수치모형을 이용한 하천제방 설계인자 검토

Investigation about Design Parameter of Levee using Numerical Model

박재홍* · 김상호** · 이창희***

Park, Jae Hong · Kim, Sang Ho · Lee, Chang Hee

Abstract

Levee breach analysis model is developed with levee failure by river flood. This model can calculate levee overflow based on hydraulic theory, analyze inundation depth on the protected area using these results. The enlargement of levee breach width is changed by levee material properties and formation. Detailed parameters are as follows-porosity, uniformity, friction angle, cohesive strength and slope of levee etc. In this study, levee failure sensitivity on geotechnical design parameters is reviewed using numerical analysis model. And it is supposed to help establish design standard of levee design. For these purposes, sensitivity analysis is performed with levee design parameters - geometric and soil mechanic parameters, and the results can be used for basic data in levee design. The results of sensitivity variation on individual parameters shows that mean diameter have the most effect on the maximum breach flowrate, followed by the up and downstream slope, uniformity, porosity, friction angle, cohesive strength etc.

Key words : Levee failure, Inundation analysis, Levee design parameter, Sensitivity analysis

요 지

하천 홍수시 제방붕괴로 인한 제내지 제방붕괴 해석모형을 개발하여 수리학적 이론에 기반한 제방율류 유량을 산정하고 이를 이용하여 제내지 침수해석을 실시하였다. 제방붕괴는 제체 재료나 제체 형상에 따라서 그 양상이 달라지게 되는데, 제체 재료의 다짐도나 입도분포, 마찰각, 점착력 및 비탈면의 경사 등이 세부 인자로서 작용하게 된다. 본 연구에서는 지반공학적인 설계요소에 대한 제방의 붕괴예민도를 수치해석모형을 이용하여 파악하고 이들 기준에 대한 설계인자를 설정하는 데 도움이 되고자 한다. 이를 위해 제방설계 인자들을 기하학적 인자로서 상류 사면경사, 정부폭, 하류사면 경사, 제방고, 사면의 식생여부 등으로 구분하였으며 토질역학적 인자로 제방재료의 평균직경, 공극률, 재료의 단위중량, 입도분포, 내부마찰각, 제방재료의 마찰계수, 코어의 존재 여부 등을 이용하여 예민도 분석을 수행하였다. 이 결과를 이용하여 제방설계를 위한 기준자료로 제공하고자 하였다. 각 인자별 예민도의 변화 양상은 평균입경이 유출량의 변화에 가장 크게 영향을 미치고 있었으며 상·하류 사면경사, 균일성계수, 공극률, 마찰각, 점착력 계수 등으로 나타났다.

핵심용어 : 제방붕괴, 침수 해석, 제방설계인자, 예민도 분석

1. 서 론

현재 가속화 중인 지구 온난화, 강화된 엘니뇨, 라니냐 현상과 같은 기후변화의 영향으로 사상 유례가 없는 홍수가 발생하고 있고 수많은 인명과 재산피해가 나타나고 있다. 그와 동시에 지구 반대편에서는 극심한 가뭄이 발생하는 등 세계 각지에서 기상학적 이상현상이 나타나고 있다. 이러한 이상기후는 일시적인 현상이 아니라 향후 점점 더 극단적인 기상현상으로 발전될 것으로 예측되고 있다. 우리나라도 예외는 아니어서 강우량의 계절적인 집중현상으로 인해 상습적인 홍수

피해가 발생하고 있으며, 피해규모 또한 과거와 비교할 수 없을 만큼 커지고 있다. 이러한 피해 양상 중 하천제방 붕괴로 인한 인명 및 재산피해가 많은 부분을 차지하고 있다. 하천 홍수피해의 주된 원인이 되는 제방붕괴는 율류, 침식, 제체의 이상 및 하천구조물에 의한 붕괴 등으로 구분되는데 주로 율류 및 침식으로 인해 발생한다. 하천제방이 붕괴되었을 때 발생하는 제방의 붕괴면을 통과하여 제내지로 유출되는 파제유량의 정확한 추정과 제방 붕괴에 관한 물리적 이론에 기반한 공학적 해석은 제방붕괴의 예방 및 지연, 홍수범람 구역에 대한 침수범위 산정, 적절한 홍수 예·경보 및 피난

*정회원 · 세명대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail: jhpark@semyung.ac.kr)

**정회원 · 상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과 부교수(교신저자)

***국립환경과학원 수질총량관리센터 전문위원

대책의 수립을 가능케 하여 홍수피해를 저감하는데 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 하지만 국내에서의 제방 붕괴로 인한 피해유량의 정확한 추정에는 이론의 난해함 및 자료의 부족으로 인해 주로 과거 하천제방 붕괴로 인한 범람 상황 및 제방 붕괴 시나리오를 통한 경험적 추정 등에 의존해 오고 있으며 토질역학적 인자를 고려한 제방붕괴해석 및 설계기준의 제시는 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

물리적인 이론에 기초한 제방붕괴 및 유출에 관한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다. Cristofano(1965)는 세굴수로를 통하여 흐르는 물의 힘과 세굴수로의 바닥에서의 흙 입자들의 전단강도를 연계하는 방정식을 유도하였다. Harris와 Wagner(1967)는 Schoklitsch 유사이동 방정식을 사용하여 세굴수로를 월류가 발생함과 동시에 아래쪽으로 진행이 시작된다고 고려하였다. Ponce와 Tsivoglou(1981)는 Meyer-Peter와 Muller 유사이송방정식을 1차원 부정류 방정식과 유사보존식을 연계시켜 연구하였으나 사용되어지는 계수들의 결정방법이 명확하지 못하였다. Fread(1980)에 의해 개발된 수치모형은 붕괴된 흙담으로부터 유출되는 유량수문곡선을 예측하기 위해 저수지 유입, 여수로 유출 그리고 침식으로 형성된 붕괴부의 유출량에 대한 연속방정식을 적용하였다.

국내에서는 이종태와 한건연(1989)은 가상 수치실험을 통한 월류 및 제방의 붕괴에 의한 하도-제내지 간의 흐름의 특성을 해석하여 붕괴부의 폭이 유출량에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났었다. 한건연 등(2006)은 제방월류 또는 붕괴에 의해 발생한 홍수파로 인한 제내지 침수위, 침수시간, 침수범위 등의 예측을 위해 하도구간에서는 1차원 부정류를 이용하여 하천 홍수위를 예측하고 제내지에서는 제방붕괴로 인한 범람홍수위의 시간별 수문곡선을 유입수문곡선으로 하는 2차원 수치해석모형을 개발하였고, 윤광석과 김규호(2006)는 수공학적 측면에서 하천제방의 안정성에 대해 조사하였는데, 국내에 발생한 제방붕괴 사례를 검토하여 제방붕괴 원인 및 유형을 분류하였으며, 비정상침투해석을 위한 홍수파형을 제시하였으나 하천 제방붕괴 해석을 위한 물리적 기반의 세굴식 도입은 이루어지지 못하였다.

제방붕괴 메커니즘은 수리학적인 요소뿐만 아니라 지반공학적인 요소 또한 큰 영향을 받는다. 제체 재료나 제체 형상에 따라서 그 붕괴양상이 달라지게 되는데, 제체 재료의 다짐도나 입도분포, 마찰각, 점착력 및 비탈면의 경사 등이 세부 인자로서 작용하게 된다. 그러나 이러한 지반공학적 요소들은 하천 설계기준내에 제방설계 기준으로 설정되어 있지 못하여 하천 제방의 안정 확보측면에서 하천제방의 붕괴시 제내지의 위험도는 높을 수밖에 없다.

본 연구에서는 하천 홍수시 제방붕괴로 인한 제내지 유입 유량이 해석 가능한 모형을 개발하여 수리학적 이론에 기반한 제방월류 유량을 산정하고 이를 이용하여 제내지 침수해석을 실시하였다. 개발된 모형을 이용하여 제방붕괴 예방 및 지연을 위해 침식 및 세굴이론 등 물리적 이론에 근거하여 제방 붕괴 메커니즘을 인자별로 분석하여 제방붕괴 예방 및 설계인자 기준을 제시하고자 하였다.

또한 지반공학적 설계요소에 대한 제방의 붕괴예민도를 개

발된 모형을 이용하여 파악하고 이들 기준에 대한 설계인자를 설정하는 데 도움이 되고자 한다. 이를 위해 제방설계 인자들을 기하학적 인자로서 상류 사면경사, 정부폭, 하류사면경사, 제방고, 사면의 식생여부 등으로 구분하였으며 토질역학적 인자로 제방재료의 평균직경(D_{50}), 공극률, 재료의 단위중량, 입도분포(D_{90}/D_{30}), 내부마찰각, 제방재료의 마찰계수, 코어의 존재 여부 등을 이용하여 예민도 분석을 수행하고, 이 결과를 이용하여 제방설계를 위한 기준자료로 제공하고자 하였다.

2. 제방붕괴 해석모형

2.1 기본 개념

하천의 유량에 따라 침식, 세굴 및 하천의 흐름 등을 제한하기 위해 설치되는 제방은 하천내의 흐름과 제방에 구성상태에 상호작용하게 된다. 하천을 통해 흐르는 유량은 침식 및 세굴 또는 수위에 따라 월류를 발생시키기도 한다. 제체에서는 이러한 세굴, 침식을 방지하고 월류를 예방하기 위해 적절한 높이와 형태를 구성하게 된다. 그러나 제체의 붕괴 및 높은 하천수위로 인해 제방월류가 발생하게 되면 월류된 물은 제내지를 침수시키고 침수위와 하천 수위의 관계에 따라 월류량이 결정되므로 하천제방의 해석을 위해 하천수위의 해석, 제방의 토질역학적 이해 및 제내지의 침수위 산정 등이 필요하게 된다.

본 연구에서는 제방붕괴에 영향을 미치는 하천수위의 영향과 제방붕괴 단면을 따라 발생한 피해유량으로 기인된 제방재료의 세굴 및 침식영향을 고려할 뿐 아니라 월류량에 따른 제내지 침수해석이 가능한 제방붕괴 해석 방법을 Fig. 1과 같이 도입하였다. 그림과 같이 하천수위 해석 모형과 제방붕괴 모의모형 및 제내지 침수해석 모형이 서로 결합되어 하천 해석모형은 하천수위를 해석하며, 제방붕괴모형은 제방붕괴 단면을 통한 월류유량을 위어의 월류 공식을 이용하여 산정하고, 이 붕괴면 월류량은 제내지 침수모형으로 넘겨지게 된다. 제내지 침수모형은 넘겨진 월류량을 이용하여 제내지 침수심을 계산하고, 제내지 침수위를 월류유량의 해석을 위한 하류단 영향으로 고려할 수 있도록 되돌려 주었고, 침수심을 고려한 월류량이 다시 보정되어 하천수위 결정을 위한 측방향 유출량으로 고려되어 하천수위를 산정하였다. 이와 같이

Fig. 1. Conceptualized diagram of this model

세 모형이 서로 연결되어 하천, 제방, 제내지의 해석이 순환적으로 모의기간 동안 이루어져 수위자료와 파제유량자료를 상호 교환하면서 제내지 수위 및 파제유량을 계산하도록 하였다.

이와 같은 모형의 구성으로 인해 하천 붕괴시 제방붕괴 양상을 기존의 모형에서는 순간붕괴 혹은 시간에 따른 선형적 붕괴폭 확대와 같은 시나리오에 따라 붕괴폭에 결정되었으나 본 연구모형에서는 제방의 물리적 및 기하학적 인자에 의해 계산되어 토질역학적 메카니즘에 의해 붕괴폭이 결정되어지는 모형으로 개발될 수 있었다.

2.2 하천흐름 해석모형

하천의 홍수시 제방붕괴 유출해석을 위한 하천수위 해석을 위해 1차원 부정류 방정식인 Saint-Venant 방정식을 도입하였다. 도입된 질량보존의 식과 운동량보존의 식은 각각 다음과 같다(Fread, 1985).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A+A_o)}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e\right) + L + W_f B = 0 \quad (2)$$

여기서, Q 는 유량, A 는 흐름단면적, A_o 는 저류단면적, q 는 측방유입량, x 는 거리, t 는 시간, h 는 수위, S_f 는 마찰경사, S_e 는 단면 확대·축소에 의한 손실경사, B 는 하폭, W_f 는 바람에 의한 응력, L 은 지류에 의한 운동량의 변화를 각각 나타낸다.

비선형 쌍곡선형 편미분방정식인 Saint-Venant 방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가장 4점 음해 유한차분 근사해법을 도입하면 식 (1), (2)는 시간대 $(j+1)$ 에서 (i) 및 $(i+1)$ 점에 대한 미지수 h , Q 의 비선형 방정식이 된다. 시간대 (j) 와 관련된 모든 항들은 초기조건에 의하거나 바로 이전 시간단계로부터 구해진 기지의 값이 되며 시간대 $(j+1)$ 에서는 (i) 및 $(i+1)$ 점에서 h , Q 가 4개의 미지수로 존재하여 두 개의 식만으로는 직접적으로 그 해를 구할 수 없

는 두 개의 비선형 대수방정식이 된다.

이렇게 구해진 대수방정식을 상류 및 하류경계간의 $(N-1)\Delta x$ 개의 구간 각각에 대하여 적용하고 상류단 경계조건과 하류단 경계조건식을 도입하면 $2N$ 개의 미지수를 가진 $2N$ 개의 비선형식이 만들어 질 수 있으며 Newton-Raphson 방법에 의하여 그 해가 구해지게 된다.

2.3 제방붕괴 해석모형

제방붕괴 해석모형은 토사로 이루어진 하천 제방이나 댐의 붕괴 과정을 모의할 수 있도록 구성하였다. 만약 월류 붕괴가 모의된다면 하류사면에서 침식이 발생하기 위해 저수지나 하천 수위(H)가 제방 정상부를 초과해야 한다. 침식의 첫 번째 단계는 Fig. 2에서 선 A-A의 해에 나타나 있는 것처럼 오직 제방의 하류사면에서 발생한다. 여기서 만약 초기에 식생 피복이 존재하지 않는다면 작은 사각형태의 초기수로가 하류면을 따라 존재하는 것으로 가정한다. 시간이 지남에 따라 세굴수로로는 점차 제방의 하류사면 속으로 파고 든다. 세굴수로로 흐르는 유량은 식 (3)과 같은 넓은 마루위에 공식에 의해 결정되었다.

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

여기서 Q_b 는 세굴수로로 통하여 흐르는 유량, B_o 는 초기 사각형 수로의 순간 폭, 그리고 H_c 는 붕괴면 저면의 높이이다. 제방의 하류사면 내부로 세굴수로가 세굴됨에 따라 세굴수로 상류단 저면높이(H_c)는 제방의 정부(H_U)에 초기에는 남아 있게 된다. 세굴수로의 상류지점은 제방의 정부를 가로질러 제방의 상류사면으로 점차 침식이 계속되면서 이동하게 된다. 침식 수로의 저면이 Fig. 2에서의 선 B-B의 위치를 가지면 세굴수로 저면(H_c)은 아래쪽 연직방향으로 침식하기 시작한다. 세굴수로 저면은 댐의 저면높이 H_L 에 도달할 때까지 계속될 수 있다(Fread, 1988).

세굴수로(breach channel)의 폭을 결정하는 방법은 제방 붕괴해석을 위한 핵심적인 요소이다. 본 모형에서는 세굴수로의 폭은 두 가지 메카니즘에 의해 결정하였다. 먼저 초기의 붕

Fig. 2. Side view of levee showing overtopping failure sequence

Fig. 4. Levee configuration applied on this model

Table 1. Levee specification applied on this model

b	m	h_1	h_2	h_3	h_4
5	2	52.19	52.53	5.08	4.74

고 있다. 이 유역은 태풍 루사시 집중호우로 인해 하천이 범람하고 급격한 유속에 견디지 못한 수충부의 취약한 제방은 삽시간에 파제되어 주변 농경지 및 가옥을 덮쳤다. 이로 인하여 가옥의 침수는 물론 전도되는 피해와 미처 신속하게 대피하지 못한 주민들은 귀중한 생명을 잃게 되었다. 일시에 쏟아진 폭우로 강물이 급속히 불어나고 기존 제방의 취약한 지구로부터 서서히 붕괴되면서 제내지의 농경지와 가옥의 침수가 6~8시간 지속되었다.

계산구간은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 상류단 감천국가하천 시점부터 하류단 선산수위표의 35.63 km 구간으로 전체 단면의 개수는 80개이다. 이 구간의 주요 지류는 직지사천이며 감천 합류부 상단 4.3 km 지점이다. 또한 강곡천·대방천 유역, 아천 유역, 율곡천 유역, 대천 유역의 유량을 측방유입

Fig. 7. Later inflow at Gamcheon

량으로 계산하였다(건설교통부, 1997).

감천과 직지사천의 상류단 유입유량과 하류단 경계조건은 선산수위표의 실측 수위를 사용하였으며 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 7은 측방유입량을 나타내고 있다(김천시, 2003).

Fig. 5. River network configuration for Gamcheon levee failure analysis

Fig. 6. (a) Upstream boundary condition, (b) Downstream boundary condition

Fig. 8. (a) Breach Width Variation with Time, (b) Breach Flowrate through Failure Section

Fig. 9. (a) Flow Hydrograph at Just Up & Down Stream section of Breach site, (b) Stage Hydrograph at Just Up & Down Stream section of Breach site

제방붕괴 모형을 이용하여 감천의 제방에 적용한 결과 붕괴면을 통해 유출되는 유량과 시간에 따른 제방붕괴 폭의 변화를 Fig. 8(a)에서 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 붕괴가 일단 발생하면 붕괴폭은 일정하게 유지하면서 하류사면의 세굴이 이루어지다가 세굴수위가 상류사면에 도달하면 급격히 붕괴폭이 확대되어 단시간내에 최대 붕괴 폭에 이르는 것으로 나타났다. 그러나 붕괴폭의 변화는 선형적으로 증가하는 것이 아니라 Fig. 8(a)에서 나타난 바와 같이 포물 선형으로 증가하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 9(a), 9(b)는 붕괴단면을 통해 유출되는 유량 및 붕괴단면 직하류에서의 유량과 수위를 나타내었다. 직상류와 직하류에서의 유량차이는 붕괴면을 통해 제내지로 유출된 유량이며, 붕괴면의 수위 변화 양상이 직상류와 직하류에서의 수위 변화 양상과 비슷함을 확인할 수 있었다.

4. 제방붕괴 인자별 영향분석

본 모형을 이용하여 제방 붕괴유량에 대한 제방의 설계인

자별 예민도를 분석하였다. 월류량에 대한 예민도 분석은 제방의 구조적 형상에 따른 분석을 위해 기하학적 인자로서 제방고, 상·하류 사면경사 등을 고려하였고 제방 재료의 물리, 화학적 인자는 공극률, 입도분포, 입자의 평균크기, 마찰각 그리고 재료의 점성이다.

제방붕괴 모형을 이용하여 입력자료에 대한 붕괴부를 통한 유출량의 변화양상을 파악하기 위해 입력변수의 영향분석을 실시하였다. 입력변수들은 각각 댐 재료의 마찰각 및 점착력, 재료의 중간크기, 체체재료의 균일성, 공극률 등이었다. 모의된 제방의 규모를 고려하여 대규모, 중·소규모 제방으로 구분하여 고려하였으며, 본 모형에 적용된 제방들의 특성은 Table 2와 같다.

4.1 제체 상·하류사면 경사의 영향

제체 상류사면과 하류사면 경사에 따른 유출량의 변화가 Fig. 10(a), 10(b)에 나타나 있다. 상류사면 경사의 경우에는 대규모 제방과 중·소규모 제방 모두 상류사면 경사가 완만할수록 유출량이 감소하는 것으로 나타났다. 적용된 두 댐

Table 2. Levee Characteristics for analyzing failure sensitivity according to levee design parameter

Levee	Height (m)	W_{cr} (m)	Z_U	Z_D	D_{50} (mm)	Uniformity (D_{90}/D_{30})	Friction (deg)	Cohesion (KPa)
Large	79.8	10.6	2.0	2.5	0.03	40	40	0.35
Mid-Small	11.6	4.6	2.0	2.4	0.4	50	20	0.3

Fig. 10. (a) Flow variation on upstream face of levee, (b) Flow variation on downstream face of levee

모두 하류사면 경사가 상류사면 경사와 마찬가지로 완만할수록 유출량이 감소하는 것으로 나타났다.

4.2 마찰각에 대한 영향

제체재료의 마찰각에 따른 붕괴유출량의 변화를 계산하였다. Fig. 11에서 보여지는 바와 같이 대규모 제방과 중·소규모 제방의 경우 마찰각이 클수록 최대붕괴유출량이 감소하였다. 그 이유는 마찰각이 클수록 저항력이 증가하여 붕괴가 천천히 일어나고 붕괴 유출량이 감소하는 것으로 판단된다. 마찰각으로 인한 붕괴부 최대유출량은 붕괴폭, 최대 붕괴폭에 이르는 시간, 댐의 높이와 폭 등이 복합적으로 고려되어야 할 것으로 판단되며 좀 더 많은 자료를 이용한 모의를 통하여 이에 대한 정확한 영향을 파악하는 것이 필요할 것이다.

4.3 제체재료 점착력에 대한 영향

제체재료에 대한 점착력의 영향을 파악하고자 하였고 점착력 계수를 0.02~1.25(KPa)까지 변화시켜 붕괴부를 통한 최대 유출량을 비교하였다. 점착력에 대한 영향은 마찰력과 마찬가지로 대규모 제방과 중·소규모 제방에서 비교되었고 결과는 Fig. 12와 같이 점착력이 클수록 최대붕괴유출량은 감소하는 형태로 서로 비슷한 양상을 나타내었다. 제체는 토사로 이루어져 있고 일반적으로 알고 있는 토사의 성질과 같이 점착력이 클수록 붕괴에 대한 저항력이 커 붕괴가 천천히 발달하며 이에 따라 붕괴폭도 감소하여 최대유출량도 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 11. Flow variation by friction angle

4.4 제체재료 중간입자크기의 영향

제체재료의 평균입경의 크기에 대한 붕괴부 최대유출량의 변화는 Fig. 13과 같다. 그림에서 나타나듯이 중간입자의 크기가 클수록 대규모 제방, 중·소규모 제방 모두에서 유출량은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 댐의 크기에 따라 최대 유출량이 크게 증가하는 범위는 다르게 나타났고 어느 정도 크기가 되면 유출량의 증가는 나타나지 않는 것으로 보여졌다.

4.5 공극률의 영향

제체재료의 공극률에 따른 최대유출량의 변화가 Fig. 14에 나타나 있다. 공극률 0.0~0.5 사이의 값에 대하여 제방의

Fig. 12. Flow variation by cohesion strength

Fig. 13. Flow variation by mean diameter

Fig. 14. Flow variation by porosity

최대 유출량은 대규모 제방에서 60,577~78,340 m³/s, 중·소 규모 제방에서 248~382 m³/s 유출량을 나타내어 두 제방 모두 공극률이 클수록 최대유출량이 증가하고 있었다. 이는 공극률이 크면 다짐도가 낮아지고 다짐도가 낮을수록 붕괴부가 초기에 발달하여 유출이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

4.6 제체재료의 균일성에 대한 영향

제체재료의 균일성에 대한 영향을 고려하였다. 균일성에 대한 고려는 균일성 계수 D_{90}/D_{30} 의 크기로 하였고 계산된 계수의 범위는 2-300이다.

Fig. 15에서 보여지는 바와 같이 적용된 두 댐 모두 균일

Fig. 15. Flow variation caused by uniformity of levee material

Fig. 16. Flow variation caused by material properties on large levee

Table 3. The results of Flow variation by material properties on large levee

Parameter	Small	Used	Large	Δ
Friction Angle- ϕ (Deg)	20	20	45	-35%
Cohesion-C(KPa)	0.2	0.2	57.4	-30%
Size- D_{50} (mm)	0.01	0.1	10	35%
Uniformity Coef.- U_c	2	40	300	
Porosity-p	0	0.35	0.5	25%
DownstreamSlope- z_D	1	2	3	-35%
UpstreamSlope- z_U	1	2.5	4	

성 계수가 클수록 유출량이 크게 나타났으며 이는 입도분포가 좋을수록 최대유출량이 증가한다는 것을 의미한다. 본 실험에서는 공극률은 일정하고 단지 균일성 계수가 증가하는 것으로 고려하였기 때문에 균일성계수가 커질수록 즉 D_{90} 의 크기가 커질수록 그에 따라 생기는 공극 하나의 크기는 커져 본 실험의 결과가 발생하는 것으로 판단된다.

4.7 대규모 제방에 대한 영향검토

제체 재료의 변수 사용값에 따른 유출량의 변화량을 분석하였다. 마찰각과 점착력에 대한 대규모 제방의 적용 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 대규모 제방의 경우 마찰각의 영향은 최대 유출량의 경우 마찰각의 변화에 따라 최대 35% 정도 유출량의 변화가 발생할 수 있는 것으로 나타났으며, 점착력의 경우에는 약 30% 정도 유출량의 변화가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 제체사면의 상류경사, 하류경사, 제체재료의 균일성계수, 공극률, 제체재료 입자의 크기에 대한 대규모 제방의 유출량 영향을 도시하였다. 사면경사의 경우 상류사면과 하류사면 모두 경사가 완만할수록 유출량이 감소하는 것으로 나타났으며 사면 경사에 따라 최대 35% 정도 유출량이 감소할 수 있는 것으로 해석 되었다. 공극률, 제체입자의 크기, 재료의 균일성에 대한 영향은 각각의 변수가 커질수록 최대 유출량이 증가하였으며, 공극률의 경우 약 25%, 균일성계수의 경우 약 35%, 중간입자의 크기의 경우에는 35% 정도 유출량의 변화가 발생할 수 있는 것으로 나타났다(Table 3).

4.8 소규모 제방 적용 결과

제체 재료의 변수 사용값에 따른 유출량의 변화량을 분석

Fig. 17. Flow variation caused by material properties on small levee

Table 4. The results of Flow variation by material properties on small levee

Parameter	Small	Used	Large	Δ
Friction Angle- ϕ (Deg)	20	20	45	-18%
Cohesion-C (KPa)	0.2	0.2	57.4	-33%
Size- D_{50} (mm)	0.01	0.4	10	80%
Uniformity Coef.- U_c	2	50	300	50%
Porosity- p	0	0.3	0.5	45%
Downstream Slope- z_D	1	2.4	3	-45%
Upstream Slope- z_U	1	2	4	

하였다. 마찰각과 점착력에 대한 중·소규모 제방의 적용 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 중·소규모 제방의 경우 최대 유출량은 마찰각의 변화에 따라 최대 20% 정도 유출량의 변화가 발생할 수 있는 것으로 나타났으며, 점착력의 경우에는 약 35% 정도 유출량의 변화가 발생할 수 있는 것으로 해석되었다. 사면경사의 경우 상류사면과 하류사면 모두 경사가 완만할수록 유출량이 감소하는 것으로 나타났으며 사면 경사에 따라 최대 40% 정도 유출량이 감소할 수 있는 것으로 해석되었다. 공극률, 제체입자의 크기, 재료의 균일성에 대한 영향은 각각의 변수가 커질수록 최대 유출량이 증가하였으며, 공극률의 경우 약 45%, 균일성계수의 경우 약 50%, 중간크기의 입자 경우에는 80% 정도 유출량의 변화가 발생할 수 있는 것으로 나타났다(Table 4).

5. 결 론

본 연구에서는 하천 홍수로 인한 제방붕괴 모의모형을 개발하고 개발된 모형을 이용하여 제방의 기하학적 특성 및 물리적 성질에 따른 붕괴 특성을 해석하였다. 개발된 모형은 하천 홍수시 하천수위, 제방붕괴고 및 폭 그리고 제내지 침수위를 고려하여 제방붕괴를 모의하고 있었으며 제방의 성질에 따른 붕괴 유량 유출특성은 다음과 같다.

- 1) 하천 홍수로 인한 제방붕괴모의를 위해 하천흐름해석-제방붕괴-제내지 침수해석 모형이 연계되어 일관성있게 모의할 수 있는 수치모형을 개발하였다. 개발된 모형을 감천유역의 태풍루사 경우에 적용한 결과 합리적으로 홍수 및 제내지 월류유량을 모의할 수 있어 본 모형의 제방

붕괴 모의능력을 입증할 수 있었다.

- 2) 제방 붕괴해석을 위해 적용된 입력변수들은 제방 재료의 점착력, 마찰각, 입자의 평균크기, 공극률, 균일성 및 상·하류 제방 사면경사 등이었다. 적용결과 점착력, 마찰각 및 상·하류 사면 경사의 경우 인자값이 증가할수록 유출량의 크기는 감소하였으며 평균입경, 공극률, 균일성 계수는 클 경우에 유출량이 증가하였다.
- 3) 제방의 규모별 유출량 변화양상은 인자별 제방의 크기에 관계없이 유사한 양상을 나타내고 있어 제방의 크기는 유출량의 변화에는 큰 영향을 미치고 있지는 않았다.
- 4) 각 인자별 예민도의 변화 양상은 평균입경이 유출량의 변화에 가장 크게 영향을 미치고 있었으며 상·하류 사면경사, 균일성계수, 공극률, 마찰각, 점착력 계수 등으로 나타났다.
- 5) 본 연구결과 개발된 모형은 하천제방 붕괴 해석을 위한 물리적 기반모형으로 좀 더 많은 실제 적용을 통해 적용성이 검증된다면 제방붕괴로 인한 홍수위험도 작성, 제내지 침수해석 등의 홍수 예·경보 분야에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 첨단도시개발사업(11첨단도시C07)에 의한 기후변화 대응형 도시 빗물관리시스템 연구과제의 일부로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김천시 (2003) 2002 수해백서(태풍 루사, 매미).
 건설교통부 부산지방국토관리청 (1997) 김천 하천정비기본계획(보완).
 윤광석, 김규호 (2006) 하천제방 안정성(수공학적 측면), 물과 미래, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 14-19.
 이종태, 한건연 (1989) 하천제방의 붕괴로 인한 제내지의 침수 예측모형, 한국수문학회 논문집, 제22권, 제2호, pp. 223-231.
 한건연, 박재홍 (2006) 도시침수해석 모형의 개발, 도시홍수재해관리기술연구단.
 한건연, 이종태, 이원환 (1985) Earth Dam 파괴로 인한 유출수 문곡선의 유도, 대한토목학회 논문집, 제5권, 제2호, pp. 41-50.

- Cristofano, E.A. (1965) Method of computing erosion rate for failure of earthfill dams. *United States Bureau of Reclamation*, Denver, Colorado.
- Fread, D.L. (1980) Capabilities of NWS model to forecast floods caused by dam failures. *Proceedings of the Second Conference on Flash Floods.*, American Meteorological Society, pp. 171-178.
- Fread, D.L. (1982) DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model., *Hydrologic Research Laboratory*, National weather Service, Silver Spring, Maryland, pp. 56.
- Fread, D.L. (1985) "Channel Routing", in Anderson, M.G., and Burt, T.P.(eds), *Hydrological Forecasting*, John Wiley & Sons, New York, pp. 437-503.
- Fread, D.L. (1988) Breach: An Erosion Model For Earthen Dam Failure. *Hydrologic Research Laboratory*, National weather Service, Silver Spring, Maryland.
- Harris, G.W. and D.A. Wagner. (1967) Outflow from breached earth dams. University of Utah, Salt Lake City, Utah.
- Hromadka, T.V. and Yen, Chung-cheng. (1987) A Diffusion Hydrodynamic Model, *Water Resources Investigations Report 87-4137*, U.S. Geological Survey.
- Morris, H.M., and J.M. Wiggert. (1972). *Applied Hydraulics in Engineering*. The Ronald Press Co., New York, pp. 69-70, 290, 451-452.
- Ponce, V.M. and Tsivoglou, A.J. (1981) "Modeling of gradual dam-breaches", *Journal of Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, 107(HY6), pp. 829-838.
- Smart, G.M. (1984) "Sediment transport formula for Steep Channels", *Journal of Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, 110(HY3), pp. 267-276.
- Spangler, M.G. (1984) *Soil Engineering*. 4th Ed. Harper & Row Publishers, New York, pp. 482-484.

◎ 논문접수일 : 11년 10월 13일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 10월 18일
 ◎ 심사완료일 : 11년 12월 07일