

홍수위험지도 작성을 위한 댐 붕괴 지점에서의 유량곡선 산정

이길하¹ · 김성욱^{2*} · 유순영³ · 김상현⁴ · 조진우⁵ · 김진만⁵

¹대구대학교 토목공학과, ²주식회사 지아이 지반정보연구소, ³국가수리과학연구소 계산수학연구부,
⁴부산대학교 사회환경시스템공학부, ⁵한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

Development of a Hydrograph Triggered by Earth-Dam-Break for Compiling a Flood Hazard Map

Khil-Ha Lee¹, Sung-Wook Kim^{2*}, Soonyoung Yu³, Sang-Hyun Kim⁴,
Jinwoo Cho⁵, and Jin-Man Kim⁵

¹Civil Engineering, Daegu University

²Gi Co. Ltd.

³Division of Computational Sciences in Mathematics, National Institute for Mathematical Sciences

⁴Department of Environmental Engineering, Pusan National University

⁵Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

홍수위험지도를 작성하기 위하여 수치모형을 이용한 잠재적 피해 대상 지역 파악이 선행되어야 한다. 댐 붕괴로 인하여 빗어지는 홍수위험지도 작성에서도 시나리오 별로 댐 붕괴를 모의하기 위한 댐 붕괴 수치 모의가 필요하다. 댐 붕괴 시 침투 유량은 결정 인자인 댐 붕괴(breach)나 저수지의 수량과 댐 붕괴 형성 및 진행에 민감하므로 이런 요소를 포함하는 물리적 모형이 필요하다. 댐 붕괴 메커니즘과 수리학적 현상이 모든 댐 붕괴에 같다고 가정하고 하나의 물리적 댐 붕괴 수치 모형을 구축하였다. 댐 붕괴지점에서 수문곡선을 추정하는데 초점을 두어 댐 하류의 하도 추적 시 상류부의 경계조건 역할을 하도록 하는 것이며, 연구에서 하류부의 하도 추적은 다루지 않았다. 물리적 모형은 댐 붕괴 형성과정에 필요한 역할과 댐 붕괴를 통한 흐름의 수리학적 설명을 담고 있다. 2008년 중국의 장지산(Tangjishan) 댐 붕괴 시 관측된 현장 자료를 이용하여 모형의 수행능력을 검증하였다. 모의 결과는 만족할만한 수준의 정확도를 가지는 것으로 나타났으며 결정계수는 0.974, NSC는 0.94, RMSE는 610 m³/sec 정도로 나타났다. 이로 미루어보아 연구에서 구축된 댐 붕괴 모형은 실제 댐 붕괴 관측 자료를 현실적으로 잘 재현해내는 것으로 확인되었으며, 댐 붕괴로 인한 홍수위험지도 구축 시 상류부 경계조건으로서 활용성이 높은 것으로 나타났다.

주요어 : 홍수위험지도, 댐 붕괴, 수치모형, 홍수, 수문곡선

In compiling flood hazard maps for the case of dam-failure, a scenario-based numerical modeling approach is commonly used, involving the modeling of important parameters that capture peak discharge, such as breach formation and progress. In this study, an earth-dam-break model is constructed assuming an identical mechanism and hydraulic process for all dam-break processes. A focus of the analysis is estimation of the hydrograph at the outlet as a function of time. The constructed hydrograph then serves as an upper boundary condition in running the flood routing model downstream, although flood routing is not considered here. Validation was performed using the record of the Tangjishan dam-break in China. The results were satisfactory, with a coefficient of determination of 0.974, Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (NSC) of 0.94, and Root Mean Square Error (RMSE) of 610 m³/sec. The proposed model will contribute to assessments of potential flood hazards caused by dam-break.

Key words : flood hazard map, dam-break, numerical modeling, flood, hydrograph

*Corresponding author: suwokim@chol.com

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

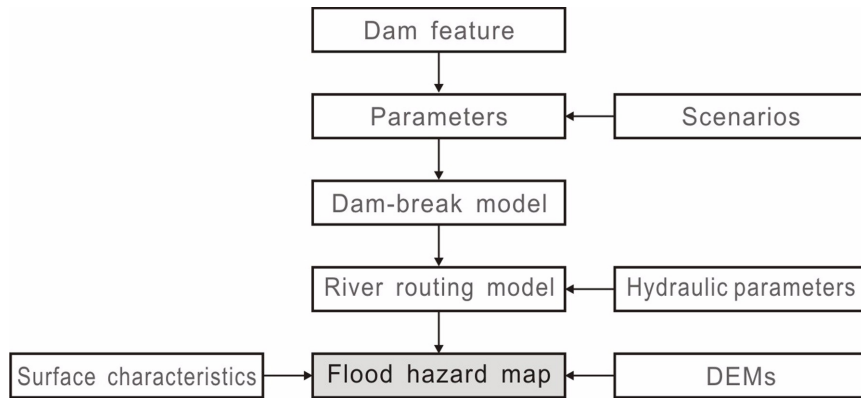


Fig. 1. Flowchart of the steps in compiling a flood hazard map.

서 론

자연 댐은 산사태, 토석류, 빙하에 의하여 하천의 흐름이 막혀 형성되거나(Costa and Schuster, 1988), 화산 분출 후 증력에 의해 화산쇄설물이 침전되어 칼데라호가 형성되는 경우에 생긴다. 인공 댐은 필 댐(fill dam)과 콘크리트 댐으로 분류할 수 있다. 1988년도 미국(Costa, 1988)에서 조사한 바에 의하면 26 m 이상이거나 61,650 m³/sec 이상인 댐의 93%가 필 댐이나, 우리나라에서는 콘크리트 댐의 건설 빈도가 증가하고 있다. 필 댐은 파이핑, 침투, 월류, 기초 부식으로 인하여 서서히 붕괴하나 콘크리트 댐은 순간 붕괴가 일어난다(ASCE, 2011).

국토보존은 개발뿐 아니라 유지관리도 중요하므로 재해에 대한 국토의 유지관리는 우리가 대비하는 만큼 보상을 받을 것이다. 자연 댐이든 인공 댐이든 댐이 붕괴되어 홍수를 유발하면 막대한 인명과 재산에 피해를 가져오는 동시에 환경의 변화를 일으켜 인간의 생활에 직간접적으로 영향을 미친다. 댐 붕괴는 대부분의 저수지가 위치하는 농촌 시설의 파괴를 가져옴으로써 생산성을 저하시키고 이는 인간의 사회, 경제, 문화, 건강, 복지 등의 문제로 연결되어 재해 전문가뿐만 아니라 환경정책 결정권자에게도 중요한 문제로 대두될 것이다. 따라서 댐 붕괴로 인한 홍수 재해와 환경 변화를 분석하고 평가하여 대비책을 마련하는 것이 필요할 것이다.

댐 붕괴가 위험한 것은 그 규모 때문만이 아니라 예기치 못한 시기에 갑자기 발생하기 때문에 그 피해에 대한 대응 시간이 충분하지 못하다. 그래서 발생 가능한 시나리오를 만들고 그에 따른 대비책과 대응 매뉴얼을

미리 작성하여 일련의 조치를 취하면 효과적이다.

댐 붕괴로 인한 잠재 피해 정도를 추정하기에 앞서 먼저 피해지역을 파악할 필요가 있는데, 이를 위하여 홍수위험지도를 제작하면 여러 가지 측면에서 유용할 것이다(Fig. 1). 댐, 저수지, 제방, 홍수 조절지 등의 축조, 하천정비, 배수시설 등 구조적인 홍수 방어에 실패하면 계획 규모를 상회하는 홍수에 의한 하천범람 및 내수침수 등의 홍수 피해를 입게 되는데 이를 최소화하기 위해 비구조적 대책을 병행할 필요가 있으며 홍수위험지도가 하나의 대안이 될 수 있다. 즉 홍수위험지도는 홍수방어의 계획수립을 위한 비구조물적 대책수립을 지원하는 하천공간정보의 기초자료 관리를 위해 작성된 2차원 지도이다. 홍수위험지도는 홍수가 발생하는 시점에 침수의 공간적 범위, 침수의 심도, 대피로, 대피처 등 침수정보 및 피난정보를 지도상에 표시하여 행정계획과 개발사업의 재해영향평가를 통하여 홍수위험 지구 지정 및 관리와 비상대피계획 수립 등을 위한 기초자료로 널리 활용할 수 있도록 한다.

연구 배경

홍수위험지도

홍수위험지도를 작성하는 일반적인 방법은 수치모형을 이용하여 잠재적 피해 대상 지역을 미리 파악하는 것인데 댐 붕괴로 인하여 빚어지는 홍수 위험 지도 작성에서도 예외 없이 시나리오 별로 댐 붕괴를 모의하기 위한 댐 붕괴 수치 모의가 필요하다. 잠재적인 댐 붕괴로 인한 침투 유량을 추정하는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 관측 유량과 관련된 수문인자

(물의 부피, 수심 등)를 이용하여 관계식을 미리 구성한 후 수문인자를 입력변수로 이용하여 첨두 유량을 추정하는 방법이다. 둘째는 붕괴 형성 과정과 유출과정을 물리적 이론에 바탕을 두고 수학적 모형(예, 미분방정식)을 구성한 후 수치해석 기법을 이용하여 추정치를 산정하는 방법이다(Evans, 1986; Costa, 1988; Fread, 1989; Singh et al., 1996). 상관 관계식(regression equations)을 이용한 추정은 많은 노력을 기울이고 방대한 자료를 필요로 함에도 불구하고 정확도가 보장되지 않는다. 물리적 모형인 경우에는 댐 구조나 구성 물질 등 입력 자료를 필요로 하는 정보가 구하기 쉽지 않은데 특히 자연 댐일 경우는 더욱 어렵다. 첨두 유량의 결정에서 물의 부피나 수심 같은 수문인자는 민감하지 않고 붕괴나 저수지의 수량과 붕괴 형성 및 진행에 더 민감하므로 이런 요소를 포함하는 물리적 모형이 선호된다. 실제 댐 붕괴 수치모형의 개발은 1980년 후반 이후에는 그다지 활발하지 않으며 현재 많이 이용되는 수치모형(예: DAMBRK, FLDWAV, HEC-RAS, FLO-2D 등)조차도 1980년대에 개발된 모형(Fread, 1989)에 의존한다. 전국적으로 많은 댐이 존재하고 있으며 댐 붕괴에 대한 예비 분석과 대비가 필요하나 기존의 상용 수치모형은 다방면의 분석용으로 사용하기에는 한계가 있어 보이며, 특히 비선형 붕괴유출을 고려할 때 그러하다. 그래서 여기에서는 하나의 물리적 이론에 바탕을 둔 댐 붕괴 수치 모형을 수치해석으로 재현하고 현장 관측 자료를 이용하여 검증하였다. 댐 붕괴지점에서 one-point 수문곡선을 추정하는데 초점을 두어 기존에 개발된 모형(Waythomas et al., 1996)을 포트란 프로그램으로 재현하여 댐 하류의 하도 추적 시 상류부의 경계조건 역할을 하도록 하는 것이다. 따라서 하류부의 하도 추적은 여기에서는 다루지 않았다. 물리적 모형은 붕괴 형성 과정에 필요한 역할과 붕괴를 통한 흐름의 수리학적 설명을 담고 있다. 댐 붕괴 메커니즘과 수리학적 현상이 모든 댐 붕괴에서 같다고 가정하였다.

이론적 배경

앞서 언급하였듯이 물리적 댐 붕괴 모형은 붕괴 형성 과정에 필요한 역할과 붕괴를 통한 흐름의 수리학적 설명을 담고 있는데, 댐 붕괴의 메커니즘과 수리학적 현상이 모든 댐 붕괴에 같다고 가정하여(Walder and O'Conner, 1997) 댐 붕괴지점에서 수문곡선을 추정하는 댐 붕괴에서 모형은 질량보존의 법칙으로부터 유도할 수 있다.

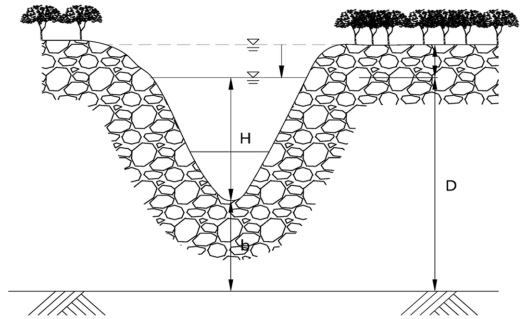


Fig. 2. Schematic diagram of a dam breach.

$$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_o \tag{1}$$

여기에서 V 는 저수지에 저장된 물의 부피, Q_i 는 저수지로 유입되는 유량, Q_o 는 저수지에서 흘러나가는 유량을 나타내며, t 는 시간간격을 나타낸다. 댐의 붕괴가 Fig. 2와 같이 사다리꼴이라고 가정하여 사다리꼴형의 웨어(French, 1986)공식을 적용하면 유량은 다음과 같다. 사다리꼴은 w 와 θ 에 따라 삼각형과 사각형으로 변형할 수 있다.

$$Q = (c_1 w + c_2 H \cot \theta) g^{0.5} H^{1.5} \tag{2}$$

식 (2)에서 w 는 붕괴의 폭을 나타낸다. θ 는 유출입구 측면의 기울기, H 는 붕괴 바닥으로부터의 수위를 나타내며, c_1 과 c_2 는 기하학적 상수이다. 댐 붕괴가 진행되는 동안 붕괴는 확장이 되나 그 진행에 대한 메커니즘에 대한 규명은 미미하다. 그래서 댐의 붕괴가 진행되어 최종상태에 이를 때까지 일정한 붕괴 비율 k (m/hr)와 일정한 붕괴모양을 유지하며 진행된다고 가정하면 최종상태에서 붕괴의 바닥까지의 높이를 b 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} b &= D - kt \quad (t < D/k) \\ b &= 0 \quad (t \geq D/k) \end{aligned} \tag{3}$$

같은 가정 하에서 θ 와 $\frac{b}{(D-h_o)}$ 도 일정하다고 보면

다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} w &= rkt \quad (t < D/k) \\ w &= rD \quad (t \geq D/k) \end{aligned} \tag{4}$$

저수지에 저장된 물의 부피는 흔히 저수지의 수위와 일정한 관계를 가진다고 보고 다음과 같이 경험적인 관계식을 표현할 수 있다.

$$\frac{V}{V_0} = \left[\frac{h_1}{h_0} \right]^p \quad (5)$$

여기에서 h_1 은 저수지에 저장된 물의 부피 V 와 상응하는 저수지 수위, h_0 와 V_0 는 초기 저수지 수위와 물의 부피를 나타내고 P 는 저수지의 형상계수를 나타낸다. 따라서 위의 사항을 이용하여 다음을 구할 수 있다.

$$h_1 = b + H \quad (6)$$

식 (3)을 식 (6)에 대입하고 식 (6)을 식 (5)에 대입한다. 식 (4)를 식 (2)에 대입하고 다시 식 (2)와 앞서 변형된 식 (5)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (7)의 미분방정식을 얻을 수 있다(Walder and O'Conner, 1997).

$$\frac{dH}{dt} = k - \frac{D^p}{pV_0} g^{0.5} H^{1.5} \frac{(c_1 w + c_2 H \cot \theta)}{(H + D - kt)^{p-1}} \quad (t < D/k) \quad (7)$$

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{D^p}{pV_0} g^{0.5} H^{2.5-p} (c_1 w + c_2 H \cot \theta) \quad (t \geq D/k)$$

식 (7)의 형태로 유도된 비선형 상미분방정식은 댐 붕괴 모형을 나타내며 유한차분법과 같은 수치해석법과 비선형 풀이법(Newton-Raphson)을 이용하여 최적해를 구할 수 있다.

대상지역 선정 및 입력자료 구성

구축한 수치 모형의 완성도를 높이고 검증과정을 거치기 위하여 현장에서 관측한 실측 자료가 필요하다. 기존의 상용 수치모형조차도 지역적인 검증을 거치지 않은 상태이므로 적용하기에 앞서 신뢰성을 확보해야 한다. 그러나 우리나라에서는 댐 붕괴와 관련하여 현장에

서 관측한 실측 자료가 연구용으로 사용하기에는 불가능해 보인다. 연구에서 모형의 검증하기 위해 중국의 장지산(Tangjishan)의 댐 붕괴 시 관측된 현장 실측 자료를 이용하였다(Wang et al., 2008; Cui et al., 2009; Hu et al., 2009; Xu and Zhang, 2009; Chang and Zhang, 2010; Liu et al., 2010; Chang et al., 2011; Liu et al., 2012; Wu et al., 2012; Xu et al., 2012).

장지산 댐은 2008년 6월 10일 윈천(Wenchuan) 지진에 의하여 산사태가 발생하여 형성된 자연 댐이다. 이 Landslide 댐은 쓰촨 성(Sichuan province)에서 두 번째로 큰 명양(Mianyang)시에서 상류부로 85 km 떨어진 위치에 있다. 현장조사 결과 위험하다고 판단하여 2008년 5월 31일 댐 상부에 가배수로(diversion channel)를 인공적으로 만들어 수위를 낮추어 주었다. 깊이 12m에 폭 25m의 가배수로 (diversion channel)가 만들어지기 전에는 저류량이 $316 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었다가 수로를 만든 후에는 $247 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 줄어들었다. 2008년 6월 10일 1시 30분경에 수심은 743.1m에 이르다가 댐 붕괴가 약 6시경에 시작한다. 첨두 유량은 12시 30분경에 $6500 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 이때 수심은 약 735.8m이다. 이후 댐 붕괴가 진행 되면서 유량은 급격히 줄어 20시경에는 $290 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 붕괴가 약 14시간에 걸쳐 발생 하였다. 이때 저수지의 부피는 $247 \times 10^6 \text{ m}^3$ 에서 $86 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 변하였으며, 최종 붕괴길이는 42 m (752 m에서 710 m)로 나타났다. 붕괴의 상부는 145~234 m이고 하부는 80~100 m이다. 댐의 제원은 Table 1과 Fig. 3에 제시하였다.

모형 검증을 수행한 장지산댐은 자연댐으로 구성이 유사한 농업용 저수지의 필댐에 적용될 수 있으며, 매개변수를 적절하게 조절함으로써 콘크리트댐의 붕괴 모형에도 사용할 수 있다.

분석 방법 및 결과

식 (7)에서 제시된 미분 방정식은 유한차분법(Finite Difference Method)을 이용하여 FORTRAN 프로그램으

Table 1. Specifications of the Tangjishan dam (Xu and Zhang, 2009; Chang and Zhang, 2010).

Factor of the dam			After the construction of the diversion channel		
Dam	Height	82 m	Channel	Height	12 m
	Width	802 m		Length	25 m
	Length	611 m		Length	475 m
	Volume	$204 \times 10^6 \text{ m}^3$	Cutting volume of soil		
	Poundage	$316 \times 10^6 \text{ m}^3$	Dam	Poundage	$247 \times 10^6 \text{ m}^3$

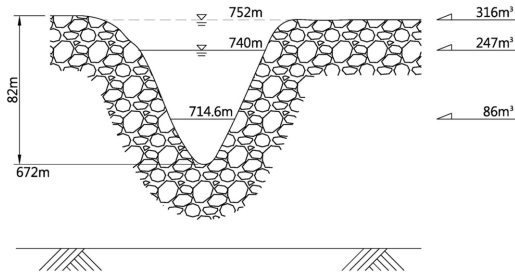


Fig. 3. Specifications of the Tangjishan dam (Xu and Zhang, 2009; Chang and Zhang, 2010).

로 작성하였으며 초기 수위와 붕괴 시간은 자유롭게 조절할 수 있도록 프로그램화 하였다. 유량산정의 시간은 30초 간격으로 18시간에 걸쳐 충분히 수렴하도록하여 총 2,160의 격자에 대하여 계산을 수행하였다. 수치 모형의 결과에서 가장 크게 영향을 미치는 요소는 입력 자료의 신뢰도와 매개변수의 정확도이다. 관측 자료를 바탕으로 한 입력 자료는 무한 신뢰를 부여한다고 하더라도 매개변수의 정확도는 사용자에 따라 주관적일 수 있다. 모형 검증에서 사용된 매개변수는 관측된 자료를 바탕으로 하여 산정되었다. 붕괴의 하부 폭 $B_{LO} = 90$ m, 붕괴 높이 $h = 42$ m, 붕괴시간 $t_f = 14$ 시간, 댐 높이는 82m로 설정되었다. 그러나 붕괴가 진행되는 메커니즘은 수학적으로 표현해주는 매개변수인 동시에 침투 유량곡선 추정에 가장 민감한 인자의 하나이므로 주의가 기울일 필요가 있다. 여기에서는 붕괴 바닥의 관측 자료를 사용하여 다음과 같이 붕괴 진행곡선 k 를 산출하였다.

$$\begin{aligned} k &= 0.594t + 3.197 \quad (6.0 \leq t \leq 10.0) \\ k &= -0.594t - 14.36 \quad (10.0 \leq t \leq 20.0) \end{aligned} \quad (8)$$

댐 붕괴 모형의 모든 매개변수가 결정이 되고 나면 초기화 수위를 설정해야 하며 초기수위는 2.18 m로 관측된 값을 이용하였다. 즉 장지산 댐의 Diversion channel을 통하여 6월 10일 0:0시에 2.18 m의 수위로 물이 흐르다가 댐 붕괴의 전조 현상이 일어나고 새벽 6:00시에 서서히 댐 붕괴가 시작되어 12:30분경에 최대 유량으로 방출되는 과정을 새로이 구축한 댐 붕괴 모형으로 재현해 보는 것이다.

모형을 이용한 추정의 정확도를 파악하기 위하여 Nash-Sutcliffe coefficient of Efficiency (NSC, Nash and Sutcliffe, 1970) 값과 RMSE 오차를 이용하여 계

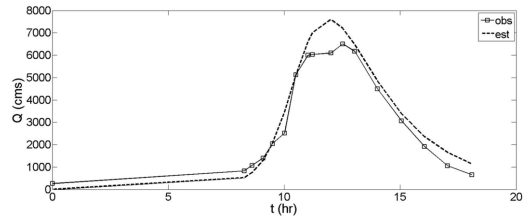


Fig. 4. Numerical results: Change in runoff as a function of time (Xu and Zhang, 2009; Chang and Zhang, 2010).

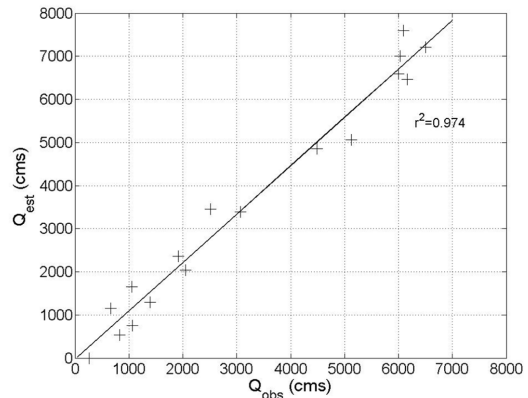


Fig. 5. Numerical results: scatter plot showing observed versus estimated run-off discharge.

산하였다.

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{est} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{Q_{est}} - Q_{obs})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{est} - Q_{obs})^2}{n}} \quad (10)$$

여기서, Q 는 유량, 첨자로 사용한 obs 와 est 는 각각 관측치, 추정치를 의미하며, n 은 사용한 자료의 개수, 변수 상단의 $\bar{(-)}$ 표시는 평균을 의미한다. 또, NSC 값의 최대값은 1로, 1에 접근할수록 추정 정확도가 높음을 의미하며, RMS오차는 오차의 크기를 나타내므로 작을수록 추정 신뢰도가 좋은 것을 의미한다.

Fig. 4-Fig. 5는 수치모형의 결과를 보여준다. Fig. 4에는 장지산댐에서 붕괴과정에서 현장 관측된 자료 중 시간에 따른 유량의 변화추이를 보여주며(Xu and Zhang, 2009; Chang and Zhang, 2010), Fig. 5는 관

측치와 연구에서 제시된 댐붕괴 모형에 의한 예측치의 산포도(Scatter plot)를 보여준다. 결과는 만족할만한 수준의 정확도를 가지며 결정계수는 0.974 정도로 나타났다. 또 NSC는 0.94이며, RMSE는 $610 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 나타났다. 이로 미루어보아 여기에서 구축된 댐 붕괴 모형은 실제 댐 붕괴 관측 자료를 정확하게 잘 재현해내는 것으로 확인되었다.

결 론

물리적 이론을 바탕으로 하나의 댐 붕괴 모형을 구축해 보았다. 입력 자료의 신뢰도와 매개변수의 불확실성은 뒷전으로 하고라도 우선 모형의 정확도와 거동에 대한 확인이 필요하였다. 이를 위해서는 중국 쓰촨 성의 장지산 댐 붕괴 자료를 사용하여 새로이 구축된 댐 붕괴 모형을 검증해 보았다. 모든 매개변수와 초기자료를 관측 자료를 바탕으로 설정하였다.

모형 운영의 결과 유량 곡선을 합리적으로 재현해내어, 모형의 효용성을 보여주었다. 비록 모형 검증이 자연 댐이면서도 흙 댐에서 이루어졌다고는 하나, 구축된 댐 붕괴 모형은 매개변수를 조절함으로써, 인공적으로 구축된 콘크리트 댐이나 보에서도 적용가능 할 것이다. 모형의 결과는 댐 지역에서 수문 곡선을 제공함으로써 HEC-RAS 같은 하도추적모형 구동에 앞서 상류 경계조건의 역할을 할 것이다. 구축된 댐 붕괴모형은 콘크리트 댐이나 보가 붕괴될 경우에 대비하여 홍수위험지도를 구축 하는데 사용할 수 있으며, 정책입안자로 하여금 향후 가이드라인을 제시할 수 있을 것이다.

댐 붕괴 현상은 예기치 못한 상황에서 순간적으로 발생하므로 대비하기도 어려울뿐더러 관측 자료조차 미비한 상태이므로 연구하기가 쉽지 않다. 특히 우리나라의 경우 자료가 거의 전무한 상태이며, 콘크리트 댐이 다수여서 댐 위주의 연구가 주류를 이루는 현재의 추세에서 연구가 더욱 힘든 편이다. 그래서 구축된 모형을 검증하기가 쉽지 않다. 비록 관측 자료가 있다고 하더라도 관측 자료를 매개변수와 연결시키는 과정이 매우 주관적이며, 특히 매개변수가 추정결과에 매우 민감한 경우 모형에 적합한 매개변수를 산정하기가 매우 어렵다. 향후 구축된 모형의 검증과 아울러 모형의 매개변수를 산정하는 알고리즘과 관계식이 더 많이 연구됨이 바람직할 것이다.

이 연구에서 구축된 댐붕괴 모형의 계산 결과는 장지산댐의 현장 관측 결과와 잘 부합한다. 모형의 결과

를 댐 붕괴에 대한 예비 분석과 수변구조물 일원의 개발 및 재해경감 시설투자의 우선 순위 결정 등에 이용함으로써 홍수 재해에 대한 피해를 저감하는데 일조할 것이다.

사 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구S01)에 의해 수행되었습니다.

References

- ASCE/EWRI Task Committee on Dam/Levee Breaching, 2011, Earthen Embankment Breaching. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137, 1549-1564.
- Chang, D. S. and Zhang, L. M., 2010, Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth. *NatHazards Earth Syst. Sci.* 10, 933-946.
- Chang, D. S., Zhang, L. M., Xu, Y., and Huang, R. Q., 2011, Field testing of erodibility of two landslide dams triggered by the 12 May Wenchuan earthquake. *Landslides*, 8, 321-332.
- Costa, J. E., 1988, Floods from dam failures, in *Flood Geomorphology*, edited by V.R. Baker, R.C. Kochel, and P.C. Patton. John Wiley, NY 439-463.
- Costa, J. E. and Schuster, R. L., 1988, The formation and failure of natural dams. *Geological Society of American Bulletin*, 100, 1054-1068.
- Cui, P., Zhu, Y. Y., Han, Y. S., Chen, X. Q., and Zhuang, J. Q., 2009, The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation. *Landslides*, 6, 209-223.
- Evans, S. G., 1986, The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-made and natural dams. *Can Geotech. J.* 23, 385-387.
- Fread, D. L., 1989, National Weather Service models to forecast dam-breach floods, in *Hydrology of disasters*, edited by O. Starosolszky and O.M. Melder. James and James, London, 192-211.
- French, R. H., 1986, *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, 339-343.
- Hu, X. W., Huang, R. Q., Shi, Y. B., Lu, X.P., Zhu, H. Y., and Wang, X. R., 2009, Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam. *Chin J Rock Mech Eng*, 28, 181-189(in Chinese).
- Liu, N., Chen, Z. Y., Zhang, J. X., Lin, W., Chen, W. Y., and Xu, W. J., 2010, Draining the Tangjiashan barrier lake. *J Hydraul Eng*, 136, 914-923.
- Liu, F., Fu, X., Wang, G., and Duan, J., 2012, Physically based simulation of dam breach development for Tangjiashan Quake Dam, China. *Environmental Earth Science*, 65, 1081-1094.

- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models, I-A Discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Singh, V. P., Scarkators, P. D., Collins, J. G., and Jourdan, M. R., 1988, Breach erosion of earthfill dams (BEED) model. *Natural Hazards*, 1, 161-180.
- Walder, J. and O'connor, J. E., 1997, Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams. *Water Resources Research*, 33, 2337-2348.
- Wang, G., Liu, F., Fu, X., Li, T., 2008, Simulation of dam breach development for emergency treatment of the Tangjiashan Quake Lake in China. *Sci China SerE TechnolSci*, 51(Supp.II), 82-94.
- Waythomas, C. F., Walder, J. S., McGimsey, R. G., and Neal, C. A., 1996, A catastrophic flood caused by drainage of a caldera lake at Aniakchak volcano, Alaska, and implications for volcanic hazards assessment. *Geological Society of America Bulletin* 108(7), 861-871.
- Wu, W., Marsooli, R., and He, Z., 2012, Depth-averaged two-dimensional model of unsteady flow and sediment transport due to noncohesive embankment break/breaching. *J of Hydraulic Engineering*, 138, 503-515.
- Xu, Y. and Zhang, L., 2009, Breaching parameter for earth and rockfill dams. *J of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering-ASCE*, 135, 1957-1969.
- Xu, F., Zhou, H., Zhou, J., and Yang, X., 2012, A mathematical model for forecasting the dam-break flood routing routing process of a landslide dam. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 1-16.

원고접수일: 2013년 10월 1일

수정본채택: 2013년 12월 6일

게재확정일: 2013년 12월 8일

이길하

712-714 경북 경산시 진량읍 대구대로

대구대학교 토목공학과

Tel: 053-850-6522

E-mail: klee@daegu.ac.kr

김성욱

611-839 부산 연제구 중앙대로 1048번길 11

(주) 지아이

Tel: 051-506-9261

E-mail: suwokim@chol.com

유순영

305-811 대전 유성구 유성대로 1689번길 70

KT 대덕2 연구센터 국가수리과학연구소

Tel: 042-717-5714

E-mail: s7yu@nims.re.kr

김상현

609-735 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길2

부산대학교 사회환경시스템공학부

Tel: 051-510-2479

E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr

조진우

411-712 경기 고양 일산서구 고양대로 283

한국건설기술연구원

Tel: 031-910-0780

E-mail: jinucho@kict.re.kr

김진만

411-712 경기 고양 일산서구 고양대로 283

한국건설기술연구원

Tel: 031-910-0221

E-mail: jmkim@kict.re.kr