

# 댐붕괴 모델링을 위한 첨두붕괴유출량 예측식 검토

## Review of Peak Breach Outflow Predictors in Dam-Failure Modeling

김극수\*, 김지성\*\*, 김 원\*\*\*  
Keuk Soo Kim, Ji Sung Kim, Won Kim

### 요 지

댐붕괴 모델링에 관한 연구가 활성화된 시기는 미국 Baldwin Hills 댐(1964)과 Lower Van Norman(San Fernando) 댐(1971) 붕괴 사고 이후이며 1970년대 발생한 Buffalo Creek 댐(서부 버지니아, 1972), Teton 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 연천댐 붕괴(1996년)와 장현저수지와 동막저수지의 붕괴(2002년)로 하류에 위치한 가옥 및 농경지 침수로 인해 재산피해가 발생한 바 있으며, 2005년 비상대처계획 수립을 의무화하는 제도가 도입되었다.

오늘날 댐 붕괴와 붕괴로 인한 유출 수문곡선을 분석하는데 이용 가능한 수많은 도구들이 존재하고 있다. 가장 잘 알려져 있으며 가장 널리 이용되는 모형은 NWS Dam-Break Flood Forecasting Model(DAMBRK; Fread, 1977)이며 국내 댐·저수지 비상대처계획 수립을 위해 많이 이용되고 있다. DAMBRK 모형의 입력자료는 붕괴지속시간, 결괴부측면경사, 최종결괴부바닥표고, 댐붕괴시작수위 등이 요구되며, 이 중 결괴형성과정에 관련된 매개변수의 선정에 대해서는 댐붕괴 사례연구 자료가 활용되고 있다. 모형으로부터 도출된 붕괴 유출수문곡선에 대한 적정성 평가는 과거 경험, 공학적 판단, 첨두유출 예측식에 의해 수행되고 있으며 가장 객관적인 기준이라 판단되는 첨두유출량 예측식은 사례연구 자료의 부족으로 인해 높은 불확실성을 안고 있다. 본 연구는 최근까지 개발된 댐결괴 첨두유출량 예측식을 기반으로 국내 건설된 댐의 대다수를 차지하는 필댐에 대해 댐높이, 댐형식별로 예측식의 적정성을 평가하였다.

**핵심용어** : 댐붕괴, 결괴첨두유출, DAMBRK 모형

### 1. 서 론

댐은 홍수조절, 발전, 수자원 확보, 급수, 레저활동 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 붕괴 사고시 2,600여명, 1989년 미국 펜실바니아 South Fork(Johnstown) 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,

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 박사후연구원 · Email : keuksookim@kict.re.kr

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 박사후연구원 · Email : jisungk@kict.re.kr

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구위원 · Email : wonkim@kict.re.kr

1972), Teton 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 비상대처계획 수립을 의무화하는 제도가 도입된 바 있다.

## 2. 댐붕괴 모델링

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 있으며 여러가지 결괴해석 영향 요소들이 붕괴모의 수행 전에 전제되어야 한다. 또한 침투결괴 유량 추정을 위해서는 댐형식(축제댐, 콘크리트 중력식댐, 아치댐 등)과 붕괴양상(월류, 침윤, 파이핑, 사면불안정, 구조적결함, 산사태 등)이 고려되어야 한다. 국내에 건설된 대댐(높이 15m 이상)의 형식은 지형적인 요인으로 인해 필댐(균질형필댐, 코아형필댐, 락필댐, 표면차수벽형락필댐)과 콘크리트 중력식댐이 대다수를 차지하고 있다. 일반적으로 결괴유량은 댐 높이가 높을수록, 저수지 수면적이 넓을수록, 결괴형성시간이 짧을수록 증가하게 된다.

댐붕괴 모델링에서 합리적인 결괴 유출량을 추정하기 위해서는 결괴부 유출수문곡선의 예측이 매우 중요하다. 댐결괴 해석기법으로는 비교분석기법, 예측식기법, 매개변수기반모형, 물리기반모형 등(USB, 1988)이 있으며 최근 연구(Kahawita, 2007)에서는 댐붕괴해석 모형을 경험적 모형, 해석적 모형, 매개변수 모형, 물리기반 모형으로 구분하고 특히 물리기반 모형을 경험적 물리기반 모형과 이론적 물리기반 모형으로 구분한 바 있다. 이러한 결괴부 예측 기법들은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

비교분석기법은 기존 댐붕괴 사례자료와 분석대상 댐이 매우 유사한 특성을 가지고 있을 경우에 결괴부 특성치와 침투유량을 과거 댐붕괴 사례와 동일한 값으로 추정하는 방법이다. 이 기법은 쉽고 간단하게 적용이 가능한 장점을 가지고 있으나 댐이 과거 댐붕괴 사례와 유사한 특성(형식, 형상, 규모, 건설특성, 재료 등)을 가져야만 적용이 가능하다는 점에서 실무 적용성이 매우 낮은 기법이다.

예측식기법은 과거 댐붕괴 사례 자료를 기반으로 댐붕괴 침투유출량을 댐높이, 저수용량 등을 변수로 하는 회귀식을 추정하여 분석에 활용하는 기법으로 높은 실용성을 지니고 있으며, 매개변수기반 모형과 물리기반 모형의 예측결과를 검토할 수 있는 자료로의 이용이 가능하다는 측면에서 높은 활용도를 가지고 있다. 반면 분석 대상 댐에 적절한 식의 선택에 관한 문제를 가지고 있으며 수문곡선을 도출하기 위해 비교분석기법과 마찬가지로 추가적인 가정이 요구되는 특징을 갖는다.

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 결괴매개변수에 대한 가정(결괴부 형상, 붕괴시작표고, 붕괴지속시간 등)이 요구되기 때문에 비교분석기법과 예측식기법과 마찬가지로 댐붕괴 사례 자료에 높은 의존도를 보이는 한계를 가지고 있다(DAMBRK 모형, HEC-RAS

모형, SMPDBK 모형 등).

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 증가하게 되며 현재까지 개발된 모형으로는 적용할 수 있는 댐의 종류가 제한적인 문제점을 가지고 있다. 그러나 현재 가장 활발한 연구가 진행되고 있어 이러한 문제들이 점진적으로 극복될 것으로 판단된다(HR-BREACH 모형, SIMBA 모형, WINDAM 모형, FIREBIRD 모형 등).

댐붕괴 모델링을 위해서는 전술한 4가지 댐결괴 해석 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 요구된다. 결론적으로 댐 결괴해석에서 추천되는 방법은 가용한 여러가지 결괴해석 기법을 모두 적용하여 도출된 결과를 상호 비교함으로써 서로 유사한 값을 보이는 결과를 선택하여 댐붕괴 모델링의 신뢰도를 향상시키는 것이다.

### 3. 결괴부 침투유량 예측식

댐결괴부 침투유량 예측에 관한 연구는 Kirkpatrick, SCS, Hagen, USBR, Singh과 Snorasson, MacDonald와 Langridge-Monopolis, Costa, Evans, Froehlich, Webby, Wader와 O'Conner 등에 의해 수행된 바 있으며(Wahl, 1998), 최근 과거의 댐붕괴 사례연구 자료를 종합하여 Froehlich(2008)와 Wu와 Zhang(2009)에 의해 추가적인 연구가 수행되었다. 특히 Wu와 Zhang은 Earthfill 댐과 Rockfill 댐에 관한 자료를 토대로 다변량 회귀분석에 의해 결괴부 침투유량 예측식과 결괴부 매개변수 예측식을 제안하였다. 표 1은 현재까지 제안된 댐붕괴 침투유출량 예측식을 제시한 것이다.

표 1에서 제시된 바와 같이 현재까지 제안된 댐붕괴 침투유출량 예측식은 일반적으로 댐높이, 저수용량의 함수로 제시되고 있으며, 최근 연구라 할 수 있는 Walder와 O'Conner, Xu와 Zhang의 연구에서 추가적으로 저수지수위하강, 체침식성, 댐형식 등이 고려되고 있음을 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 국내에 건설된 댐의 대다수는 필댐형식(약 96%)을 취하고 있기 때문에 Earthfill 댐과 Rockfill 댐을 분석 대상으로 한 Xu와 Zhang의 연구에서 이용된 75개의 댐붕괴 사례 중 침투유출량에 대한 정보가 가용한 39개 사례를 연구에 활용하였다.

표 1. 댐붕괴 침두유출량 예측식(Wahl, 1998 보완)

구 분	예 측 식	고려변수	
Kirkpatrick(1977)	$Q_p = 1.268(h_w + 0.3)^{2.5}$	(댐높이b)	
SCS(1981)	$Q_p = 16.6(h_w)^{1.85}$	(댐높이b)	
Hagen(1982)	$Q_p = 0.54(S \cdot h_d)^{0.5}$	(저수용량a), (댐높이a)	
USBR(1982)	$Q_p = 19.1(h_w)^{1.85}$	(댐높이b)	
Singh과 Snorasson(1982, 1984)	$Q_p = 13.4(h_d)^{1.89}$ ; $Q_p = 1.776(S)^{0.47}$	(댐높이a); (저수용량a)	
MacDonald와 Langridge-Monopolis(1984)	$Q_p = 1.154(V_w \cdot h_w)^{0.412}$ ; $Q_p = 3.85(V_w \cdot h_w)^{0.411}$	(저수용량b)(댐높이b)	
Costa(1985)	$Q_p = 1.122(S)^{0.57}$ ; $Q_p = 0.981(S \cdot h_d)^{0.42}$ ; $Q_p = 2.634(S \cdot h_d)^{0.44}$	(저수용량a); (저수용량a), (댐높이a)	
Evans(1986)	$Q_p = 0.72(V_w)^{0.53}$	(저수용량b)	
Froehlich(1995)	$Q_p = 0.607(V_w^{0.295} h_w^{1.24})$	(저수용량b), (댐높이b)	
Webby(1996)	$Q_p = 0.0443g^{0.5} V_w^{0.367} h_w^{1.4}$	(저수용량b), (댐높이b)	
Walder와 O'Connor(1997)	$Q_p = 1.51(g^{0.5} d^{2.5})^{0.06} (k V_0 / d)^{0.94}$ ; $Q_p = 1.94g^{0.5} d^{2.5} (D_c / d)^{0.75}$	(수위 ↓), (↓ 침식율), (유출체적); (수위 ↓), (댐높이c)	
Xu와 Zhang(2009)	$Q_p / \sqrt{g V_w^{5/3}} = 0.133(V_w^{1/3} / h_w)^{-1.276} e^{C_4}$	(저수용량b), (댐높이), (댐형식), (침식성)	
$h_d$	= 댐높이(댐높이a)	$d$	= 결괴를 통한 저수지수위 하강
$h_w$	= 결괴부 바닥 기준 댐 높이(댐높이b)	$k$	= 결괴부 평균연직침식율
$S$	= 저수지체적(저수용량a)	$V_0$	= 결괴부 흐름체적
$V_w$	= 결괴부 바닥 기준 저수량(저수용량b)	$D_c$	= 댐바닥기준 댐정부 표고(댐높이c)
$g$	= 중력가속도	$C_4$	= 댐형식과 제체 침식성에 따른 계수

검토에 이용된 식은 Walder와 O'Connor 식을 제외한(수위하강, 침식율에 대한 정보 활용 불가) 15개 식이며 그림 1에서는 가용한 전체 자료에 대해 침두유출량 예측식을 적용한 결과를 관측된 값과 비교하였다. 가용한 자료들이 Xu와 Zhang의 연구에 이용된 식이기 때문에 Xu와 Zhang(2009) 식이 가장 나은 적합도를 보이는 것으로 나타나고 있으나 그림에서 제시된 바와 같이 붕괴사례 자료를 모두 만족시킬 수 있는 예측식은 없으며 조건별로 매우 불확실성이 높은 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 그림 2와 3에서는 댐형식과 댐높이로 세분하여 예측식의 적정성을 평가하였다.

먼저 그림 2의 댐형식별 검토에서는 DC(dams with corewalls), FD(concrete-faced dams), HD(homogeneous dams), ZD(zoned-fill dams)로 댐형식을 분리하여 각각의 예측식에 대한 적정성을 검토하였다. 먼저 DC의 경우는 Hagen(1982) 식이 가장 적합한 결과를 보였으며, FD의 경우 Webby(1996) 식, HD의 경우 Xu와 Zhang(2009) 식이 가장 나은 적합도를 보이는 식으로 나타났다. ZD의 경우 가용한 자료가 3개 밖에 되지 않아 적정성을 판단하기에는 다소 무리가 있어 보이거나 제시된 결과만으로 볼 때 Kirkpatrick(1977) 식이 가장 나은 적합도를 보이고 있었다.

다음으로 그림 3의 댐 높이별 검토에서는 댐높이 15m 미만, 15m 이상 30m 미만, 30m 이상 40m 미만, 40 m 이상으로 구분하여 예측식의 적정성을 평가하였다. 댐 높이 15m 미만의 경우 Froehlich(1995) 식과 Xu와 Zhang(2009) 식, 15m~30m의 경우, Hagen(1982) 식, 30m~40m의 경우, USBR(1982) 식, 40m 이상의 경우, Kirkpatrick(1977) 식이 가장 나은 적합도를 보이는 식으로 나타났다.

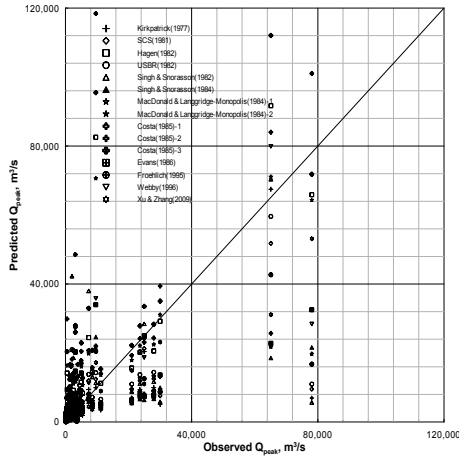


그림 1. 결괴 침두유량 예측값 vs. 관측값 비교

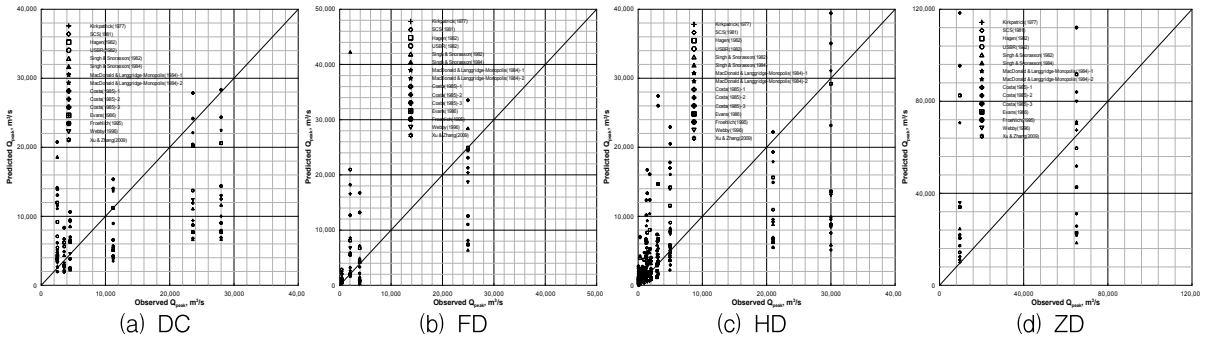


그림 2. 댐형식별 예측값 vs. 관측값 비교

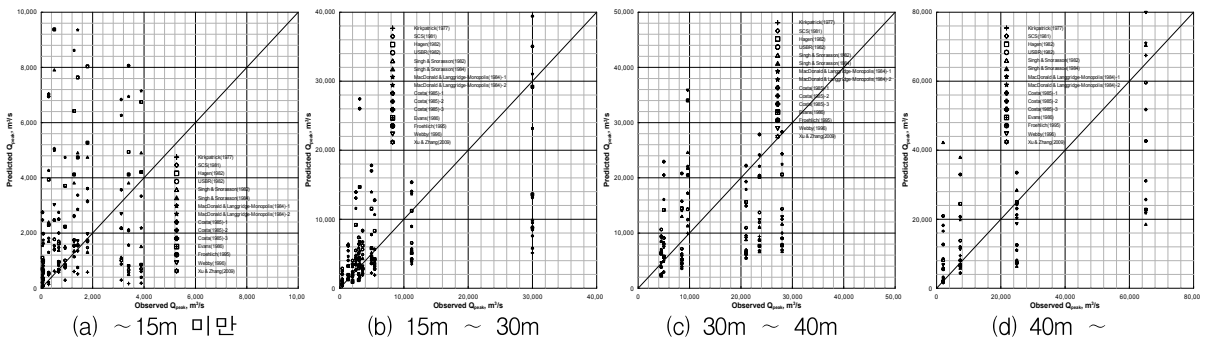


그림 3. 댐높이별 예측값 vs. 관측값 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 댐붕괴 모델링에서 결괴부 침두유출량 예측의 적정성 평가를 위한 결괴 해석 기법의 적용의 방법론을 제시하였으며, 현재까지 제안된 침두유출량 예측식의 적정성에 대한 검토를 수행하였다. 이용된 침두유출량 예측식은 총 15개이며 국내에서 건설된 댐의 대다수를 차지하고 있는 필댐에 대한 붕괴사례에 적용하였다. 예측식의 상세 적용 방안을 제시를 위해 붕괴사례를 댐높이, 댐형식별로 세분하여 기존 예측식의 적정성을 검토하였다. 더 나은 적합도를 갖는 식들이 적용 조건별로 서로 다르게 나타날 뿐 아니라 예측 결과의 불확실도가 매우 크게 나타나고 있기

때문에 침투 붕괴유출량의 적정성 검토를 위해서는 가급적 예측식 적용의 구체화 및 세분화를 통한 정량적 접근이 필요할 것으로 판단된다. 최근 댐 결괴해석 모형의 연구추세는 물리기반 댐결괴 해석모형 개발과 관련 대규모 실험에 집중되어 있다(HR Wallingford, USDA, USBR, DSIG 등에서 대규모 연구 프로젝트를 진행 중). 한편 국내의 경우 댐붕괴 모델링에 관한 연구는 수치모형 개발에 편중되고 있어 실무 적용에 한계를 보이고 있다. 그러므로 현재까지 개발된 댐결괴 해석 기법을 상세히 분석하고 대상 댐에 적합한 기법을 채택하여 붕괴모델링에 적용할 필요가 있으며 현재 최신 댐결괴 해석 기법을 벤치마킹함으로써 국내 댐붕괴 모델링 실무에 적합하며 관련 종사자들의 요구에 부합하는 관련 기술 개발이 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)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. Froehlich, D.C.(2008). "Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties." *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), 1708-1721.
3. Kahawita, R. (2007). *Dam breach modelling - a literature review of numerical models*, CEATI Report No. T032700-0207C. CEA Technologies (CEATI). CEATI.
4. USBR (1988). *Downstream Hazard Classification Guidelines*, ACER-Technical Memorandum No. 11, Assistant Commissioner - Engineering and Research, Denver, Colorado.
5. 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.
6. Xu, Y. and Zhang, L.M.(2009). "Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1957-1970.