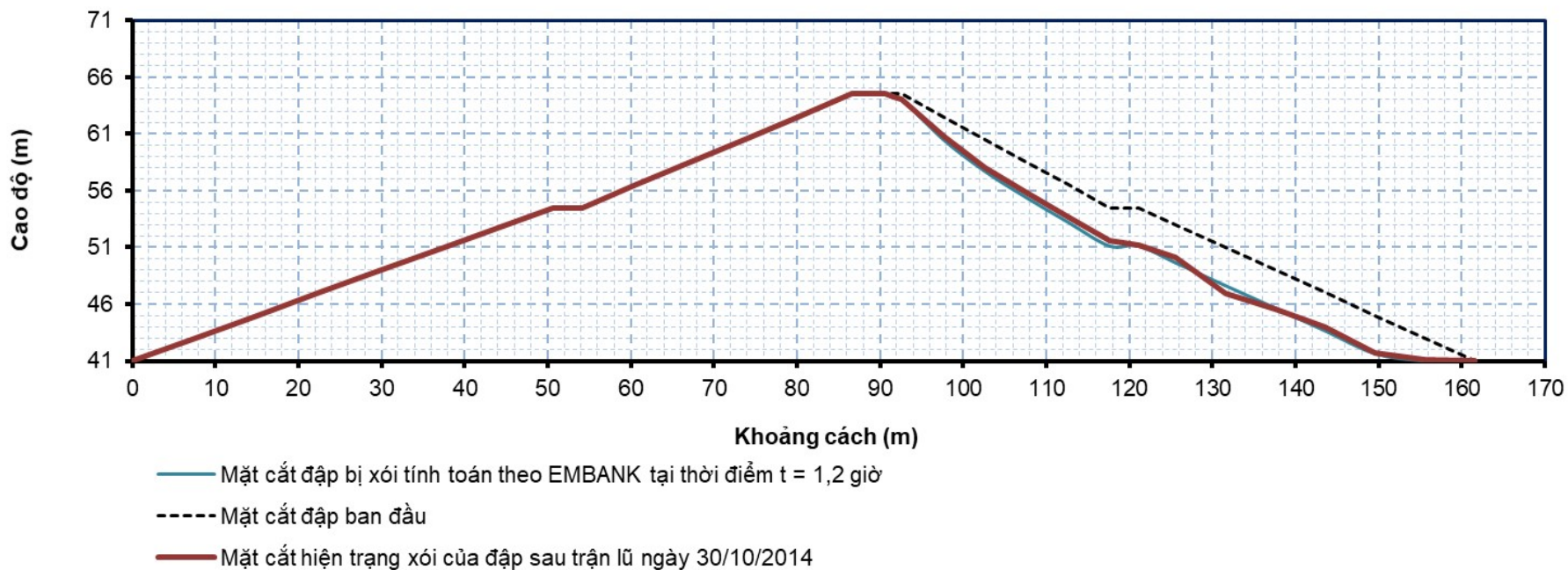
Bảng 4. 2. So sánh độ sâu xói mái đập chính Đầm Hà Động giữa thực tế và tính toán (thời điểm $t = 1,2$ giờ)

Điểm	Tọa độ X (m)	Cao độ			Độ sâu xói		Sai số (%)
		Ban đầu (m)	Tính toán Z_{tt} (m)	Thực tế Z (m)	Tính toán S_{tt} (m)	Thực tế S (m)	
1	0,00	41,00	41,00	41,00	0,00	0,00	0,00
2	7,50	43,00	43,00	43,00	0,00	0,00	0,00
3	15,00	45,00	44,99	45,00	0,01	0,00	0,00
4	22,50	47,00	47,00	47,00	0,00	0,00	0,00
5	30,00	49,00	49,00	49,00	0,00	0,00	0,00
6	37,50	51,00	51,00	51,00	0,00	0,00	0,00
7	45,00	53,00	53,00	53,00	0,00	0,00	0,00
8	50,63	54,50	54,50	54,50	0,00	0,00	0,00
9	54,13	54,50	54,50	54,50	0,00	0,00	0,00
10	60,63	56,50	56,48	56,50	0,02	0,00	0,00
11	67,13	58,50	58,50	58,50	0,00	0,00	0,00
12	73,63	60,50	60,50	60,50	0,00	0,00	0,00
13	80,13	62,50	62,50	62,50	0,00	0,00	0,00
14	86,63	64,50	64,50	64,50	0,00	0,00	0,00
15	87,63	64,50	64,50	64,50	0,00	0,00	0,00
16	88,63	64,50	64,50	64,50	0,00	0,00	0,00
17	89,63	64,50	64,50	64,50	0,00	0,00	0,00
18	90,63	64,50	64,50	64,50	0,00	0,00	0,00
19	91,63	64,50	64,26	64,28	0,24	0,22	10,67
20	92,63	64,50	64,07	64,00	0,43	0,50	14,73
21	97,63	62,50	60,51	60,81	1,99	1,69	17,90
22	102,63	60,50	57,70	58,02	2,80	2,48	12,77
23	107,63	58,50	55,39	55,81	3,11	2,69	15,73
24	112,63	56,50	53,22	53,71	3,28	2,79	17,47
25	117,63	54,50	51,12	51,62	3,38	2,88	17,38

Điểm	Tọa độ X (m)	Cao độ			Độ sâu xói		Sai số (%)
		Ban đầu (m)	Tính toán Z_{tt} (m)	Thực tế Z (m)	Tính toán S_{tt} (m)	Thực tế S (m)	
26	121,13	54,50	51,12	51,22	3,38	3,28	3,06
27	125,63	53,00	49,63	50,11	3,37	2,89	16,75
28	131,63	51,00	47,61	46,96	3,39	4,04	16,19
29	137,63	49,00	45,63	45,61	3,37	3,39	0,68
30	143,63	47,00	43,62	44,01	3,38	2,99	12,90
31	149,63	45,00	41,62	41,75	3,38	3,25	3,85
32	155,63	43,00	41,00	41,11	2,00	1,89	5,82
33	161,63	41,00	41,00	41,00	0,00	0,00	0,00

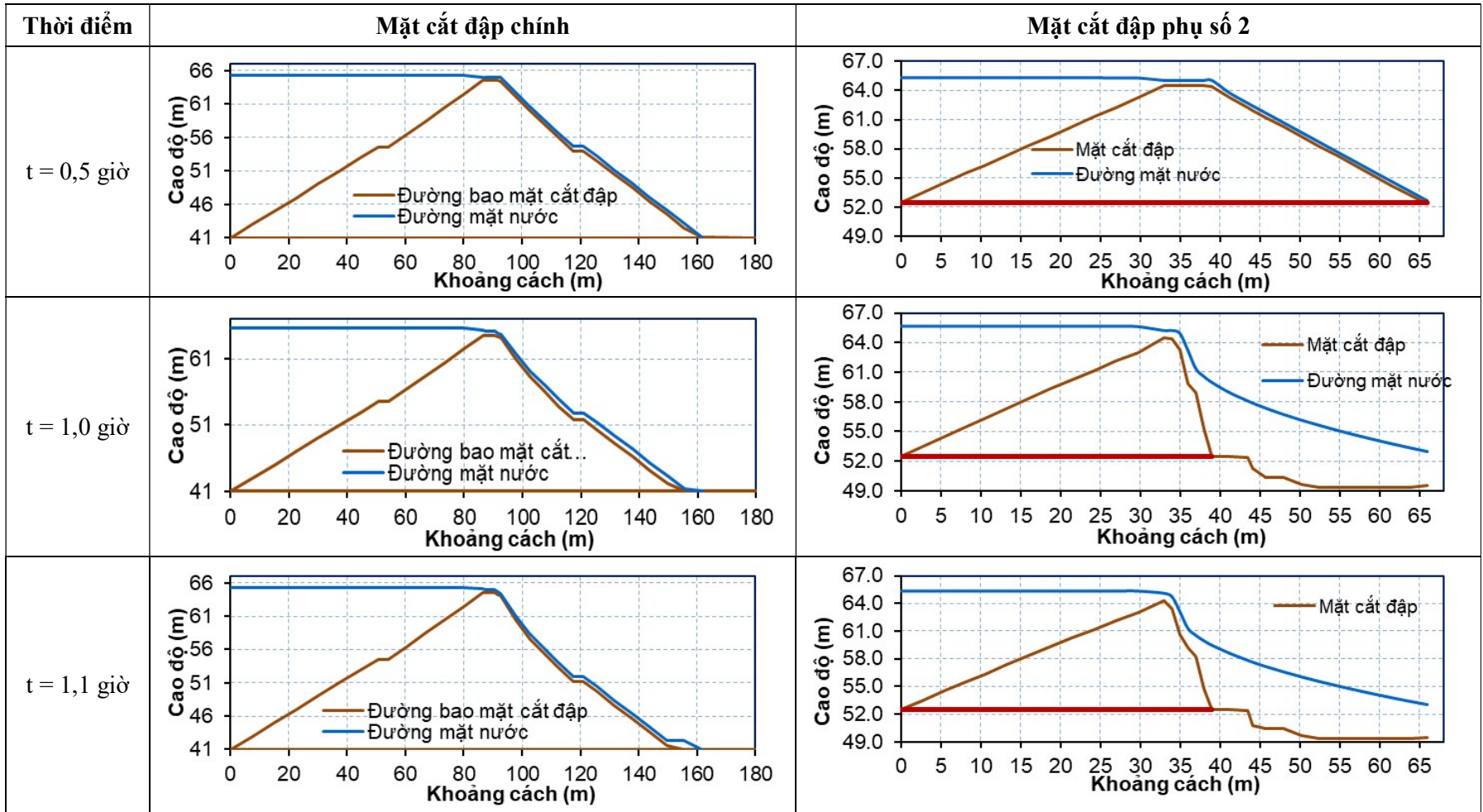
Trị số sai số lớn nhất là 17,9%. Sai số giữa tính toán và thực tế được giải thích do sự không tương đồng về vật liệu (vật liệu thí nghiệm đất đã loại bỏ hoàn toàn thành phần hạt thô ($d > 5\text{mm}$), trong khi đất đắp đập Đầm Hà Động vẫn còn tồn tại một số ít hạt đường kính lớn), trong tính toán đã bỏ qua ảnh hưởng của ống khói thoát nước trong thân đập đến quá trình xói, sử dụng công thức xói mái cỏ chỉ là gần đúng, v.v... Như vậy, có thể khẳng định công thức thực nghiệm tính toán tốc độ xói (3-7), (3-8), (3-9) đã xác định được trong phần thí nghiệm ở chương 3 là đáng tin cậy.

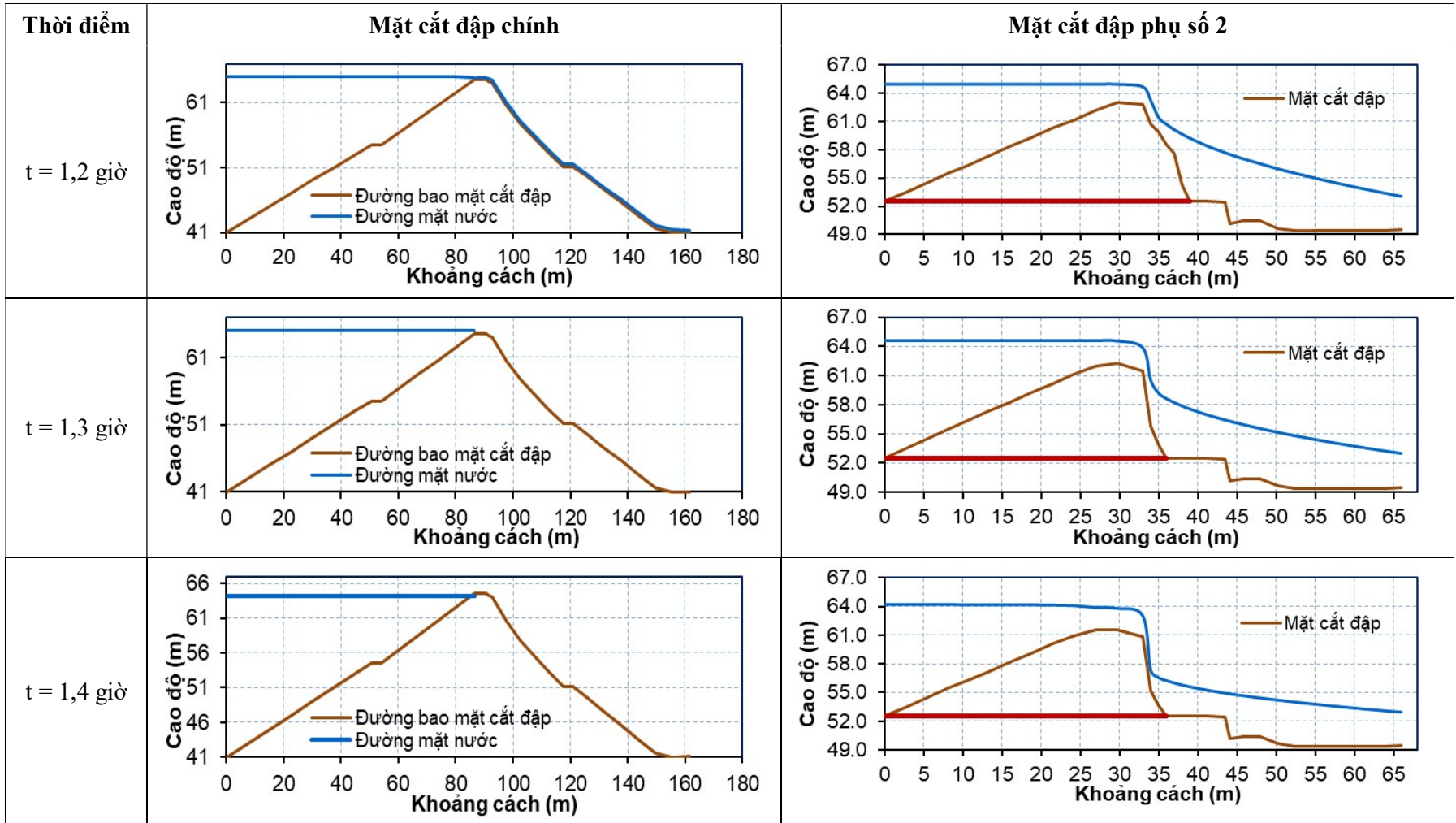
Vận tốc dòng chảy trên mái hạ lưu đập chính và đập phụ đạt giá trị lớn nhất cùng một thời điểm $t = 1,0$ giờ (thời điểm trước khi vỡ đập phụ). Giá trị vận tốc trên đập phụ $V = 6,55\text{m/s}$ nhỏ hơn vận tốc trên đập chính $V = 10,91\text{ m/s}$ (Hình 4. 10 và Hình 4. 16). Tuy nhiên, vận tốc xói lớn nhất trên đập phụ là $E = 0,2722\text{cm/s}$ lớn hơn vận tốc xói lớn nhất trên đập chính là $E = 0,0774\text{cm/s}$ (do ảnh hưởng của tính chất đất), vì vậy mà đập phụ bị xói mạnh hơn dẫn đến vỡ đập, còn đập chính chỉ bị xói một phần trên mái hạ lưu và đỉnh đập. Điều này có thể khẳng định sự ảnh hưởng quan trọng của tính chất đất đắp đến cơ chế xói và vỡ đập khi nước tràn đỉnh. Bảng 4. 3 thể hiện sự so sánh mặt cắt ngang của đập chính và đập phụ số 2 tại các thời điểm trong quá trình tràn đỉnh đập.



Hình 4. 20. So sánh kết quả tính toán xói trên đập chính theo EMBANK và mặt cắt thực tế sau sự cố

Bảng 4. 3. Bảng so sánh mặt cắt đập chính và đập phụ số 2 tại các thời điểm





4.4 Kết luận chương 4

Luận án đã lựa chọn công trình nghiên cứu là các đập đất của hồ chứa Đàm Hà Động, tỉnh Quảng Ninh (đập chính và đập phụ số 2). Đây là công trình đại diện tiêu biểu cho loại hình đập đất đã bị vỡ do nước tràn đỉnh ở Việt Nam.

Dựa vào các tài liệu thu thập được, tác giả đã xác định các mặt cắt ngang đập chính tại vị trí xói sâu nhất và mặt cắt ngang đập phụ số 2 tại vị trí vỡ; thông qua kết quả tính điều tiết lũ xác định diễn biến mực nước trong hồ; sử dụng công thức tính tốc độ xói của đất là dữ liệu đầu vào cho chương trình EMBANK. Tính toán cơ chế xói đất của đập chính và diễn biến vỡ đập phụ số 2. Kết quả tính toán cho thấy:

- Đập phụ số 2 bị vỡ tại thời điểm sau khi nước tràn đỉnh đập 1,1 giờ, so sánh với thời gian vỡ đập thực tế là 1,0 giờ, như vậy kết quả tính toán là tương đối phù hợp. Diễn biến mặt cắt đập trong quá trình vỡ thể hiện trên Hình 4. 8.

- Đập chính bị xói trên bề mặt mái hạ lưu với chiều sâu xói lớn nhất tính toán là 3,4m, diễn biến mặt cắt đập thể hiện trên Hình 4. 14. Mặt cắt bị xói của đập chính tính toán theo chương trình EMBANK gần như trùng với mặt cắt thực tế của đập sau sự cố (Hình 4. 20), sai số tương đối có trị số lớn nhất là 17,9%.

- So sánh diễn biến mặt cắt đập chính và đập phụ số 2 trong quá trình xói (Bảng 4. 3) cho thấy mặc dù vận tốc dòng chảy trên mái hạ lưu ở đập chính lớn hơn ở đập phụ nhưng đập phụ vẫn bị xói mạnh hơn dẫn đến vỡ đập, còn đập chính chỉ bị xói một phần mái hạ lưu. Kết quả này khẳng định sự ảnh hưởng lớn của tính chất đất đắp đến cơ chế xói và vỡ đập khi nước tràn đỉnh.

Qua kết quả tính toán cho sự cố đập chính và đập phụ số 2, Đàm Hà Động, Quảng Ninh, nhận thấy sự phù hợp của kết quả tính toán với diễn biến thực tế sự cố công trình. Vì vậy có thể khẳng định:

- Phương pháp và kết quả thí nghiệm xác định công thức tính tốc độ xói được sử dụng trong luận án là hợp lý và cho kết quả đáng tin cậy.

- Mô hình toán EMBANK phù hợp để tính toán tốc độ xói, xác định thời điểm bắt đầu vỡ đập và mô phỏng diễn biến sự cố đập đất khi nước tràn đỉnh (khi đã có các thông số đầu vào là kích thước công trình, công thức xác định tốc độ xói của đất và quá trình mực nước thượng hạ lưu).

KẾT LUẬN

I. Kết quả đạt được của luận án

1. Nghiên cứu tổng quan

Luận án đã đưa được một bức tranh tổng thể về tình hình an toàn của các đập đất trên thế giới và ở Việt Nam. Thống kê, phân tích các nguyên nhân gây sự cố công trình và cho thấy rõ tầm quan trọng của nguyên nhân nước tràn đỉnh đập đất gây vỡ.

Qua tổng quan tình hình nghiên cứu cơ chế xói đất và vỡ đập đất do nước tràn đỉnh cho thấy rằng thế giới đã có rất nhiều nghiên cứu được thực hiện chủ yếu là bằng mô hình vật lý và mô hình toán và đã đạt được những kết quả nhất định. Tuy nhiên, các nghiên cứu trong lĩnh vực này ở Việt Nam còn rất hạn chế. Trong điều kiện làm việc hiện tại của các đập đất ở Việt Nam đã đặt ra yêu cầu cần có những nghiên cứu cụ thể về cơ chế xói đất và vỡ đập đất do nước tràn đỉnh.

Phân tích tổng hợp các phương pháp thí nghiệm hiện nay trên thế giới thường dùng để nghiên cứu bài toán này, tác giả đã lựa chọn phương pháp thí nghiệm đo xói mẫu đất trên mô hình máng kính, kết hợp với mô hình tính toán vỡ đập EMBANK để mô phỏng cơ chế xói mặt của đập đất khi nước tràn đỉnh.

2. Nghiên cứu thực nghiệm

a) Luận án đã tiến hành thí nghiệm mô hình đập đất bị nước tràn đỉnh trong máng kính, đập được đắp bằng đất dính nhiều (đất A) và đất ít dính (đất C), với các cột nước tràn thay đổi, kết quả thí nghiệm đã mô tả được cơ chế xói và vỡ của đập đất dính nhiều và đất ít dính như sau:

- Với những đập đắp bằng đất dính nhiều, quá trình xói thường bắt đầu ở điểm dưới chân hạ lưu đập và sau đó phát triển dần lên đỉnh, cơ chế vỡ ban đầu là xói bề mặt, sau đó là quá trình hình thành vết xói trong thân đập, vết xói mở rộng dần dẫn đến vỡ đập.
- Với những đập đắp bằng đất ít dính, xói là quá trình bào mòn dần trên toàn bộ mái hạ lưu và đỉnh đập, cơ chế vỡ đập là cơ chế xói bề mặt.

b) Tiến hành thí nghiệm trên máng kính thủy lực đo đặc tốc độ xói của ba mẫu đất đại diện cho ba nhóm đất có lực dính khác nhau (đất A, đất B và đất C), từ đó xác định được công thức thực nghiệm tính tốc độ xói của ba loại đất như sau:

- Đất A là đất có tính dính lớn $C = (0,24 \div 0,30)\text{kG/cm}^2$:

$$E = 0,0007 (\tau - 5,955)^{1,197}$$

- Đất B là đất có tính dính trung bình $C = (0,20 \div 0,23)\text{kG/cm}^2$:

$$E = 0,0011 (\tau - 4,798)^{0,9737}$$

- Đất C là đất có tính dính nhỏ $C = (0,16 \div 0,19)\text{kG/cm}^2$:

$$E = 0,0017 (\tau - 3,962)^{0,8253}$$

Các công thức này được sử dụng để tính toán mô phỏng vỡ đập đất do nước tràn đỉnh của các đập đắp bằng đất có lực dính thay đổi trong phạm vi $C = (0,16 \div 0,3)\text{kG/cm}^2$

c) Ứng dụng các công thức tính tốc độ xói đạt được từ nghiên cứu thực nghiệm, kết hợp với chương trình tính toán vỡ đập EMBANK, tác giả đã xây dựng được các biểu đồ xác định thời điểm vỡ của đập đất đồng chất có chiều cao thay đổi từ 5m ÷ 20m, được đắp bằng các loại đất đã thí nghiệm (biểu đồ Hình 3. 21, Hình 3. 22, Hình 3. 23, Hình 3. 24) . Các biểu đồ này có thể ứng dụng trong thực tế để cảnh báo thời điểm bắt đầu vỡ của các đập trong trường hợp bị nước tràn đỉnh.

3. Nghiên cứu ứng dụng vào công trình thực tế

Luận án đã ứng dụng chương trình tính toán vỡ đập EMBANK và các công thức tính tốc độ xói của đất xác định được từ thí nghiệm để tính toán tái hiện cơ chế xói của đập chính và cơ chế vỡ của đập phụ số 2 – Đầm Hà Động, tỉnh Quảng Ninh khi bị nước lũ tràn qua đỉnh đập mùa lũ năm 2014. Kết quả tính toán cho thấy:

- Đập chính không bị vỡ mà chỉ bị xói với chiều sâu xói tính toán lớn nhất là 3,4m trên bề mặt mái hạ lưu. Mặt cắt xói tính toán của đập gần trùng với mặt cắt thực tế sau sự cố (sai số tương đối có trị số lớn nhất là 17,9%).

- Đập phụ số 2 bị xói mạnh trên mái sau đó bị vỡ tại thời điểm sau 1,1 giờ tính từ khi nước tràn đỉnh đập, Thời gian bắt đầu vỡ đập theo tính toán cũng có sai số nhỏ so với thời gian bắt đầu vỡ đập trong thực tế (1,0 giờ).

Kết quả tính toán cho thấy việc sử dụng chương trình EMBANK và các công thức tốc độ xói xác định bằng thực nghiệm nêu trên là có cơ sở thực tế để áp dụng tính toán cảnh báo thời gian vỡ khi nước tràn đỉnh đối với các đập đất đắp ở Việt Nam.

II. Những đóng góp mới của luận án

Luận án có những đóng góp mới như sau:

1) Thiết lập công thức thực nghiệm tính tốc độ xói của ba loại đất đắp đập thuộc ba nhóm đặc trưng ở Việt Nam trên cơ sở công thức thực nghiệm của phòng thí nghiệm nghiên cứu nông nghiệp Hoa Kỳ (ARL).

2) Mô phỏng quá trình xói mái đập chính và vỡ đập phụ Đầm Hà Động theo mô hình EMBANK và kết quả thí nghiệm xói của đất đắp đập.

III. Tồn tại và hướng phát triển

1. Tồn tại

- Do kinh phí và thời gian hạn chế, thí nghiệm chưa phủ được hết các loại đất thường dùng để đắp đập ở Việt Nam (những đất có lực dính nằm ngoài khoảng $C = 0,16 \div 0,30$ kG/cm²). Trên thực tế cũng có nhiều đập được đắp bằng đất có lực dính nằm ngoài khoảng mà tác giả đã lựa chọn để tính toán.

- Xây dựng công thức tính tốc độ xói của đất chưa xét được sự ảnh hưởng của một số yếu tố khác như độ đầm chặt của đất, thành phần hạt (do hạn chế về điều kiện và thời gian nghiên cứu) – đây là những nhân tố cũng có sự ảnh hưởng lớn đến cơ chế xói của đất.

- Khi mô phỏng vỡ đập Đầm Hà Động bằng mô hình toán EMBANK, sự ảnh hưởng của thiết bị bảo vệ mái hạ lưu (chưa thí nghiệm được công thức tính tốc độ xói của mái đất có cỏ mà mới chỉ lấy gần đúng cho loại đất tương tự theo kết quả của các tác giả trước), thiết bị thoát nước trong thân đập (trong tính toán đã bỏ qua ảnh hưởng của thiết bị này) và mô phỏng vật liệu có sai khác so với thực tế (vật liệu thí nghiệm mẫu đã loại bỏ các hạt có đường kính $d > 5$ mm) dẫn đến sai số nhất định trong tính toán.

2. Hướng phát triển

- Tiếp tục thí nghiệm để xây dựng công thức tính tốc độ xói cho nhiều loại đất khác nhau, từ đó có thể đánh giá và khái quát hóa thành công thức chung.
- Nghiên cứu sự ảnh hưởng của các nhân tố khác (độ đầm chặt, thành phần hạt, nhiệt độ nước, v.v..) đến công thức tính tốc độ xói đất. Từ đó có những kết luận tổng quan hơn cho mỗi nhóm đất.
- Xây dựng qui trình cảnh báo thời gian vỡ đập đất khi có nguy cơ nước tràn đỉnh đập dựa vào dữ liệu thí nghiệm kết hợp với các mô hình toán.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Phạm Thị Hương**, Tổng Hoàng Hiệp, “Tính toán điều tiết lũ cho hồ chứa khi có sự tham gia của tràn sự cố kiểu đập đất tự vỡ”. Tuyển tập hội nghị khoa học thường niên – ĐHTL. ISBN: 978-604-82-1710-5, tháng 11/2015.
2. **Phạm Thị Hương**, “Nghiên cứu các đặc điểm xói của đất đắp khi nước tràn đỉnh đập”. Báo cáo đề tài nghiên cứu khoa học và phát triển công nghệ cấp cơ sở, ĐHTL năm 2015.
3. **Phạm Thị Hương**, “Thí nghiệm xác định tốc độ xói của đất đắp dưới tác dụng của dòng chảy trên bề mặt”. Tạp chí khoa học kỹ thuật Thủy lợi và môi trường. ISSN1859 – 3941, số 53, tháng 6/1016.
4. **Phạm Thị Hương**, “Ảnh hưởng của cốt liệu thô đến tốc độ xói đất”. Tuyển tập hội nghị khoa học thường niên – ĐHTL. ISBN: 978-604-82-1980-2, tháng 11/2016.
5. **Phạm Thị Hương**, Nguyễn Cảnh Thái, “Nghiên cứu cơ chế vỡ của đất đắp đập khi nước tràn đỉnh”. Tạp chí khoa học kỹ thuật Thủy lợi và môi trường. ISSN1859 – 3941, số 59, tháng 12/2017. (Đã chấp nhận đăng)
6. **Phạm Thị Hương**, Nguyễn Cảnh Thái, “Tính toán xói và mô phỏng diễn biến vỡ đập Đầm Hà Động – Quảng Ninh”. Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn. ISSN1859 – 4581, số 23, tháng 12/2017.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Tổng cục Thủy lợi. “Báo cáo chương trình an toàn hồ chứa”. 2015.
- [2] ICOLD. “World Register of Dams”. 2016.
- [3] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, U.S. Army Corps of Engineers. “Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis”. 2014.
- [4] Xie. J.B, Sun. D.Y. “Statistics of dam failures in China and analysis on failure causations”. Journal of Water Resources and Hydropower Engineering, 2009.
- [5] Zhang. L.M, Xu. Y, Jia. J. S. “Analysis of earth dam failures: A database approach”. Journal of IGeorisk, 2009.
- [6] Costa, J. E. “Floods from dam failures”. U.S. Geological Survey, Open-File Rep. No 85-560, Denver, pp 54, 1985.
- [7] Phạm Ngọc Quý và nnk. “Tiêu chí đánh giá an toàn đập đất”. Nhà xuất bản Xây Dựng, 2016.
- [8] R. P. Sharma, A. Kumar. “Case Histories of Earthen Dam Failures”. Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 2013.
- [9] Jan Vigyan Bhawan. “Dambreak study of Barna dam”. National Institute of Hydrology, India, 1996 – 1997.
- [10] X. Y. HE, Z. Y. WANG, and J. C. HUANG. “Temporal and spatial distribution of dam failure events in China”. International Journal of Sediment Research, 2008.
- [11] J.L.Briaud, H.C.Chen, A.V.Govindasamy and R. Storesund. “Erosion Tests on Samples from the New Orleans Levees”. American Society of Civil Engineers, 2007.
- [12] Ralston, Davis C. “Mechanics of Embankment Erosion During Overflow”, Hydraulic Engineering, Proceedings of the ASCE National Conference on Hydraulic Engineering, Williamsburg, Virginia, pp 733-738, August 3-7, 1987.
- [13] D.L.Fread. “A breach erosion model for earthen dams”. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA .1988.
- [14] Zhu, Y. “Breach growth in clay-dikes” .PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2006.
- [15] Pawan Kumar Bhattarai, Hajime Nakagawa, Kenji Kawaike, Hao Zhang. “Experimental study on river dyke breach characteristics due to overtopping”. Journal of JSNDS Vol 33, pp 65-74, 2014.
- [16] Coleman, E. S., Andrews, D. P. & Webby, M. G. “Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments”. J. Hydraulic Engineering 128, No. 9, pp 829–838, 2002.

- [17] Gerd Pickert, Volker Weitbrecht, Andreas Bieberstein. “Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion”. *Journal of Hydraulic Research*. Vol 49, pp 143-156, 2011.
- [18] Visser, P. J. “Breach growth in sand dike”. PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 1998.
- [19] Hanson, G. J., Cook, K. R. & Hunt, S. L. “Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments”. *Trans ASAE48*, No. 5, pp1783–1794, 2005.
- [20] FUJISAWA Azunori, KOBAYASHI Akira, MOMOKI Shohei and AOYAMA Shigeyasu. “Mechanism Elucidation of Embankment Failure due to Overflow and Assessment of Slope Protection”. *Trans of JSIDRE No.252*, pp 1 - 7. December, 2007.
- [21] Hunt, S. L., Hanson, G. J., Cook, K. R. & Kadavy, K. C. “Breach widening observation from earthen embankment tests”. *Trans ASAE48*, No. 3, pp 1115–1120, 2005.
- [22] K. Fujisawa, A. Kobayashi và S. Aoyama. “Theoretical description of embankment erosion owing to overflow”. *Geotechnique* 59, No. 8, pp 661–671, 2009.
- [23] Chaiyuth CHINNARASRI, Tawatchai TINGSANCHALI, Sutat WEESAKUL, and Somchai WONGWISES. “Flow patterns and damage of dike overtopping”. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 18, No. 4, pp 301-309, 2003.
- [24] Powledge, George R, D.C. Ralston, P. Miller, Y.H. Chen, P.E. Clopper, and D.M. Temple. “Mechanics of Overflow Erosion on Embankments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 8, pp 1056-1075, August 1989.
- [25] Y.H. Chen, Bradley A. Anderson. “Development of a methodology for estimating embankment damage due to flood overtopping”. US. Department of transportation, No FWA/RD-86/126, 1987.
- [26] H. M. Rasel, M. R. Hasan and S. C. Das. “Study on the effects of vegetation density in reducing bed shear stress on the downstream slope of earthen embankment”. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, Vol . 5(4), pp. 187-193, April, 2013.
- [27] Tony L, Wahl. A. “Comparision of the hole erosion test and jet erosion test”. Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, June 27 - July 1, 2010.
- [28] Kazunori Fujisawa, Akira Kobayashi, Kiyohito Yamamoto. “Erosion rates of compacted soils for embankments”. *Doboku Gakkai Ronbunshuu C*, Vol.64 No.2, pp 403-410, 2008.
- [29] Singh, VP. “Dam Breach Modelling Technology”. Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, 242 p, 1996.

- [30] Lê Văn Nghị và nnk. “Nghiên cứu đánh giá rủi ro đối với thượng, hạ du khi xảy ra sự cố các đập trên hệ thống bậc thang thủy điện sông Đà”. Đề tài KC08.22/11-15, 2016.
- [31] Lê Trần Chương, Lê Văn Thuận, “Đánh giá tác động của sóng âm và điều kiện thủy lực ở hạ lưu vết vỡ đối với quá trình truyền sóng vỡ đập”.
- [32] Trần Thục. “Tính toán thủy lực trong trường hợp giả sử vỡ đập Hoà Bình và Sơn La”. Tạp chí Khí tượng thủy văn 2(506)/2003, trang 29-35, 2003.
- [33] Trần Đình Hợi, Trần Quốc Thương, Lê Văn Nghị. “Nghiên cứu bài toán mô hình thủy lực vỡ đập công trình thủy điện Sơn La phục vụ thiết kế và vận hành an toàn công trình”. Đề tài cấp Bộ, 2004.
- [34] Nguyễn Văn Hạnh, Nguyễn Đức Diệm. “Nghiên cứu lũ và lũ do vỡ đập trong hệ thống sông Hồng -sông Thái Bình”. Hợp phần thuộc dự án DANIDA, Hà Nội, Việt Nam, 2003.
- [35] Viện Năng lượng. “Nghiên cứu cơ chế thủy lực và tính toán vỡ đập cầu chì trong các công trình thủy điện, dự án thủy điện Sông Hinh”. Đề tài cấp bộ, 2003.
- [36] Viện Năng lượng. “Báo cáo kết quả nghiên cứu thí nghiệm mô hình thủy lực tràn sự cố dự án thủy điện Trung Sơn”. Dự án sản xuất, 2011.
- [37] Ngô Trí Viêng và nnk. “Nghiên cứu cơ sở khoa học và đề xuất các giải pháp khoa học công nghệ đảm bảo sự ổn định và độ bền của đê biển hiện có trong trường hợp sóng, triều cường tràn qua đê”. Đề tài KC08.15/06-10, 2010.
- [38] J. M. Wiggert, and D. N. Contractor, "A Methodology for Estimating Embankment Failure," Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24060, 1969.
- [39] E. A. Cristofano, "Method of Computing Erosion Rate for Failure of Earthfill Dams," Engineering and Research Center, Bureau of Reclamation, Department of the Interior, Denver, CO, April 1965.
- [40] R. Ariathurai, and K. Arulanandan. "Erosion Rates of Cohesive Soils". Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 3104, No. HY2, pp 279-283, February 1978.
- [41] Hanson, G.J., and Simon, A. “Erodibility of cohesivestreambeds in the loess area of the midwestern USA”. Hydrological Processes, Vol. 15, pp 23-38, 2001.
- [42] J. Gessler, "Beginning and Ceasing of Sediment Motion," Chapter 7, edited by H.W. Shen, 1971.
- [43] S. Fortier and F. C. Scobey. "Permissible Canal Velocities". Trans. ASCE, Vol. 89, pp. 940-956, 1926.
- [44] E. T. Smerdon, and R. P. Beasley, "Relation of Compaction and Other Soil Properties to Erosion Resistance of Soils". Trans. ASCE, Vol. 8, 1959.
- [45] E. T. Smerdon, and R. P. Beasley. "The Tractive Force Theory Applied to Stability of Open Channels in Cohesive Soils". University of Missouri, College

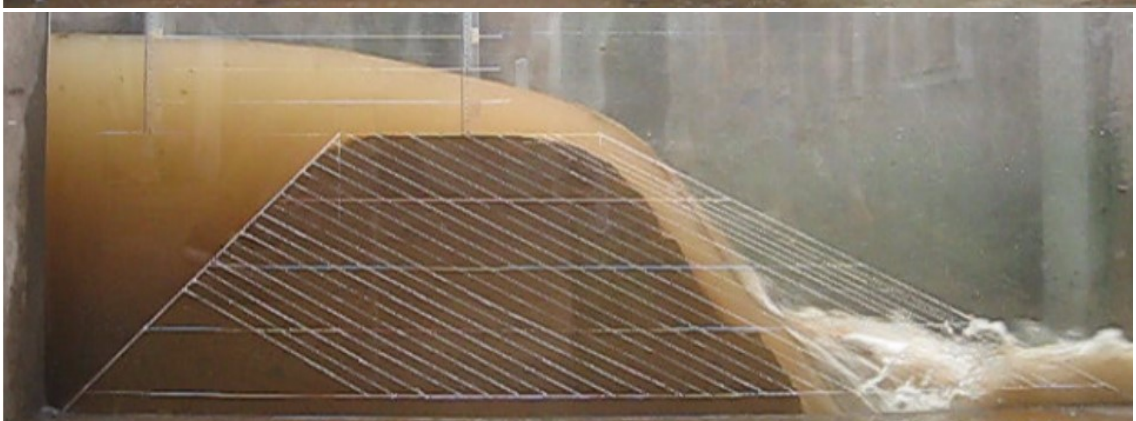
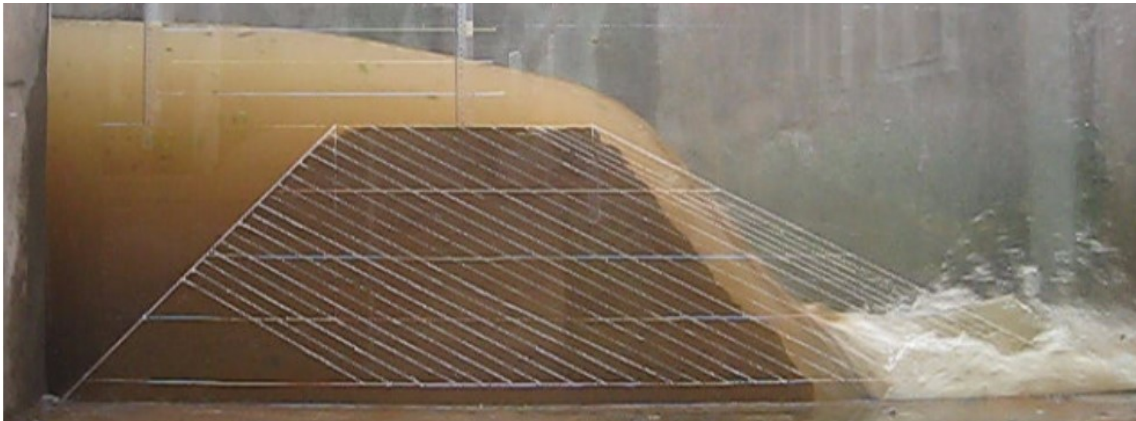
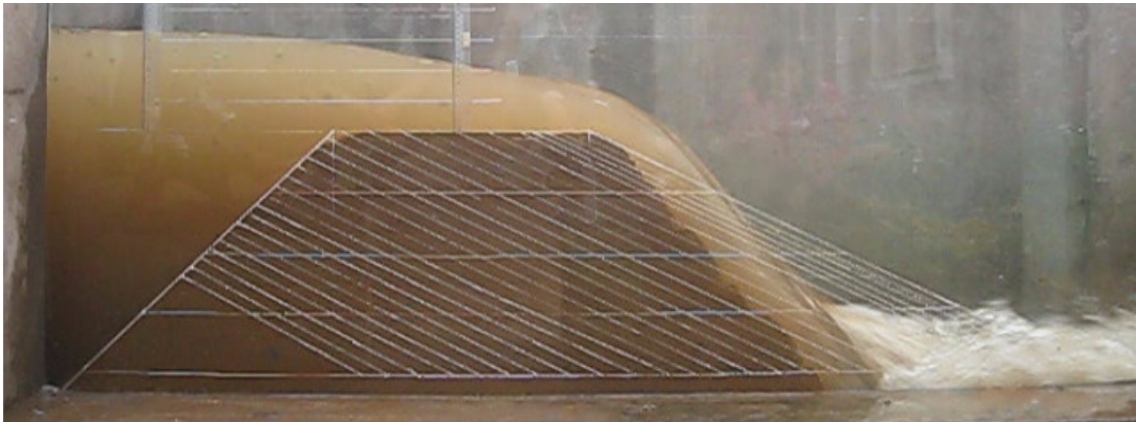
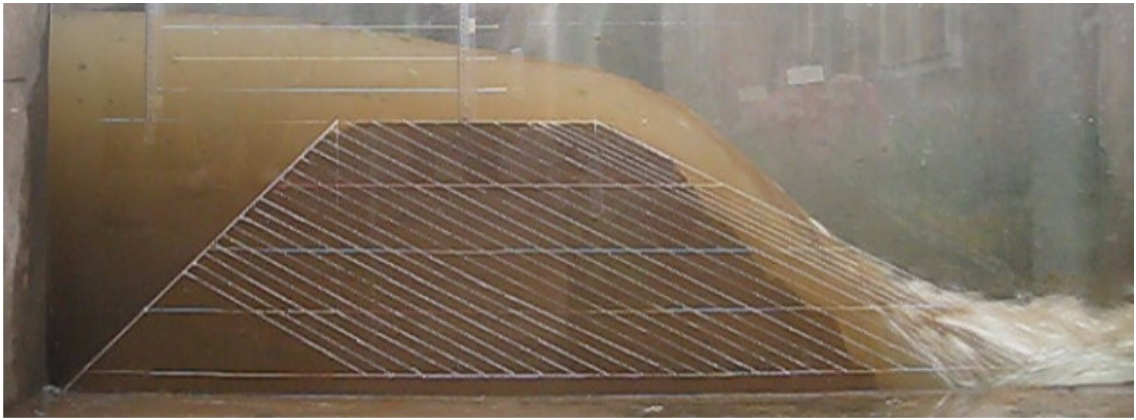
- of Agriculture, Agr. Exp. Station, October, 1959.
- [47] Julian, J. P. and Torres, R. “Hydraulic erosion of cohesive riverbanks”. *Geomorphology* 76 (1-2), pp 193-206. 2006.
- [48] J. C. McWhorter, T. G. Carpenter, and R. N. Clark, "Erosion Control Criteria for Drainage Channels". Mississippi State University, March 1968.
- [49] V. T. Chow. “Open-Channel Hydraulics”. McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.
- [50] ASTM D5852. “Standard Test Method for Erodibility Determination of Soil in the Field or in the Laboratory by the Jet Index Method”. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [51] Maliheh Karamigolbaghi, Seyed Mohammad Ghaneizad, Joseph F. Atkinson, Sean J. Bennett. “Experimental Design of the Submerged Jet Erosion Test for a Soil Erodibility Evaluation”. World Environmental and Water Resources Congress, 2016.
- [52] J. N. Bradley, and A. J. Peterka, "Hydraulic Design of Stilling Basins: Stilling Basin with Sloping Apron (Basin V)”, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol.83, No. HY5, October 1957.
- [53] TCVN 2683:2012. “Đất xây dựng - Lấy mẫu, bao gói, vận chuyển và bảo quản mẫu”. 2012.
- [54] TCVN 4195:2012. “Đất xây dựng – Phương pháp xác định khối lượng riêng trong phòng thí nghiệm”. 2012.
- [55] TCVN 4196:2012. “Đất xây dựng – Phương pháp xác định độ ẩm và độ hút ẩm trong phòng thí nghiệm”. 2012.
- [56] TCVN 4197:2012. “Đất xây dựng – Phương pháp xác định giới hạn dẻo và giới hạn chảy trong phòng thí nghiệm”. 2012.
- [57] TCVN 4201:2012. “Đất xây dựng – Phương pháp xác định độ chặt tiêu chuẩn trong phòng thí nghiệm”. 2012.
- [58] TCVN 4202:2012. “Đất xây dựng - Phương pháp xác định khối lượng thể tích trong phòng thí nghiệm”. 2012.
- [59] Tiêu chuẩn ngành 10TCN 922:2006. “Máy nông lâm nghiệp và thủy lợi – Đo lưu lượng nước trong kênh hở bằng đập tràn thành mỏng”, 2006.
- [60] Nguyễn Cảnh Cầm và nnk. “Giáo trình Thủy Lực tập 2”. Nhà xuất bản Đại học và trung học chuyên nghiệp, 1978.
- [61] Công ty tư vấn và chuyển giao công nghệ - trường Đại học Thủy Lợi. “Hồ sơ thiết kế kỹ thuật công trình hồ chứa nước Đầm Hà Động, tỉnh Quảng Ninh”. 2003.
- [62] HEC1. “Báo cáo kiểm định nguyên nhân sự cố hồ chứa nước Đầm Hà Động – xã Quảng Lợi, huyện Đầm Hà, tỉnh Quảng Ninh”. 2015.
- [63] HEC1. “Hồ sơ thiết kế sửa chữa cụm công trình đầu mối hồ chứa nước Đầm Hà Động – Quảng Ninh”, 2015.

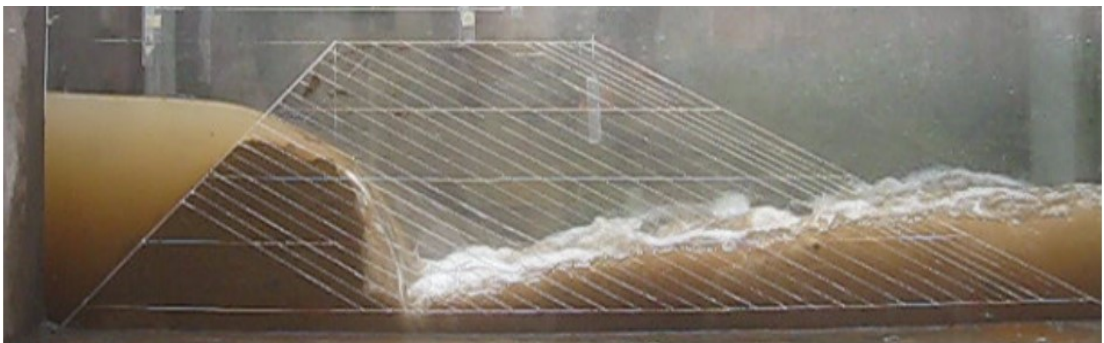
PHỤ LỤC

Phụ lục A. Hình ảnh thí nghiệm nghiên cứu cơ chế vỡ đập

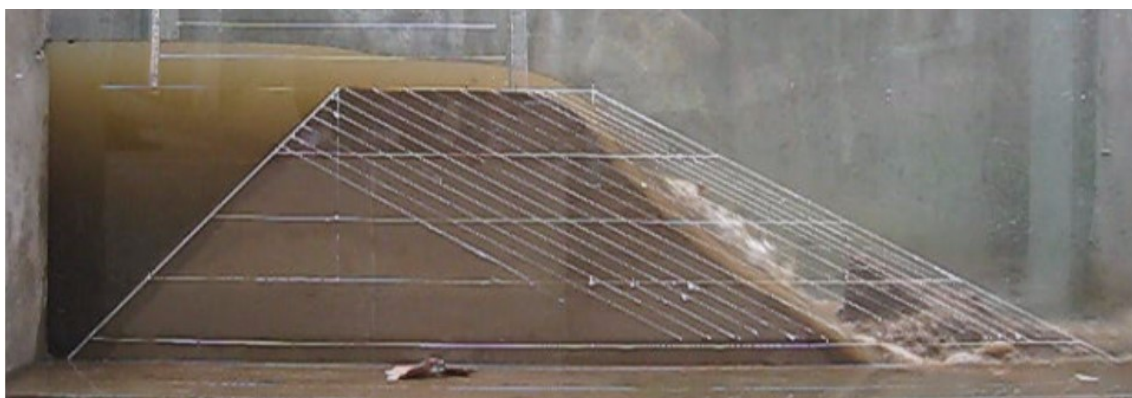
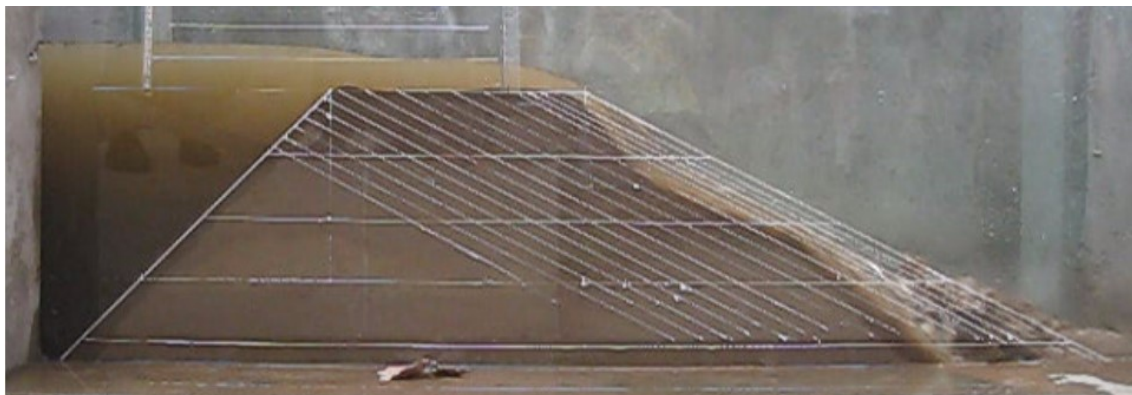
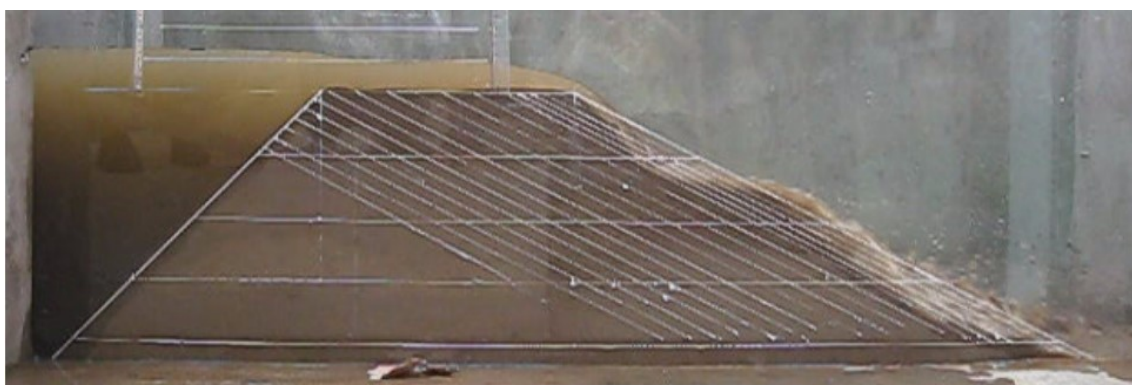
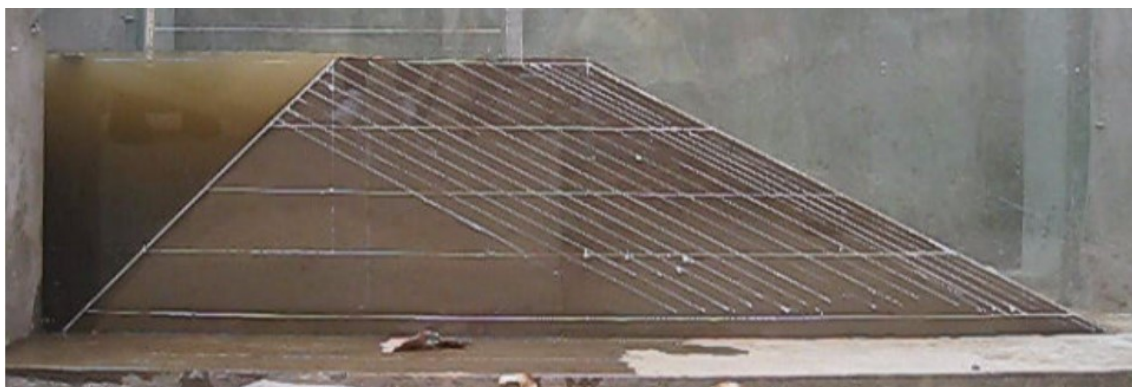
Phụ lục A – 1. Đập đắp bằng đất A – Trường hợp cột nước tràn $H = 15\text{cm}$

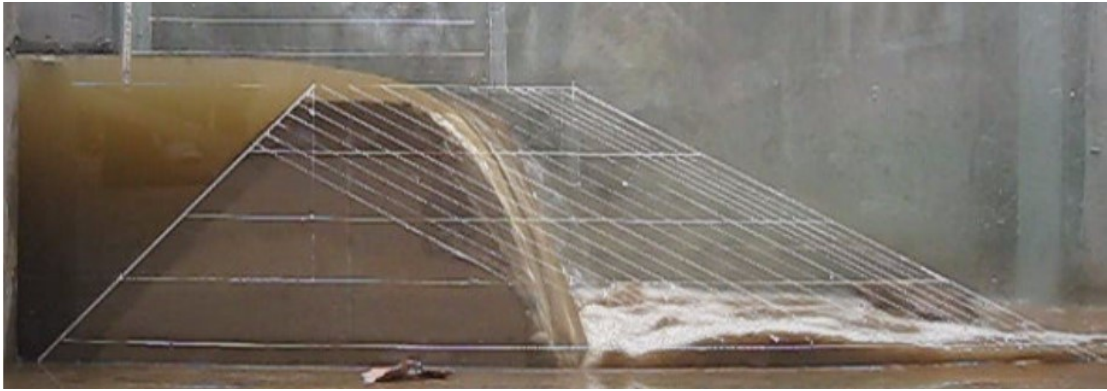
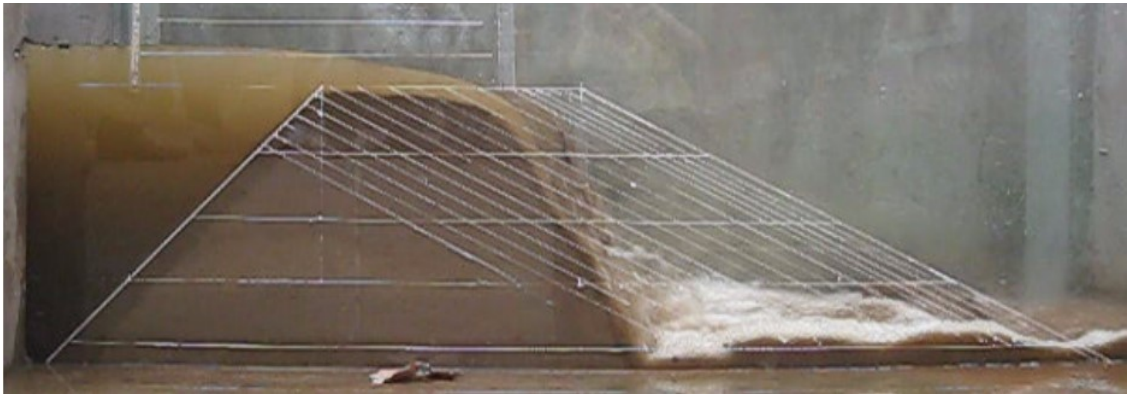
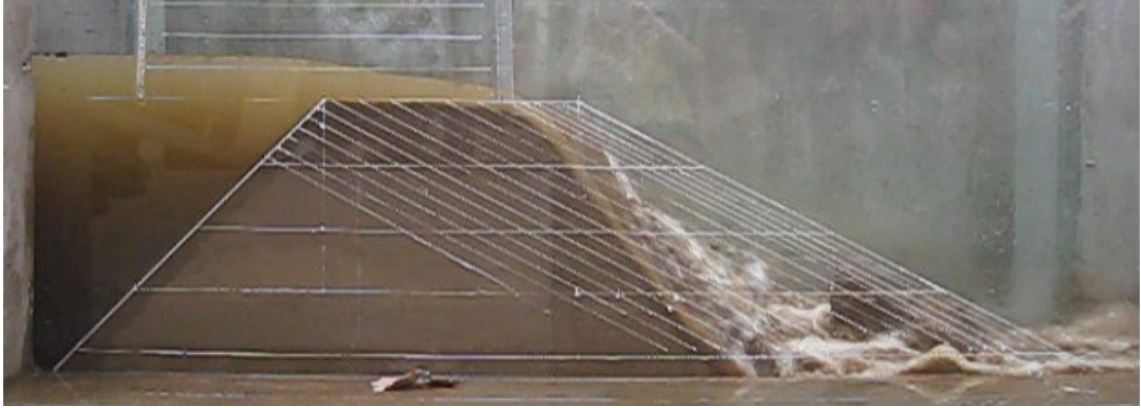






Phụ lục A – 2. Đập đập bằng đất C – Trường hợp cột nước tràn $H = 7\text{cm}$







Phụ lục B. Kết quả thí nghiệm đo tốc độ xói đất

Phụ lục B - 1. Kết quả đo tốc độ xói đất A

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
6,33	3,6	0,5	19,9	0,1
		1	19,8	0,2
		1,5	19,7	0,3
		2	19,6	0,4
		2,5	19,5	0,5
		3	19,4	0,6
		3,5	19,3	0,7
		4	19,2	0,8
		4,5	19,15	0,85
		5	19,1	0,9
		5,5	19	1
		6	18,9	1,1
		6,5	18,8	1,2
		7	18,7	1,3
		7,5	18,6	1,4
		10,83	5,6	8
8,5	18,4			1,6
9	18,3			1,7
9,5	18,2			1,8
10	18,1			1,9
0,5	19,8			0,2
1	19,5			0,5
1,5	19,3			0,7
2	19,1	0,9		
2,5	18,8	1,2		
3	18,6	1,4		
3,5	18,3	1,7		
4	18,1	1,9		

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
		4,5	17,9	2,1
		5	17,6	2,4
		5,5	17,4	2,6
		6	17,2	2,8
		6,5	16,9	3,1
		7	16,7	3,3
		7,5	16,5	3,5
		8	16,2	3,8
		8,5	16	4
		9	15,7	4,3
		9,5	15,5	4,5
10	15,2	4,8		
16,19	7,6	0,5	19,7	0,3
		1	19,3	0,7
		1,5	19	1
		2	18,6	1,4
		2,5	18,2	1,8
		3	17,9	2,1
		3,5	17,5	2,5
		4	17,2	2,8
		4,5	16,9	3,1
		5	16,5	3,5
		5,5	16,2	3,8
		6	15,8	4,2
		6,5	15,5	4,5
		7	15,1	4,9
7,5	14,8	5,2		
8	14,4	5,6		
8,5	14,1	5,9		
9	13,7	6,3		
9,5	13,4	6,6		
10	13	7		
20,21	8,5	0,5	19,5	0,5
		1	18,9	1,1
		1,5	18,5	1,5
		2	18	2
		2,5	17,4	2,6
		3	16,9	3,1
		3,5	16,5	3,5
		4	16	4
		4,5	15,4	4,6
		5	14,9	5,1
5,5	14,4	5,6		

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
		6	13,9	6,1
		6,5	13,5	6,5
		7	12,9	7,1
		7,5	12,4	7,6
		8	11,8	8,2
		8,5	11,3	8,7
		9	10,8	9,2
		9,5	10,3	9,7
		10	9,7	10,3
		26,9	10,7	0,5
1	18,8			1,2
1,5	18,1			1,9
2	17,5			2,5
2,5	16,8			3,2
3	16,1			3,9
3,5	15,5			4,5
4	14,8			5,2
4,5	14,1			5,9
5	13,5			6,5
5,5	12,8			7,2
6	12,2			7,8
6,5	11,5			8,5
7	10,9			9,1
7,5	10,2			9,8
8	9,5			10,5
8,5	8,9			11,1
9	8,3			11,7
9,5	7,6			12,4
10	7			13

Phụ lục B - 2. Kết quả đo tốc độ xói đất B

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
5,03	3,4	0,5	19,9	0,1
		1	19,8	0,2
		1,5	19,6	0,4
		2	19,4	0,6
		2,5	19,3	0,7
		3	19,2	0,8
		3,5	19,1	0,9
		4	19	1

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
		4,5	18,9	1,1
		5	18,7	1,3
		5,5	18,6	1,4
		6	18,4	1,6
		6,5	18,3	1,7
		7	18,2	1,8
		7,5	18,1	1,9
		8	18	2
		8,5	17,9	2,1
		9	17,8	2,2
		9,5	17,6	2,4
10	17,5	2,5		
9,23	5	0,5	19,7	0,3
		1	19,4	0,6
		1,5	19,1	0,9
		2	18,7	1,3
		2,5	18,3	1,7
		3	18	2
		3,5	17,6	2,4
		4	17,3	2,7
		4,5	17	3
		5	16,6	3,4
		5,5	16,2	3,8
		6	15,9	4,1
		6,5	15,5	4,5
		7	15,2	4,8
		7,5	14,8	5,2
		8	14,4	5,6
8,5	14,1	5,9		
9	13,7	6,3		
9,5	13,4	6,6		
10	13	7		
14,31	7,1	0,5	19,5	0,5
		1	19,1	0,9
		1,5	18,6	1,4
		2	18,1	1,9
		2,5	17,5	2,5
		3	17	3
		3,5	16,4	3,6
		4	15,9	4,1
		4,5	15,4	4,6
		5	14,9	5,1
5,5	14,5	5,5		

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
		6	14	6
		6,5	13,5	6,5
		7	13,1	6,9
		7,5	12,6	7,4
		8	12,2	7,8
		8,5	11,7	8,3
		9	11,2	8,8
		9,5	10,6	9,4
		10	10	10
18,16	8,1	0,5	19,3	0,7
		1	18,6	1,4
		1,5	17,8	2,2
		2	17,1	2,9
		2,5	16,3	3,7
		3	15,5	4,5
		3,5	14,7	5,3
		4	13,8	6,2
		4,5	13	7
		5	12,1	7,9
		5,5	11,3	8,7
		6	10,6	9,4
		6,5	9,8	10,2
		7	9	11
		7,5	8,3	11,7
		8	7,5	12,5
		8,5	6,7	13,3
		9	5,9	14,1
		9,5	5	15
10	4,1	15,9		
24,59	10	0,5	19,1	0,9
		1	18,2	1,8
		1,5	17,2	2,8
		2	16,2	3,8
		2,5	15,3	4,7
		3	14,3	5,7
		3,5	13,4	6,6
		4	12,4	7,6
		4,5	11,4	8,6
		5	10,5	9,5
		5,5	9,6	10,4
		6	8,6	11,4
		6,5	7,6	12,4
7	6,7	13,3		

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
		7,5	5,7	14,3
		8	4,8	15,2
		8,5	3,8	16,2
		9	2,8	17,2
		9,5	1,8	18,2
		10	0,8	19,2

Phụ lục B - 3. Kết quả đo tốc độ xói đất C

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
3,85	2,85	0,5	19,9	0,1
		1	19,8	0,2
		1,5	19,7	0,3
		2	19,6	0,4
		2,5	19,5	0,5
		3	19,4	0,6
		3,5	19,3	0,7
		4	19,2	0,8
		4,5	19,1	0,9
		5	19	1
		5,5	18,9	1,1
		6	18,8	1,2
		6,5	18,7	1,3
		7	18,6	1,4
		7,5	18,5	1,5
		8	18,4	1,6
		8,5	18,3	1,7
9	18,2	1,8		
9,5	18,1	1,9		
10	18	2		
7,73	4,52	0,5	19,8	0,2
		1	19,6	0,4
		1,5	19,3	0,7
		2	19	1
		2,5	18,7	1,3
		3	18,5	1,5
		3,5	18,3	1,7
		4	18	2
		4,5	17,8	2,2
		5	17,5	2,5
		5,5	17,2	2,8
		6	16,9	3,1

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
		6,5	16,6	3,4
		7	16,4	3,6
		7,5	16,1	3,9
		8	15,8	4,2
		8,5	15,5	4,5
		9	15,2	4,8
		9,5	14,9	5,1
		10	14,6	5,4
12,52	6,73	0,5	19,7	0,3
		1	19,4	0,6
		1,5	19	1
		2	18,7	1,3
		2,5	18,3	1,7
		3	17,9	2,1
		3,5	17,5	2,5
		4	17,1	2,9
		4,5	16,6	3,4
		5	16,1	3,9
		5,5	15,7	4,3
		6	15,3	4,7
		6,5	14,9	5,1
		7	14,5	5,5
7,5	14,2	5,8		
8	13,8	6,2		
8,5	13,5	6,5		
9	13,1	6,9		
9,5	12,7	7,3		
10	12,3	7,7		
16,19	7,71	0,5	19,5	0,5
		1	19	1
		1,5	18,5	1,5
		2	17,9	2,1
		2,5	17,4	2,6
		3	16,9	3,1
		3,5	16,4	3,6
		4	15,8	4,2
		4,5	15,3	4,7
		5	14,8	5,2
		5,5	14,3	5,7
		6	13,8	6,2
		6,5	13,3	6,7
		7	12,8	7,2
7,5	12,2	7,8		

Cấp lưu lượng Q	Độ sâu dòng chảy h	Thời gian t	Chiều cao mẫu Z	Chiều sâu xói ΔZ
l/s	cm	phút	cm	cm
		8	11,6	8,4
		8,5	11	9
		9	10,5	9,5
		9,5	10	10
		10	9,5	10,5
22,36	9,68	0,5	19,4	0,6
		1	18,8	1,2
		1,5	18,1	1,9
		2	17,5	2,5
		2,5	16,8	3,2
		3	16,1	3,9
		3,5	15,5	4,5
		4	14,8	5,2
		4,5	14,1	5,9
		5	13,4	6,6
		5,5	12,7	7,3
		6	12	8
		6,5	11,4	8,6
		7	10,7	9,3
		7,5	10	10
8	9,3	10,7		
8,5	8,6	11,4		
9	7,9	12,1		
9,5	7,2	12,8		
10	6,6	13,4		

Phụ lục C. Số liệu và kết quả tính toán diễn biến sự cố Đầm Hà Động bằng mô hình toán EMBANK

Phụ lục C – 1. File số liệu đập chính

DAM HA DONG MAIN DAM - INPUT

33
1
3
1
1
1
0.00 0.00
24.61 6.56
49.21 13.12
73.82 19.68
98.42 26.25

123.03	32.81											
147.64	39.37											
166.09	44.29											
177.57	44.29											
198.90	50.85											
220.22	57.41											
241.55	63.98											
262.87	70.54											
284.20	77.10											
287.48	77.10											
290.76	77.10											
294.04	77.10											
297.32	77.10											
300.60	77.10											
303.88	77.10											
320.29	70.54											
336.69	63.98											
353.10	57.41											
369.50	50.85											
385.90	44.29											
397.39	44.29											
412.15	39.37											
431.84	32.81											
451.52	26.25											
471.20	19.68											
490.89	13.12											
510.57	6.56											
530.26	0.00											
14	20											
100	0.14	0.1										
0.015	0.03	0.02										
1.94												
1.0	1.0	0.0011	0.9737	0.0011	0.9737							
14	20											
156	0.46	100										
0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33				
13												
0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	0.10	0.10										
77.10	77.10	77.10	77.10	79.72	80.05	80.38	80.87	80.87	80.87	79.82	78.74	
	77.33	76.02	74.64									
0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64
	1.64	1.64										

0.00	0.00	0.00	0.00	12.93	15.48	18.12	22.35	22.35	22.35	13.71	6.39	0.33
	0.00	0.00										

Phụ lục C – 2. File số liệu đập phụ 2

DAM HA DONG SADDLE NUMBER 2 DAM - INPUT

32			
1			
4			
1			
1			
1			
0.00		0.00	
9.02		3.28	
18.04		6.56	
27.07		9.84	
34.28		12.47	
43.31		15.75	
52.33		19.03	
61.35		22.31	
70.37		25.59	
79.40		28.87	
88.42		32.15	
97.44		35.43	
108.27		39.37	
111.55		39.37	
114.83		39.37	
118.11		39.37	
121.39		39.37	
124.67		39.37	
127.95		39.37	
135.33		36.09	
142.71		32.81	
144.65		31.95	
150.10		29.53	
157.48		26.25	
164.86		22.97	
172.24		19.68	
179.62		16.40	
187.01		13.12	
194.39		9.84	
201.77		6.56	
209.15		3.28	
216.53		0.00	
13	19		
100	0.114	0.08	0.10
0.015	0.03	0.02	0.02

19.4												
1.0	1.0	0.0017		0.8253		0.0017		0.8253		0.0011		
	0.9737											
13	19											
156	0.46	100										
0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.00					
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	6.56	13.12	19.68	26.25	32.81	39.37	36.09	32.81	
	31.95	29.53	26.25	22.97	19.68	16.40	13.12	9.84				
15												
0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	0.10	0.10										
39.37	39.37	39.37	39.37	41.99	42.32	42.65	43.14	43.14	43.14	42.10	41.00	
	39.60	38.30	36.90									
0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64
	1.64	1.64										
0.00	0.00	0.00	0.00	12.92	15.47	18.12	22.35	22.35	22.35	17.46	28.15	
	48.23	72.93	109.76									

Phụ lục C – 3. Kết quả tính toán cho đập chính

Phụ lục C – 3.1. Các giá trị tính toán tại thời điểm $t = 0,5$ giờ

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Giá trị tính toán theo công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	m	m	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
1	0,00	41,000	1,62E-01	0,05	3,90E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
2	7,50	43,000	1,77E-01	0,05	4,77E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
3	15,00	44,993	1,94E-01	0,06	5,94E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
4	22,50	47,005	2,15E-01	0,07	7,57E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
5	30,00	49,016	2,42E-01	0,07	9,92E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
6	37,50	50,998	2,75E-01	0,08	1,35E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
7	45,00	53,009	3,20E-01	0,10	1,91E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
8	50,63	54,503	3,65E-01	0,11	2,59E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
9	54,13	54,503	3,65E-01	0,11	2,59E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
10	60,63	56,484	4,48E-01	0,14	4,18E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
11	67,13	58,496	5,80E-01	0,18	7,63E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
12	73,63	60,507	8,22E-01	0,25	1,73E-03	0,0001	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
13	80,13	62,489	1,41E+00	0,43	6,11E-03	0,0003	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
14	86,63	64,500	7,69E+00	2,34	2,15E-01	0,0105	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
15	87,63	64,500	7,69E+00	2,34	2,15E-01	0,0105	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Giá trị tính toán theo công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	m	m	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
16	88,63	64,500	7,69E+00	2,34	2,15E-01	0,0105	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
17	89,63	64,500	7,69E+00	2,34	2,15E-01	0,0105	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
18	90,63	64,500	7,69E+00	2,34	2,15E-01	0,0105	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
19	91,63	64,500	7,69E+00	2,34	2,15E-01	0,0105	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
20	92,63	64,348	7,69E+00	2,34	2,15E-01	0,0105	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
21	97,63	62,153	1,99E+01	6,07	3,76E+00	0,1836	3,89E-03	0,0361	0,0039	0,0358	0,99
22	102,63	60,050	2,17E+01	6,61	4,44E+00	0,2168	4,60E-03	0,0427	0,0046	0,0423	1,00
23	107,63	58,039	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
24	112,63	56,027	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
25	117,63	54,015	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
26	121,13	54,015	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
27	125,63	52,522	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
28	131,63	50,540	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
29	137,63	48,529	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
30	143,63	46,517	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
31	149,63	44,536	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
32	155,63	42,530	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,84E-03	0,0450	0,0048	0,0446	0,80
33	161,63	41,177	2,22E+01	6,77	4,68E+00	0,2285	4,80E-03	0,0446	0,0048	0,0446	0,03

Phụ lục C – 3.2. Các giá trị tính toán tại thời điểm $t = 1,0$ giờ

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Giá trị tính toán theo công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
1	0,00	41,000	2,76E-01	0,08	1,13E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
2	7,50	43,000	3,01E-01	0,09	1,38E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
3	15,00	44,993	3,30E-01	0,10	1,71E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
4	22,50	47,005	3,65E-01	0,11	2,17E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
5	30,00	49,016	4,09E-01	0,12	2,83E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
6	37,50	50,998	4,65E-01	0,14	3,81E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
7	45,00	53,009	5,39E-01	0,16	5,37E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
8	50,63	54,503	6,12E-01	0,19	7,21E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
9	54,13	54,503	6,12E-01	0,19	7,21E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
10	60,63	56,484	7,45E-01	0,23	1,14E-03	0,0001	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
11	67,13	58,496	9,54E-01	0,29	2,04E-03	0,0001	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
12	73,63	60,507	1,33E+00	0,41	4,40E-03	0,0002	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
13	80,13	62,489	2,18E+00	0,66	1,41E-02	0,0007	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
14	86,63	64,500	9,04E+00	2,76	2,97E-01	0,0145	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
15	87,63	64,500	9,04E+00	2,76	2,97E-01	0,0145	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
16	88,63	64,500	9,04E+00	2,76	2,97E-01	0,0145	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Giá trị tính toán theo công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
17	89,63	64,500	9,04E+00	2,76	2,97E-01	0,0145	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
18	90,63	64,500	1,24E+01	3,78	9,66E-01	0,0472	9,56E-04	0,0089	0,0010	0,0089	0,22
19	91,63	64,287	1,48E+01	4,51	1,37E+00	0,0669	1,39E-03	0,0129	0,0014	0,0129	0,01
20	92,63	64,135	1,69E+01	5,15	1,81E+00	0,0884	1,85E-03	0,0172	0,0019	0,0172	0,35
21	97,63	60,965	3,11E+01	9,48	6,12E+00	0,2988	6,31E-03	0,0586	0,0063	0,0587	0,13
22	102,63	58,282	3,46E+01	10,55	7,55E+00	0,3686	7,77E-03	0,0722	0,0078	0,0722	0,07
23	107,63	55,996	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
24	112,63	53,832	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
25	117,63	51,729	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
26	121,13	51,729	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
27	125,63	50,236	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
28	131,63	48,254	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
29	137,63	46,243	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
30	143,63	44,231	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
31	149,63	42,241	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
32	155,63	41,000	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04
33	161,63	41,000	3,58E+01	10,91	8,10E+00	0,3954	8,33E-03	0,0774	0,0083	0,0774	0,04

Phụ lục C – 3.1. Các giá trị tính toán tại thời điểm t = 1,1 giờ

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Giá trị tính toán theo công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	m	m	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
1	0,00	41,000	1,72E-01	0,05	4,39E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
2	7,50	43,000	1,87E-01	0,06	5,36E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
3	15,00	44,993	2,06E-01	0,06	6,67E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
4	22,50	47,005	2,28E-01	0,07	8,49E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
5	30,00	49,016	2,56E-01	0,08	1,11E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
6	37,50	50,998	2,92E-01	0,09	1,51E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
7	45,00	53,009	3,39E-01	0,10	2,14E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
8	50,63	54,503	3,86E-01	0,12	2,90E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
9	54,13	54,503	3,86E-01	0,12	2,90E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
10	60,63	56,484	4,74E-01	0,14	4,67E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
11	67,13	58,496	6,12E-01	0,19	8,51E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
12	73,63	60,507	8,67E-01	0,26	1,92E-03	0,0001	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
13	80,13	62,489	1,48E+00	0,45	6,71E-03	0,0003	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
14	86,63	64,500	7,88E+00	2,40	2,26E-01	0,0110	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
15	87,63	64,500	7,88E+00	2,40	2,26E-01	0,0110	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
16	88,63	64,500	7,88E+00	2,40	2,26E-01	0,0110	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
17	89,63	64,500	7,88E+00	2,40	2,26E-01	0,0110	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Giá trị tính toán theo công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	m	m	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
18	90,63	64,500	1,23E+01	3,75	9,58E-01	0,0468	9,48E-04	0,0088	0,0009	0,0088	0,15
19	91,63	64,257	1,48E+01	4,51	1,39E+00	0,0679	1,41E-03	0,0131	0,0014	0,0131	0,10
20	92,63	64,074	1,70E+01	5,18	1,82E+00	0,0889	1,87E-03	0,0174	0,0019	0,0173	0,16
21	97,63	60,507	3,06E+01	9,33	5,92E+00	0,2890	6,11E-03	0,0568	0,0061	0,0568	0,06
22	102,63	57,703	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
23	107,63	55,387	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
24	112,63	53,223	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
25	117,63	51,119	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
26	121,13	51,119	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
27	125,63	49,626	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
28	131,63	47,614	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
29	137,63	45,633	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
30	143,63	43,624	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
31	149,63	41,625	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
32	155,63	41,000	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06
33	161,63	41,000	3,19E+01	9,72	6,40E+00	0,3124	6,60E-03	0,0613	0,0066	0,0614	0,06

Phụ lục C – 3.2. Các giá trị tính toán tại thời điểm t = 1,2 giờ

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Giá trị tính toán theo công thức			
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số	
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%	
1	0,00	41,000	8,12E-02	0,02	9,84E-06	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
2	7,50	43,000	8,85E-02	0,03	1,20E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
3	15,00	44,993	9,74E-02	0,03	1,50E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
4	22,50	47,005	1,08E-01	0,03	1,92E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
5	30,00	49,016	1,22E-01	0,04	2,53E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
6	37,50	50,998	1,39E-01	0,04	3,46E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
7	45,00	53,009	1,62E-01	0,05	4,96E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
8	50,63	54,503	1,86E-01	0,06	6,77E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
9	54,13	54,503	1,86E-01	0,06	6,77E-05	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
10	60,63	56,484	2,29E-01	0,07	1,11E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
11	67,13	58,496	3,00E-01	0,09	2,07E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
12	73,63	60,507	4,33E-01	0,13	4,90E-04	0,0000	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
13	80,13	62,489	7,81E-01	0,24	1,94E-03	0,0001	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
14	86,63	64,500	5,78E+00	1,76	1,22E-01	0,0060	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
15	87,63	64,500	5,78E+00	1,76	1,22E-01	0,0060	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
16	88,63	64,500	5,78E+00	1,76	1,22E-01	0,0060	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
17	89,63	64,500	9,35E+00	2,85	5,51E-01	0,0269	5,06E-04	0,0047	0,0005	0,0047	0,0049	0,49

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Giá trị tính toán theo công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
18	90,63	64,500	1,15E+01	3,51	8,29E-01	0,0405	8,09E-04	0,0075	0,0008	0,0075	0,18
19	91,63	64,257	1,40E+01	4,27	1,24E+00	0,0605	1,25E-03	0,0116	0,0013	0,0116	0,12
20	92,63	64,074	1,60E+01	4,88	1,62E+00	0,0791	1,66E-03	0,0154	0,0017	0,0154	0,27
21	97,63	60,507	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
22	102,63	57,703	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
23	107,63	55,387	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
24	112,63	53,223	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
25	117,63	51,119	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
26	121,13	51,119	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
27	125,63	49,626	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
28	131,63	47,614	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
29	137,63	45,633	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
30	143,63	43,624	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
31	149,63	41,625	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
32	155,63	41,000	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03
33	161,63	41,033	2,72E+01	8,29	4,66E+00	0,2275	4,82E-03	0,0448	0,0048	0,0448	0,03

Phụ lục C – 4. Kết quả tính toán cho đập phụ 2

Phụ lục C – 4.1. Các giá trị tính toán tại thời điểm $t = 0,5$ giờ

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK							Tính toán từ công thức			
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	m	m	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
1	0,00	52,500	3,08E-01	0,09	3,10E-03	0,0002	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
2	2,75	53,500	3,34E-01	0,10	8,43E-03	0,0004	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
3	5,50	54,500	3,65E-01	0,11	1,04E-02	0,0005	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
4	8,25	55,499	4,02E-01	0,12	1,30E-02	0,0006	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
5	10,45	56,310	4,38E-01	0,13	1,59E-02	0,0008	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
6	13,20	57,316	4,93E-01	0,15	2,09E-02	0,0010	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
7	15,95	58,291	5,63E-01	0,17	2,86E-02	0,0014	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
8	18,70	59,297	6,57E-01	0,20	4,09E-02	0,0020	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
9	21,45	60,303	7,89E-01	0,24	5,89E-02	0,0029	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
10	24,20	61,309	9,87E-01	0,30	9,22E-02	0,0045	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
11	26,95	62,284	1,32E+00	0,40	1,64E-01	0,0080	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
12	29,70	63,229	1,99E+00	0,61	3,76E-01	0,0184	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
13	33,00	64,509	4,07E+00	1,24	6,03E-01	0,0294	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
14	34,00	64,509	4,07E+00	1,24	6,03E-01	0,0294	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
15	35,00	64,509	4,07E+00	1,24	6,03E-01	0,0294	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Tính toán từ công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	m	m	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
16	36,00	64,509	4,07E+00	1,24	6,03E-01	0,0294	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
17	37,00	64,509	4,07E+00	1,24	6,03E-01	0,0294	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
18	38,00	64,509	4,07E+00	1,24	6,03E-01	0,0294	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
19	39,00	64,357	4,07E+00	1,24	6,03E-01	0,0294	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
20	41,25	63,229	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
21	43,50	62,254	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
22	44,09	61,979	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
23	45,75	61,248	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
24	48,00	60,242	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
25	50,25	59,236	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
26	52,50	58,230	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
27	54,75	57,255	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
28	57,00	56,249	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
29	59,25	55,243	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
30	61,50	54,243	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
31	63,75	53,244	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76
32	66,00	52,319	4,07E+00	1,24	1,57E+00	0,0766	2,36E-03	0,0219	0,0023	0,0215	1,76

Phụ lục C – 4.2. Các giá trị tính toán tại thời điểm $t = 1,0$ giờ

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Tính toán từ công thức			
	Toạ độ X	Toạ độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số	
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%	
1	0,00	52,500	5,18E-01	0,16	8,72E-03	0,0004	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
2	2,75	53,500	5,61E-01	0,17	2,36E-02	0,0012	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
3	5,50	54,500	6,12E-01	0,19	2,88E-02	0,0014	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
4	8,25	55,499	6,72E-01	0,20	3,59E-02	0,0018	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
5	10,45	56,310	7,30E-01	0,22	4,35E-02	0,0021	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
6	13,20	57,316	8,17E-01	0,25	5,67E-02	0,0028	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
7	15,95	58,291	9,29E-01	0,28	7,64E-02	0,0037	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
8	18,70	59,297	1,08E+00	0,33	1,08E-01	0,0053	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
9	21,45	60,272	1,27E+00	0,39	1,53E-01	0,0075	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
10	24,20	61,187	1,54E+00	0,47	2,25E-01	0,0110	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
11	26,95	62,162	1,97E+00	0,60	1,96E-01	0,0096	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
12	29,70	63,016	2,68E+00	0,82	4,02E-01	0,0196	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
13	33,00	64,509	8,70E+00	2,65	2,75E+00	0,1343	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
14	34,00	64,357	9,01E+00	2,75	2,95E+00	0,1440	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
15	35,00	63,260	1,25E+01	3,81	9,81E+00	0,4789	1,01E-02	0,0938	0,0111	0,1033	10,05	

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Tính toán từ công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
16	36,00	59,876	2,15E+01	6,55	2,92E+01	1,4255	2,93E-02	0,2722	0,0275	0,2552	6,25
17	37,00	58,901	3,84E+00	1,17	7,30E+00	0,3564	8,52E-03	0,0792	0,0087	0,0807	1,98
18	38,00	55,249	1,40E+00	0,43	5,22E+00	0,2548	6,40E-03	0,0595	0,0066	0,0610	2,55
19	39,00	52,500	8,95E-01	0,27	4,50E+00	0,2197	5,66E-03	0,0526	0,0058	0,0538	2,38
20	41,25	52,500	1,04E+00	0,32	4,73E+00	0,2309	5,90E-03	0,0548	0,0060	0,0561	2,41
21	43,50	52,399	1,18E+00	0,36	4,94E+00	0,2412	6,27E-03	0,0583	0,0063	0,0582	0,05
22	44,09	51,296	1,13E+00	0,34	4,87E+00	0,2378	6,19E-03	0,0575	0,0062	0,0575	0,04
23	45,75	50,400	1,03E+00	0,31	4,72E+00	0,2304	6,03E-03	0,0560	0,0060	0,0560	0,03
24	48,00	50,400	1,06E+00	0,32	4,77E+00	0,2329	6,08E-03	0,0565	0,0061	0,0565	0,09
25	50,25	49,662	1,04E+00	0,32	4,73E+00	0,2309	6,04E-03	0,0561	0,0060	0,0561	0,04
26	52,50	49,391	1,13E+00	0,34	4,87E+00	0,2378	6,19E-03	0,0575	0,0062	0,0575	0,04
27	54,75	49,391	1,18E+00	0,36	4,94E+00	0,2412	6,26E-03	0,0582	0,0063	0,0582	0,11
28	57,00	49,391	1,28E+00	0,39	5,08E+00	0,2480	6,42E-03	0,0596	0,0064	0,0596	0,07
29	59,25	49,391	1,41E+00	0,43	5,24E+00	0,2558	6,58E-03	0,0611	0,0066	0,0612	0,07
30	61,50	49,391	1,54E+00	0,47	5,40E+00	0,2636	6,75E-03	0,0627	0,0068	0,0627	0,04
31	63,75	49,391	1,70E+00	0,52	5,58E+00	0,2724	6,94E-03	0,0645	0,0069	0,0645	0,01
32	66,00	49,501	1,95E+00	0,59	5,83E+00	0,2846	7,21E-03	0,0670	0,0072	0,0669	0,14

Phụ lục C – 4.3. Các giá trị tính toán tại thời điểm $t = 1,1$ giờ

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Tính toán từ công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	m	m	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
1	0,00	52,500	3,31E-01	0,10	3,58E-03	0,0002	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
2	2,75	53,500	3,59E-01	0,11	9,74E-03	0,0005	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
3	5,50	54,500	3,92E-01	0,12	1,20E-02	0,0006	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
4	8,25	55,499	4,32E-01	0,13	1,50E-02	0,0007	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
5	10,45	56,310	4,70E-01	0,14	1,83E-02	0,0009	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
6	13,20	57,316	5,29E-01	0,16	2,41E-02	0,0012	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
7	15,95	58,291	6,04E-01	0,18	3,28E-02	0,0016	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
8	18,70	59,297	7,05E-01	0,21	4,69E-02	0,0023	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
9	21,45	60,272	8,38E-01	0,26	6,64E-02	0,0032	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
10	24,20	61,187	1,03E+00	0,31	5,03E-02	0,0025	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
11	26,95	62,162	1,34E+00	0,41	9,30E-02	0,0045	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
12	29,70	63,016	1,85E+00	0,56	1,99E-01	0,0097	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
13	33,00	64,357	8,08E+00	2,46	2,37E+00	0,1157	0,00E+00	0,0000	0,0024	0,0227	0,00
14	34,00	63,473	1,12E+01	3,41	7,85E+00	0,3832	8,08E-03	0,0751	0,0081	0,0751	0,00
15	35,00	60,608	1,95E+01	5,94	2,39E+01	1,1668	2,41E-02	0,2239	0,0241	0,2238	0,05
16	36,00	59,206	2,48E+00	0,76	5,98E+00	0,2919	6,18E-03	0,0574	0,0062	0,0574	0,08
17	37,00	58,230	2,23E+00	0,68	5,86E+00	0,2861	6,05E-03	0,0562	0,0061	0,0562	0,04

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Tính toán từ công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	m	m	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
18	38,00	54,765	8,56E-01	0,26	4,26E+00	0,2080	4,41E-03	0,0410	0,0044	0,0410	0,01
19	39,00	52,500	5,89E-01	0,18	3,76E+00	0,1836	3,89E-03	0,0361	0,0039	0,0362	0,07
20	41,25	52,500	6,78E-01	0,21	3,94E+00	0,1924	4,08E-03	0,0379	0,0041	0,0379	0,03
21	43,50	52,399	7,60E-01	0,23	4,09E+00	0,1997	5,35E-03	0,0497	0,0053	0,0497	0,05
22	44,09	50,732	6,53E-01	0,20	3,89E+00	0,1899	5,13E-03	0,0477	0,0051	0,0476	0,08
23	45,75	50,400	6,15E-01	0,19	3,81E+00	0,1860	5,04E-03	0,0468	0,0050	0,0468	0,06
24	48,00	50,400	6,76E-01	0,21	3,93E+00	0,1919	5,18E-03	0,0481	0,0052	0,0480	0,19
25	50,25	49,662	6,57E-01	0,20	3,90E+00	0,1904	5,14E-03	0,0478	0,0051	0,0477	0,06
26	52,50	49,391	6,85E-01	0,21	3,95E+00	0,1928	5,20E-03	0,0483	0,0052	0,0482	0,14
27	54,75	49,391	7,43E-01	0,23	4,06E+00	0,1982	5,32E-03	0,0494	0,0053	0,0494	0,11
28	57,00	49,391	8,09E-01	0,25	4,18E+00	0,2041	5,45E-03	0,0506	0,0054	0,0506	0,07
29	59,25	49,391	8,83E-01	0,27	4,30E+00	0,2099	5,58E-03	0,0518	0,0056	0,0518	0,05
30	61,50	49,391	9,68E-01	0,30	4,44E+00	0,2168	5,73E-03	0,0532	0,0057	0,0532	0,01
31	63,75	49,391	1,07E+00	0,33	4,58E+00	0,2236	5,88E-03	0,0546	0,0059	0,0546	0,02
32	66,00	49,501	1,21E+00	0,37	4,78E+00	0,2334	6,10E-03	0,0567	0,0061	0,0566	0,07

Phụ lục C – 4.4. Các giá trị tính toán tại thời điểm $t = 1,2$ giờ

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Tính toán từ công thức			
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số	
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%	
1	0,00	52,500	2,29E-01	0,07	1,73E-03	0,0001	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
2	2,75	53,500	2,49E-01	0,08	4,74E-03	0,0002	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
3	5,50	54,500	2,73E-01	0,08	5,86E-03	0,0003	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
4	8,25	55,499	3,02E-01	0,09	7,40E-03	0,0004	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
5	10,45	56,310	3,29E-01	0,10	9,09E-03	0,0004	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
6	13,20	57,316	3,72E-01	0,11	1,21E-02	0,0006	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
7	15,95	58,291	4,28E-01	0,13	1,67E-02	0,0008	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
8	18,70	59,297	5,03E-01	0,15	2,39E-02	0,0012	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
9	21,45	60,272	6,05E-01	0,18	3,46E-02	0,0017	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
10	24,20	61,187	7,53E-01	0,23	2,78E-02	0,0014	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
11	26,95	62,162	1,01E+00	0,31	5,47E-02	0,0027	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
12	29,70	63,016	1,45E+00	0,44	1,28E-01	0,0062	3,43E-05	0,0003	0,0000	0,0000	0,0003	4,55
13	33,00	62,833	1,46E+01	4,45	1,35E+01	0,6591	1,38E-02	0,1282	0,0138	0,1279	0,1279	0,22
14	34,00	60,730	1,98E+01	6,04	2,47E+01	1,2059	2,49E-02	0,2313	0,0249	0,2311	0,2311	0,10
15	35,00	59,907	2,52E+00	0,77	6,18E+00	0,3017	6,38E-03	0,0593	0,0064	0,0593	0,0593	0,00
16	36,00	58,505	1,62E+00	0,49	6,18E+00	0,3017	6,38E-03	0,0593	0,0064	0,0593	0,0593	0,00
17	37,00	57,590	1,35E+00	0,41	5,84E+00	0,2851	6,03E-03	0,0560	0,0060	0,0560	0,0560	0,04

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Tính toán từ công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
18	38,00	54,271	5,62E-01	0,17	4,36E+00	0,2129	4,51E-03	0,0419	0,0045	0,0419	0,06
19	39,00	52,500	4,14E-01	0,13	3,94E+00	0,1924	4,07E-03	0,0378	0,0041	0,0379	0,22
20	41,25	52,500	4,73E-01	0,14	4,11E+00	0,2007	4,26E-03	0,0396	0,0043	0,0395	0,13
21	43,50	52,399	5,27E-01	0,16	4,27E+00	0,2085	5,54E-03	0,0515	0,0055	0,0515	0,08
22	44,09	50,165	4,14E-01	0,13	3,94E+00	0,1924	5,18E-03	0,0481	0,0052	0,0481	0,03
23	45,75	50,400	4,22E-01	0,13	3,96E+00	0,1933	5,21E-03	0,0484	0,0052	0,0483	0,12
24	48,00	50,400	4,63E-01	0,14	4,09E+00	0,1997	5,34E-03	0,0496	0,0053	0,0497	0,13
25	50,25	49,662	4,49E-01	0,14	4,04E+00	0,1972	5,30E-03	0,0492	0,0053	0,0492	0,15
26	52,50	49,391	4,66E-01	0,14	4,10E+00	0,2002	5,36E-03	0,0498	0,0054	0,0498	0,03
27	54,75	49,391	5,05E-01	0,15	4,21E+00	0,2055	5,48E-03	0,0509	0,0055	0,0509	0,02
28	57,00	49,391	5,49E-01	0,17	4,33E+00	0,2114	5,61E-03	0,0521	0,0056	0,0521	0,00
29	59,25	49,391	5,99E-01	0,18	4,45E+00	0,2172	5,74E-03	0,0533	0,0057	0,0533	0,01
30	61,50	49,391	6,55E-01	0,20	4,59E+00	0,2241	5,89E-03	0,0547	0,0059	0,0547	0,03
31	63,75	49,391	7,20E-01	0,22	4,73E+00	0,2309	6,05E-03	0,0562	0,0060	0,0561	0,13
32	66,00	49,501	8,19E-01	0,25	4,94E+00	0,2412	6,27E-03	0,0583	0,0063	0,0582	0,05

Phụ lục C – 4.5. Các giá trị tính toán tại thời điểm $t = 1,4$ giờ

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Tính toán từ công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
1	0,00	52,500	1,27E+00	0,39	5,44E-02	0,0027	0,00E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
2	2,75	53,488	1,39E+00	0,42	1,51E-01	0,0074	1,12E-04	0,0010	0,0000	0,0000	0,00
3	5,50	54,478	1,53E+00	0,47	1,90E-01	0,0093	2,03E-04	0,0019	0,0000	0,0000	0,00
4	8,25	55,463	1,71E+00	0,52	2,45E-01	0,0120	3,18E-04	0,0030	0,0000	0,0000	0,00
5	10,45	56,249	1,88E+00	0,57	3,07E-01	0,0150	4,37E-04	0,0041	0,0000	0,0000	0,00
6	13,20	57,194	2,16E+00	0,66	4,20E-01	0,0205	6,41E-04	0,0060	0,0000	0,0000	0,00
7	15,95	58,169	2,52E+00	0,77	5,99E-01	0,0292	5,59E-04	0,0052	0,0000	0,0000	0,00
8	18,70	59,114	3,02E+00	0,92	8,65E-01	0,0422	8,48E-04	0,0079	0,0000	0,0000	0,00
9	21,45	60,090	3,76E+00	1,15	6,87E-01	0,0335	6,54E-04	0,0061	0,0000	0,0000	0,00
10	24,20	60,974	5,08E+00	1,55	1,38E+00	0,0674	1,40E-03	0,0130	0,0014	0,0130	0,05
11	26,95	61,553	7,91E+00	2,41	3,88E+00	0,1894	4,02E-03	0,0373	0,0040	0,0373	0,08
12	29,70	61,583	9,74E+00	2,97	5,98E+00	0,2919	6,17E-03	0,0573	0,0062	0,0574	0,09
13	33,00	60,791	9,74E+00	2,97	5,98E+00	0,2919	6,17E-03	0,0573	0,0062	0,0574	0,09
14	34,00	55,155	9,74E+00	2,97	5,98E+00	0,2919	6,17E-03	0,0573	0,0062	0,0574	0,09
15	35,00	53,695	5,48E+00	1,67	1,65E+00	0,0806	1,68E-03	0,0156	0,0017	0,0157	0,43
16	36,00	52,500	3,94E+00	1,20	1,17E+00	0,0571	1,17E-03	0,0109	0,0012	0,0109	0,58
17	37,00	52,500	4,21E+00	1,28	1,19E+00	0,0581	1,20E-03	0,0111	0,0012	0,0111	0,16

Mặt cắt	Giá trị tính toán từ chương trình EMBANK								Tính toán từ công thức		
	Tọa độ X	Tọa độ Z	Vận tốc V		Ứng suất τ		Tốc độ xói E		Tốc độ xói E		Sai số
	(m)	(m)	ft/s	m/s	lb/ft ²	kN/m ²	ft ³ /s-ft ²	cm/s	ft ³ /s-ft ²	cm/s	%
18	38,00	52,500	4,47E+00	1,36	1,22E+00	0,0596	1,22E-03	0,0113	0,0012	0,0114	0,83
19	39,00	52,500	4,73E+00	1,44	1,24E+00	0,0605	1,25E-03	0,0116	0,0013	0,0116	0,12
20	41,25	52,500	5,33E+00	1,62	1,54E+00	0,0752	1,57E-03	0,0146	0,0016	0,0146	0,05
21	43,50	52,399	5,74E+00	1,75	1,84E+00	0,0898	2,71E-03	0,0252	0,0027	0,0252	0,03
22	44,09	50,138	3,11E+00	0,95	1,08E+00	0,0527	1,70E-03	0,0158	0,0017	0,0158	0,10
23	45,75	50,400	3,43E+00	1,05	1,11E+00	0,0542	1,75E-03	0,0163	0,0017	0,0162	0,55
24	48,00	50,400	3,64E+00	1,11	1,14E+00	0,0557	1,78E-03	0,0165	0,0018	0,0166	0,12
25	50,25	49,662	3,23E+00	0,98	1,09E+00	0,0532	1,72E-03	0,0160	0,0017	0,0159	0,44
26	52,50	49,391	3,19E+00	0,97	1,09E+00	0,0532	1,71E-03	0,0159	0,0017	0,0159	0,14
27	54,75	49,391	3,33E+00	1,01	1,10E+00	0,0537	1,73E-03	0,0161	0,0017	0,0160	0,21
28	57,00	49,391	3,47E+00	1,06	1,12E+00	0,0547	1,75E-03	0,0163	0,0018	0,0163	0,25
29	59,25	49,391	3,63E+00	1,11	1,13E+00	0,0552	1,78E-03	0,0165	0,0018	0,0164	0,66
30	61,50	49,391	3,78E+00	1,15	1,15E+00	0,0561	1,80E-03	0,0167	0,0018	0,0167	0,22
31	63,75	49,391	3,95E+00	1,20	1,17E+00	0,0571	1,82E-03	0,0169	0,0018	0,0169	0,20
32	66,00	49,501	4,24E+00	1,29	1,19E+00	0,0581	1,86E-03	0,0173	0,0019	0,0172	0,47