

하부투수층을 고려한 제방침투 수치모델링

Numerical model for infiltration in riverbank and its foundation

이남주*, 김지현**, 류권규***
Nam-Joo Lee, Ji Hyun Kim, Kwonkyu Yu

요 지

이 연구에서는 SEEP2D 모형을 사용하여 하부에 투수지반을 갖는 제방 내부의 침투흐름에 대한 수치모의를 수행하였다. 제방의 재료는 4대강사업 낙동강 제2하구둑 건설 현장에서 채취한 시료를 사용하였으며, 입도분석과 들밀도시험을 통해 구한 제방의 건조단위중량과 다짐도 및 제방의 투수계수는 각각 1.372 g/cm^3 , 93%, 1.35 m/day 이다. 투수지반층과 1:3 비탈경사를 가지는 제방모형을 제작하여 연직 이차원 정상류 침투해석 모형을 해석하는 SEEP2D 프로그램을 사용하여 나온 결과 값을 수리모형 실험 결과 값과 비교하였다. 모의조건은 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m, 0.60 m의 4가지 수위(각각 Case1~4)조건에 대하여 수리모형실험과 동일한 조건을 수치모형에 적용하였다. 수치모형의 결과는 실험결과와 비교적 일치하였지만 제방의 비탈사면이 시작하는 부분에서는 수치모형의 결과 값보다 실험결과 값이 작은 것으로 확인되었다. 각각의 조건별로 수치해와 실험결과값을 비교해본 결과 대체적으로 비슷한 양상을 보였지만 제방의 비탈사면이 시작하는 지점부터 수치모형의 결과 값보다 실험결과 값이 작은 것으로 확인되었다. Case3의 경우 4.35 m 지점부터 6.00 m 지점까지 유출이 발생하였으며 수치모형의 결과값과 실험결과 값의 차이가 가장 작게 나타났다. 사면유출 길이는 Case4에서 가장 길게 나타났으며 최대 4.10 cm로 발생하였다.

핵심용어 : SEEP2D, 제방 침투, 투수층 지반, 수치모델링

1. 서 론

제방이란 유수의 원활한 소통을 유지시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 흙으로 축조한 공작물을 말한다. 최근 하천 제방이 정비됨에 따라 강우와 하천수의 복합요인에 의한 침투과피가 중요한 문제로 대두되고 있으나 이에 대한 검토 및 국내외에서 제방 침투 설계 및 안전성 검토가 제대로 시행되지 않고 있다. 이 연구에서는 낙동강 하류의 4대강 사업 낙동강 제2하구둑 건설 현장에서 채취한 시료로 개정된 표준단면 1:3 경사와 기초 지반을 고려하여 실험실에 제방축소모형을 제작하였다. 수위별 정상 상태의 침투수위를 측정하였으며 이 결과는 안전도 평가 지표 선정을 위한 자료를 위해 제공하고 실험결과를 이용하여 SEEP2D 모형으로 수치모의를 수행하였다.

2. 침투 해석 방법

* 정희원 · 경성대학교 토목공학과 교수 · E-mail: njlee@ksu.ac.kr

** 정희원 · 경성대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail: 0168438813@hanmail.net

*** 정희원 · 동의대학교 토목공학과 교수 · E-mail: pururumi@deu.ac.kr

제방 침투는 일반적으로 제내지 쪽의 제방 사면 하단부에서 침투에 의해 물이 유출되는 현상으로 제체 내부의 침윤선이 제내지 사면에 도달하면 침투에 의한 누수가 나타나기 시작한다. 침투에 의한 누수 현상은 제체 구조에 심각한 손상을 입히기도 하며 경우에 따라서 제체 붕괴까지 진행하기도 한다. 홍수시 수위 상승으로 인한 제체 내부의 침투 양상은 제체의 기하학적 형태, 제체와 기초의 토질공학적 특성과 수리학적 특성, 그리고 하천 수위 조건 등에 지배된다. 제방의 침투 해석은 현장조사 및 측정, 수리모형실험, 해석해, 수치모델링을 이용하는 방법으로 구분할 수 있다.

침투류에 대한 수치해석 연구 Taylor and Brown(1967), Neuman and Witherspoon(1970)의 유한요소법 적용, Desai(1973)의 유한차분법을 이용한 자유면 비정상 침투해석 등에서 시작되었다. 침투해석을 실무에 적용할 수 있는 컴퓨터 프로그램으로써 미공병단수로국(WES)에서 개발한 SEEP2D(Tracy, 1973)가 있는데, 유한요소법을 적용하는 정상침투해석 프로그램이다(김상규, 김영목, 1991).

2.1 해석해 방법

이론적인 관점에서 침투 해석은 Darcy(1856)의 법칙과 Dupuit(1863)의 가정에서 출발하였고 Forchheimer(1886)의 2차원 침투 해석에 의해 본격적으로 시작되었다. Chapuis(1990)는 현장측정을 실시하여 구조물 내부의 침투흐름률을 해석할 수 있는 해석해를 개발하였으며, 이와 같은 해석해는 기존의 다양한 연구문헌 및 검증을 토대로 개발되었지만, 이와 같은 해석해를 이용하는 침투 해석방법은 비포화 조건을 고려하지 못하는 등 다양한 제약조건이 내포되어 있다(임동균 등, 2006). 제방은 인공적으로 축조하는 구조물이어서 형상이 단순하고, 토질 특성이 균질에 가깝지만, 홍수시의 침투 해석은 비정상 상태의 해석이 가능하여야 하기 때문에 이상적인 경우를 제외하고는 해석해를 구하기 어렵다.

2.2 수치해석 방법

지하수 흐름에 대한 지배방정식은 일반적으로 Darcy 법칙 (1)과 연속방정식 (2)로 구성된다.

$$K \nabla h \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (K \nabla h) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 V 는 Darcy 유속, K 는 투수계수, h 는 침윤 수위, Q 는 경계 내부의 유량, t 는 시간, θ 는 체적단위의 함수량(volumetric water content)이다. 식 (2)를 연직평면(x, z)에 대한 식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + K_z \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

식 (3)은 Fourier 방정식의 형태이며, 정상조건일 경우 Poisson 방정식의 형태가 된다. 지하수 흐름에 대한 지배방정식을 계산하는 수치모형은 수치해석 기법과 입출력 자료 등에 따라 다양한 상용 및 공개 프로그램이 개발되어 있다.

2.3 현장실험 및 모형실험

제방 침투에 대한 현장 실험은 홍수기로만 국한되며, 안전성의 문제 등으로 인해 국내외의 조사 사례는 찾아보기 어려운 상황이다. 그렇지만 실물제방을 실험장으로 옮겨서 실험하는 사례는 국외에서 찾아볼 수 있다. 中島秀雄(2003)은 실제 제방에서의 침투 현상을 규명하기 위해 실물제방을 이용하여 침투실험을 수행하였다. 이 연구를 통해 강우, 제방의 피복재료, 그리고 포화도 등

이 침투에 미치는 영향을 분석하였고, 다양한 제방 차수대책을 제시한 바 있다. 그러나 국내에서는 실물제방에서의 침투실험을 시행한 사례는 거의 없으며, 실험실에서의 수리모형실험을 통해 침투 거동을 분석한 사례는 다수 보고되어 있다.

2.4 현장재료 토질특성

해석대상은 하부투수층과 상부의 제방을 대상으로 하였으며, 제방 저면의 길이는 2.50 m, 제방 상부의 길이는 0.40 m, 제체의 높이는 0.35 m이며 하부 투수층의 길이는 6.00 m, 높이는 0.30 m 를 가지는 제방축소모형 실험결과를 사용하였다. 입도분석과 들밀도시험의 결과로 제방의 건조단위중량과 다짐도는 각각 1.372 g/cm^3 , 93%로 측정되었다. 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m, 0.60 m의 4가지 수위(각각 Case1~4) 조건에 대하여 수리모형실험과 실험조건을 동일하게 하였으며, 수리모형 실험에서 사용한 제체재료의 투수계수는 정수위 투수시험을 통해 측정된 값으로 1.35 m/day 을 사용하였다.

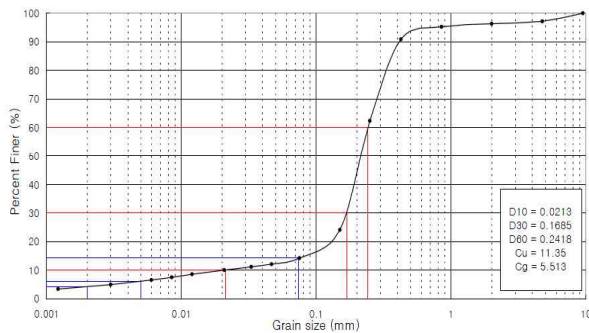


그림 1. 입도분포곡선

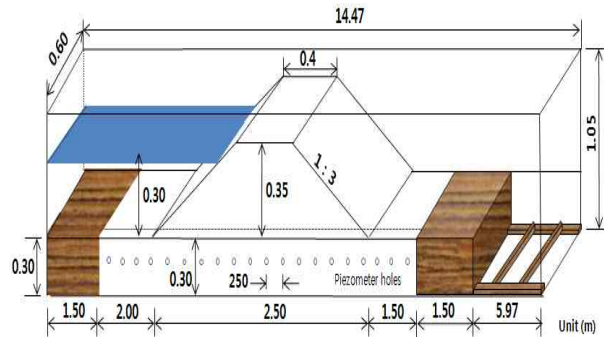


그림 2 제방 모형의 형상

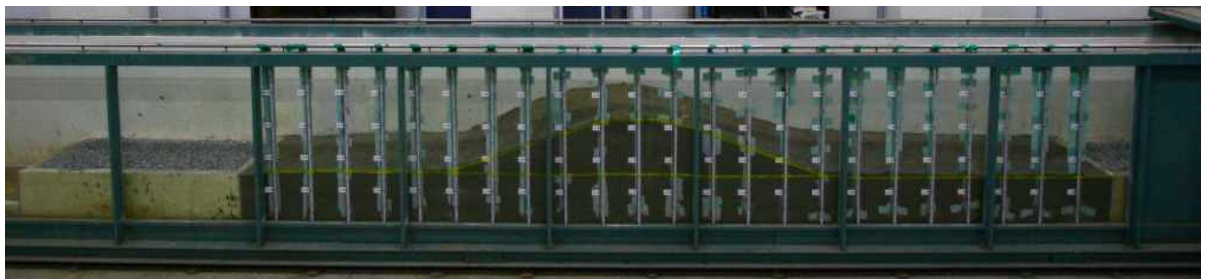


그림 3. 기초 지반을 고려한 제방 모형

3. 수치모형의 적용

SEEP2D 모형은 연직 이차원 정상류 침투해석 모형으로 사력댐이나 제방의 단면을 통한 침투를 계산하도록 설계된 FEM기법으로 2차원 유한요소 흐름모형이다. 피압, 부분피압, 비피압 흐름 상태를 모의할 수 있으며, 부분피압이나 비피압 흐름 상태에서 포화 및 불포화 흐름 모의가 가능하다. 그리고 적용대상의 형상이 복잡하거나 토양이 비균질·비등방성인 경우에도 모의가 가능하다. 정상상태 해석시 입력이 용이하고 계산속도가 빠르지만 비정상 조건 해석이 용이하지 않은 한계를 가지고 있다. SEEP2D는 유한요소망의 각각의 절점에서 유속특성을 계산하며, 이 값들을 이용하여 유선 및 등포텐셜선을 도시함으로써 침투망을 결정할 수 있다.

수치모형에 사용한 평면 이차원 유한요소망은 삼각형 요소를 사용하였다. 계산에 사용한 삼각형 유한요소의 개수는 2,228개이며, 격자점의 수는 1,242개이다. 그림 4는 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m,

0.60 m의 4가지 수위에 해당하는 Case1~4의 정상상태 수치모델링과 수리모형실험결과인데 실선은 수리모형의 결과, 표식은 수치모형의 결과를 나타낸 것이다.

수치모형의 결과는 실험결과와 대체적으로 비슷한 양상을 보이지만 제방의 비탈사면이 시작하는 2.50 m지점부터 3.80 m지점까지는 수치모형의 결과 값보다 실험결과 값이 작은 것으로 확인되었다. Case1의 경우 2.50 m의 위치에서 수치모형의 값과 실험값의 차이가 최대로 발생하였고 2.50 m지점에서 3.00 m지점까지 수치모형의 결과가 더 높게 나왔지만 평균적으로는 수치모형의 값이 과소산정 되었다고 판단된다. 수리모형 실험에서는 정확하게 확인할 수 없었던 사면유출의 위치를 수치모형의 결과 값을 보고 4.35 m 위치부터 4.65 m까지 사면유출이 발생하였으며 4.453 m 위치에서는 침윤선의 경사가 급격하게 변화함을 알 수 있었다. Case2 역시 수치모형의 값과 실험결과 값의 최대로 발생하는 지점은 Case1의 경우와 동일하였으며 전체적인 양상도 비슷한 결과로 확인되었다. 사면유출의 시작지점 또한 Case1과 같았지만 사면유출이 발생하는 거리는 0.20 m 증가하여 4.75 m까지 유출이 발생하였다. Case3은 수치모형의 결과 값과 실험결과 값이 가장 일치하는 경우로써 비탈경사가 시작되는 부분을 제외하고는 모두 수치해가 실험결과 값보다 과대산정 되었다. 또 사면유출이 가장 많은 경우로서 4.35 m거리에서 제내지 끝인 6.00 m까지 사면유출이 발생하였다. Case4의 경우 2.50 m지점에서 3.30 m지점 사이에서 수치모형의 값과 실험값의 차이가 최대 4.10 cm로 발생하였고 다른 Case보다 차이 값이 가장 크게 발생하였다. 사면유출은 4.35 m 위치부터 4.80 m지점까지 발생하였다.

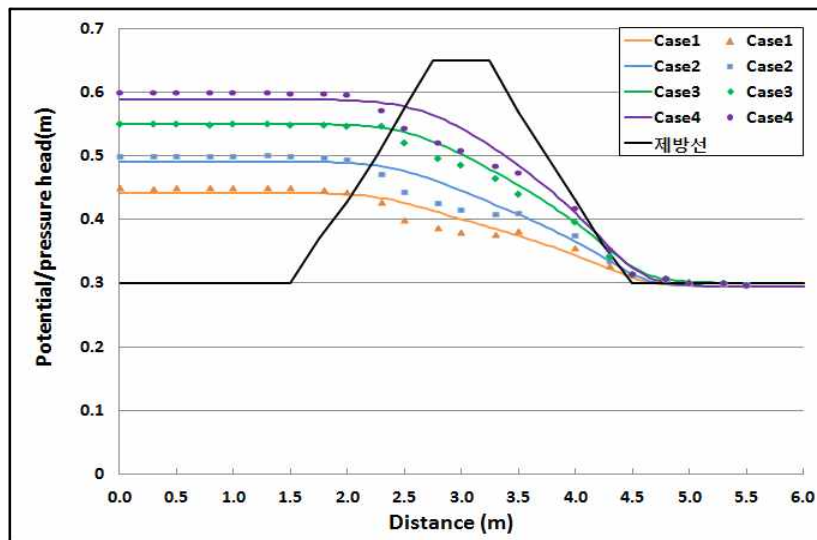


그림 5. 수위별 침윤선 수치모의 결과

4. 결론

투수지반층과 1:3 비탈경사를 가지는 제방모형을 제작하여 연직 이차원 정상류 침투해석 모형을 해석하는 SEEP2D 프로그램을 사용하여 나온 결과 값을 수리모형 실험 결과 값과 비교하였다. 입도분석과 들릴모시험을 통해 제방의 건조단위중량과 다짐도 및 제방의 투수계수는 각각 1.372 g/cm^3 , 93%, 1.35 m/day임을 확인하였으며 0.45 m, 0.50 m, 0.55 m, 0.60 m의 4가지 수위(각각 Case1~4)조건에 대하여 수리모형실험과 동일한 조건을 수치모형에 적용하였다. 수치모형에 사용한 평면 이차원 유한요소망은 삼각형 요소를 사용하였다.

수치모형의 결과는 실험결과와 비교적 일치하였지만 제방의 비탈사면이 시작하는 부분에서는 수

치모형의 결과 값보다 실험결과 값이 작은 것으로 확인되었다. 각각의 Case별로 수치해와 실험 결과값을 비교해본 결과 대체적으로 비슷한 양상을 보였지만 제방의 비탈사면이 시작하는 지점부터 수치모형의 결과 값보다 실험결과 값이 작은 것으로 확인되었다. Case3의 경우 4.35 m지점부터 6.00 m지점까지 유출이 발생하였으며 수치모형의 결과값과 실험결과 값의 차이가 가장 작게 나타났다. 사면유출 길이는 Case4에서 가장 길게 나타났으며 최대 4.10 cm로 발생하였다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 건설교통부(2004). 하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서, 한국건설교통기술평가원
2. 김상규, 김영목(1991). 강우로 인한 사면 불안정, 대한토질공학회 논문집, 제17권 제1호, pp. 53-64.
3. 이남주, 김혜림(2011). GMS-SEEP2D 모형을 사용한 정상상태 하천 제방 침투 해석, 2011년 한국수자원학회 학술발표회
4. 이남주, 류권규, 이상호(2011). 홍수시 제방의 침투 해석에 대한 연구, 2011년 한국수자원학회 학술발표회
5. 임동균, 여홍구, 김규호, 강준구(2006). “제방 침투 수치해석 모형의 적합성 분석.” 한국수자원학회 논문집, 제39권, 제3호, pp. 241-252.
6. 신방웅, 강종범(1999). “모형실험에 의한 토공구조물의 침투거동 특성.” 한국산업안전학회지 논문집, 한국산업안전학회, 14(4), pp. 158-167.
7. 한국수자원(2009). 하천설계기준 해설
8. Chapuis. R.(1990). Sand-bentonite liners: field control method. Canadian Geotechnical Journal, Volume 27, Number 2, pp. 216-223.
9. Darcy, H.(1856). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
10. Dupuit, J.(1863). Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables, Dunod, Paris.
11. Forchheimer, P. (1886) “Uber die ergiebigkeit von brunnen anlagen und sickerschlitzen.” Zeitschrift des Architektenund Ingenieurs Vereins zu Hannover, Volume 32, pp. 539-564.
12. Neuman, S.P. & Witherspoon, P.A.(1970). Finiter element method of nalyzing steady seepage with a free surface. Water Resources Research, Vol. 6, pp. 889-897.
13. Taylor, R.L., & Brown, C.B.(1976). “Darcy flow with a free surface.” Hydraulic Division, ASCE, Vol. 93, pp. 25-33.
14. 中島秀雄 (2003). 圖說 河川堤防, 技報堂