

# 흙댐의 물리적 특성치가 붕괴 유출 수문곡선에 미치는 영향

(The Breach Hydrograph due to the variation  
of Earth Dam's physical values)

이 종 태 윤 세 의 한 건 연 \* 강 태 호

경기대학교 공과대학 토목공학과 \* 경북대학교 공과대학 토목공학과

## 1. 서론

흙댐의 붕괴는 댐 제체를 구성하는 토립자의 침식에 의한 점진적 붕괴이다. 붕괴 원인은 댐의 월류로 인한 경우와 댐제체나 기초부의 침투,파이핑에 의한 경우가 대부분으로서 붕괴부는 제체를 구성하는 토립자가 침식되어 나감으로써 점차적으로 발달되어 커지게 된다. 붕괴부의 크기와 형상, 붕괴시간등은 토립자의 침식성과 물의 흐름에 기인하게 되며, 기왕의 자료에 의하면 붕괴시간은 약3-4시간 정도이며 댐의 일부분이 붕괴부로 형성된다.

월류에 의한 붕괴는 댐높이와 저수지내의 수위차가 대략 0.5미터 이내가 되면 댐마루의 가장 약한 하류단의 부분부터 침식하여 붕괴가 시작되고 물입자의 유동이 이 약한 부분을 계속 깎아내고 붕괴부가 바닥에 이를때 까지 계속되다가 침식성이 작은 자연지반에 이르면 중지된다. 파이핑, 침투에 의한 붕괴는 물이 제체를 통하여 누수되면서 공동을 형성하고 댐 하류단을 침식하면서 발생하는데 이 경우 누수되는 유속이 크게 되면 토립자를 유실시키고 이것이 가속화 됨에 따라 결국, 월류의 경우와 유사한 형태로 붕괴가 진행된다.

실제로 흙댐 붕괴원인에 대하여 Johnson과 Illes의 조사에 의하면 월류에 의한 경우 전체 붕괴의 35%이고 파이핑, 침투가 25%이다. USCOLD/ASCE의 댐 붕괴 조사자료에 의하여도 월류 및 파이핑, 침투등에 의한 붕괴가 거의 대부분을 차지하고 있다. 붕괴로 인한 홍수 유출량에 영향을 미치는 주요인자로는 붕괴부 형태, 크기, 붕괴시간 등이 있다.

일반적으로 댐 붕괴의 문제를 다루는데 있어서는 흐름에 관한 각종 경계 조건들이 방출되는 붕괴 홍수파와 관련되어 수치적 또는 해석적으로 표현될 수 있어야 한다. 댐붕괴의 양상이 시간적 및 기하학적으로 기술되어야 하고 붕괴부 형상, 저수지내로의 유입량, 저수지 저류 효과, 여수로나 터빈을 통한 유량, 댐 바로 하류부의 수위에 따른 잠수 효과등에 의한 영향요소들을 복합적으로 고려하여 유출 수문곡선이 유도되어야 한다. 또한, 제체의 형상, 사용재료등의 물리적 특성치도 붕괴 홍수량에 영향을 줄 것으로 판단된다.

본 연구에서는 흙댐의 물리적 특성치가 댐 붕괴로 인한 유출 수문곡선에 미치는 영향을 분석하기 위하여 댐의 물리적 특성치로서 ①제체의 경사도 ②댐 마루의 폭 ③하류측 사면의 피복여부 ④코아의 유무 ⑤제체의 구성에 의한 영향을 검토하였다. 유출 수문곡선의 유도를 위해서는 댐 붕괴시 흐름에 의한 침식양상을 고려한 NWS의 BREACH를 활용하였다. 계산된 유출수문곡선들로 부터 위에서 언급된 각각의 물리량의 변화가 붕괴 양상에 주는 영향을 침투유량 및 도달시간 등에 대하여 분석하였다.

## 2. 흙댐의 붕괴

댐 붕괴로 인한 홍수의 유출 수문곡선은 주로 붕괴부 형태, 크기, 붕괴 소요 시간등에 의하여 결정된다. 붕괴부의 형태는 불확실하지만 문제의 단순화를 위해 일반적으로 규칙적인 형태로서 삼각형, 직사각형, 제형(사다리꼴)의 3가지로 구분하게 되며, 실제 관측된 형상과 유사한 것으로 조사된 바 있다. 이 세가지 단면형태는 사다리꼴형의 측면 경사  $Z(0 < Z < 2)$ , 붕괴부 폭  $B$  등을 변화시킴에 따라 가장 일반화된 형태로 표현된다. Fread(19

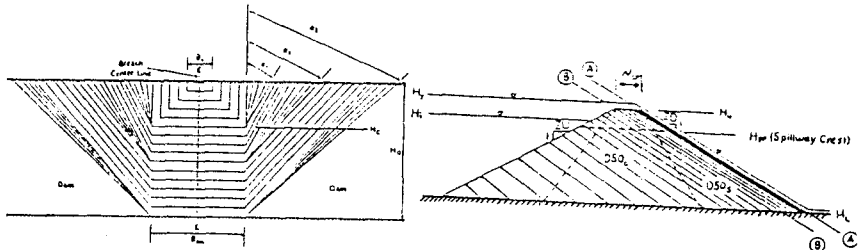


그림 1 댐 붕괴 양상에 대한 모식도

88)에 의한 BREACH에서는 초기 붕괴부의 형태는 직사각형으로 보고 어느 정도 시간이 경과됨에 따라 붕괴부의 저면과  $\theta$  라는 각도를 이루는 사다리꼴 형태로 변화되는 형상으로 가정하였다(그림1). DAMBRK는 붕괴부의 폭을 시간에 따라 선형적으로 변화한다고 가정하였지만, BREACH에서는 시간에 따라 토사침식을 고려한 붕괴단면을 계산하여 점진적인 형태로 나타내었다.

## 2.1 붕괴 단면의 계산

시간의 경과에 따른 붕괴단면의 확대 양상을 추적하기 위하여 먼저 초기 붕괴 폭  $B$ 는  $B=B_r * y$ 로 보았다. 여기서, 붕괴폭과 수심의 비  $B_r$ 은 월류의 경우에는 2, 파이핑의 경우 1이다. 월류로 인한 붕괴시  $y$ 는 붕괴부에서의 한계수심이며  $2/3(H-H_c)$ 이다. 이때  $H_c$ 는 붕괴부 저면의 표고,  $H$ 는 수위이다.

붕괴가 지속됨에 따라 초기 직사각형 붕괴부의 측면이 무너지고 수직방향에 대하여  $\alpha$ 의 경사를 이루며 사다리꼴 형태로 변한다. 이때 사면의 경사도는 Sp--angler(1951)의 사면 안정식에 의해 결정되며, 붕괴부의 깊이( $H_c'$ )는 한계수심( $H'$ )에 도달할 때 무너지며, 댐 재료 특성인 마찰각( $\Phi$ ), 점착력( $C$ ), 단위중량( $\gamma$ )의 함수로 표시된다.

$$H_{k'} = \frac{4C \cos \Phi \sin \theta'_{k-1}}{\gamma [1 - \cos(\theta'_{k-1} - \Phi)]} \quad K=1,2,3 \quad (1)$$

$K$ 는 댐 저면까지 붕괴되는 과정을 그림 1에서의 순차적인  $\alpha$ 의 변화에 따른 3가지의 경우( $K=1,2,3$ )로 본다.

침식은 붕괴부 측면이 무너질 때를 제외하고는 붕괴 수로 측면과 바닥을 따라 발생한다고 가정한다.

## 2.2 저수지 수위 변화

저수지의 수위는 질량 보존식에 의하여 계산된다. 즉,

$$Q_i - (Q_b + Q_{s,p} + Q_o) = S_s (\Delta H / \Delta t) * (43,560 / 3,600) \quad (2)$$

여기서,

$Q_i$  : 유입량

$Q_{s,p}$  : 여수토를 통과하는 유출량

$Q_0$  : 댐 마루에서의 유출량

$Q_b$  : 붕괴부에서의 유출량

$S_a$  : 저수지 수표 면적(acre)

위 식에서 각  $Q$ 는 계산 시간간격  $\Delta t$ 에서의 시간 평균유량(cfs)이다.

$\Delta H$ 는  $\Delta t$  사이의 저수지 수위 변화

$$\Delta H = 0.0826 \Delta t / S_a (Q_0 - Q_b - Q_{sp} - Q_0) \quad (3)$$

결국, 임의 시간( $t$ )에서 저수지 표고( $H$ )는

$$H = H' - \Delta H \quad H' : \text{앞시간에서의 저수지의 수위} \quad (4)$$

### 2.3 붕괴부에서의 수리

붕괴부에서의 흐름은 quasi-steady uniform 흐름으로 가정하여 각 시간 대( $t$ )에서 개수로에서의 Manning의 식을 적용하였다. 즉,

$$Q_b = 1.49 * S^{0.5} * A^{1.67} / (n * P^{0.67}) \quad (5)$$

여기서  $S=1/ZD$ ,

$A$ : 붕괴부 하도의 단면적

$P$ : 율변

$n$ : Manning의 조도계수

Manning의 조도계수  $n$ 은 재료의 평균입경을 기초로한 Strickler의 관계식을 이용하였다.

$$n = 0.031 * D_{50}^{0.167} \quad D_{50}: \text{평균 입경(mm)} \quad (6)$$

붕괴 사면에서의 흐름을 quasi-steady uniform 흐름으로 가정한것은 인공댐인 경우 매우 가파른 경사( $1/zd$ )와 붕괴부 하도가 극히 짧으며, 또한 landslide 댐인 경우 하도의 길이가 길고 경사는 작아지므로 개수로 내의 흐름 변화는 매우 작다고 볼수 있기 때문이다. 만약, 붕괴부의 모양이 직사각형이면, (5)식에 의해 수심은 다음과 같이 구해진다.

$$Y_n = [(Q_b \cdot n) / (1.49 B_0 \cdot S^{0.5})]^{0.6} \quad (6)$$

붕괴부가 사다리꼴일때에는 Newton-Raphson 반복법에 의해 수심을 구할 수 있다.

$$Y_n^{k+1} = Y_n^k - f(Y_n^k) / f'(Y_n^k) \quad (7)$$

$$f(Y_n^{k+1}) = Q_b P^{0.67} - 1.49 S^{0.5} A^{1.67} \quad (8)$$

여기서,

율변장,  $P = B_{0.0} + Y_n / \cos(\alpha)$ 이며,  $k$ 는 반복 계산횟수이다.

$$Y_n^{k-1} - Y_n^k \leq \hat{\epsilon} \quad \hat{\epsilon} \leq 0.01 \quad (9)$$

초기 추정치  $Y_n$ 은 다음 과정에서 얻을 수 있다. 즉,

$$Y_n^1 = [Q_b n / (1.49 B S^{0.5})]^{0.6} \quad (10)$$

여기서,

$$B = 0.5(B_{0m} + B') \quad (11)$$

$B'$ : 수심( $y_n$ )에 따른 붕괴부 상단폭

## 2.4 제체의 침식

제체의 침식은 월류단면, 경사도, 및 저질 구성물질 등에 의하여 계산된다. F-read는 침식깊이의 해석에 있어 초기의 침식모형(1984)에서는 Meyer-Peter-Muller식을 사용 하였으나, 1985년에는 이를 개선한 Smart의 식을 사용하여 토사 이동을 해석하였다. Smart(1984)는 급한 경사의 하도(4%~20%, 입경 0.4mm이상)에서의 유사량 해석을 위하여 다음 식을 제안하였다.

$$Q_s = 3.64(d_{90}, d_{30})^{0.2} P(D^{2/3}/n) S^{1.1} (D^* S - 0.0054 d_{50} \tau) \quad (12)$$

여기서,

$Q_s$ : 토사 침식량(cfs)

$d_{30}, d_{50}, d_{90}$ (mm): 중량백분율 30, 50, 90% 입자의 크기

$D$ : 수리 수심(ft),  $S$ : 댐제체 하류경사

$\tau$ : Shield's 무차원 전단응력

토사이동을 고려한 단위 시간동안의 침식 깊이  $H_c$ 의 증가분  $\Delta H_c$ 는

$$\Delta H_c = 3600 \Delta t Q_s / [P_o L (1 - P_{o,r})] \quad (13)$$

$L$ : 붕괴된 하도의 길이,  $P_{o,r}$ : 붕괴된 재료의 공극비

$P_o$ : 붕괴부의 윤변의 길이

결국,  $H_c = H_c' + \Delta H_c$ 가 된다.

## 2.5 붕괴 홍수량의 계산

### 1) 월류에 의한 경우

월류에 의해 침식이 시작되는 경우 광정웨어의 유량공식을 이용하여 유량을 구할 수 있다.

$$Q_b = 3 B_o (H - H_c)^{1.5} \quad (14)$$

$H_c$ : 붕괴부의 바닥위치

$H$ : 수위

## 2) 파이핑에 의한 경우

이 경우의 유량을 오리피스 유량공식에 의해 구한다.

$$Q_b = A[2g(H-H_p)/(1+fL/d)]^{0.5} \quad (15)$$

여기서, A: 파이핑의 단면적, g: 중력가속도, (H-H<sub>p</sub>): 파이핑의 수두차

L: 파이핑의 총길이, d: 파이핑의 지름, 또는 넓이,

f: Darcy의 마찰계수

공동(cavity)이 제체의 윗 부분에까지 확대되면 이 흐름은 오리피스의 흐름에서 광정웨어의 흐름으로 변하게 된다.

만약, 파이핑 발생 위치의 표고가 댐마루 표고와 같을 때는 붕괴부의 흐름이 웨어의 형태로 되며 다음과 같다.

$$Q_b = 3B_o(H - H_c)^{1.5} + 2 \tan(\alpha)(H - H_c)^{2.5} \quad (16)$$

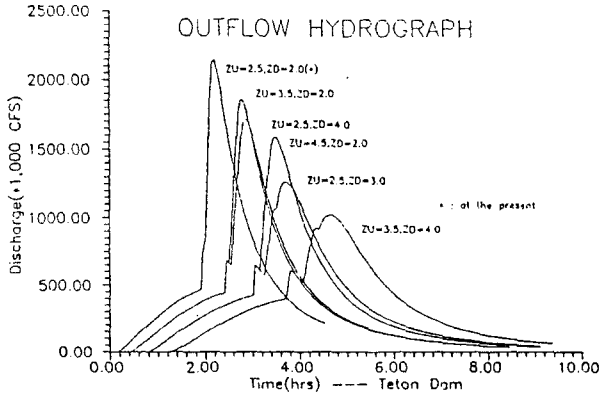
여기서, B<sub>o</sub>는 붕괴된 상단 폭으로 대신한다.

## 3. 흙댐의 물리적 특성치와 붕괴 유출수문곡선

BREACH모형을 위한 자료로서는 높이에 따른 저수지 표면적, 초기 수위, 시간에 따른 유입량, 댐 재료의 성질, 댐의 형상, 여수토의 흐름 등이다. 본 모형에 의하여 유출수문곡선이 계산되며, 첨두유량과 그 발생시간 및 붕괴부의 크기가 구해진다.

### 3.1 사면의 경사도 변화에 따른 영향

토사 이동량 Q<sub>s</sub>는 (12)식에 의하면 제체의 경사 S의 1.1승에 비례한다. 일반적인 흙댐 제체사면의 경사도(Z=2-4) 범위 내에서 제체의 경사도를 변화시켜 보았다. Teton댐의 실제 단면을 기준으로 하여 하류측 경사도를 1.0씩 증가 시킴에 따라 붕괴부를 통한 첨두 유출량이 실제보다 Q<sub>BP</sub>가 20%, 41% 정도로 감소하였으며, 첨두 유출량 발생시간 T<sub>p</sub>는 30%씩 증가하였다. 또한 상류측 제체 경사도, ZU를 1.0씩 증가 시켰을 때 붕괴부를 통한 첨두 유출량 Q<sub>BP</sub>는 13%, 52% 정도로 감소하였다. 상, 하류측의 방향 선택에 따른 홍수 지체 효과는 다소 차이는 있었으나 현 연구 단계에서는 뚜렷한 관계성을 찾을수가 없었다. 제체의 경사도가 완만해짐에 따라 첨두 유출량의 감소 및 발생시간의 지연에 효과적으로 작용 함을 알 수 있다.



	ZU=2.5 ZD=2.0 (실제)	ZU=2.5 ZD=3.0	ZU=2.5 ZD=4.0	ZU=3.5 ZD=2.0	ZU=4.5 ZD=2.0	ZU=3.5 ZD=4.0
$Q_{BP}$	2,154,444	1,718,822	1,267,436	1,865,193	1,021,593	1,589,941
$T_p$	2.18	2.85	3.68	2.77	3.48	4.66

$Q_{BP}$ : 붕괴부의 첨두유출량(cfs)     $T_p$ : 첨두유출량 발생 시간(hrs)

그림 1 사면 경사와 유출수문곡선

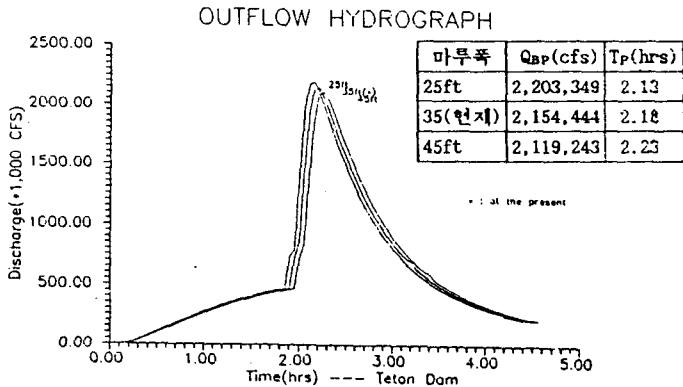


그림 2 댐 마루폭과 유출수문곡선

### 3.2 댐 마루폭(Wr)의 변화에 따른 영향

흙댐의 일반적인 마루폭 범위(17ft-33ft) 내에서 댐 마루폭을 변화 시키면서 유출 수문곡선을 계산 하였다. 댐 마루폭 변화에 따른 붕괴부를 통한 첨두 유출량은 큰 변화가 없었으며, 첨두 유출량 발생시간에도 큰 변화가

없었음을 알수 있었다.

### 3.3 경사면 피복상태(잔디의 유부)

댐 하류측 경사면에 잔디가 피복되었을 경우 붕괴부를 통한 침투유량은 잔디가 없을때의 경우와 비교해 보면 4.5배의 큰 차이가 발생하며, 발생시간 역시 15%의 차이가 나타났다. 입력 자료로서의 잔디의 길이는 11cm(4.33 inch)이고 침식이 되기전 잔디가 허용할수 있는 속도(VMP)는 4.5ft/sec(1.37m/sec)를 사용하였다. 이러한 잔디가 피복 되었을 경우, 초기 파이핑에서의 유출량이 침투유량의 약 70%정도를 차지하고 있는 것이 특징이다. 또한, 잔디가 없을때는 오리피스 흐름에서 웨어의 형태로 변환하는 시간이 파이핑 발생후 1시간인데 반하여 잔디가 피복되어 있을 때는 2시간 정도가 소요 되었다. 만약 잔디가 피복되었다고 해도 그 상태가 양호하지 못하면 잔디가 피복 되지 않는 상태와 같은 결과가 보여진다.

### 3.4 내부 코아의 유무 영향

제체 내부에 코아가 있을 경우의 붕괴는 코아가 없을 경우와 비교하여 볼때 점진적이면서 서서히 붕괴되어 나가는데 반하여, 코아가 없을 경우에는 코아가 있을 경우에 비해 급격히 붕괴가 진행되면서 침투 유출량 발생시간이 15%정도 빨리 나타난다. 그러나 침투 유출량은 코아가 없을 경우가 다소 작게 나타나는데 이것은 코아 부분의 침식이 완료되면 제체의 잔여부분에 대하여 급격하게 붕괴부가 발달되기 때문이다.

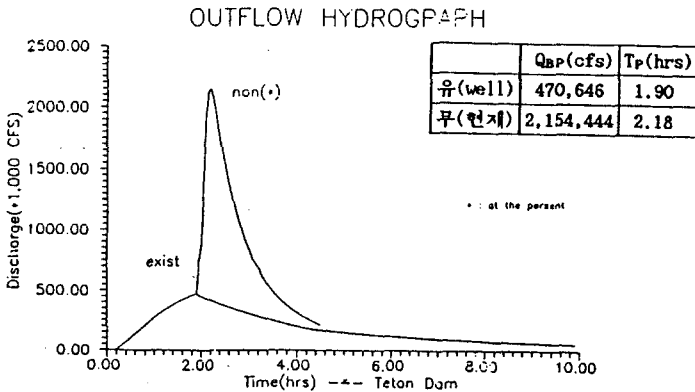
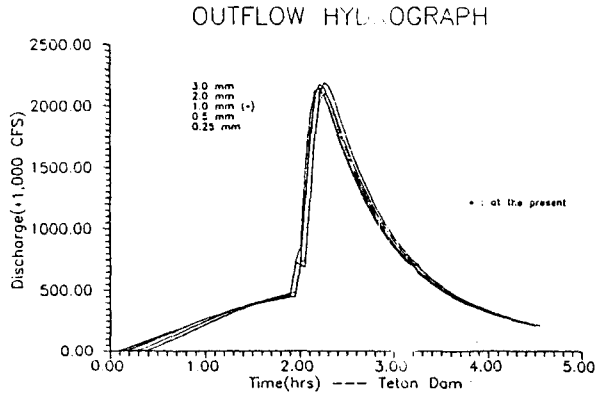
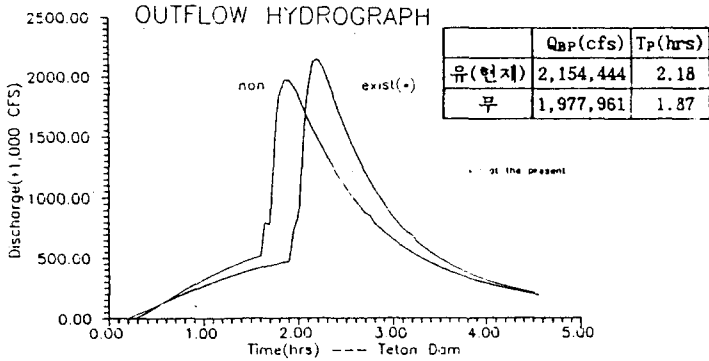


그림 3 경사면의 피복상태와 유출수문곡선





D <sub>50</sub> (mm)	0.25	0.5	1(실제)	2.0	3.0
QBP(cfs)	2,104,917	2,128,076	2,154,444	2,181,808	2,198,052
Tp(hrs)	2.25	2.20	2.18	2.21	2.26

그림 5 입경과 유출수문곡선

### 3.5 제체 입경(D<sub>50</sub>)의 변화 영향

토사 이동량에 관계식 (12)식으로 부터 토사 이동량 Qs는 중앙 입경에 비례하나 중앙입경에 변화가 붕괴부의 침투 유출량 및 발생시간에 미치는 영향은 다른 물리량에 비하여 비교적 작았다. 이때 사용한 입경은 모래의 입경 범위(0.1-2.0 mm)를 참고 하였다.

#### 4. 결 론

본 연구는 집중호우 또는 댐의 결함으로 인한 흩뎠이나 제방등 수공 구조물의 붕괴가 발생하였을 경우, 제체의 물리적 특성치가 유출 수문곡선에 미치는 영향을 분석하였다.

제체의 물리적 특성치 변화에 따른 침투 유출량 및 발생시간을 분석하기 위하여 BREACH모형을 Teton댐의 경우에 적용하여 수치 실험을 실시하였다.

제체의 경사도는 침투 유출량 및 발생시간중에 큰 영향을 줄 수 있었다. 또한, 코아는 침투유량의 발생시간을 지체 시켰으나 침투유량은 오히려 다소의 증가 계산치를 보였다. 잔디의 피복 상태는 침투유량 및 발생시간에 있어 붕괴 유출 수문곡선에 매우 큰 영향을 주었음을 알 수 있었으며, 제체의 피복식생의 적절한 관리는 홍수피해를 줄이는데 매우 중요함을 의미하고 있다.

한편, 마루폭 및 입경은 유출 수문곡선의 형태에 큰 영향을 주지 못함을 보여주었다.

#### 참 고 문 헌

1. 한건연, 이종태, 이원환(1985), "Earth Dam파괴로 인한 유출 수문곡선의 유도" 대한토목학회 논문집, 5(2), PP 41-50
2. 이종태, 한건연, 이정식(1986), "Fill-Dam의 가상 파괴로 인한 홍수파의 예측 모형", 대한토목학회 논문집, 6(4), PP 69-782
3. 한건연(1986), "Fill Dam 파괴에 따른 홍수파 예측 모델의 개발"연세대 대학원, 박사학위 논문
4. 이종태(1987), "댐의 파괴 양상", 한국 수문학회지, 20(3)
5. 오남선(1989), "흩뎠의 점진적 파괴에 관한 연구" 서울대 대학원, 석사학위 논문
6. Fread, D.L. (1988), "BREACH : An erosion model for earthen dam failure"
7. Fread, D.L. (1984), "DAMBRK: The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model", NWS
8. Fread, D.L. and Harbaugh, T.E. (1973). "Transient Hydraulic Simulati

- on of Breached Earth Dams". J. Hydr. Eng., ASCE, 99(1), PP 139-154
9. French, R.H. (1985), "Open - Channel Hydraulics" McGraw-Hill Book Co., New York.
  10. Smart, G.M. (1984), "Sediment transport formula for steep channels" J. Hydr. Eng., ASCE, 110(3), PP 267-276
  11. Singh, V.J. and Scrlatos. (1988), "Analysis of gradual earth-dam failure" J. Hydr. Eng., ASCE, 114(1), PP 21-42
  12. Yevjevich, V. (1975), "Sudden water Release" in Mahmood, K., and Yevjevich, V. (eds.) Unsteady Flow in open channels. Vol. II, Fort Collins, Colorado, Water Resources Publications, Chap 15, 1975, PP 587-668
  13. Spangler, M.G. (1951), "Soil Engineering" International Textbook Co., Scranton, Pennsylvania, PP 321-323