

# 제방 붕괴 모의를 위한 수치해석모형의 적용

## The Application for Levee failure Analysis by Numerical Model

박재홍\*, 천명호\*\*,한건연\*\*\*

Jae Hong Park, Myung Ho Chun, Keun Yeun Han

### 요 지

국내에서의 범람홍수 및 범람으로 인한 제방붕괴 특성은 그 해석상의 어려움으로 인해 주로 과거 범람상황 및 지형도를 통한 경험적 추정 등에 의존해 오고 있는 실정으로 정교한 물리학적 이론에 근거하지 못하였으므로 범람홍수량, 제방의 붕괴폭 등을 정확하게 예측하기에는 미흡한 점이 많았다. 도시하천과 같이 제방 인접한 곳에 주거, 산업시설 등이 밀집하고 있는 지역에서의 제방붕괴로 인한 홍수류의 범람은 막대한 인명 및 재산피해를 발생시키는 큰 재해가 될 수 있다. 본 연구를 통해서 홍수시 제방일류로 인한 제방붕괴 양상을 예측하고 이를 통해 범람유량의 정확한 예측을 통하여 도시하천 제방 계획시 홍수피해와 투자액을 감안한 경제적인 하천 제방단면 결정을 위한 기본자료로 활용될 수 있고, 도시 중요시설물의 입지 선정시 홍수피해에 대한 판단자료로 이용될 수 있을 것이다.

본 연구에서 개발된 모형을 이용하여 Teton 댐, Mantaro landslide 댐, Spirit Lake 장애물 댐 등에 적용하여 개발된 모형의 정확성을 입증하였다. 적용결과 개발된 모형은 기존의 모형과 같은 결과를 나타내어 국내 계산환경에 적용가능함을 보여 앞으로 이용가능성이 큰것을 알 수 있었다. 적용결과 파이핑의 발생위치의 영향은 대체로 파이핑의 위치가 체체의 윗부분에 위치할수록 최대 유출량은 커지는 것으로 나타났으나 Lawn Lake 댐의 경우에는 사면의 식생의 영향으로 다른 결과를 나타내었다. 점착력은 경우에는 점착력이 클수록 유출량의 크기는 감소하는 것으로 나타났으며 마찰각은 최대 붕괴폭의 크기 및 발생시간, 댐의 높이와 폭, 저수용량 등과 유출량이 연관있어 좀 더 많은 계산결과를 이용하여 심도있는 고찰이 요구되었다. 입자의 중간크기, 공극률, 균일성의 경우 적용된 댐들 모두 유사한 결과를 나타내었고 변수들이 커질수록 유출량도 증가하였다. 댐 사면 경사의 경우에는 상,하류 사면 모두 경사가 완만할수록 유출량이 감소하였다. 위의 결과를 통해 개발된 제방붕괴 해석모형은 좀 더 많은 연구와 적용을 통해 개선과 검증이 이루어진다면 국내 제방붕괴해석에 필요한 해석모형이 될 수 있다고 판단되었다.

**핵심용어 : 하천제방, 수치모형 제방붕괴특성**

### 1. 서 론

거의 해마다 되풀이 되는 도시침수 및 하천 범람에 의한 홍수재해는 제내지에서의 많은 인명손실과 극심한 재산피해를 줄 뿐 아니라 사회적 문제를 야기하기도 한다. 따라서, 도시침수 및 하천홍수범람에 관한 정확한 추정이 필요하며 이를 통해서 홍수범람구역에 대한 적절한 홍수예경보 및 피난대책의 수립이 가능하게 된다.

그간 국내에서의 범람홍수 및 범람으로 인한 제방붕괴 특성은 그 해석상의 어려움으로 인해 주로

\* 정회원·세명대학교 토목공학과 부교수 E-mail : jhpark@semyung.ac.kr

\*\* 세명대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\* 정회원·경북대학교 토목공학과 교수

과거 범람상황 및 지형도를 통한 경험적 추정 등에 의존해 오고 있는 실정으로서 정교한 물리학적 기초이론에 근거하지 못하였으므로 범람홍수량, 제방의 붕괴폭 등을 정확하게 예측하기에는 미흡한 점이 많았다. 도시하천과 같이 제방 인접한 곳에 주거, 산업시설 등이 밀집하고 있는 지역에서의 제방붕괴로 인한 홍수류의 범람은 막대한 인명 및 재산피해를 발생시키는 큰 재해가 될 수 있다. 본 연구를 통해서 홍수시 제방월류로 인한 제방붕괴 양상을 예측하고 이를 통해 범람유량의 정확한 예측을 통하여 도시하천제방 계획시 홍수피해와 투자액을 감안한 경제적인 하천 제방단면 결정을 위한 기본자료로 활용될 수 있고, 도시 중요시설물의 입지 선정시 홍수피해에 대한 판단자료로 이용될 수 있을 것이다.

또한 범람홍수로 인해 도시홍수 재해시 본 연구결과를 이용하여 범람 홍수파의 전달 특성해석, 침수 범위 및 침수위 추정, 예상 피해규모를 예측할 수 있는 기본 자료로 사용 될 수 있을 것으로 판단된다. 하천제방 붕괴의 역학적 과정은 수학적으로 완전하게 설명되지 못하고 있다. 파괴형상의 개념을 이해하는 것은 유사 이송 이론과 침식되고 있는 제방 붕괴면을 흐름 특성들의 정보로부터 얻어질 수 있다. 경험적인 관계는 수두와 파괴를 통한 흐름의 함수로써 제방 재료의 이송을 계산하는데 이용될 수 있다. 이러한 경험식은 흙담에서의 파괴 형상을 모형화 할 컴퓨터 프로그램으로 풀 수 있다.

## 2. 제방붕괴 모형의 개요

본 연구 모형에서 계산절차는 붕괴면의 크기는 붕괴면으로 유입되는 유량에 달려있고 유사 이동량은 붕괴면의 크기와 유량에 달려있는 반면에 붕괴면으로 유입되는 유량은 붕괴면을 바닥높이와 폭에 달려 있기 때문에 반복적 작업을 통해 해석될 수 있다. 단순한 반복기법이 유량, 침식, 그리고 붕괴면의 크기의 상호의존성을 설명하기위해 이용되었다. 추정된 증가되는 침식 깊이( $\Delta H_c$ )는 반복 계산을 시작하기 위해 각 시간단계에서 사용되어진다.

이 추정된 값은 이전에 계산된 증가되어지는 침식깊이로부터 첫 몇 번의 시간단계후에 외삽되어진다. 계산 알고리즘은 다음과 같다.

증가 시간 :  $t = t' + \Delta t$

1. 추정된  $\Delta H_c$ 를 사용하여 계산된  $H_c$  :  $H_c = H'_c - \Delta H_c$
2. 저수지 수위를 계산 :  $H = H' + \Delta H$ , 여기서,  $\Delta H$  는 이전 변화치로부터 외삽되어 얻어진 하천 수위에서의 추정된 증가된 변화, 그리고  $H'$  는 시간  $t'$ 에서의 하천수위이다.
3. H 와 연관된  $\overline{Q_{sp}}, \overline{Q_i}, \overline{Q_o}$  를 계산
4. 이전에 계산된 붕괴면 유량( $Q_b$ )를 이용하여  $\Delta H$ 를 계산
5. 하천 수위를 계산 :  $H = H' + \Delta H$
6. 오리피스 혹은 위어식을 이용한 붕괴면 유량( $Q_b$ )를 계산
7. 하류 잠수효과를 고려한 붕괴면 유량을 보정;
8. 붕괴면에 대한 붕괴단면폭, 붕괴사면각, 붕괴면 윤변, 동수반경 계산
9. Meyer-Peter-Muller 유사이동식을 이용하여 유사이동량( $Q_s$ )을 계산
10. 유사이동량을 이용한 제방세굴깊이 계산
11. 추정된  $\Delta H_c$ 로부터  $\Delta H_c$  를 비교 : 각각되면 1 단계과정 반복
12. 제방의 붕괴여부를 조사
13.  $\Delta H_c$  와  $\Delta H'$  에 대한 추정치를 외삽
14. 만약 t 가 주어진 계산시간( $t_c$ ) 보다 작으면 단계 1 로 돌아간다; 그리고
15. 각 시간단계에서 계산된 총유량 ( $Q_b + Q_{sp} + Q_o$ )을 구성하는 유출 수문곡선을 그린다.

### 3. 모형의 매개변수 영향분석

제방붕괴 모형을 이용하여 입력자료에 대한 붕괴부를 통한 유출량의 변화양상을 파악하기 위해 입력변수의 영향분석을 실시하였다. 입력변수들은 각각 제방 파이핑의 위치, 담체재료의 마찰각 및 점착력, 재료의 중간크기, 제체재료의 균일성, 공극율, 제방 상,하류사면의 경사 등이었다. 모의된 제방은 각각 Teton 댐, Tocoa 댐, Lawn Lake 제방이다.

#### 3.1 파이핑의 발생위치의 영향

먼저 제체의 파이핑 발생위치로 인한 유출량의 크기를 비교하였다. 그림 3.1 에서 표시된 것은 파이핑 위치에 따라 발생하는 최대 유출량을 무차원화하였다. 그림에서 보여지듯이 파이핑의 위치에 따른 최대 유출량의 변화는 가장 아랫부분에서 파이핑이 발생했을 경우 가장 큰 유출량을 보이는 값의 0.5 - 1.0 배 이르는 유출을 보이며 파이핑의 위치가 댐의 위쪽으로 이동함에 따라 유출량의 변화는 서서히 줄어들며 Tocoa 댐의 경우에는 계속적으로 증가하기도 한다. 파이핑의 위치가 일정위치에 도달하면 유출량이 증가하여 최대 유출량에 도달하는 것으로 나타났다.

#### 3.2 마찰각에 대한 영향

제체재료의 마찰각에 따른 붕괴유출량의 변화를 계산하였다. 그림 3.2 에서 보여지는 바와 같이 Teton 댐의 경우에는 마찰각이 20 - 38 에서는 클수록 최대붕괴유출량이 증가하다가 그 이상의 마찰각에서는 마찰각이 커질수록 유출량이 감소하였다. 그러나 Tocoa 댐의 경우에는 계산된 마찰각의 범위에서는 마찰각이 커질수록 최대붕괴유출량이 감소하는 것으로 보여진다. 그 이유는 확실치는 않으나 마찰각이 클수록 저항력은 증가하지만 일단 붕괴가 발생하면 큰 마찰각은 이웃하는 토사입자와 큰 마찰을 일으켜 크게 붕괴되어 일정시간내에 큰 붕괴폭에 이르는 것으로 파악되었다.

#### 3.3 제체재료 점착력에 대한 영향

제체재료에 대한 점착력의 영향을 파악하고자 하였고 점착력 계수를 10 - 1400 까지 변하시켜 붕괴부를 통한 최대유출량을 비교하였다. 점착력에 대한 영향은 마찰력과 마찬가지로 Teton 댐과 Tocoa 댐에서 비교되었고 결과는 그림 3.3 과 같이 점착력이 클수록 최대붕괴유량은 감소하는 형태로 서로 비슷한 양상을 나타내었다. 제체는 토사로 이루어져 있고 일반적으로 알고 있는 토사의 성질과 같이 점착력이 클수록 붕괴에 대한 저항력이 커 붕괴가 천천히 발달하며 이에 따라 붕괴폭도 감소하여 최대 유출량도 감소하는 것으로 판단된다.

#### 3.4 제체재료의 중간입자크기의 영향

제체재료의 중간입자의 크기에 대한 붕괴부 최대유출유량의 변화는 그림 3.4 와 같다. 그림에서 나타나듯이 중간입자의 크기가 클수록 Teton 댐, Tocoa 댐 모두에서 유출량은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 댐의 크기에 따라 최대 유출량이 크게 증가하는 범위는 다르게 나타났고 어느정도 크기에 다 다르면 유출량의 증가는 나타나지 않는 것으로 보여졌다.

#### 3.5 공극률(Porosity)의 영향

제체재료의 공극률에 따른 최대유출유량의 변화가 그림 3.5 에서 나타나 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공극률이 클수록 최대유출량이 증가하고 있으며 이는 공극률이 다짐도를 나타낼 수 있으며 공극률이 크면 다짐도가 낮아지고 그에 따라 붕괴부가 조기에 발달하여 유출이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

#### 3.6 제체재료의 균일성(Uniformity)에 대한 영향

제체재료의 균일성에 대한 영향을 고려하였다. 균일성에 대한 고려는 균일성 계수  $D_{90}/D_{30}$  의 크기로

하였고 계산된 계수의 범위는 2 - 10 이다. 그림 3.6에서 보여지는 바와 같이 적용된 두 댐 모두 균일성 계수가 클수록 유출량이 크게 나타났으며 이는 입도분포가 좋을수록 최대유출량이 증가한다는 것을 의미한다. 본 실험의 결과는 공극률은 일정한 것으로 고려하였고 단지 균일성계수가 증가한 것으로 고려하였기 때문에 균일성계수가 커질수록 즉  $D_{90}$  의 크기가 커질수록 그에 따라 생기는 공극 하나의 크기는 커져 본 실험의 결과가 발생하는 것으로 판단된다.

### 3.7 하류사면의 경사의 영향

제체 하류사면 경사에 따른 유출량의 변화가 그림 3.7 에서 나타나 있다. 적용된 두 댐 모두 하류사면 경사가 완만할수록 유출량이 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.8 제체 상류사면 경사의 영향

제체 상류사면 경사에 따른 유출량의 변화가 그림 3.8 에서 나타나 있다. 상류사면 경사의 경우에도 하류사면과 마찬가지로 Teton 댐과 Tocoa 댐 모두 상류사면 경사가 완만할수록 유출량이 감소하는 것으로 나타났다.

## 4.결 론

본 연구에서는 제방붕괴해석을 위한 수학적 모형을 개발하였다. 개발된 모형을 이용하여 Teton 댐, Mantaro landslide 댐, Spirit Lake 장애물 댐 등에 적용하여 개발된 모형의 정확성을 입증하였다. 적용결과 개발된 모형은 기존의 모형과 같은 결과를 나타내어 국내 계산환경에 적용가능함을 보여 앞으로 이용가능성이 큰것을 알 수 있었다.

적용결과 파이핑의 발생위치의 영향은 대체로 파이핑의 위치가 제체의 윗부분에 위치할수록 최대 유출량은 커지는 것으로 나타났으나 Lawn Lake 댐의 경우에는 사면의 식생의 영향으로 다른 결과를 나타내었다. 점착력은 경우에는 점착력이 클수록 유출량의 크기는 감소하는 것으로 나타났으며 마찰각은 최대 붕괴폭의 크기 및 발생시간, 댐의 높이와 폭, 저수용량 등과 유출량이 연관있어 좀 더 많은 계산결과를 이용하여 심도있는 고찰이 요구되었다.

입자의 중간크기, 공극률, 균일성의 경우 적용된 댐들 모두 유사한 결과를 나타내었고 변수들이 커질수록 유출량도 증가하였다. 댐 사면 경사의 경우에는 상,하류 사면 모두 경사가 완만할수록 유출량이 감소하였다. 위의 결과를 통해 개발된 제방붕괴 해석모형은 좀 더 많은 연구와 적용을 통해 개선과 검증이 이루어진다면 국내 제방붕괴해석에 필요한 해석모형이 될 수 있다고 판단되었다.

## 감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업 (03 산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

## 참 고 문 헌

도시홍수재해관리기술연구사업단 (2004). "국내 도시홍수 침수원인 조사 및 분석.", 2003 년도 도시홍수 재해관리 기술보고서, FFC03-09.

Fread, D. L. (1988), "BREACH : An Erosion Model for Earthen Dam Failures."

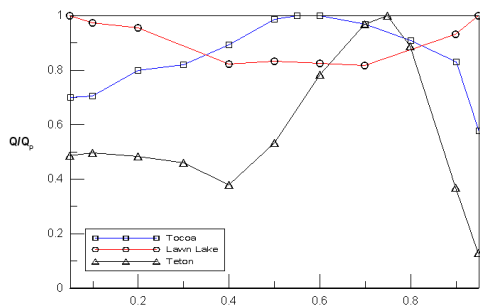


그림 3.1 파이핑 발생위치별 최대유출량 비교

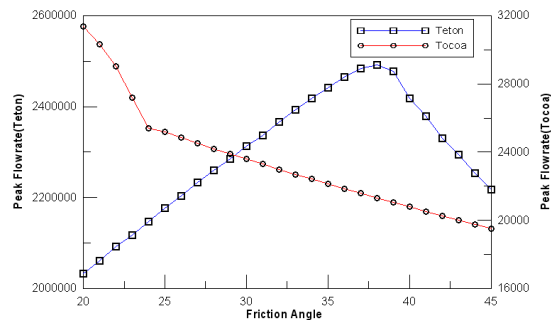


그림 3.2 마찰각에 의한 최대유출량 비교

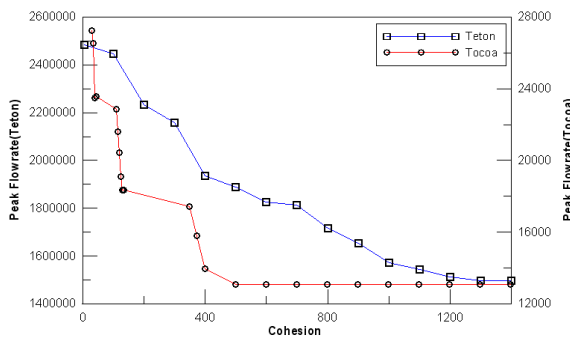


그림 3.3 제체재료의 점착력에 따른 최대유출량 비교

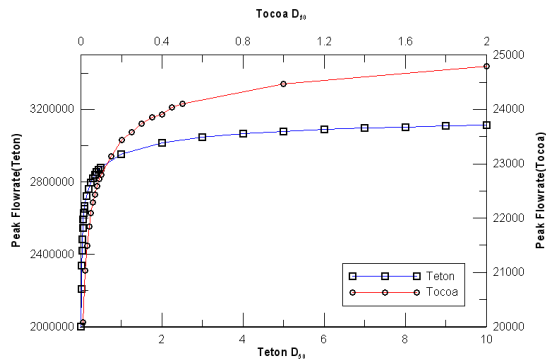


그림 3.4 중간입자크기에 따른 최대유출량 변화

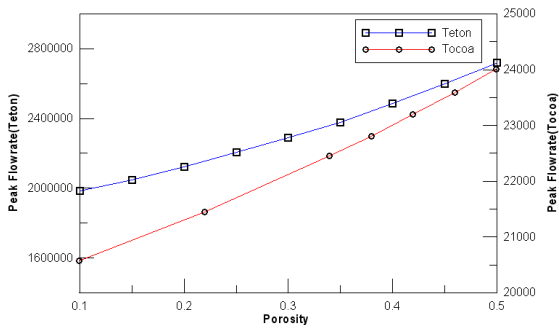


그림 3.5 공극률에 따른 유출량의 변화

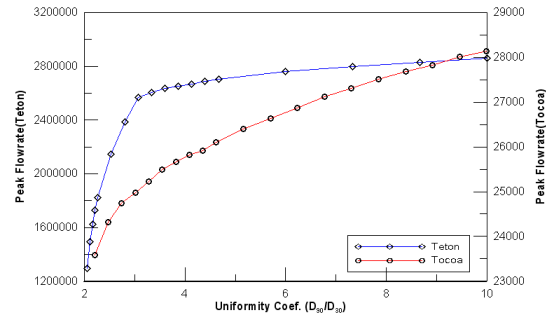


그림 3.6 균일성계수의 변화에 따른 유출량 변화

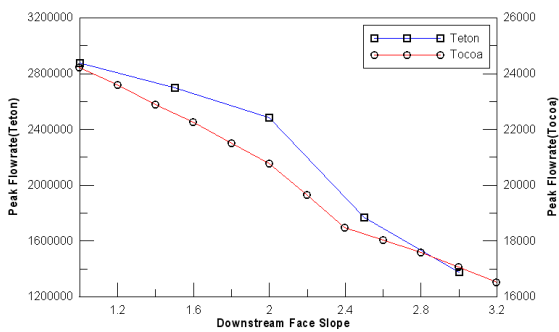


그림 3.7 제체 하류 사면경사에 따른 유출량 변화

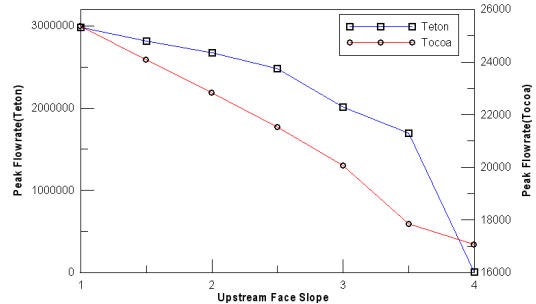


그림 3.8 제체 상류사면 경사에 따른 유출량 변화