

FFC-9 모형을 이용한 하천제방 붕괴해석

The Analysis of Levee Break using FFC-9

박재홍*, 천명호**,한건연***

Jae Hong Park, Myung Ho Chun, Keun Yeun Han

요 지

하천 제방붕괴 해석을 위한 FFC-9 모형을 개발하였다. 본 모형은 하천제방의 붕괴해석을 위해 하천의 흐름해석 및 제방붕괴 알고리즘이 결합된 물리적 이론에 기반한 프로그램이다. 개발된 프로그램을 이용하여 낙동강 실제제방의 붕괴해석에 적용하였다. 적용된 제방은 경북 고령의 낙동강 본류 우안에 위치하고 있는 실제제방이 2000년 9월 15일 07:40분경에 붕괴를 시작하였다. 붕괴폭은 110 m로 최초에는 60 m, 수위 강하시 50 m로 붕괴는 지속되었다. 붕괴지점의 제방고는 22.80 m이며 계획 홍수위는 20.26 m, 사고당시 하천의 수위는 17.10 m, 제내지 수위는 9.80 m로서 제내지와 제외지의 수위차는 7.3 m였다. 제방 붕괴로 인한 여러 피해중 농경지 침수는 150 ha에 이르렀다. 연구모형을 2000년 9월 12일 00시~18일 23시 기간동안 낙동강 유역의 홍수로 인한 제방 붕괴상황에 대해 적용하였다. 계산구간은 현풍~적포교의 33.55 km 구간으로서 전체 단면의 개수는 67개이며 평균적인 계산거리간격은 $\Delta x = 0.5 \text{ km}$ 이고 계산시간간격은 0.5 hr이며 제방 붕괴시의 계산시간간격은 0.25 hr 으로 설정하였다. 이 구간에서의 주요 지류로서는 회천과 황강이 고려되었다. 상류단 경계조건으로서는 현풍 수위표지점의 유량 수문곡선을 사용하였고, 하류단 경계조건으로서는 적포교 수위표지점의 수위 수문곡선을 사용하였다. 본 모형에 적용된 조도계수는 이전의 홍수조건으로부터 검증된 0.020~0.033의 범위를 이용하였다.

핵심용어 : 제방붕괴해석, 세굴과정, 홍수지도, 붕괴유량

1. 서론

본 연구에서는 국내의 홍수특성 및 이로 인해 발생하는 제방붕괴로 인해 발생하는 피해를 저감하기 위해 이를 효과적으로 모의할 수 있는 물리적 이론에 기초한 제방붕괴 모의 컴퓨터 모형을 개발코자 하였다. 즉 하도구간에서는 홍수시 흐름의 시간변동성을 고려하기 위해 하천 홍수해석을 위해 가장 널리 이용되고 있는 4점 음해 유한차분기법을 이용하여 하천 홍수위를 예측하며, 제방붕괴해석을 위해서 제방침식을 고려한 토사이동방정식을 도입하여 물리적 제방붕괴 모형을 개발하여 시간에 따른 제방월류 유량, 그에 따른 제방붕괴폭, 제방월류 유량을 산정하고 월류유량으로 인한 본류에서의 흐름양상 변화 등을 고려할 수 있게 하였다. 하천 흐름해석과 제방붕괴 해석모형을 완전히 통합시킨 하천제방붕괴 해석모형을 통해서 하천에서의 홍수위 예측은 물론

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

** 세명대학교 토목공학과 석사과정

*** 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수

제내지에서의 범람 홍수량을 정확히 예측할 수 있도록 하여 하천 제방붕괴시 제내지 침수범위 및 침수위 해석, 홍수파의 도달시간, 제방붕괴로 인한 본류의 흐름양상의 변화 등을 보다 정교하게 예측하고자 하였다.

2. 모형의 개발

2.1 하천흐름 해석모형

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

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

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

비선형 쌍곡선형 편미분방정식인 Saint-Venant 방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가중 4점 음해 유한차분 근사해법을 도입하면 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 구성되어 해가 구해지게 된다.

2.2 제방붕괴 해석모형

초기에 식생 피복이 존재하지 않는다면 작은 사각형태의 초기수로가 하류면을 따라 존재하는 것으로 가정한다. 시간이 지남에 따라 세굴수로는 점차 제방의 하류사면 속으로 파고 든다. 세굴수로로 흐르는 유량은 Eq. (3)과 같은 넓은 마루 웨어 공식에 의해 결정되었다.

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

파이핑으로 인한 붕괴면이 모의된다면 저수지에서의 수위는 붕괴관(breach pipe)의 크기가 침식을 통해 증가하기 위해 초기 사각형 붕괴관 가운데 높이(H_p)보다 커야 한다. 붕괴관의 저면이 연직방향으로 아래쪽으로 침식될 동안 붕괴관의 정부도 같은 이유로 위쪽방향으로 침식된다. 붕괴관내의 유량은 오리피스 유량에 의해 계산될 수 있으며 Eq. (4)와 같다.

$$Q_b = A\left(\frac{2g(H - H_p)}{1 + fL/D}\right)^{0.5} \quad (4)$$

여기서 Q_b 는 붕괴관을 통한 유량(m^3/sec), g 는 중력가속상수, A 는 붕괴관의 단면적(m^2), $(H-H_p)$ 는 붕괴관위의 정수압 수두(m), L 은 붕괴관의 길이(m), D 는 붕괴관의 직경 혹은 폭(m) 이고 f 는 다음의 Moody곡선의 수학적 표현식(Morris와 Wiggert, 1972)으로부터 계산된 마찰계수이다.

2.2.1 세굴수로의 폭

본 모형에서는 세굴수로의 폭은 두가지 메카니즘에 의해 결정하였다. 먼저 초기의 붕괴면은 사각형 형상을 가진다. 세굴수로의 폭(B_o)는 Eq. (5)에 의해 결정되어진다.

$$B_o = B_r y \quad (5)$$

여기서, B_r 은 수리학적 최량단면에 기초한 인자이고 y 는 붕괴면의 흐름깊이이다.

붕괴면의 폭을 제어하는 두 번째 역학적 과정은 사다리꼴 단면의 측면경사의 안정성해석으로부터 유도되어졌다(Spangler, 1982). 초기 사각형태의 수로는 세굴수로 수로의 측벽들의 활동이 시작되면서 수직면에 대한 경사각(α)을 형성하고 사다리꼴 수로로 변화한다. 측벽들의 붕괴는 붕괴단면의 깊이(H'_c)가 댐 재료의 내부마찰각(ϕ), 점착력(C), 제방재료의 단위중량(γ)의 함수인 한 계수심(H'_k)에 도달할 때 일어난다.

$$H'_k = \frac{4C \cos \phi \sin \theta'_{k-1}}{\gamma [1 - \cos(\theta'_{k-1} - \phi)]} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (6)$$

여기서, θ 는 수평면과 붕괴수로와 이루는 각, $\theta'_k = (\theta'_{k-1} + \phi)/2$, 첨자 k 는 계속해서 연쇄되는 붕괴를 나타낸다.

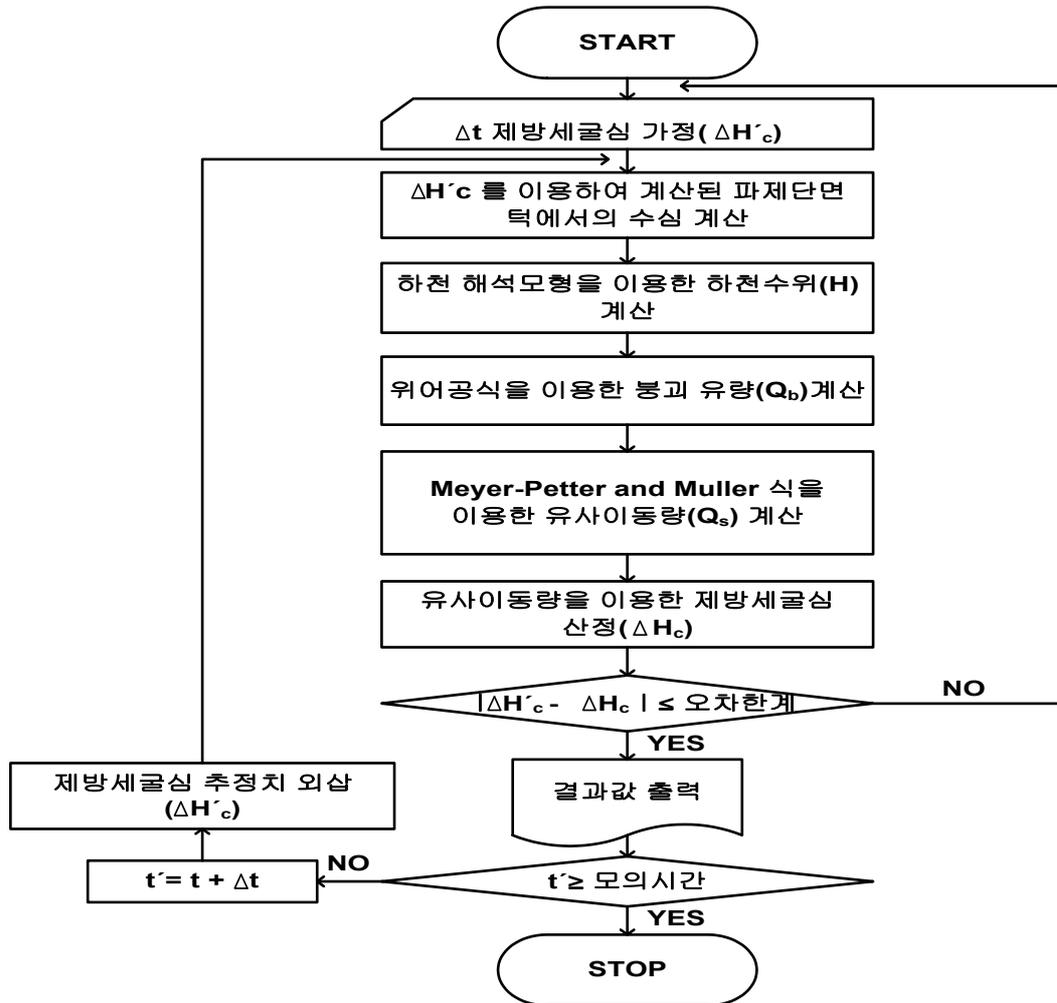
2.2.2 유사이동 해석

파제면의 유사이동량을 산정하기 위해 Meyer-Peter와 Muller 유사이동식을 급경사 하천을 대해 개선한 Eq. (7)을 이용하였다(Smart, 1984).

$$Q_s = 3.64 (D_{90}/D_{30})^{0.2} P \frac{D^{2/3}}{n} S^{1.1} (DS - \Omega) \quad (7)$$

여기서, Q_s 는 유사이동율(cms), D_{30} , D_{50} , D_{90} (mm)은 각각 총 무게 30, 50, 90%의 크기에 해당하는 입자의 크기, D 는 유량의 수리수심(m), S 는 댐의 하류경사면의 경사, Ω 는 토사의 점착력에 따라 결정되는 전단응력값이다.

2.2.3 계산 알고리즘



3. 개발 모형의 적용

본 연구모형을 이용하여 실제 제방붕괴 사례에 적용한 결과는 그림. 2~7과 같다.

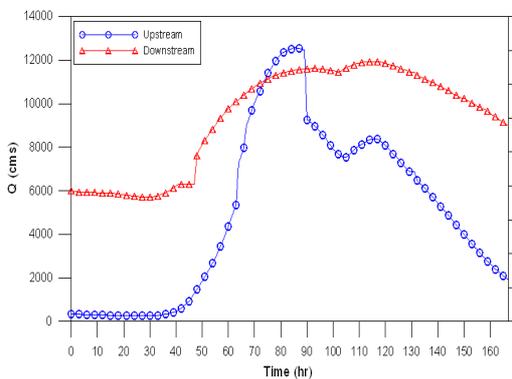


Fig 2 Upstream and Downstream Condition applied to this Model.

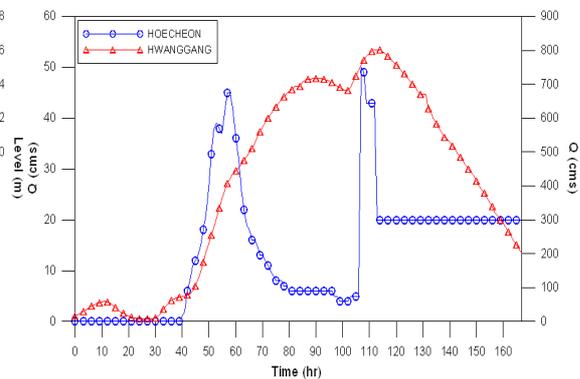


Fig 3 Lateral Inflow Hydrograph in Hoecheon and Hwanggang

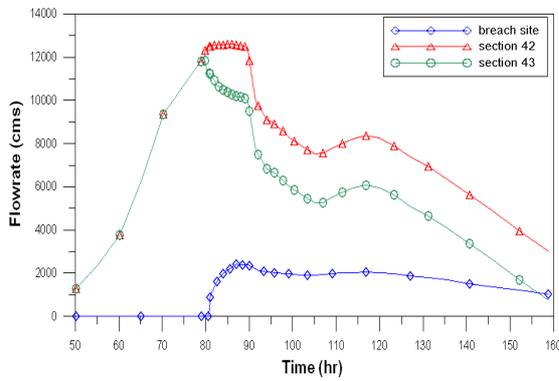


Fig 4 Flow hydrograph at Breach Site and nearby Section

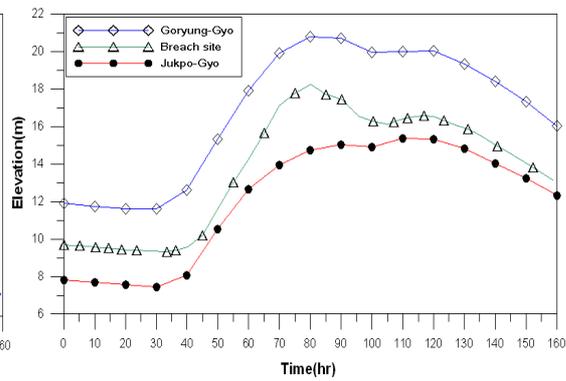


Fig 5 Stage Hydrograph at Breach Site, Goryung-Gyo and Jukpo-Gyo

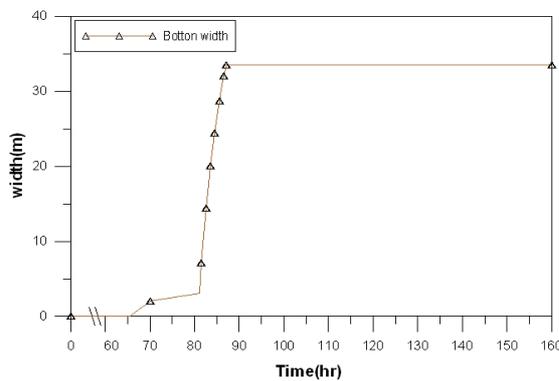


Fig 6 Variation of Bottom Width at Breach Section

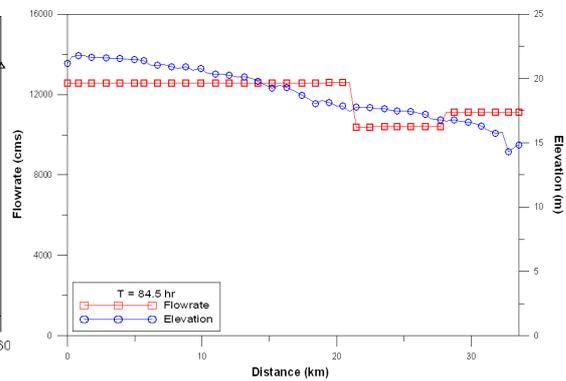


Fig 7 Flowrate and Stage Values at Timestep 84.5 hr.

4. 결론

본 연구에서는 하천에서의 제방붕괴해석을 위해 하천의 동역학적 흐름특성을 고려한 수학적 모형과 제방의 세굴을 계산할 수 있는 모형을 결합하였다. 개발된 모형은 NWS의 BREACH 모형을 기초로 국내의 하천 붕괴에 적용가능한 모형으로 발전시켰다. 개발된 모형을 이용하여 가상 하도 및 실제 제방붕괴사례에 본 모형을 적용하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2008년도 건설기술혁신사업에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고 문헌

1. 도시홍수재해관리기술연구단 (2002). 국내 도시홍수 침수원인 조사 및 분석.
2. 이종태, 한건연 (1989). "하천제방의 붕괴로 인한 제내지의 침수 예측모형.", 한국수문 학회 논문집, 제22권 제2호, pp. 223-231
3. Spangler, M.G. 1984. Soil Engineering. 4th Ed. Harper & Row Publishers, New York,