

댐 결괴 해석 기법 분석



김 국 수
한국건설기술연구원 연구원
keuksookim@kict.re.kr



김 지 성
한국건설기술연구원 연구원
jisungk@kict.re.kr



김 원
한국건설기술연구원 책임연구원
wonkim@kict.re.kr

동 등의 다양한 이익을 우리사회에 제공하고 있는 반면 댐 붕괴로 인한 피해 규모는 막대하다. Costa(1985)는 댐붕괴 홍수의 수문학적/지형학적 특성에 대한 내용을 정리한 바 있다. 댐붕괴로 인한 인명피해는 1963년 이탈리아 Vaiont 댐 붕괴사고 시 2,600여명, 1989년 미국 펜실바니아 South Fork(Johnstwon) 댐 붕괴사고시 2,200여명, 1974년 인도 Machhu II 댐 붕괴사고에서 2,000명 이상이었으며, 댐붕괴 사고시 경보의 유무에 따라 평균 사망자 수는 19배 정도 차이가 남을 보고하였다. 이와 같이 댐붕괴로 인한 인명 피해를 최소화하기 위해서는 조기경보시스템의 구축이 중요하며, 시스템 구축을 위해서는 댐붕괴 모델링이 필수적이다.

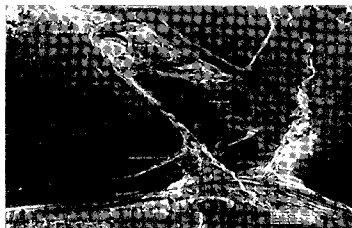
댐붕괴 모델링에 관한 연구가 활성화된 시기는 1964년 미국 Baldwin Hills 댐과 1971년 Lower Van Norman(San Fernando) 댐 붕괴 사고 이후 California 주 정부의 댐붕괴 범람지도 관련 법규 제정 이후로 생각할 수 있다. 또한 1970년대 발생한 Buffalo Creek 댐(서부 버지니아, 1972), Teton

1. 머리말

댐은 홍수조절, 발전, 수자원확보, 급수, 레저활



(a) Teton 댐



(b) Buffalo Creek 댐



(c) 연천댐

그림 1. 댐붕괴 사례



댐(아이다호, 1976), Laurel Run 댐/Sandy Run 댐(펜실바니아, 1977), Kelly Barnes 댐(조지아, 1977) 붕괴 사고로 인해 미국 댐 안전 관리 프로그램의 포괄적 재검토의 필요성이 제기되었다. 국내에서도 1996년 연천댐 붕괴와 2002년 장현저수지와 동막저수지의 붕괴로 인해 막대한 인명 및 재산피해가 발생하였으며, 2005년 7월 27일 시행된 자연재해대책법 개정법률에서 각종 시설물에 대한 비상대책회 수립을 의무화하는 제도가 도입된 바 있다.

2. 결괴해석기법

댐붕괴 모델링은 댐붕괴 유출수문곡선을 예측하여 이 수문곡선을 하류하천을 통해 추적하는 과정으로 나타낼 수 있다. 여기서 유출수문곡선을 예측하는 과정은 결괴부 특성치(결괴부 형상, 깊이, 폭, 결괴형성속도 등)를 예측하는 과정과 저수지의 저

류와 결괴부 유입을 추적하는 과정으로 구분할 수 있다. 지금까지 개발된 결괴 예측 기법들은 결괴형성과정의 예측 측면에서 큰 차이를 보이고 있으며 대부분의 모형들은 결괴형성과정을 직접 모의하지 않으며 사용자가 독립적으로 결괴부 특성치를 결정하여 추적모형의 입력자료로 활용하는 특징을 보이고 있다.

2.1 기법분류

미개척국(USBR, 1988)은 댐 결괴해석기법을 비교분석기법, 예측식기법, 매개변수기반모형, 물리기반모형의 4가지 형태로 분류한 바 있다. 최근 Kahawita(2007)는 댐붕괴해석 모형을 경험적 모형, 해석적 모형, 매개변수 모형, 물리기반 모형으로 구분하였으며 추가적으로 물리기반 모형을 경험적 물리기반 모형과 이론적 물리기반 모형으로 구분하였다.

표 1. 댐붕괴 침두유출량 예측식(Wahl, 1998 보완)

구분	사 례	예 측 식	비 고
Kirkpatrick(1977)	16건(가상붕괴 5건)	$Q_p = 1.268(h_w + 0.3)^{2.5}$	
SCS(1981)	13건	$Q_p = 16.6(h_w)^{1.85}$	
Hagen(1982)	6건	$Q_p = 0.54(S h_d)^{0.5}$	
USBR(1982)	21건	$Q_p = 19.1(h_w)^{1.85}$	
Singh와 Snorasson (1982, 1984)	20건(실제붕괴), 8건(가상붕괴)	$Q_p = 13.4(h_d)^{1.89}$ $Q_p = 1.776(S)^{0.47}$	모의된 결과로부터 도출
MacDonald와 Langridge-Monopolis(1984)	42건	$Q_p = 1.154(V_w h_w)^{0.412}$ $Q_p = 3.85(V_w h_w)^{0.111}$	
Costa(1985)	31건(건설된 댐)	$Q_p = 1.122(S)^{0.57}$ $Q_p = 0.981(S h_d)^{0.42}$ $Q_p = 2.634(S h_d)^{0.44}$	자연적으로 생성된 댐에 대한 붕괴사례 포함
Evans(1986)		$Q_p = 0.72(V_w)^{0.53}$	
Froehlich(1995)	22건	$Q_p = 0.607(V_w^{0.295} h_w^{1.24})$	
Webby(1996)		$Q_p = 0.0443g^{0.5} V_w^{0.367} h_w^{-1}$	
Walder와 O'Connor(1997)		$Q_p = 1.51(g^{0.5} d^{2.5})^{0.06} (k V_o/d)^{0.94}$ $Q_p = 1.94g^{0.5} d^{2.5} (D/d)^{0.75}$	
Xu와 Zhang(2009)75건		$Q_p/\sqrt{g V_w^{2/3}} = 0.133(V_w^{1/3}/h_w)^{-1.276} e^{C_4}$	

h_d = 댐 높이
 h_w = 결괴부 바닥 기준 댐 높이
 S = 저수지용량
 V_w = 결괴부 바닥 기준 저수량
 g = 중력가속도

d = 결괴를 통한 저수지수위 하강
 k = 결괴부 평균연직침식율
 V_o = 결괴부 흐름체적
 D_c = 댐바닥기준 댐정부 표고
 C_4 = Xu와 Zhang(2009) 참고

비교분석기법은 기존 댐붕괴 사례자료와 비교하여 댐규모, 건설방법, 재료가 매우 유사할 경우 결과부 특성치와 침투유량을 과거 댐붕괴 사례와 동일한 값으로 추정하는 것이다. 예측식 기법은 과거

댐붕괴 사례 자료를 기반으로 댐붕괴 침투유출량을 댐높이, 저수용량 등을 변수로 하는 회귀식을 추정하여 분석에 활용하는 기법으로 매우 높은 실용성을 가지고 있다. 현재까지 개발된 결과 침투유출량

표 2. 결과매개변수 예측식(Wahl, 1998 보완)

구분	사 례	예 측 식
Johnson과 Illes(1976)		$0.5h_d \leq \bar{B} \leq 3h_d$ [Earthfill dams]
Singh과 Snorrason (1982, 1984)	20건	$2h_d \leq \bar{B} \leq 5h_d$ $0.15m \leq d_{ovtop} \leq 0.61m$ $0.25hr \leq t_f \leq 1.0hr$
MacDonald와 Langridge-Monopolis(1984)	42건	Earthfill dams: $V_{er} = 0.0261(V_w \times h_w)^{0.769}$ [best fit] Non-earthfill dams: $V_{er} = 0.00348(V_w \times h_w)^{0.852}$ [best fit] $t_f = 0.0179(V_{er})^{0.364}$ [upper envelope]
Froehlich(1987)	43건	$\bar{B}^* = 0.47K_o(S^*)^{0.25}$ $K_o = 1.4$ overtopping; 1.0 otherwise $t_f^* = 79(S^*)^{0.47}$ $Z = 0.75K_c(h_w^*)^{1.57}(\bar{W}^*)^{0.73}$ $K_c = 0.6$ (with corewall); 1.0(without corewall)
Singh과 Scarlatos(1988)	52건	$\bar{B}_i/\bar{B}_b = 1.29$
Von Thun과 Gillette(1990)	57건	$\bar{B} = 2.5h_w + C_b$ $t_f = 0.015h_w$ or $\bar{B}/(4h_w)$ [highly erodible] $t_f = 0.020h_w + 0.25$ or $\bar{B}/(4h_w + 61)$ [erosion resistant] $Z = 1.0; 1/2$ or $1/3$ with cohesive shells or very wide cohesive cores
Froehlich(1995)	63건	$\bar{B} = 0.1803K_o V_w^{0.32} h_b^{0.19}$ $K_o = 1.4$ overtopping; 1.0 otherwise $t_f = 0.00254 V_w^{0.53} h_b^{-0.90}$
Froehlich(2008)	74건	$\bar{B} = 0.27K_o V_w^{0.32} h_b^{0.04}$ $K_o = 1.3$ overtopping; 1.0 otherwise $\bar{B} = 0.27K_o V_w^{1/3}$ $t_f = 63.2 \sqrt{V_w/(gh_b^2)}$ $Z = 1.0$ overtopping; 0.7 otherwise
Xu와 Zhang(2009)	75건	$h_d/h_d = C_1 - 0.025(h_d/h_w)$ $B_i/h_b = 0.996(V_w^{1/3}/h_w)^{0.558} e^{C_2}$; $\bar{B}/h_b = 5.543(V_w^{1/3}/h_w)^{0.739} e^{C_2}$ $t_f/t_r = C_3(h_d/h_w)^{0.654}(V_w^{1/3}/h_w)^{1.246}$
FERC(1987)		$1.0h_d \leq \bar{B} \leq 5h_d$ [\bar{B} 는 보통 h_d 의 2~4배] $0.1hr \leq t_f \leq 1.0hr$ [engineered, compacted earth dam] $0.1hr \leq t_f \leq 0.5hr$ [non-engineered, poorly compacted] $0.25 \leq Z \leq 1.0$ [engineered, compacted dams] $1.0 \leq Z \leq 2.0$ [non-engineered, slag or refuse dams]
USBR(1988)		$\bar{B} = 3h_w$ $t_f = 0.011\bar{B}$

- d_{ovtop} = 월류심
- t_f = 붕괴지속시간
- V_{er} = 재료 침식 체적
- \bar{B}^* = \bar{B}/h_b ; 무차원 결과부 평균폭
- K_o = 월류보정계수
- S^* = S/h_b^2 ; 무차원 저수용량
- T_f^* = $t_f/\sqrt{gh_b}$; 무차원 붕괴지속시간
- K_c = corewall 보정계수
- h_w^* = 결과부 바닥기준 무차원 댐높이
- Z = 결과부 측면경사
- \bar{W}^* = $(W_{crest} + W_{bottom})/(2h_b)$; 무차원 평균 embankment 폭
- B_i = 결과부 정부폭
- B_b = 결과부 바닥폭
- \bar{B} = 결과부 평균폭
- C_i = Xu와 Zhang(2009) 참고($i=1, 2, 3, 5$)



회귀식과 결괴부 매개변수 예측식을 표 1과 2에 제시하였다. 매개변수기반 모형은 결괴부 형성과정을 고려하기 위해 과거 댐 결괴 매개변수(표 2)를 이용하고 있으며 결괴형성과정은 최종 결괴부형상을 가정한 후 최종형상에 도달할 때까지 시간 따른 함수로 고려하고 있다. 결괴부 유량은 수리학 이론으로 이용하여 매 시간단계별로 계산된다. 대표적으로 DAMBRK/FLDWAV 모형과 SMPDBK 모형이 매개변수 모형의 예이다. 물리기반 모형은 수리학, 유사이송, 토질역학, 댐재료특성 관련 이론을 이용하여 결괴 형성과정을 모의하는 모형이다. 최초의 물리기반 모형은 Cristofano(1965)가 개발한 모형이며, 이후 지속적인 연구가 수행되어 Harris-Wagner 모형, BRDAM 모형, Lou 모형, Ponce-Tsivoglou 모형, Nogueira 모형, BREACH 모형, BEED 모형, SIMBA 모형, FIREBIRD 모형, HR-BREACH 모형 등이 개발되었으며 현재 지속적인 연구프로젝트가 수행되고 있다.

2.2 특징

결괴해석기법을 댐붕괴 모델링에 적용하기 위해서는 기법의 특징 및 제한사항을 파악하여야 한다. 각 기법에 대한 특징 및 제한사항은 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) 비교분석기법

비교분석기법은 분석대상 댐에 대해 쉽고 간단하게 적용이 가능한 장점을 가지고 있으나 댐이 과거 댐붕괴 사례와 유사한 특성(형식, 형상, 규모, 건설 특성, 재료 등)을 가져야만 적용이 가능하다는 점에서 실무 적용성이 매우 낮다. 또한 현재까지 구축된 댐 붕괴 데이터베이스의 자료 수가 제한적이며 설사 비교분석이 가능한 붕괴사례가 존재할 경우라도 데이터베이스에서 제공되는 자료는 일반적으로 결괴점두유출량, 최종결괴형상, 붕괴지속시간에 대한 정보만을 제공하고 있기 때문에 결괴부 유출수문곡

선을 도출하기 위해서는 추가적인 가정이 요구되는 특징을 가지고 있다.

(2) 예측식 기법

예측식기법은 분석 대상 댐에 적절한 식에 대한 선택의 문제를 가지고 있다. 이 기법을 적용할 경우 사용자는 분석 상황별로 식의 개발에 이용된 자료를 검토하고 과거 자료가 해석할 상황과 유사한지를 결정하여 평가 목적에 따라 가장 적합한 식을 선정하여야 하며, 경우에 따라 분석 대상 댐의 특성(형식, 규모, 건설특성, 재료 등)에 맞는 과거 붕괴 사례 자료로부터 직접 회귀식을 개발하여 분석 목적에 적합하도록 이용해야할 필요가 있다. 이 기법은 댐붕괴 실무에 대한 적용성이 높으며 매개변수기반 모형과 물리기반 모형의 예측결과를 검토할 수 있는 자료로의 이용이 가능하다는 측면에서 효용성을 지닌다. 예측식 기법의 경우도 결괴부 침두 유출량만을 제공하고 있기 때문에 결괴유출수문곡선을 도출하기 위해서는 비교분석기법과 마찬가지로 추가적인 가정이 요구된다.

(3) 매개변수기반 모형

매개변수기반 모형의 경우는 현재 댐붕괴 실무에서 가장 많이 이용되고 있는 모형으로 경험적 방법에 비해 좀 더 상세한 결과를 도출할 수 있는 장점을 가지고 있으며 특히 비교분석기법과 예측식기법과는 달리 결괴부 유출수문곡선을 별도의 가정없이 수리학적 원리를 통해 계산할 수 있는 특징을 가지고 있다. 그러나 궁극적으로 결괴부 예측과정에서 결괴 매개변수(표 2)에 대한 가정(결괴부 형상, 붕괴시작 표고, 붕괴지속시간 등)이 요구되기 때문에 비교분석기법과 예측식기법과 마찬가지로 댐붕괴 사례 자료에 높은 의존도를 보이는 한계를 가지고 있다.

(4) 물리기반 모형

물리기반 모형은 일반적으로 수리학, 유사이송, 토질역학, 구조적거동을 통합적으로 고려함으로써

결괴유출수문곡선과 결괴형성과정에 대한 현실적인 예측이 가능하며 가장 상세한 결괴형성과정에 대한 정보를 획득할 수 있는 장점을 가진다. 그러나 복잡한 침식메커니즘에 대한 정보가 요구되며 타 기법에 비해 상대적으로 계산소요시간이 증가하는 문제점을 가지고 있다. 또한 현재까지 개발된 모형으로 적용할 수 있는 댐의 종류가 제한적이라는 문제(homogeneous cohesive/noncohesive, simple composite embankment dam)를 가지고 있으나 지속적인 연구개발 프로젝트를 통해 이러한 문제는 점진적으로 해결될 것으로 보이며, 현재 가장 활발한 연구가 진행되고 있는 기법이다.

현재 댐붕괴 실무에서 가장 많이 이용되고 있는 기법은 매개변수기반 모형이며 최근 연구추세는 물리기반 모형에 집중되고 있다. 그러나 이들 기법의 적용에는 콘크리트중력식댐, 아치댐, 부벽식댐과 같은 형식의 댐에 대한 적용에는 여전히 한계를 나타내고 있으며, 결괴형성과정의 3차원적 특성(댐 건설재료의 공간적 분포, 채움밀도, 다짐정도, 댐코어 분포)을 반영하기에는 아직까지 많은 어려움이 존재하고 있다.

3. 댐붕괴 모델링에 대한 적용

일반적으로 댐붕괴 모델링은 댐 유출수문곡선 예측, 하류하천을 통한 수문곡선 추적, 홍수로 인한 인명손실 및 재산피해 예측과정으로 구성된다. 댐 결괴해석은 붕괴유출수문곡선의 도출과 직접적인 연관을 가지고 있기 때문에 상대적으로 그 중요도가 상대적으로 크다고 말할 수 있다. 보통 댐붕괴 해석에서 결괴유출량 도출을 위해 결괴부 매개변수를 추정하는 것은 과거 경험 또는 공학적 판단에 기초하고 있으며 댐붕괴 시나리오별로 다수의 가정이 요구될 수 있다. 예를 들어 댐은 극한 홍수 유입에 의한 월류붕괴가 발생할 수 있으며, 호우기간 이외의 기간에 파이핑에 의해 붕괴될 수도 있다. 아치댐

의 경우는 댐 단면 전체가 붕괴될 수도 있으며, 구조적으로 취약한 일부분만이 붕괴될 수도 있다. 축제댐(embankment dam)의 결괴형성시간은 규모와 형상에 따라 수 십분, 수 시간 또는 몇 일이 소요될 수 있다. 또한 붕괴시 저수지 수위 조건이 상황별로 크게 달라질 수 있다. 이와 같이 여러가지 결괴해석 영향 요소들이 붕괴모의 수행 전에 전제되어야 한다. 또한 침투결괴 유량 추정을 위해 댐형식과 붕괴양상이 고려되어야 한다. 기본적인 붕괴양상은 월류붕괴(일반적으로 호우기간동안 발생)와 평상시 상황에서 발생하는 붕괴(침윤, 파이핑, 사면 불안적, 구조적 결함, 산사태로 유발)로 구분할 수 있다. 그리고 댐형식은 결괴양상과 침투 결괴유량에 큰 영향을 미치며 댐 건설조건에 따른 축제댐, 콘크리트 중력식댐, 아치댐 등으로 분류할 수 있다. 국내에 건설된 대댐(높이 15m 이상)의 형식은 지형적인 요인으로 인해 필댐(균질형필댐, 코아형필댐, 락필댐, 표면차수벽형락필댐)과 콘크리트 중력식댐이 대다수를 차지한다. 일반적으로 결괴유량은 댐 높이가 높을수록, 저수지 수면적이 넓을수록, 결괴형성시간이 짧을수록 증가하게 된다.

댐붕괴 모델링에서 합리적인 결괴 유출량을 추정하기 위해 전술한 4가지 댐결괴해석 기법을 적용할 수 있으며 각 기법에 대한 특성과 제한점을 확인하여 분석대상 댐에 대해 가장 적절한 기법을 선정·적용하거나 조합하여 적용할 필요성이 있다. 예측식 기법을 이용하여 댐붕괴 모델링을 수행할 경우 분석 대상댐에 가장 적합한 식을 결정하기 위해서는 식의 개발에 이용된 자료를 검토하여 분석될 상황과 과거 댐붕괴 사례의 상황이 유사한지를 결정해야 하며 평가 목적에 적합한 추정값을 도출할 수 있는 예측식이 선정되어야 한다. 예를 들어 분석 목적이 댐 하류부 위험분류에 관한 것일 경우, 댐 안전 측면에서 높은 결괴유출량을 추정할 수 있는 예측식이 선정되어야 한다. 또한 예측식 선정이 어려운 경우, 분석 대상 댐에 적합한 댐붕괴 사례 표본을 추출하여 예측식을 직접 작성한 후 결괴해석에



활용하여야 한다. 매개변수기반 모형 또는 물리기반모형을 이용하여 댐결괴해석을 수행할 경우는 기존 예측식 기법에서 얻을 수 있는 침투유출량과의 비교를 통해 결과의 적절성에 대한 판단의 지표로 활용할 필요가 있다. 또한 붕괴 매개변수별 민감도를 분석을 통해 댐붕괴 모델링의 위험도 측면의 접근이 필요할 것이다. 결론적으로 댐 결괴해석에서 추천되는 방법은 가용한 여러가지 결괴해석 기법들 모두 적용하여 도출된 결과를 상호 비교함으로써 서로 유사한 값을 보이는 결과를 선택하여 댐붕괴 모델링의 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다.

4. 맺음말

최근 지구온난화로 인한 기상이변 및 빈발하고 있는 대규모 강진으로 인해 기존 댐들에 대한 잠재 위험도는 점점 더 증가하고 있는 실정이다. 댐붕괴로 인한 인명손실을 최소화하기 위해서는 적절한 경보의 발령과 이에 따른 신속한 대피계획이 필수적이다. 최근 댐 결괴해석 모형의 연구추세는 물리

기반 댐결괴 해석모형 개발과 이를 위한 대규모 수리실험에 집중되어 있으며 이를 위해 HR Wallingford, USDA, USBR, DSIG 등에서 대규모 연구 프로젝트를 진행 중에 있어 댐붕괴 모델링 분야의 기술 진보가 기대된다. 반면 국내의 경우 댐 붕괴 모델링에 관한 연구는 수치모형 개발에 편중되고 있어 실무 적용에 한계를 보이고 있다. 그러므로 현재까지 개발된 댐결괴 해석 기법들 상세히 분석하여 대상 댐에 적합한 기법을 채택하여 붕괴 모델링에 적용할 필요가 있으며 현재 최신 댐결괴 해석 기법들 벤치마킹함으로써 국내 댐붕괴 모델링 실무에 적합하며 관련 종사자들의 요구에 부합하는 관련 기술 개발이 필요할 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08 기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. ☺

참고문헌

1. Costa, J.E. (1985). Floods from Dam Failures, U.S. Geological Survey Open-File Report 85-560, Denver, Colorado.
2. Cristofano, E.A. (1965). Method of computing erosion rate for failure of earthfill dams, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
3. Froehlich, D.C.(2008). "Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties," Journal of Hydraulic Engineering, 134(12), 1708-1721.
4. Kahawita, R. (2007). Dam breach modelling - a literature review of numerical models, CEATI Report No. T032700-0207C. CEA Technologies (CEATI). CEATI.
5. USBR (1988). Downstream Hazard Classification Guidelines, ACER-Technical Memorandum No. 11, Assistant Commissioner - Engineering and Research, Denver, Colorado.
6. Wahl, T.L.(1998). Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment, Dam Safety Research Report DSO-98-004, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
7. Xu, Y. and Zhang, L.M.(2009). "Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(12), 1957-1970.