

〈Dam Break Wave〉

댐의 破壞 樣相

李 鍾 泰

1. 머릿말

댐의 파괴 양상에 대한 종합적인 이해를 위해서는 수공학, 토질, 기초공학, 재료, 시공학 등의 각 분야에서의 다각적인 검토가 진행되어야 한다. 그러나 이러한 종합적인 검토가 수행되었다고 하더라도 댐의 파괴는 비교적 짧은 시간동안에 복합적인 요인들에 의하여 이루어지는 현상이므로 이를 일반화 시킬 수 있는 보편 타당성있는 정교한 이론의 정립은 그 동안 많은 관계학자들의 노력에도 불구하고 아직까지는 만족스럽지 못한 실정이다. 현재까지 소개된 해석수법의 대부분은 기왕의 파괴된 댐들로부터 직접 간접적으로 얻어진 관측자료로부터의 경험, 통계적인 방법이거나, 단순화된 개념처리에서 출발한 해석적 방법들이다.

2. 댐파괴의 요인

댐 파괴의 거동은 크게 두가지로 구분하여 설명할 수 있다. 즉, 댐 구조물에 가해지는 과도한 응력에 의하여 구조물의 일부 또는 전체가 급속히 제거되는 순간적 파괴(Instantaneous Failure)와 댐 제체를 구성하고있는 토립자의 침식에 의하여 발생하는 점진적 파괴(Gradual Failure)이다. 댐의 주된 파괴 요인은 크게 월류(overtopping), 기초결함(foundation defect), 파이핑과 침투(piping and seepage)등의 세가지로 분류하는 것이 일반적이다. 순간적 파괴는 콘크리트댐

이나 중력댐, 아치댐 등에서 볼 수 있는 현상으로서 댐자체의 부적절한 설계나 기초침하, 월류지진, 댐 접합부의 불안전 등에 의한 과도한 힘이 댐 구조물에 작용하므로써 구조물을 전도시키거나 밀어냄으로서 극히 짧은 순간에 발생되는데 이 경우에서의 수학적 해석은 점차적인 파괴에 비해 훨씬 단순하다. 이러한 파괴형태의 예는 St. Francis 댐, Lack Gleno 댐, Austin 댐등에서 찾아 볼 수 있다. ICOLD (1973)에서 조사한 콘크리트 댐에서 댐의 순간적 파괴의 주된 요인으로는 기초결함(53%), 월류(29%)로 인한 것들이었으며, 그러나, 파이핑과 침투로 인한 파괴는 없었음을 보여주었다.

한편 뮐 댐의 경우에는 점진적 파괴형태를 보여주게 되는데 물의 흐름이 댐을 월류하거나 댐 제체나 기초부 또는 접합부를 통한 파이핑 침투에 의한 경우가 파괴요인의 대부분으로서 파괴부는 제체를 구성하는 토립자가 침식되어 나감에 따라 점차적으로 발달되어 커지게 되다. 파괴부의 크기와 형상, 파괴시간 등은 토립자의 침식성과 흐름의 수리특성 등에 의하여 결정된다. 월류에 의한 댐의 파괴현상은 댐의 정부와 저수지내의 수위차가 대략 0.5m 이내에 이르게 되면 댐 정부의 가장 약한 부분의 하류단에서부터 침식으로 인한 파괴가 시작되고, 파괴부가 바닥에 이를 때 까지 계속되다가 침식성이 작은 자연지반에 이르면 중지 된다. 파이핑, 침투에 의한 파괴는 물이 제체를 통하여 누수되고, 공동을 형성하여 댐 하류단이 침식되면서 시작되며, 누출되는 유속이 점차로 증대되며 제체내의

토립자의 유실이 가속화되어 월류에서의 경우와 유사한 형태로 파괴가 진행된다. 점차적 파괴형태는 모든 월 범의 파괴가 이에 해당되므로 그에도 많으나, 파괴시 파괴부에서의 충분한 관측 자료를 얻기가 매우 어렵고 그 파괴특성이 매우 다양하여 이를 모형화 하기가 용이하지 않다. 실제로 월 범의 파괴원인에 대하여 ICOLD(1973)의 조사에 의하면, 적절하지 못한 여수로에 의하여 발생하는 월류가 전체 파괴의 35%이고, 파이핑과 침투가 38%로 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 범의 파괴요인은 범의 사용기간에 따라 달라지게 되어 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 사용기간이 경과되면서 월류로 인한 파괴가 차지하는 비중이 증대되게 된다. 이는 범의 내용년한을 고려한 적정 홍수소통능력의 확보와 적절한 수문조작이야말로 범의 안전과 직결됨을 의미한다. 그러나, 월 범의 경우에는 상당한 기간이 경과 됨에도 불구하고 파이핑과 침투에 의한 파괴도 상당한 퍼센트를 차지함을 알 수 있으며, 월 범에 대한 유지 보수관리의 필요성이 콘크리트 범보다 훨씬 큼을 알 수 있다.

3. 파괴부의 양상

파괴양상이 유출량에 직접적으로 미치는 요소들은 파괴부의 형태, 크기, 파괴소요시간 등의 색가지로 크게 나누어 생각해 볼 수 있으며 범의 구조형식, 단면의 구성, 사용 재료의 종류에 따라 각종 범의 파괴요인들과 더불어 매우 복잡

한 파괴형태로 나타난다. 따라서 이에 관한 객관적인 이해는 기왕의 파괴자료들로부터 얻어진 결과로부터 일반화된 특성을 찾아보는 것으로 만족할 수 밖에 없다.

일반적으로 중력식 및 아아치 콘크리트 범의 경우에는 월류에 대하여는 월 범의 경우보다 강한 일면을 보여주고 있으나, 일단 안정을 잃게 되면 어떤 요인으로 인한 파괴이던지 간에 순간적 파괴의 양상으로서 파괴부가 전체적으로 급속히 제거되는 양상을 보여준다. 한편 월 범의 경우에는 파괴가 제체 구성재료의 침식에 의해서 점진적으로 그 파괴 규모가 확대되어 나가는 것이 콘크리트 범의 경우와는 대조적인 점진적 파괴 형태로서 표 1에서의 파괴 폭, 파괴소요시간 등에서 볼 수 있는 바와 같이 비교적 파괴양상이 다양하며 그 영향이 하류부의 홍수파에 직접적으로 영향을 준다.

파괴부의 형태는 불확실 하지만 문제의 단순화를 위하여 일반적으로 비교적 규칙적인 형태를 가정하여 해석하고 있는데, 삼각형, 직사각형, 사다리꼴형, 포물선형 등이 있겠으나 사다리꼴형은 측벽면경사 $Z(0 \leq Z \leq 2)$, 파괴부의 폭 B 등을 변화시킴에 따라 가장 일반화된 형태로 표현할수있다. Singh(1982)가 조사한 결과에 의하면 파괴 상단의 폭 B 와 범높이 H 와의 관계는 $2H \leq B \leq 5H$ 의 범위에 있다고 하였고, MacDonald(1984)가 조사한 범 파괴에 관한 자료를 프롯트한 결과 B 의 값은 $H \leq B \leq 5H$ 의 범위로 밝혀졌으며, Fread(1977)의 파괴부 평균 폭 \bar{B} 에 대한 연구결과는 $H \leq \bar{B} \leq 3H$ 으로 나타나 있어, 이들 값을 비교하여 볼 때 Singh와 MacDonald의 조사치가 파괴부의 상단폭임

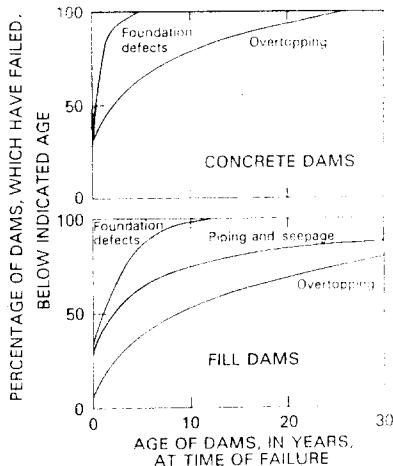


그림 1. 범의 사용기간과 파괴 요인

표 1. Dam Breach Characteristics

Type of Dam	Avg. Breach Width (\bar{B})	Failure Time (hrs) (T)
Earth (Well constructed)	$H \leq \bar{B} \leq 3H$	$0.5 \leq T \leq 3.0$
Earth	$H \leq \bar{B} \leq 3H$	$0.1 \leq T \leq 0.5$
Concrete (Gravity)	$\bar{B} \geq 0.5W$	$T \leq 0.2$
Concrete (Arch)	$\bar{B} \geq 0.8W$	$T \leq 0.1$

(주) W : 범 전체의 폭, 범의 높이, H : 파괴지속시간을 나타내고 있음.

을 감안하면 Fread(1977)의 연구결과가 타당한 것으로 판단 되었다.

활 댐에서의 파괴지속시간 T 는 구성재료의 침식성에 크게 좌우된다. Singh, MacDonald, Fread 등의 조사에 의하여 비교적 견고하게 축조된 earth dam의 경우 $0.5 \leq T \leq 3.0$ 시간범위로 나타 났으며, 균질의 토사로 축조된 단면에서의 침식으로 인한 월류부의 하강속도는 파괴 지속 시간을 통하여 대개 일정하다고 볼 수 있다.

4. 파괴양상과 유출

일반적으로 댐파괴에 따른 유출의 문제를 다루기 위해서는 댐 파괴의 양상이 시간적 및 기하학적으로 기술되어야 하고 파괴부의 형태, 저수지 내로의 유입양, 저수지의 저류방정식, 여수로나 터어빈을 통한 파괴부의 유량, 댐 직하류부의 수위에 따른 submergence effect 등에 의한 영향요소들을 복합적으로 고려하여 유출 수문곡선이 유도되어야 한다. 유출수문곡선의 형상과 첨두유량의 크기 및 발생 시간 등은 댐 하류부로 홍수와 추적을 수행하고 하류부의 홍수 범위도(inundation map) 등을 작성하는데 매우 중요한 자료가 된다. 순간적 파괴시의 유출에 관한 기초적인 연구는 Barre de Saint Venant (1871)에 의해 제시된 것으로 부터 비롯되었는 바, 현재까지의 많은 노력에도 불구하고 크게 진전된 성과는 없다. 그는 댐이 순간적으로 완전히 제거되는 조건에서, 마찰의 영향 및 바닥의 경사도와 하류부의 수위를 무시한 가정조건 하에서 임의의 시간 t 에서의 정·부파(positive, negative wave)로 구성된 모습인 수위 곡선을 이론적으로 표현하였다. 즉,

$$\frac{X_d(\text{or } X_u)}{t \sqrt{g Y_0}} = 2 - 3 \sqrt{\frac{y}{Y_0}} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, X_d : 댐으로 부터 하류방향으로의 거리, (ft)

X_u : 댐으로 부터 상류방향으로의 거리, (ft)

y : 수심, (ft)

Y_0 : 댐 파괴 직전의 수심, (ft)

$X_d=0$ 이고, $t=1$ 일때 댐 지점에서의 수심은 $4/9 Y_0$ 이다. St. Venant는 또한 댐의 초기수심

과 폭으로 부터 파괴로 인한 첨두유량 Q_{max} 을 결정하였다.

$$Q_{max} = \frac{8}{27} W_d \sqrt{g} Y_0^{3/2} \dots\dots\dots(2)$$

위의 결과식들은 다시 A.Ritter(1892), A.Scho klitsch(1917) 등에 의하여 다시 검토되었으며 부분파괴 및 하도의 마찰저항이 유출에 주는 영향에 대하여 실험적으로 검토하였다. 즉 부분파괴 깊이 D_b 이고, 전체 폭 W_d 에 대하여 파괴 폭이 W_b 일때 Q_{max} 는 다음식과 같다.

$$Q_{max} = \frac{8}{27} W_b \left(\frac{W_d}{W_b}\right)^{1/4} \left(\frac{Y_0}{D_b}\right)^{0.33} \sqrt{g} D_b^{3/2} \dots\dots\dots(3)$$

WES(1960)에서는 모형실험의 결과치로 부터 다음의 결과식을 제시 하였다.

$$Q_{max} = 0.29 \sqrt{g} W_b D_b^{3/2} \left(\frac{W_d}{W_b} \cdot \frac{Y_0}{D_b}\right)^{0.28} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, $1.0 \leq \left(\frac{W_d}{W_b} \cdot \frac{Y_0}{D_b}\right) \leq 20$ 가 적용 범위이며, $\left(\frac{W_d}{W_b} \cdot \frac{Y_0}{D_b}\right)$ 가 1.0에 접근할수록 결과치의 성과는 좋은것으로 나타났다. 이에 관한 연구는 계속되어 Price(1975), Yevjevich(1975) 등에 의한 노력들과, 필자(1985)가 소개한 바 있는 저수지의 지형인자들을 도입한 첨두유량의 추산을 위한 각종 경험 실험식들이 있다. 한편 점차적 파괴시의 유출량은 기본적으로 연속방정식의 개념에 기초한 저류방정식으로 표현한다. 즉,

$$\frac{ds}{dt} = Q_i(t) - Q_b(h, t) - Q_s(h, t) \dots\dots\dots(5)$$

여기서, ds/dt : 시간에 따른 저수량의 변화율

$Q_i(t)$: 저수지내로의 유입량

$Q_b(h, t)$: 파괴부의 유출량

$Q_s(h, t)$: 여수로의 유출량

상기 식에서 $Q_b(h, t)$ 를 산정함에 있어서 웨어와 오리피스스의 유출량의 산출공식이 활용된다. 파괴지속시간이 비교적 짧은 경우에는 부파(negative wave)의 전파가 유출량에 미치는 영향은 상당하다고 볼 수 있으나, 시간의 변화에 따른 부파의 진행은 3차원 비정상적(unsteady)인 문제로 처리되는 것이며, 저수지의 복잡한 지형을 고려하여 볼때 그 실제 적용면에 있어서는 매우 어려운 문제이다. 따라서, 점차적인 파괴인 경

우에서의 이 영향은 파괴 지속시간이 비교적 긴 경우에는 무시하거나, 유출량계수에 흡수시켜 경험적으로 처리하는 것이 일반적이다.

한편, 근사적인 처리수법으로서 댐의 파괴 지속시간 t 를

$$t \leq \frac{1,008A}{B(H)^{1/2}} \dots\dots\dots(6)$$

으로 추산하고, 이로 인한 첨두유량 Q_{max} 는 시간의 함수관계식으로 표현하였다. (Wetmore, 1981) 즉,

$$Q_{max} = 3.1B[c/t + c/\sqrt{H}]^3 \dots\dots\dots(7)$$

$$c = 23.4A/B$$

여기서, Q_{max} : 첨두유량

B : 파괴부 평균폭 (ft)

A : 저수지의 만수면적 (acres)

H : 댐의 높이 (ft)

한 진연 (1985) 등은 국내 댐에 대하여 대표적으로 적용할 수 있는 저류방정식을 유도하기 위하여 국내 2,000여개의 댐들을 하천 지형학적으로 비교적 동일한 특성을 갖는 몇가지의 형태로 구별하여, 각 형태별로 대표적인 수위-수면적 관계식을 도출하였다. 이때 형태구별을 위해 사용된 지형학적 변수 K 는,

$$K = \frac{A}{H} = \frac{\text{Surface Area (ha)}}{\text{Dam Height (m)}} \dots\dots\dots(8)$$

K 의 값이 작을수록 댐은 하천상류부에 위치하여 협곡인 지형에 작은 유역면적을 이루는 긴 저수지를 갖는 댐을 의미하고, K 의 값이 클수록 댐은 중하류에 위치하며 큰 유역면적을 갖는 지형학적 특성을 나타내고 있는데 이것은 실제로 1/50,000 지형도상에서 조사한 결과와 비교적 일치하고 있었다. K 값에 의하여 저수지의 Type을 4가지로 분류하고 각 Type 별로 수위-수면적 관계 상관식들을 구하였으며, 이들의 상관계수는 0.8-0.98에 이르는 높은 상관성을 나타내고 있다. 각 Type의 댐들이 가상적으로 파괴되었을 때 유출수문곡선의 형태를 비교해 보기 위하여 댐 높이 20m에 대하여 표 1의 범위를 고려한 파괴부의 폭 40m, 파괴시간 1.75hr에 대한 유출량을 계산하였고 첨두유량 Q_{max} 에 대한 임의의 시간에서의 유량 Q 의 비 Q/Q_{max} 을 표시하여 도시한 것이 그림 4이다.

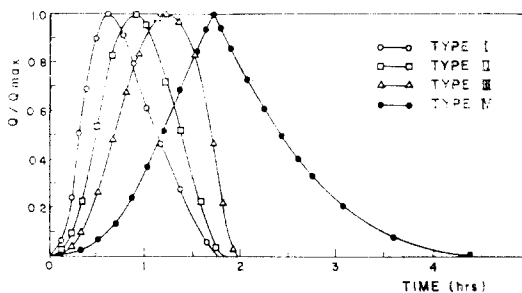


그림 2. 저수지의 형상과 유출수문곡선

그림 2에서 볼 수 있듯이 첨두유량의 발생시간은 Type I의 0.66hr에서 Type IV의 4.4hr에 달하고 있음을 알 수 있었고, 또한 첨두 유량은 Type III가 1,030 CMS, Type IV가 4,164 CMS로서 저수지의 지형학적 특성에 따라 큰 차이를 보이고 있었다.

5. 맺음말

(1) 댐 파괴양상을 종합적으로 기술하기 위해서는 수리·수문, 토질, 시공, 재료 등의 각 분야에서의 검토가 선행되어야 한다. 본고에서는 댐 파괴로 인한 하류부로의 유출현상과 관련된 측면에서 기술하여 보았다.

(2) 댐 파괴부의 양상에 대한 정확한 이해는 하류부에서의 댐과 괴로인한 홍수파의 해석 및 피해 범위를 예측함에 있어서 매우 중요함에도 불구하고 이에 대한 확실한 해석은 아직 만족스럽지 못한 실정이다. 그러나, 기왕의 댐 파괴에 관한 자료와 수리학적인 기본개념을 적절히 활용하면 비교적 보편적인 성격의 도출도 가능하다. 이를 위하여서는 국내외 댐의 파괴 자료에 대한 면밀한 분석과 해석적 이론 개발이 계속연구되어야 할 것이다.

또한, 기존댐의 안전, 유지관리에 대하여서는 방재공학적 차원에서 지속적으로 이루어져야 될 필수 과제이다.

참 고 문 헌

1) 이종태, “댐의 파괴원인과 첨두 홍수량의 예측”, 대한토목학회지, 제35권, 제 1호,

1987. 2.
- 2) 한건연, 이종태, 이원환, "Earth Dam의 파괴로 인한 유출수문곡선의 해석", 대한토목학회 논문집, 제 5 권, 제 2 호, 1985. 6.
 - 3) Barre de Saint Venant, A., "Theorie du mouvement nonpermanent des eaux." Comptes Rendus des Seances de l'Academe des Sciences, Vol 73, 1871, pp.147~154, 237~240.
 - 4) Fread D.L., "The Development and Testing of a Dam-Break Flood Forecasting Model", Proc. of the Dam-Break Flood Routing Workshop Water Resources Council, Oct. 1977.
 - 5) ICOLD, "Lessons from Dam Incidents", Boston, Massachusetts, U.S. commission on Large Dams, 1973.
 - 6) MacDonald, T.C., and Jennifer, L.M., "Breaching Characteristics of Dam Failures", J. of HY Div, Vol.110, No. 5, ASCE, May, 1984, pp.567~586.
 - 7) Price, J.T., Lowe, G.W. and Garrison, J. M., "Unsteady Flow Modeling of Dam Break Waves", Dam-Break Flood Routing Model Workshop, Bethesha, Maryland, U.S. Water Resources Council, 1977.
 - 8) Ritter, A., "Die Fortpflanzung der Wasser-Wellen", Z. Verdeut. Ing. 36, 1892.
 - 9) Schoklitsch, Armin, "Uber Dammbuchwellen", Sitzbar. Akad. Wiss. Wien. 126, 1917.
 - 10) Singh, K.P., "Dam Safety Program", Univ. of Illinois, Champaign, Illinois, June, 1982.
 - 11) WES, "Floods Resulting from Suddenly Breached Dams", Miscellaneous paper No. 2~374, U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station, Feb. 1960.
 - 12) Wetmore, J.N., and Fread, D.L., "The NWS Simplified Dam-break Flood Forecasting Model": Canadian Hydrotechnical conference, 5th, Fredericton, Canada, 1981.
 - 13) Yevjevich, V. and K. Mahmood, "Unsteady Flow in Open Channel", Water Resources Publications, U.S.A., 1975. pp.587~668.

→ 185 페이지에서 계속

고 또한 바닥傾斜의 영향도 받을 것이다. 그러나 本稿에서 考察해 본 충격파의 概念이 實際問題의 解決시에 어떻게 如何히 考慮되느냐가 重要한 因子가 되리라 思料된다.

參 考 文 獻

- 1) Stoker, J.J., "Water Waves," Interscience Publishers, Inc., New York, 1957, pp. 22~26, 291~293.
- 2) 文獻 1, pp. 293~305.
- 3) Li, W.H., "Differential Eqs. of Hydraulic Transients, Dispersion and Grondwater Flow," Prentice-Hall Inc., N.J., 1972, Ch. 3.
- 4) Abbott, M.B., "Computational Hydraulics," Pitman, 1979, Ch. 3.
- 5) 文獻 1, pp. 314~322.
- 6) Lighthill, J., "Waves in Fluids", Cambridge Univ. Press, 1978, pp.159.
- 7) 文獻 1, pp. 333~341.