

홍수시 제방의 침투 해석에 대한 연구

Analysis of Levee Infiltration in Flood-time

이남주*, 류권규**, 이상호***

Nam Joo Lee, Kwonkyu Yu, Sang Ho Lee

요 지

이 연구는 제방의 침투 수리모형 실험의 자료를 이용해 안전도 평가 지표 선정을 위한 자료 제공하고 향후 수행할 침투 수치모의에 필요한 보정 및 검증 자료를 확보할 목적으로 수행하였다. 제방 축조 현장에서 구한 제체재료를 사용하여 실험실에 제방축소모형을 14.5 m × 0.6 m × 1.6 m의 수조 내부에 제작하였다. 제방 사면의 경사는 1:2, 제방 저면의 길이는 4.60 m, 제방 상부의 길이는 2.40 m, 제체의 높이는 0.55 m로 제작하였다. 모형제방은 제방축조 방법과 유사하게 다짐을 하기위해 흙을 쌓으면서 0.20 m 높이 마다 다짐을 실시하였다. 다짐방법은 고무망치를 이용한 층다짐을 하였다. 들밀도실험에 의한 제방모형의 건조단위중량과 다짐도는 각각 1.71g/cm³, 93%로 측정되었다. 홍수위 증가에 따른 비정상 상태의 침투수위 측정을 수행하였다. 수리모형실험은 약 8일 동안 수행하였다. 침윤선의 수두와 위압계별 수두는 상류쪽(제외지 사면)부터 증가하기 시작하며 하류쪽(제내지 사면)로 확장됨을 알 수 있으며, 실험 초기에는 상류쪽의 수두가 급격히 상승하지만, 점차 상승속도가 둔화되는 등의 일반적인 경향이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 실험시작 18시간 경과 후부터 제외지 사면 하단부에서 유출이 발생하였으며, 21시간 경과 후부터는 상류부의 수두가 안정되는 현상이 나타났다. 측정된 침투수위의 변화 양상은 향후 수치모형을 이용한 침투해석의 검보정 자료로 활용할 계획이다.

핵심용어 : 제방 침투, 포화-불포화 흐름, 침투 파괴

1. 서론

제방이란 홍수 시 유수의 원활한 소통을 유지시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 토질재료 등으로 축조한 공작물을 말한다. 홍수로 인하여 하천의 수위가 장기간 높아진 상태가 오래 유지되면 제체 내부에 침투가 발생하고 그로 인하여 제방 붕괴가 발생할 수 있다. 특히, 하천정비시 현지의 하천 및 홍수터에서 제방 축조용 재료를 확보하여 건설하고 있으며, 이런 제방 재료는 투수성이 높은 경우가 대부분이고, 기초역시 투수층인 경우가 상당히 많다. 과거의 하천제방은 월류에 의한 붕괴가 대부분이었으나, 최근에는 하천제방이 정비됨에 따라 강우와 하천수의 복합요인에 의한 침투파괴가 중요한 문제로 대두되고 있지만, 국내에서 제방 침투 설계 및 평가기술 붕괴가 검토는 다른 수공학 분야에 비해 중요하게 검토되지 않고 있다(임동균 등, 2006).

이 연구는 홍수시 수위 상승으로 인한 제체 내부의 침투 양상에 대한 분석을 위한 연구의 일환으로 제방의 침투 수리모형 실험의 자료를 이용해 안전도 평가 지표 선정을 위한 자료 제공하고 향후 수행할 침투 수치모의에 필요한 보정 및 검증 자료를 확보할 목적으로 수행하였다. 제방 축조 현장에서 구한 제체재료를 사

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

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

*** 정희원 · 부경대학교 토목공학과 교수 · E-mail: peterlee@pknu.ac.kr

용하여 실험실에 제방축소모형을 제작하고 홍수위 증가에 따른 비정상 상태의 침투수위 측정을 수행하였다. 측정된 침투수위의 변화 양상은 향후 수치모형을 이용한 침투해석의 검보정 자료로 활용할 계획이다.

2. 침투 해석 방법

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 토질역학적 특성과 수리학적 특성, 그리고 하천 수위 조건 등에 지배된다. 제방의 침투해석은 현장조사 및 측정, 수리모형실험, 해석해, 수치모텔링을 이용하는 방법으로 구분할 수 있다.

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 침투흐름을 해석할 수 있는 해석해를 개발하였으며, 이와 같은 해석해는 기존의 다양한 연구문헌 및 검증을 토대로 개발되었지만, 이와 같은 해석해를 이용하는 침투해석방법은 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.

수치해석 방법

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

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

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

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 다음 식 (3)과 같다.

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

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.

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 수행하였으며, 이 연구를 통해 강우, 제방의 피복재료, 그리고 포화도 등이 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 보고되어 있다(신방웅과 강종범, 1999).

3. 제방 침투 실험

3.1 실험 준비

수리모형실험에 사용할 제방재료는 경상남도 밀양시에 위치한 지방2급 하천인 청도천의 제방 건설 현장에서 채취하였다. 시료 채취 지점이 중상류에 위치하고 있어서 육안으로도 입경이 상당히 크다는 것을 확인할 수 있었다. 시료 중에는 입경이 600 mm 이상인 호박돌 등이 다량 포함되어 있었는데, 수리모형실험에 사용한 재료는 호박돌 등은 제거를 하였으며, 입도분포를 도시하면 그림 1과 같다. 현장재료의 다짐시험 결과를 정리하면 그림 2와 같다.

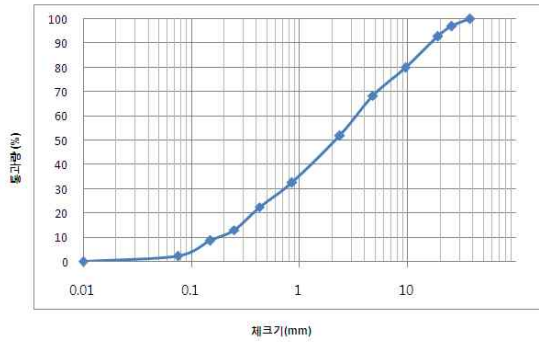


그림 1. 입도분포곡선

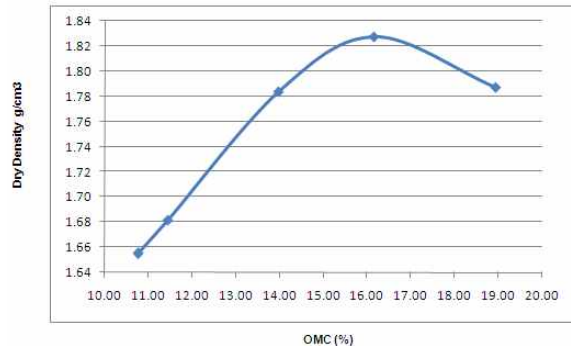


그림 2. 현장재료의 다짐곡선

제방모형은 14.5 m × 0.6 m × 1.6 m 의 수조 내부에 그림 3과 같은 형상으로 제작하였다. 제방 사면의 경사는 1:2, 제방 저면의 길이는 4.60 m, 제방 상부의 길이는 2.40 m, 제체의 높이는 0.55 m로 제작하였다. 모형제방은 제방축조 방법과 유사하게 다짐을 하기위해 흙을 쌓으면서 0.20 m 높이 마다 다짐을 실시하였다. 다짐방법은 고무망치를 이용한 층다짐을 하였다. 들밀도시험에 의한 제방모형의 건조단위중량과 다짐도는 각각 1.71g/cm³, 93%로 측정되었다. 완성된 모형제방은 그림 4와 같다. 침윤선의 수두 측정을 위해 그림 5와 같이 위압계를 0.20 m 간격으로 수조바닥 가운데에 설치하였으며, 옆에 줄자를 이용하여 측정할 수 있게 만들었다. 그리고 흙의 유입이나 토압으로 인한 막힘을 방지하기 위해 세밀한 망을 이용하여 입구를 감싸고, 그림 6과 같이 목재로 보호구를 제작하여 설치하였다.

3.2 수리모형실험 결과

수리모형실험 방법은 수위를 0.05 m까지 천천히 올렸으며(상승시간 1.33 hr), 항상 0.49 ~0.50 m를 유지하도록 하였다. 각 측정선의 수두는 각각의 위압계의 수두를 기록하고 사진을 찍어 보존하였다. 측정시간간격은 처음에는 10분 간격으로 측정을 하였으며, 수위 증가율을 고려하여 점차 측정시간간격을 늘여가며 측정하였다. 수리모형실험은 약 8일 동안 수행하였다.

그림 7은 시간에 따른 침윤선의 수두를 하루 간격으로 나타낸 것이다. 침윤선의 수두는 상류쪽(제외지 사면)부터 증가하기 시작하며 하류쪽(제내지 사면)로 확장됨을 알 수 있으며, 실험 초기에는 상류쪽의 수두가 급격히 상승하지만, 점차 상승속도가 둔화되는 등의 일반적인 경향이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 실험 시작 18시간 경과 후부터 제외지 사면 하단부에서 유출이 발생하였으며, 21시간 경과 후부터는 상류부의 수두가 안정되는 현상이 나타났다.

그림 8은 흡수변 위압계에서 시간에 따른 침윤선의 수두 변화를 도시한 것으로 위치마다 침윤선의 수두가 안정되어 가는 상황을 보여주고 있다. 위압계 번호는 하류단이 24번이며 상류단이 1번이다. 실험시작 1시간 30분정도 후에 제내지와 3번과 5번이 제일 먼저 안정상태에 도달했고, 나머지 피에조미터도 시간별 침윤선 수두와 마찬가지로 실험시작 18시간 경과 후부터 제외지 사면 하단부에서 유출이 발생하였으며, 21시간 경과 후부터는 상류단부터 순차적으로 안정상태에 도달했다.

4. 결론 및 향후연구

이 연구에서는 경상남도 밀양시에 위치한 지방2급 하천인 청도천의 제방 건설 현장에서 채취하여 호박돌 등을 제거한 후 입도분화와 현장 다짐시험 후 제방침투실험을 하였다. 모형제방은 제방축조 방법과 유사하게 다짐을 하기위해 흙을 쌓으면서 0.20 m 높이 마다 다짐을 실시하였다. 다짐방법은 고무 망치를 이용한 층다짐을 하였다. 들밀도실험에 의한 제방모형의 건조단위중량과 다짐도는 각각 1.71g/cm³, 93%로 측정되었다. 수리모형실험 방법은 수위를 0.05 m까지 천천히 올렸으며(상승시간 ???분), 항상 0.49 ~0.50 m를 유지하도록 하였고, 측정시간간격은 처음에는 10분 간격으로 측정을 하였으며, 수위 증가율을 고려하여 점차 측정시간간격을 늘어가며 측정하였다. 수리모형실험은 약 8일 동안 수행하였다. 침윤선의 수두와 위압계별 수두는 상류쪽(제외지 사면)부터 증가하기 시작하며 하류쪽(제내지 사면)로 확장됨을 알 수 있으며, 실험 초기에는 상류쪽의 수두가 급격히 상승하지만, 점차 상승속도가 둔화되는 등의 일반적인 경향이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 실험시작 18시간 경과 후부터 제외지 사면 하단부에서 유출이 발생하였으며, 21시간 경과 후부터는 상류부의 수두는 안정되는 현상을 나타내고 있다. 측정된 침투수위의 변화 양상은 향후 수치모형을 이용한 침투해석의 검보정 자료로 활용할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 임동균, 여홍구, 김규호, 강준구 (2006). "제방 침투 수치해석 모형의 적합성 분석." 한국수자원학회논문집, 제39권, 제3호, pp. 241-252.
2. 신방용, 강종범 (1999). "모형실험에 의한 토공구조물의 침투거동 특성." 한국산업안전학회지 논문집, 한국산업안전학회, 14(4), pp. 158-167.
3. Chapuis. R. (1990). "Sand-bentonite liners: field control method." Canadian Geotechnical Journal, Volume 27, Number 2, pp. 216-223.
4. Darcy, H. (1856) Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
5. Dupuit, J. (1863) Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables, Dunod, Paris.
6. Forchheimer, P. (1886) "Uber die ergiebigkeit von brunnen anlagen und sickerschlitzen." Zeitschrift des Architectenund Ingenieurs Vereins zu Hannover, Volume 32, pp. 539-564.
7. 中島秀雄 (2003). 圖說 河川堤防, 技報堂

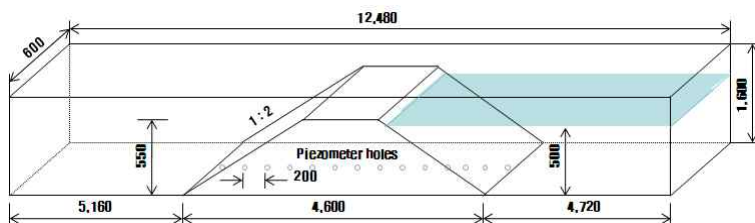


그림 3. 제방의 침투 수리모형의 제원



그림 4. 완성된 제방모형



그림 5. 수조 벽면에 설치된 액주계



그림 6. 액주계 보호구 설치

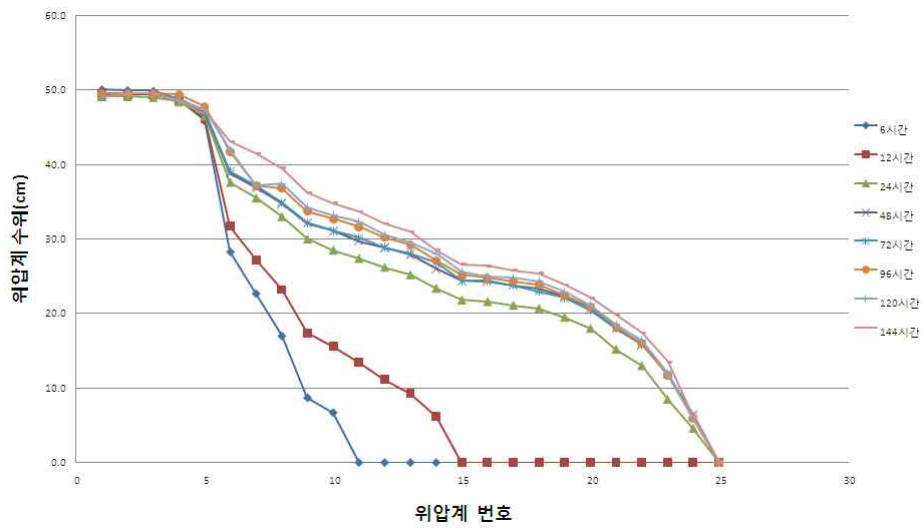


그림 7. 시간별 침윤선 수두

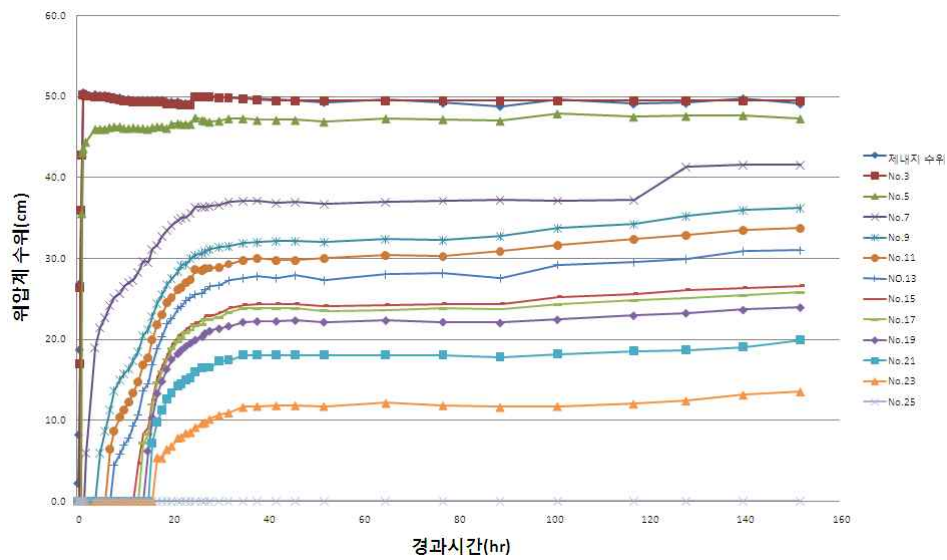


그림 8. 위압계별 수두 변화