

〈論 文〉

흙댐의 점진적 파괴에 관한 연구

A Study on the Gradual Breach of Earth Dam

吳 南 善* 鮮于 仲 皓**

Oh, Nam Seon Sonu, Jung Ho

Abstract

Gradual failure of an earth dam is caused by piping or overtopping. In this gradual failure, a breach will form and grow gradually under the erosive action of the waters. The process involved during an earth dam failure is very dynamic and complicated.

The physical model of Fread and mathematical model of Singh and Scarlatos are verified and compared in this study. Fread's model(BREACH) simulates dam failure well when sufficient data are given, and Singh and Scarlatos' model simulates it approximately with a few simple data.

요 약

점진적인 댐파괴는 흙댐에서 piping이나 overtopping에 의해 시작된다. 점진적 파괴에서는 물의 침식작용에 의해서 파괴부가 형성되고 확대되며 이 과정은 매우 복잡하고 매우 유동적이다.

본 연구에서는 Singh와 Scarlatos의 수학적 모형과 Fread의 물리적 모형을 검증하고 비교하였다. Fread의 모형은 많은 입력자료를 필요로 하며 충분한 자료가 주어질때 관측지와 근사함을 보여주었다. Singh와 Scarlatos의 모형은 간단한 입력자료만으로 댐파괴를 근사적으로 모의함을 볼 수 있었다.

1. 서 론

댐 파괴가 일어나는 과정은 크게 순간적인 파괴와 점진적인 파괴로 나뉘어지며 두 경우의 파괴 양상은 크게 다르다.

순간적인 파괴는 주로 콘크리트 댐의 경우에 댐의 일부 또는 전체의 갑작스런 제거에 의해서 일어나고 이 경우에 댐의 파괴시간은 0으로 간주될

수 있다. 그러나 점진적인 파괴는 주로 흙댐의 경우에 침식에 의해서 일어난다. 이러한 과정은 매우 복잡하고 유동적이다.

Overtopping에 의해 일어나는 점진적인 흙댐의 파괴의 경우에는 저수지의 수위가 증가함에 따라 댐 마루부의 약한 부분에서 침식이 시작되고 침식된 부분을 통과하는 물의 강한 유속때문에 침식이 빠른 속도로 진행된다. Piping이나 seepage에 의해 파괴되는 경우에는 처음에 침식이 시작되어 공

*서울대학교 대학원 박사과정

**서울대학교 토목공학과 교수

동(cavity)이 형성되며 이 공동이 댐의 마루부까지 확대되면 overtopping과 같은 형태의 파괴가 진행된다.

흙댐의 파괴가 piping 또는 overtopping에 의해서 점진적으로 진행되는 것으로 밝혀졌음에도 불구하고 파괴 특성이 다양하고 복잡하여 파괴 과정을 예측하기가 어려우며, 특히 파괴부의 크기, 형상 등의 확대 과정에 대한 실측이 어렵다. 흙댐의 파괴가 진행되는 시간을 보면 아주 짧은 시간부터 길게는 Peru의 Mantaro댐의 경우 이틀 이상까지 파괴가 계속된다. 파괴부의 형상은 거의 사다리꼴 모양이며 댐 파괴부의 최종 크기는 댐 전체 혹은 일부분으로 나타난다.¹⁹⁾ 처음에 파괴가 시작되면 유출에 의해 댐의 침식이 시작되어 저수지의 물이 없어질 때까지 또는 파괴부의 침식이 더 이상 지속될 수 없을 때까지 댐의 침식이 계속된다. 이러한 개념들을 이용해 과거 20여년간 점진적인 댐 파괴에 대한 여러 모형이 제시되었다.

Cristofano는 파괴의 넓이를 일정한 크기로 보고 토사의 이동을 경험식을 이용하여 유량과 침식량의 변화의 관계를 밝혔으며 물의 흐름을 광정 위어의 흐름으로 보고서 여러가지 가정을 도입하여 처음으로 흙댐의 파괴 양상을 연구하였으며 Harris와 Wagner는 파괴부의 형태를 포물선 형태로 보고 토사의 해석에 있어 Schoklitsch의 bed-load 식을 이용하여 흙댐의 파괴를 해석하였으며 Brown과 Rogers는 Harris와 Wagner의 연구에 기초하여 수치적 모형을 발전시켰다 한다.²¹⁾

Fread와 Harbaugh¹⁴⁾는 흙댐의 파괴에 의한 피해를 줄이는 방법을 강구하기 위하여 흙댐에 파괴 속도를 지연시키는 층(erosion retarding layer)을 설치하여 두 개의 홍수파를 만들도록 하였으며 흙댐의 파괴에 의한 피해를 줄이는데 관하여 연구하고 이 층의 가장 적절한 위치를 찾아내는 연구를 하였다.

Lou는 토사의 이동에 있어서 경험식을, Ponce와 Tsivoglou는 Meyer-Peter and Müller식을 각각 이용하여 Tail water effect를 고려하면서 댐의 점진적 파괴현상을 해석하였다.²¹⁾ 이들은 댐파괴로 인한 홍수파의 발생을 계산하는 데 있어 Full

Hydrodynamic식에 Four-Point Implicit Scheme을 이용하였다.

Fread¹²⁾는 Meyer-Peter and Müller식을 이용하여 토사 이동을 해석하고 파괴부의 형태를 직사각형, 삼각형 그리고 사다리꼴 형태로 보았으며 물의 흐름을 광정 위어의 흐름으로 보고 모형을 구성하였다.

MacDonald와 Jennifer¹⁹⁾는 이전까지 파괴된 흙댐에 대한 자료를 수집하여서 댐의 높이와 수위의 차에 유출량을 곱한 파괴형성계수(BFF)와 파괴의 특성인 파괴의 최종크기, 파괴시간, 그리고 침투유량과의 관계등을 통계적으로 연구하였다.

Singh와 Scarlatos²⁴⁾는 1985년에 토사 이동의 해석에 있어 Einstein-Brown식을 이용하였고 포화된 사면에서의 안정을 고려하여 모형을 개발하였으며 1988년에는 간단한 입력자료로써 흙댐의 점진적인 파괴를 모의할 수 있는 수학적 모형을 제안하였다.

본 연구의 목적은 점진적인 댐 파괴에 대한 모형들을 고찰하고 비교 분석하는데 있다. 먼저 지금까지 제시된 모형의 내용과 특성을 연구하고 가장 최근의 모형 가운데 Fread의 물리적 모형인 Breach Erosion Model 및 Singh와 Scarlatos의 수학적 모형을 연구 비교하여 점진적인 댐 파괴를 모의하였다.

2. 모형의 비교와 분석

점진적인 댐 파괴를 모의한 모형 중 최근에 서로 다른 접근방법에 의해 구성된 두 가지 모형을 연구 고찰하고 이들을 비교 분석하였다.

첫번째 접근방법으로서 Singh와 Scarlatos는 파괴부의 형태가 직사각형, 삼각형 그리고 사다리꼴인 경우에 대해서 질량보존식과 물의 흐름의 성질과 침식비율과의 관계식을 지배 방정식으로 하여 수학적 모형을 구성하였다. 이 모형에서 물의 흐름은 광정 위어의 유량 공식을 이용하여 계산하였고 댐의 침식과정은 흐름의 속도에 관계한다고 가정하였다.

두번째 접근방법인 Fread의 모형은 침식물질의

이동을 해석하기 위해 Smart²²⁾의 토사 이동식을 이용하였다. 이 모형에서는 물의 흐름을 광정 위어의 흐름으로 보고 질량보존식을 이용하여 물리적 모형을 구성하였으며 댐파괴에 의한 홍수파 계산 프로그램인 DAMBRK와 같이 사용할 수 있도록 하였다.

(1) Singh과 Scarlato의 연구

점진적인 댐 파괴의 해석을 위한 모형은 초기 파괴부의 크기나 모양, 댐의 파괴 과정의 유동성, 댐 파괴에 영향을 미치는 많은 변수들 등에 의해서 매우 복잡하게 된다. 그러나 이러한 물리적 현상의 복잡성뿐만 아니라 댐파괴 과정에 영향을 주는 여러요소들의 불확실성으로 인하여 현상을 분석하는 과정이 매우 어렵게 되므로 개념적인 원리를 무시하지 않고 문제의 복잡성을 줄이는 일은 매우 가치있는 일이다. 따라서 이 모형은 질량 보존식, 흙의 침식과정 및 광정 위어의 유량 공식 등에 기초하여 시간에 따른 유량의 변화를 계산할 수 있으며 비교적 간단한 수식에 의하여 표현될 수 있다.

저수지에서의 질량 보존식은 다음과 같다.

$$A_s(H) \frac{dH}{dt} = I - Q_b - Q \dots \dots \dots (1)$$

여기에서 A_s 는 저수지의 표면적(m^2), H 는 저수지의 수위(m), I 는 저수지에로의 유입량(cms), Q_b 는 파괴부에서의 유출량(cms), Q 는 파괴부 이외의 곳에서의 유출량(cms)이다. Q 는 Q_b 에 비해 아주 적고, A_s 는 H 에 독립된 즉, 단면적이 높이에 따라 변하지 않는 저수지라 가정한다. 그러면 $Q_b = -u A_b$ 이므로

$$A_s \frac{dH}{dt} = -u A_b \dots \dots \dots (2)$$

여기에서 A_b 는 파괴부의 단면적(m^2), u 는 파괴부에서의 속도(m/sec)이다. 광정 위어의 유량 공식에 의해서 파괴부를 흐르는 물의 속도는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$u = \alpha_1 (H-Z)^{\beta_1} \dots \dots \dots (3)$$

여기에서 α_1 과 β_1 은 한계류의 조건을 이용하면 각각 1.7과 0.5의 값을 가진다. 그리고 H 는 수위(m), Z 는 바닥으로부터 댐파괴부까지의 높이(m)이다.

식(2)와 식(3)을 결합하면

$$A_s \frac{dH}{dt} = -\alpha_1 (H-Z)^{0.5} A_b \dots \dots \dots (4)$$

침식 속도를 유속의 함수로 나타내면 다음과 같은 식을 추가로 구할 수 있다.

$$\frac{dz}{dt} = -\alpha_2 U^{\beta_2} \dots \dots \dots (5)$$

여기에서 α_2 와 β_2 는 경험에 의해 구하여지는 계수이다.

만약 파괴부의 형태를 안다면 식(4)와 식(5)는 초기조건을 이용하여 풀 수 있다. 초기조건은 다음과 같다.

$$t=t_0 \text{ 일 때 } H=H_0, Z=Z_0 \dots \dots \dots (6)$$

파괴부의 형태는 직사각형, 삼각형 모양의 파괴부인 것으로 가정한다. 그러면, 각 경우의 단면적은 다음과 같다.

$$A_b = b(H-Z); \text{ 직사각형 형태의 파괴일 때} \dots \dots (7)$$

$$A_b = s(H-Z)^2; \text{ 삼각형 형태의 파괴일 때} \dots \dots (8)$$

식(5)에서 지수의 값이 1일 때의 선형침식(linear erosion)인 경우와 지수의 값이 1이 아닌 비선형침식(nonlinear erosion)인 경우에 대해 식(4), 식(5) 그리고 식(6)에 각각 식(7)과 식(8)을 결합하여 해를 구할 수 있다.

a) 직사각형 형태의 파괴(선형 침식일 때)

파괴부의 형태가 직사각형이고 선형침식($\beta_2 = 1$)이므로 식(4), 식(5) 그리고 식(7)을 결합하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\frac{dH}{dz} = \frac{b}{\alpha_2 A_s} (H-Z) \dots \dots \dots (9)$$

b) 직사각형 형태의 파괴(비선형 침식일 때)

파괴부의 형태가 직사각형이고 비선형 침식 ($\beta_2 \neq 1$)인 경우 식(4), 식(5) 그리고 식(7)을 결합하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dH}{dz} = A_1(H-Z)^{A_2} \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{여기에서, } A_1 = \frac{b}{\alpha_2 A_s} \alpha_1^{1-\beta_2}$$

$$A_2 = \frac{1}{2} (3 - \beta_2)$$

c) 삼각형 형태의 파괴(선형 침식일 때)

삼각형 형태의 파괴이고 선형침식 ($\beta_2=1$)이므로 식(4), 식(5) 그리고 식(8)을 결합하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dh}{1 - (\frac{S}{\alpha_2 A_s})^{\frac{1}{2}} h} + \frac{dh}{1 + (\frac{S}{\alpha_2 A_s})^{\frac{1}{2}} h} = -2dz \dots\dots\dots (11)$$

여기에서 $h=H - Z$

d) 삼각형 형태의 파괴(비선형 침식일 때)

삼각형 형태의 파괴이고 비선형 침식 ($\beta_2 \neq 1$)이므로 β_2 를 2로 가정하면 식(4), 식(5), 그리고 식(8)을 결합하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$H-Z = H_0 - Z_0 / \left\{ \frac{S}{\alpha_1 \alpha_2 A_s} (H_0 - Z_0)^{\beta_2} + \left[1 - \frac{S}{\alpha_1 \alpha_2 A_s} (H_0 - Z_0) \right]^{3/2} \exp\left(-\frac{2}{3} \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_2 t\right) \right\}^{\frac{1}{\beta_2}} \dots\dots\dots (12)$$

e) 유출수문곡선의 유도

식(9), 식(10) 그리고 식(11)은 상미분 방정식이므로 수치 해석에 의하여 식(12)는 대수해이므로 각각의 해를 간단히 구할 수 있다. 그러므로 초기 수위, 저수지의 표면적 그리고 댐의 높이를

알면 유출수문곡선을 구할 수 있다. 이 모형에서 정확한 유출수문곡선, 특히 침투유량과 침투시간을 알기 위해서는 침식 계수 β_2 의 값이 매우 중요한 변수로 작용하며 β_2 의 변화에 따라 침투유량과 시간이 크게 변하므로 적절한 침식계수를 결정하기 위한 연구가 필요할 것이다.

(2) Fread의 연구

Fread(1984)는 흙댐의 점진적인 파괴에 의해 발생하는 유출수문곡선을 구하고 파괴의 성질을 예측하는 것을 목적으로 BREACH모형을 개발하였다. 이 모형은 수리학, 토사의 이동, 토질 역학, 댐 재료의 성질과 형상 그리고 저수지의 특성에 기초하여 구성되었다. 모형의 각 요소별 계산 방법과 이론은 다음과 같다.

a) 유량의 계산

Overtopping에 의해 침식이 시작되는 경우, 광정 위어의 유량공식을 이용하여 파괴부를 통과하는 유량을 구할 수 있으며 이는 다음과 같이 표시된다.

$$Q_b = 1.7(H-Z)^{0.5} \dots\dots\dots (13)$$

여기에서, Z는 댐바닥으로부터 파괴부까지의 높이(m), Z는 수위(m)이다.

Piping에 의해서 댐 파괴가 일어나는 경우 파괴부를 통과하는 유량은 orifice의 유량 공식에 의하여 구하여 질 수 있다. 즉,

$$Q_b = A \left[\frac{2g(H-H_p)}{1+fL/d} \right]^{0.5} \dots\dots\dots (14)$$

여기에서, A는 관의 단면적이며(m²), g는 중력 가속도(m²/sec), H는 수위(m), H_p는 관의 중심의 위치(m), L은 관의 총길이(m), d는 관의 지름 또는 너비(m), f는 마찰 손실계수이다. 마찰 손실계수는 Moody 도표에 의하여 구한다.

만약 $H < H_{pd} + 2(H_{pu} - H_p)$ 인 경우 즉, 공동(cavity)이 댐의 정상부분까지 확대되면 이 흐름

은 orifice의 흐름에서 광경 위어의 흐름으로 변하게 된다. 윗 식에서 H_{pd} 는 관의 아랫부분의 위치, H_{pu} 는 관의 윗 부분의 위치이다.

b) 파괴부 폭의 결정

초기 파괴부의 폭은 $B=B_r y$ 로 결정한다. 여기에서 B_r 의 값은 overtopping의 경우 2, piping의 경우 1이다. y 의 값은 한계수심으로 $y=2/3(H-H_c)$ 로 표시된다. 파괴부의 사다리꼴의 경사는 Spangler의 사면 안정에 의해 결정된다. 즉, 파괴부의 길이 H 가 한계수심에 도달하면 옆면의 파괴가 일어나는 것으로 가정하였다.

c) 저수지 수위의 결정

저수지의 수위는 질량 보존식에 의해 계산된다. 즉 유입량과 유출량의 차이는 저류량의 변화율과 같으므로 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q_i - Q_b - Q_{sp} - Q_o = S_a \frac{\Delta H}{\Delta t} \dots\dots\dots(15)$$

- 여기에서 Q_i 는 유입량(cms)
- Q_{sp} 는 여수토를 통과하는 유출량(cms)
- Q_o 는 댐 정부에서의 유출량(cms)
- Q_b 는 파괴부에서의 유출량(cms)
- S_a 는 수면적(m^2)

$\Delta H(m)$ 는 $\Delta t(sec)$ 사이의 수위 변화이다. 그러므로 식 (15)를 수위변화 ΔH 로 표시하면 다음과 같다.

$$\Delta H = (Q_i - Q_b - Q_{sp} - Q_o) \frac{\Delta t}{S_a} \dots\dots\dots(16)$$

d) 파괴부 하도에서의 수리학

파괴부에서의 흐름은 각 시간 간격에 대해서 Manning의 개수로식을 적용하는 quasi-steady uniform 흐름으로 기술하였다. 즉,

$$Q_b = \frac{S^{0.5} A^{1.67}}{n P^{0.67}} \dots\dots\dots(17)$$

여기에서 S 는 $1/ZD$ (ZD 는 댐 외사면 경사)이고 A 는 파괴부 하도의 단면적(m^2), P 는 파괴부 하도의 윤변의 길이(m)이다.

그리고, Manning계수 n 은 stricker식에 의해

$$n = 0.013 D_{50}^{0.167} \dots\dots\dots(18)$$

이다. 여기에서 $D_{50}(mm)$ 은 댐재료의 평균 입경이다.

만약, 파괴부의 모양이 직사각형이라면 식 (17)로부터 수심은 다음과 같이 구해진다.

$$Y = \left(\frac{Q_b n}{B_o S^{0.5}} \right)^{0.6} \dots\dots\dots(19)$$

e) 토사의 이동

침식이 일어나는 비율은 물의 수송 능력에 의해서 결정된다. Fread는 토사 이동의 해석에 있어서 1984년에는 Meyer-Peter와 Müller의 식을 사용하였으나 1985년에는 이를 개선하여 Smart⁽²²⁾의 식을 사용하여 토사의 이동을 해석하였다. Smart의 식은 급한 경사의 하도에서 일어나는 토사 이동의 해석에 적합하게 개선한 식으로 다음과 같다.

$$\Phi = 4 \frac{d_{90}^{0.2} S^{0.6} C \theta^{0.5} (\theta - \theta_{cr})}{d_{30}} \dots\dots\dots(20)$$

여기에서 $\Phi = q_b / [g(s-1)d^3]^{0.5}$, $\theta = Y \cdot S / [(s-1)d]$, $C = V / (g \cdot Y \cdot S)^{0.5}$

여기에서 d_{90} , d_{30} 은 각각 체 통과율이 90, 30퍼센트인 입경(mm), d 는 평균 입경(mm), S 는 물의 밀도에 대한 토사의 밀도의 비, S 는 댐외사면의 경사 그리고 q_b 는 토사의 시간에 따른 이동양을 작각 나타낸다.

3. 결 과

- (1) Singh과 Scarlatos의 모형에 대한 적용과 결과
Singh과 Scarlatos의 모형을 Teton댐의 파괴에

적용하였다. Teton댐은 미국 Idaho주에 있는 댐으로 높이 약 90m, 마루부의 길이 약 900m이며 파괴 직전의 수위는 약 80m, 물의 체적은 약 3억 m³ 이었다. Teton댐의 파괴는 1976년 6월 5일 piping에 의하여 오전 10시부터 시작되었으며 유출량이 조금씩 증가하기 시작하여 12시경 piping에 의한 파괴부가 갑자기 무너지면서 몇 분후 파괴가 빠른 속도로 진행되고 나서 댐의 물이 없어질 때까지 비교적 낮은 속도로 약 5시간가량 유출이 계속되었다. 파괴에 대하여 Singh과 Scarlatos의 모형을 적용하여 그림 1과 같은 결과를 얻었다. 그림에는 직사각형과 삼각형의 파괴부에 대하여 각각 선형침식과 비선형 침식을 가정한 네 경우의 유출수문곡선을 비교하였다. 그림은 관측

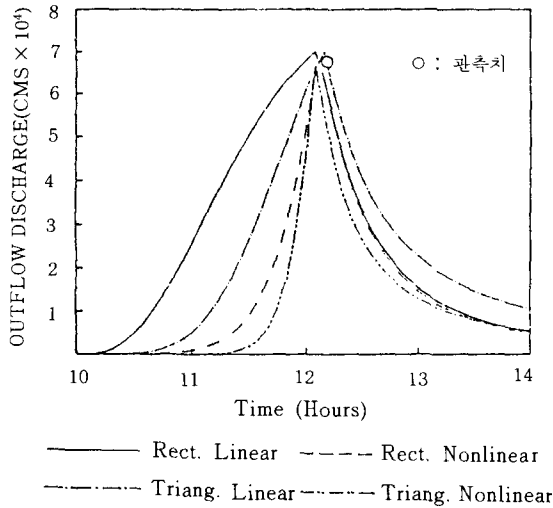


그림 1. Teton 댐의 파괴(1976. 6. 5)에 의한 유출수문곡선(Singh의 모형)

치와 비교하였으며 각 경우의 침투유량과 그때의 시간은 표 1과 같다.

Singh과 Scarlatos의 모형은 침투유량과 침투 시간에 있어 그림 1과 같이 근사하게 모의 함을 볼 수 있었다. 그러나 그림 1에서 보면 수문곡선의 상승부와 하강부에 있어서는 선형침식의 경우에는 큰 오차를 보이며 비선형 침식의 경우에는

표 1. Singh과 Scarlatos의 모형의 적용에 따른 침투유량과 시간

	침투유량(CMS)	peak때의 시간(MIN)
관 측 치	69000	7800
선형 직사각형	70756	7481
비선형 직사각형	71505	7610
선형 삼각형	70982	7771
비선형 삼각형	68550	7523

근사하게 일치하는 경향을 보였다. 이는 침식속도가 단순히 유속에 선형으로 비례하는 것으로 가정하는데 기인하는 것으로 볼 수 있다.

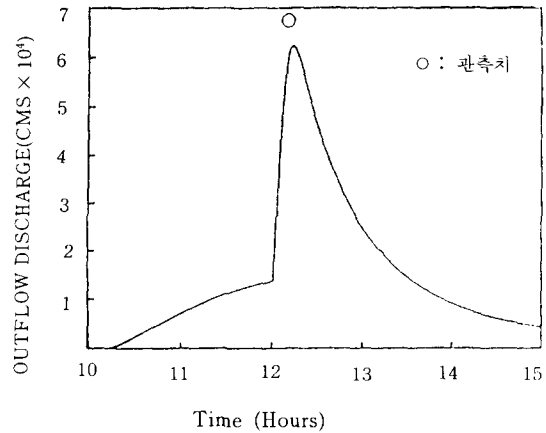


그림 2. Teton 댐의 파괴에 의한 유출수문곡선(BREACH 모형)

(2) Fread의 모형(BREACH)에 대한 적용과 결과

Fread의 댐파괴 모형에 Teton dam과 Peru의 Mantaro dam의 파괴를 적용하였다.

그림 2는 BREACH모형에 Teton dam의 파괴를 적용하여 나온 유출수문곡선이다. Teton dam은 piping에 의해서 파괴가 시작되었다. piping의

시작위치는 댐의 중간인 49m로 초기의 파괴넓이는 0.03m를 사용하였으며 pipe의 형태는 정사각형으로 가정하였다.

그림 2에서 보면 Fread의 모형은 관측치와 매우 비슷한 결과를 모의함을 알 수 있었다. 침투유량은 13,924cms로 나타났으며 이 값은 Ponce와 Tsivoglou가 계산한 값인 13,697cms와 비슷한 크기를 보였다. 그림에서 보면 침투시간과 침투유량에 있어 근사함을 볼 수 있었다. Singh과 Scarlatos의 모형과 Fread의 모형을 비교하기 위하여 Teton댐의 파괴에 대하여 Singh과 Scarlatos의 모형(삼각형 모양의 파괴부, 비선형 침식을 가정)과 Fread의 모형에 의한 유출수문곡선을 그림 3에 같이 표시하였다.

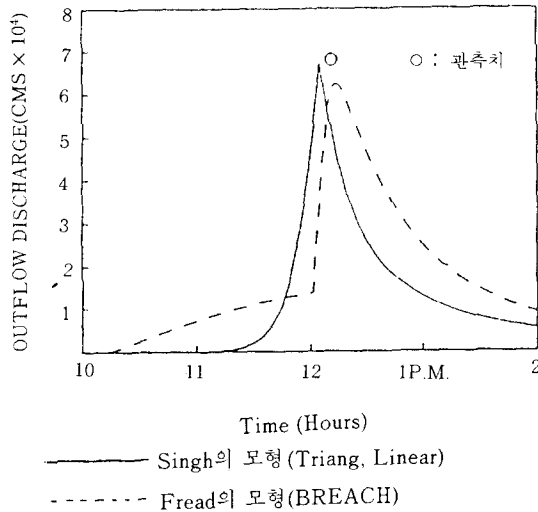


그림 3. Teton Dam의 파괴에 의한 유출수문곡선

그림 4는 BREACH 모형에 Mantaro댐의 파괴를 적용하여 나온 유출수문곡선이다. Mantaro댐은 1974년 4월 산사태에 의해서 자연적으로 만들어진 댐으로 170m 정도의 높이를 가지고 대략 160억³m의 체적을 가지고 있다. Mantaro댐은 overtopping에 의해 처음 이틀에 걸쳐 매우 느린 속도로 침식이 진행되었으며 그후 6시간에서 10시간

에 걸쳐 빠른 속도의 침식이 시작되었다. 최종 파괴부는 높이 107m, 넓이 244m의 사다리꼴 모양이었다.

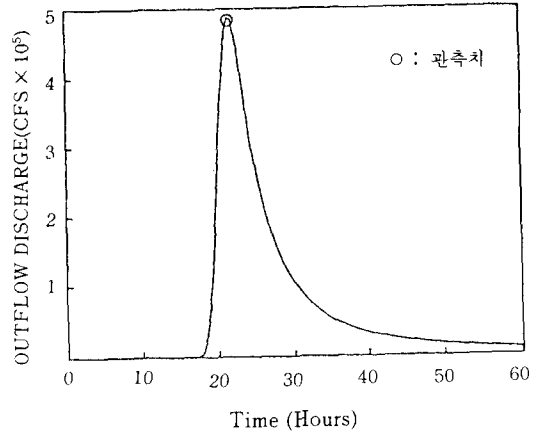


그림 4. Montaro Dam의 파괴에 의한 유출수문곡선 (BREACH)

(3) 효기리 댐 파괴에 대한 적용

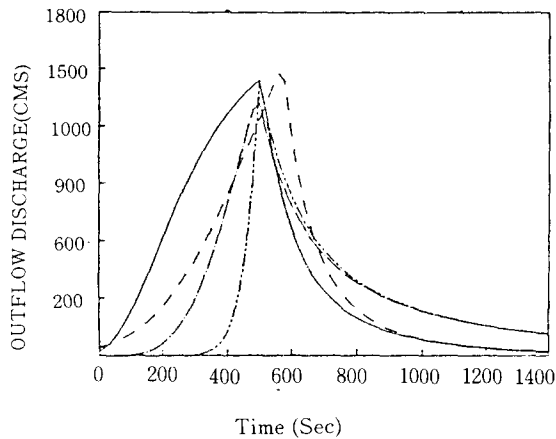
국내의 흙댐의 파괴에 대해 댐파괴를 모의하기 위해 우리나라에서 1961년 파괴된 전라북도 남원군 이백면에 위치한 효기리 댐 파괴에 두 모형을 적용하였다. 효기리댐은 1938년경 가뭄을 막기 위해 주민들이 쌓은 것으로 댐 높이 15.56m, 댐 길이 109.5m, 저수 용량 223,000³m, 유역 면적 460만²m, 만수시 면적 4만6천²m의 댐으로 1961년 7월 11일 하오 10시경 파괴되어 128명의 사망자 및 60여명의 중상자를 내고 하류부 유역에 엄청난 재산 피해를 가져왔다. 댐 파괴는 파괴전에 강우강도 약 60mm/hr의 호우가 약 두 시간 반동안 이지역에 내려 발생하였다. 현재 이 위치에는 거의 비슷한 크기의 이백지가 1962년 10월 31일 준공되었다.

Singh과 Scarlatos의 모형에 효기리댐의 파괴를 적용하여 그림 5와 같은 결과를 얻었다. 댐 높이 15.56m, 댐의 파괴 폭 70m로 하였으며 저수지의 만수면적은 4만6천²m를 이용하였다. 각 경우의

침식 계수와 침두유량과 그때의 시간은 표2와 같다.

표 2. 효기댐 파괴의 적용결과

	침 두 유 량(CMS)	peak때의 시간(MIN)	침 식 계 수
BREACH(Fread)	432	1487	
선형 직사각형(Singh)	505	1468	0.011
비선형 직사각형(Singh)	575	1512	0.004
선형 삼각형(Singh)	495	1364	0.01
비선형 삼각형(Singh)	500	1442	0.005



— Rect. Linear - - - - Rect. Nonlinear
 - · - · - Triang Linear · · · · Triang Nonlinear

그림5. 효기댐의 파괴에 의한 유출수문곡선(Singh의 모형)

Fread의 breach erosion 모형(BREACH)을 효기댐의 파괴에 적용하였다. 그림 6은 효기댐의 자료를 이용하여 구한 유출수문곡선이다. 효기댐은 overtopping에 의해서 시작되었으므로 overtopping mode로 하였으며 댐의 재질과 형상은 보통 흙댐의 자료를 이용하여 계산하였다.

그림과 표에서 보면 Singh과 Scarlatos의 모형과 Fread의 모형은 침두시간과 유출수문곡선의 경향에 있어서는 어느정도 근사함을 볼 수 있었으나 침두유량의 크기에 있어서는 BREACH모형이 작은 값을 가짐을 알 수 있었다.

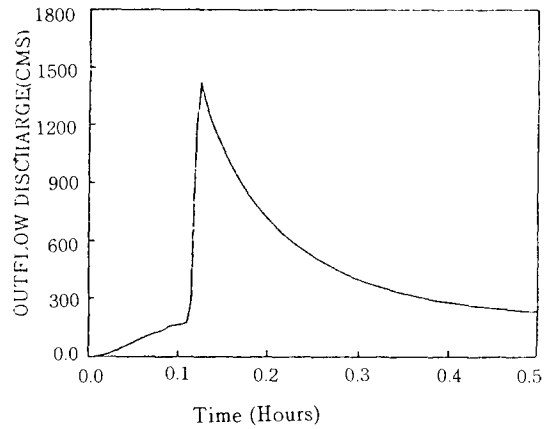


그림6. 효기댐의 파괴에 의한 유출수문곡선(BREACH 모형)

4. 결 론

Fread의 댐파괴모형(BREACH)은 overtopping과 piping의 경우에 대해서 해석이 가능하며 토사 이동의 해석에 있어서는 Smart에 의해 급경사에 적합하도록 개선된 식을 이용하였다. BREACH모형은 Teton dam과 Mantaro dam에 적용한 결과 관측치를 만족하는 유출수문곡선을 예측했다. BREACH는 최종 파괴부의 크기와 형상에 있어 측정치와 비슷한 결과를 나타내었다.

Singh과 Scarlatos의 수학적 모형은 흙댐의 점진적인 파괴에 대해서 처음으로 수학적 접근방식을 이용했다. Singh과 Scarlatos의 모형을 Teton dam파괴에 대해 적용한 결과 비교적 만족

하는 유출수문곡선을 예측했다. Singh과 Scarlatos의 모형은 침식 계수에 크게 영향받으며 어느 정도의 범위를 가지고 있다. 즉, 선형 침식의 경우 침식계수의 값은 0.001에서 0.01정도이며, 비선형 침식의 경우는 0.0001에서 0.005정도의 범위를 가진다. 이 모형에서는 침식 속도가 유속에 선형으로 비례 또는 유속의 제곱에 비례하는 것으로 가정할때서 나오는 오차를 줄이기 위해 침식 계수의 값을 조절하였다.

5. 감사의 글

이 논문은 학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 완성되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 농림부, 토지 개량 조합 연합회, 토지 개량 사업 통계연보, p. 72, 1961.
2. 동아일보: 1961년 7월 14일, 1961.
3. 선우중호: 수문학, 동명사, 서울, 1983.
4. 이종태: "댐파괴파의 홍수추적에 관한 고찰", 대한토목학회지 제35권 제1호, Feb., 1987.
5. 이종태: "댐의 파괴양상", 한국수문학회지, 제20권 제3호, Sep., 1987.
6. 이종태, 한건연, 이정식: "Earth dam의 가상파괴로 인한 홍수파의 예측 모형", 대한토목학회 논문집, 제6권 제4호, Dec., 1986.
7. 이창훈: "댐파괴모형의 비교평가", 서울대학교 대학원, 석사논문, 1988.
8. 조선일보: 1961년 7월 14일, 1961.
9. 한건연: "Fill Dam의 파괴에 따른 홍수파 예측 모형의 개발", 연세대학교 대학원 박사논문, 1986.
10. 한건연, 이종태, 이원환: "Earth Dam의 파괴로 인한 유출 수문곡선의 해석", 대한토목학회 논문집.
11. Chow, V.T.: Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 1959.
12. Fread, D.L.: DAMBRK, "BREACH: An erosion model for earthen dam failure", 1985.
13. Fread, D.L.: DAMBRK, "DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model", National Weather Service, Office of Hydrology, Maryland, 1984.
14. Fread, D.L. and Harbaugh, T.E.: "Transient hydraulic simulation of breached earth dams", J. Hydr. Div., ASCE. 99(1), pp. 139-154, 1973.
15. French, R.H.: Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 1985.
16. Gradshteyn, I. S. and Ruzik, I. M.: Table of integrals series and products, Academic Press, New York, N.Y., 1983.
17. Graf, W.H.: Hydraulics of Sediment Transport, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1971.
18. Henderson, F.M.: Open Channel Flow, Macmillan, New York, N.Y., 1966.
19. MacDonald, T.C. and Jennifer, L.M.: "Breaching characteristics of dam failures", J. Hydr. Eng. ASCE. 110(5), pp. 567-586, 1984.
20. Engineering News-Record, "Multiple probes start on dam failure," Vol. 172, No. 1, Jan. 2, p. 15, 1964.
21. Ponce, V.M., and Tsivoglou, A.J.: "Modeling gradual dam breaches." J. Hydr. Div., ASCE, 107(7), pp. 829-838, 1982.
22. Smart, G.M.: "Sediment transport formula for steep channels." J. Hydr. Eng., ASCE. 110(3), 267-276, 1984.
23. Simmer, H. and Samet L.: "Dam failure from overtopping studied on a hydraulic model.", Quatorzieme congres des grands Barrages, Rio de Janeiro., Brazil, 1982.
24. Singh, V.P. and Scarlatos, P.D.: "Analysis of gradual earth-dam failure", J. Hydr. Eng., ASCE. 114(1), 21-42., 1988.
25. Yevjevich, V., "Sudden Water Release", Unsteady flow in open channel, ed. by K. Mahmood and V. Yevjevich, vol. 2, Fort Collins, Colorado, Water Resources Pub., Chap 15, pp. 587-668, 1975.
26. Yang, C.T.: "Unit stream power and sediment transport", J. Hydr. Div., ASCE. 98(10), pp. 1805-1826, 1972.