

배수공을 이용한 하천제방의 침윤조절에 관한 연구

A Study on Seepage Control of Levee with Pervious Toe Drain

이상호*, 공영산**, 이남주***, 류권규****

Sangho Lee, Young San Kong, Nam Joo Lee, Kwonkyu Yu

요 지

하천제방은 가장 치수효과가 높은 홍수방어시설로서 홍수 시 유수를 원활하게 소통시키고 제내지를 보호하기 위해 하천을 따라 축조한 시설이다. 누수에 의한 제방파괴는 제내지 체체에 드러난 포화표면이 결정적인 요인이 되므로 침윤선을 낮추어 체체하부에 위치하도록 해야 하며 누수가 발생한 제방에 대해서는 적절한 보강기법을 적용해야 한다. 본 연구에서는 하천제방 축조 또는 보강 시 누수에 의한 파괴를 방지하기 위한 방법으로 미국 공병단과 일본 국토기술연구센터에서 사용하는 기법 중 하나인 배수공을 두어 침윤선을 조절하는 방법을 적용하였다. 구체적으로 공병단과 일본 국토기술연구센터에서 제시하는 배수공을 가지는 경우의 제방 실험 및 수치 모형 보정 결과를 비교하였다. 침투 수치 모의는 SEEP/W 프로그램으로 검토하였다. 실험에 적용한 제방의 규격은 제방폭 2.6 m, 둑마루폭 0.4 m, 사면경사 1:2, 제방 높이 0.55 m, 수위 0.5 m이다. 배수공이 없는 제방은 사면에서 누수가 발생하였으며, 배수공 바닥폭이 0.4 m인 공병단과 일본 국토기술연구센터에서 제시하는 배수공을 설치하였을 때는 누수가 발생하지 않았다. 같은 배수공 바닥폭을 가지는 공병단과 일본 국토기술연구센터식 배수공을 설치한 제방의 실험을 비교한 결과, 일본국토기술연구센터식 배수공을 설치한 제방의 침윤선이 공병단식 배수공을 설치한 제방보다 낮았다. 즉, 일본 국토기술연구센터식 사각형 배수공이 다소 안정한 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 제방, 침윤조절, 배수공, SEEP/W

1. 서론

기상여건의 변화와 급격한 도시화로 최근 몇 년간 도시지역의 홍수 피해가 급증하고 있으며 홍수 시 제방붕괴로 사회적, 경제적 피해는 매우 크다. 하천제방은 가장 치수효과가 높은 홍수방어시설로서 2002년 8월 낙동강 유역 장기홍수, 2002년 태풍 루사 및 2003년 태풍 매미 등에 의한 강원도와 낙동강 유역의 영남 지역 피해는 제방의 중요성이 부각되는 계기가 되었다. 우리나라에서는 아직까지 제방의 유지관리 및 안전진단 기술이 미국이나 일본에 비하여 미흡한 실정으로 제방의 안전도 향상을 위한 선진 고도화 기술을 개발하여 실무에 적용할 필요가 있다.

제방의 파괴는 월류, 세굴, 누수, 제방 횡단 구조물의 접합부 공동 등에 의하여 발생하며 본 연구에서는 누수에 의한 제방 파괴의 보강 방법을 다룬다. 침투로 인한 누수파괴의 대표적인 원인인 제내 비탈 끝 포화표면의 발생과 관공 현상에 대한 안전성 확보 방법으로 미국과 일본에서는 다양한 침투 보강 기법이 존재

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

** 부경대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : yym003@nate.com

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

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

한다. 본 연구의 목적은 배수공에 의하여 조절되는 하천제방의 침윤 양상을 실험과 수치 모의로 구현하고 배수공의 유용성을 확인하는 것이다.

2. 배수공에 의한 제방의 누수 방지

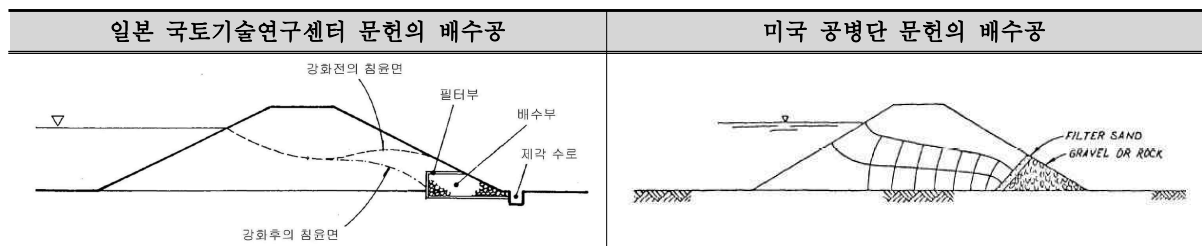
2.1 누수 방지 대책

누수 방지 대책을 분류하면 제방에 적용하는 것과 기초지반에 적용하는 것으로 크게 구분할 수 있다. 제방에 적용하는 대책은 동수경사를 감소시키고 활동에 대한 안전성을 확보하기 위한 단면확대기법, 강우나 하천수가 제방으로 침투하는 것을 방지 및 억제하기 위한 피복기법, 제방 내부의 침투수를 신속하게 배수하는 것을 목적으로 하는 배수공을 설치하는 방법 등이 있다. 기초지반에 적용하는 대책은 주로 기초지반으로 하천수가 침투하는 것을 억제 또는 방지하는 것에 초점을 맞추고 있으며, 제내외지 및 제방에 강널말뚝 등을 적용하는 차수기법, 고수부지 표면에 피복 재료를 적용하는 피복기법 등이 있다. 또한 제방 내부의 침투수를 신속히 배수하는 배수공을 설치하는 방법은 지반조건이나 설치위치에 따라서 기초지반 대책으로 적용되기도 한다(한국건설교통기술평가원, 2006).

2.2 배수공을 이용한 누수 방지 대책

배수공을 이용한 누수 방지 대책은 제방에 침투한 강우 및 하천수의 신속한 배수를 위한 배수공 부분, 집수된 침투수를 제내지로 유도 및 배출하기 위한 배수로부분, 제방의 토립자 유출방지 및 배수공의 막힘 방지를 위한 필터 부분으로 구성된다. 배수공의 형상은 일본의 국토기술연구센터(国土技術研究センター, 2002)에서 제시하는 사각형 모양의 배수공과 미국의 U.S. Army Corps of Engineers(2000)에서 제시하는 삼각형 모양의 배수공으로 나누어 질 수 있다(표 1).

표 1. 배수공의 형상



본 연구에서는 배수공이 없는 보통의 제방과 위의 두 가지 배수공을 설치한 제방에 대하여 제방 침투모형실험과 수치 모의를 수행하였다.

3. 제방 침투모형실험

3.1 제방 모형 제작

제방 모형은 12.5 m × 0.6 m × 1.6 m의 수조 내부에 제작하였다. 위압수두를 측정하기 위해 0.20 m 간격으로 13개의 위압수두계(piezometer)와 줄자를 설치하였다. 제방 모형은 그림 1과 같은 형상으로 제작하였다. 제방 사면의 경사는 1:2, 제체의 높이는 0.55 m로 제작하였으며, 실험 시 상류 수위는 0.50 m를 유

지하도록 관리하였다. 실험은 3가지 경우에 대하여 수행하였으며, Case-1은 배수공이 없는 제방, Case-2는 미국 공병단식 배수공을 가지는 제방, Case-3은 일본 국토기술연구센터식 배수공을 가지는 제방이다. 수리 모형실험의 제원은 표 2와 같다.

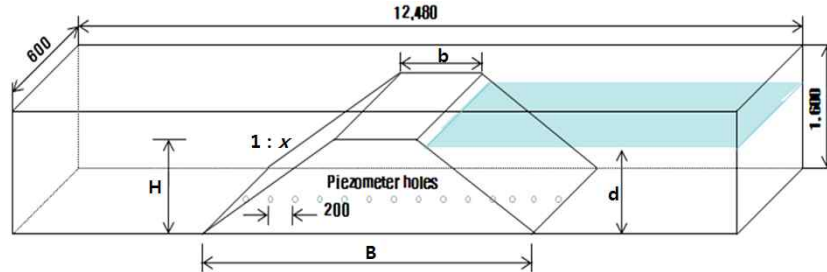


그림 1. 제방모형의 형상

표 2. 제방 침투모형실험 조건

실험 조건	마루폭 (mm)	저면폭 (mm)	제방고 (mm)	수심 (mm)	사면경사 (1 :)	배수공 폭 (mm)	배수공 형상
Case-1	400	2,600	550	500	1 : 2	-	-
Case-2	400	2,600	550	500	1 : 2	400	공병단
Case-3	400	2,600	550	500	1 : 2	400	국토기술센터

배수공 규격의 설계를 위하여 표 3과 같이 불투수층 상에 축조된 제방의 제내 포화표면길이 수식(Das, 2005)을 활용하였다. 계산된 포화표면의 길이는 318 mm이다. 공병단 문헌에서 배수공의 바닥폭을 결정하는 방법은 제시되어 있지 않다. 따라서 318 mm 보다 큰 400 mm를 임의로 선택하여 배수공의 바닥폭으로 하였다. 배수공의 재료는 자갈이고 체체 흡과 배수공 재료의 분리를 위한 필터 재료로는 부직포를 사용하였다. 그림 2는 Case-1의 완성된 제방 모형이고 그림 3~4는 Case 2와 3에서 적용된 공병단과 일본 국토기술연구센터식 배수공을 나타낸다.

표 3. 침투모형실험용 제방의 설계

침투선의 제내지층 포화표면 길이 계산	
	배수공의 경사는 사면 경사와 동일하게 적용 $\alpha = \tan^{-1} 0.5 = 26.565^\circ$
Δ	$\Delta = 500 \times 2 = 1,000 \text{ mm}$
d	$d = 2,600 - 0.7\Delta = 2,600 - 700 = 1,900 \text{ mm}$
	$L = \frac{d}{\cos \alpha} - \frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}$ $= \frac{1,900}{\cos(\tan^{-1} 0.5)} - \sqrt{\frac{1,900^2}{\cos^2(\tan^{-1} 0.5)} - \frac{500^2}{\sin^2(\tan^{-1} 0.5)}}$ $= 318 \text{ mm}$

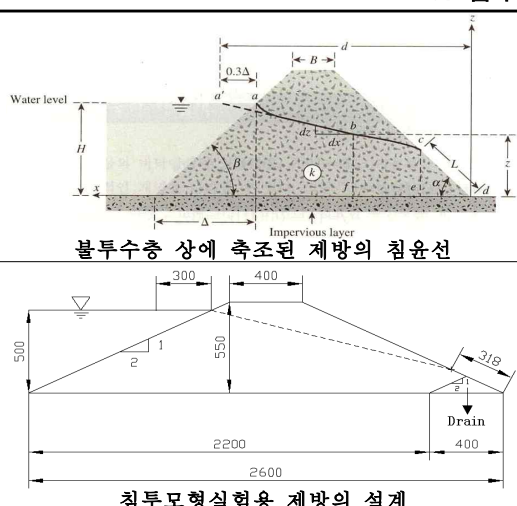




그림 2. 완성된 제방모형의 형상(Case-1)



그림 3. 배수공의 형상(Case-2)

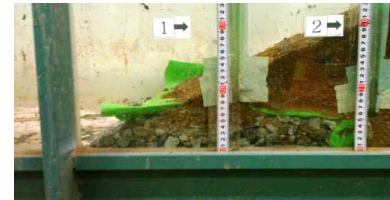


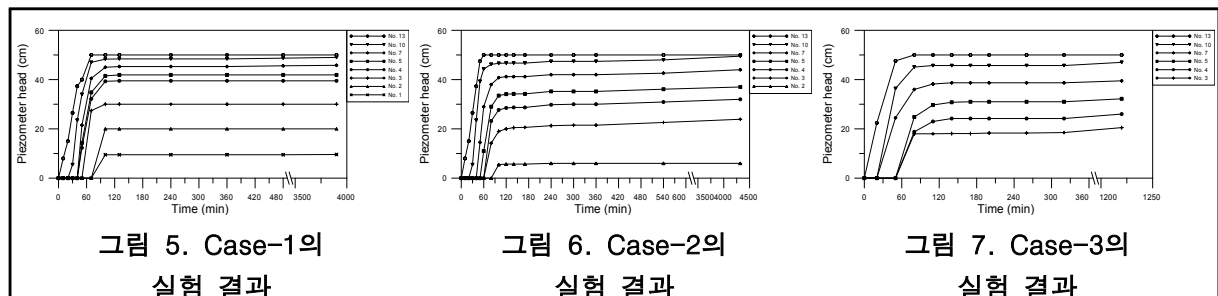
그림 4. 배수공의 형상(Case-3)

3.2 제체에 사용된 흙의 특성 시험

제방 실험모형을 제작하는데 있어 기존 제방의 흙 또는 현재 시공 중인 제방 현장에서 사용하는 흙을 이용하는 것이 보다 현실적이라고 판단된다. 따라서 경상북도 구미시 해평면의 제방 시공 현장 흙을 획득하여 사용하였다. 흙의 물리적 특성을 구하기 위해 시료를 채취하여 입도분석시험과 정수위 투수시험을 실시하였으며, 통일분류법(USCS)에 따르면 SM-SW에 속하고 모래가 74.7 %인 사질토로 투수계수는 $.60 \times 10^{-3}$ cm/sec이다.

3.3 제방 침투모형실험 결과

실험은 각 Case별로 약 65, 70, 21 시간 동안 진행하였다. 그림 5~7은 각 Case별 위압수두계의 수두 변화를 나타내는 것으로 위치마다 수두가 변화되어 가는 상황을 보여주고 있고 제외지부터 순차적으로 안정상태에 도달하였다.

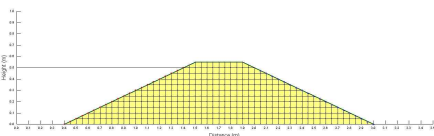
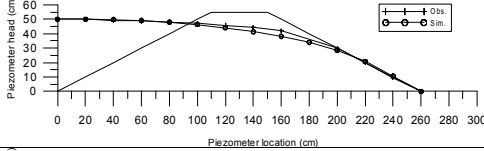
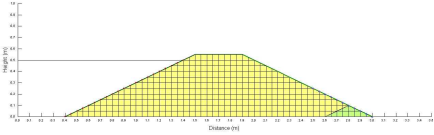
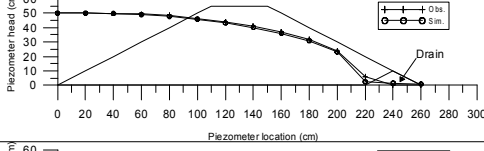
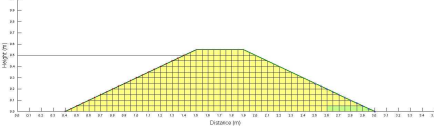
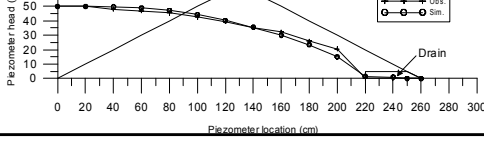


4. 제방 침투에 대한 수치 모의

현재 침투가 가능한 수치 모형들은 적용이론, 수치해석기법, 전개과정, 입력요소, 사용자 편의성을 위한 부가기능, 처리속도 등에 따라 다양하게 개발되어 있다. 본 연구에서는 침투해석 프로그램 중 사용자 편의 환경이 구축되어 있고 국내에서 널리 사용되는 SEEP/W를 사용하여 제방의 침투 양상을 수치 모의 하였습니다.

다. 침투 해석에 실시한 각 Case별 단면은 표 4.1.1과 같다. SEEP/W의 입력자료인 투수계수는 실시한 기초시험의 결과인 $.60 \times 10^{-3}$ cm/sec를 적용하였고 배수공의 투수계수는 제체 투수계수의 100배인 8.60×10^{-1} cm/sec를 적용하였다. 투수계수와 간극수압의 함수를 조정하여 모형을 보정하였으며 그 결과는 표 4와 같다. 제방 침투모형실험과 수치 모의 보정 결과의 통계량은 평균제곱오차의 제곱근(root mean square error; RMSE)으로 하였다.

표 4. 침투해석 제방 단면과 수치 모형의 보정결과

구분	침투해석을 실시한 단면	실험과 수치모의의 보정결과 비교	RMSE (cm)
Case-1			1.6
Case-2			1.2
Case-3			2.0

5. 결론

배수공이 없는 보통의 제방과 두 가지 형상의 배수공을 설치한 제방에 대하여 침투 실험과 수치 모의를 수행하였다. 배수공을 설치하지 않은 제방에서는 누수가 발생하였지만 배수공을 설치한 제방에서는 침윤선이 확연히 하강하고 제내지 제방사면에 포화 표면이 발생하지 않았다. 일본 국토기술연구센터식 사각형 배수공의 경우에 침윤선이 미국 공병단식 삼각형 배수공의 경우보다 낮게 하강하였다. 즉, 일본 국토기술연구센터식 사각형 배수공이 다소 안정한 것으로 분석되었다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 한국건설교통기술평가원(2006). 제방침투 보강기법 분석, R&D/03산학연 C01-01, 건설교통부, pp. 43-62.
2. Das, B.M. (2005). *Principles of geotechnical engineering*, pp. 238-239.
3. U.S. Army Corps of Engineers (2000). *Design and Construction of Levees*, pp. 5-9.
4. 国土技術研究センター (2002). 河川堤防の構造検討の手引き, pp. 72-78.