

제내 비탈끝 배수공을 이용한 제방의 침투조절에 관한 연구

A Study for Seepage Control of Levee with a Pervious Toe Drain

공 영 산* / 강 태 욱** / 이 상 호***

Kong, Youngsan / Kang, Taek / Lee, Sangho

Abstract

The levee is the facility which is constructed along with river for the protection of landside and for passage of water when there is a flood. When the seepage is exposed to the atmosphere on the landside surface of levee, it may eventually lead to levee failure. The seepage water may be removed from the landside surface by a properly designed drainage system. The purpose of the study is to show seepage control effect of a pervious toe drain, and to compare two drainage methods of a pervious toe drain. One is the pervious toe drain suggested by U.S. Army Corps of Engineers (USACE) and the other is that suggested by Japan Institute of Construction Engineering (JICE). The levee model constructed has the following dimension: the base width is 2.6 m; the crest width is 0.4 m; the side slope 1 : 2. The water depth in the riverside is 0.5 m. The shape of the toe drain by USACE is triangular. The shape of the toe drain by JICE is rectangular. They were installed with the base length of 0.4 m. The levee model without the toe drain showed saturation surface on the land side in the experiment but not with the toe drain. The experiment results was applied to a numerical analysis model using SEEP/W to calibrate and verify. The numerical analysis results for 35 cm and 30 cm drain width showed that the drain by JICE is a little bit safer than the drain by USACE. It is also easier to construct the toe drain by JICE. The results in the study would be applied to plan the seepage control for a levee with pervious toe drain.

Keywords : levee seepage, pervious toe drain, model experiment, SEEP/W

요 지

하천 제방은 홍수 시 유수를 원활하게 소통시키고 제내지를 보호하기 위해 하천을 따라 축조한 시설이다. 하지만 이러한 제방도 침투로 인해 제내지측 사면에 포화표면이 지속적으로 발생하게 되면, 제방은 파괴될 수 있다. 제체 침투에 의해 발생하는 침윤선은 적절한 배수 체계를 이용하여 강하될 수 있다. 본 연구의 목적은 제내지 비탈 끝에 설치되는 배수공을 통한 침투조절의 효과를 제시하고, 각기 다른 형상을 하고 있는 미국의 공병단과 일본의 국토개발기술연구센터에서 제시한 배수공의 효과를 비교, 검토하는데 있다. 이를 위해 배수공의 포함 여부에 따른 제방 침투에 관한 모형실험을 수행하였다. 축조된 제방 모형의 규격은 등마루폭 0.5m, 하부폭 2.6m, 사면경사 1:2, 제방 높이 0.55m이고, 제외지측 수위는 0.5m이다. 미 공병단의 배수공은 삼각형이고 일본의 국토개발기술연구센터의 배수공은 사각형이며, 각각의 배수공 폭은 0.4m로 설치하였다. 배수공을 포함하지 않은 제방 모형에서는 침투에 의해 제내지측 사면에 포화표면이 발생하였으나, 미 공병단과 일본의 국토개발기술연구센터에서 제시한 배수공을 포함한 제방에서는 모두 포화표면이 발생하지

*부경대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (e-mail: ymm003@nate.com)

Master's Course, Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

**부경대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (e-mail: ktw62@hanmail.net)

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

***교신저자, 부경대학교 공과대학 토목공학과 교수(e-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

않았다. 이러한 모형실험의 결과는 SEEP/W를 통한 수치모의 모형의 보정과 검증에 활용되었다. 그리고 배수공의 폭을 5cm씩 줄여가며 수치모의를 수행해 본 결과, 일본의 국토개발기술연구센터식 배수공이 미국의 공병단식 배수공에 비해 다소 안정한 것으로 분석되었다. 또한, 일본의 국토개발기술연구센터식 배수공은 시공이 쉬운 장점이 있다. 본 연구의 결과는 향후 배수공을 이용한 제방의 침투조절 계획에 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

핵심용어 : 제방 침투, 제방 비탈끝 배수공, 모형실험, SEEP/W

1. 서 론

제방은 유수를 원활하게 소통시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 흙으로 축조한 공작물이다(한국수자원학회, 2009). 국민의 재산과 생명의 보호를 목적으로 하는 제방은 충분히 안전하게 건설되어야 한다. 하지만 2002년 8월 낙동강 유역의 장기 홍수, 2002년의 태풍 루사와 2003년의 태풍 매미 등의 홍수는 강원도와 낙동강 유역에 설치된 다수의 제방을 붕괴시켰고, 이후 제방의 중요성이 부각되었다.

국토개발기술연구센터의 문헌(國土開發技術研究センター, 2002)과 윤광석(2004) 등 다수의 문헌에 의하면, 제방의 붕괴 유형은 크게 침투, 침식, 월류, 배수구조물 주위의 공동 현상에 의한 붕괴로 구분된다. 이 가운데 제방의 침투 파괴는 크게 제체의 침투 파괴와 제방 기초지반의 침투 파괴로 분류된다. 본 연구에서는 제방의 침투 파괴 중 제체의 침투 파괴 방지를 위한 기술의 하나인 배수공을 이용한 침투조절(seepage control)에 관한 내용을 다루고 있다. 연구에서는 두 가지의 배수공 설치 방법이 적용되었는데, 이는 각각 미국과 일본에서 사용하고 있는 방법이다.

U.S. Army Corps of Engineers (1993; 2000)와 국토개발기술연구센터(1998; 2002) 등에 의하면, 배수공은 모양, 설치 위치 등에 따라 다양한 형태가 있다. 특히, 국토개발기술연구센터(1998)는 일본의 배수공 설계 지침으로서 일본의 시공사례는 물론, 미국, 네덜란드, 독일, 헝가리에서 설치되고 있는 배수공에 대한 소개도 포함하고 있다. 본 연구에서는 이 가운데 시공이 비교적 단순한 두 가지 형태의 배수공에 대하여 검토하였다. 이들은 제내지 비탈 끝에 설치되는 미 공병단식(U.S. Army Corps of Engineers; USACE) 삼각형 배수공과 일본의 국토개발기술연구센터(Japan Institute of Construction Engineering; JICE)에서 제시하고 있는 사각형 배수공이다.

배수공을 이용한 제방의 침투조절 기법을 상술한 국내의 문헌은 찾기가 어려우며 기 수행된 연구도 희소하다.

본 연구와 가장 유사한 연구 사례로서 한국건설교통기술평가원(2006)은 다양한 침투 보강 기법의 종류를 소개하였고, 그 중 일본의 국토개발기술연구센터식 배수공을 적용한 제방 침투를 SEEP/W 프로그램을 이용하여 수치모의 하였고, 결과를 제시하였다. 하지만 이를 검증하는 수치모형실험은 수행하지 않았다. 모형실험과 수치해석을 병행한 연구사례로서 신방웅과 강종범(1999)은 제방의 증축부 재료와 홍수 시 수위 상승속도를 고려하여 비정상 침투류 해석을 수행한 바 있다. 그 외에 제방 침투와 관련된 연구로서 신방웅 등(2000)은 SEEP/W 프로그램을 사용하여 적용 물성치와 경계조건, 대상제체의 침윤선 변화, 단면선정에 따른 침투해석을 수행하였고, 강명수(2004)는 낙동강 중·하류부 하천 제방을 대상으로 SEEP/W 프로그램으로 침투 해석을 수행하였다. 한국건설교통기술평가원(2005)은 제방 침투에 관한 수치모의의 입력조건인 되는 격자 크기, 계산시간 간격 등을 검토하였고, 정상/비정상 침투 해석에 따른 결과를 비교하여 적절한 수치모의 방안을 제시하였다. 그리고 최정진(2007)은 제방 기초의 침투에 대한 파괴 방지 대책으로 차수벽의 위치에 따른 제방의 안정성을 평가하였고, SEEP/W 프로그램으로 수치모의를 수행하였다.

우리나라에서는 제체의 침투에 의한 제방 파괴 방지를 위해 단면 확대공법, 앞비탈 피복공법을 제시하고 있다(한국수자원학회, 2009). 그리고 단면 확대공법 가운데 제내지측 보강의 유형으로 기설 제체보다 투수성이 큰 재료를 사용하도록 제시하고 있다. 투수성이 큰 재료를 제내지측에 설치하여 배수를 촉진시킨다는 관점에서 보면, 해당 기법이 배수공을 이용한 기법과 유사할 수 있다. 하지만 한국수자원학회(2009)에서 제시하는 제내지측 보강 기법은 기본적으로 제방 단면을 키우는데 초점이 맞추어져 있으므로 배수공을 이용하는 기법과는 기술적, 경제적인 관점에서 다르다.

본 연구의 목적은 상기에서 언급된 단면 확대공법과 피복공법에 비해 상대적으로 경제적이고 시공이 간단한 배수공을 이용한 침투조절 기법을 소개하고, 실제 우리나라

하천 제방의 재료를 이용하여 모형실험 및 수치모의를 통해 해당 기술의 효과를 제시하는데 있다. 또한, 향후 관련 기술의 도입 시 참고자료로 활용될 수 있도록 형상이 서로 상이한 미국과 일본의 배수공에 대한 효과를 비교, 검토하였다.

2. 연구수행 방법

2.1 제방 제체의 침투 방지 기술

국토개발기술연구센터(2002)는 제방 제체에 적용하는 대표적인 침투 방지 대책으로 Fig. 1과 같이 단면 확대 기법, 피복기법, 배수공을 이용한 기법을 제시하였다. 단면 확대 기법은 제방 단면을 확장하여 동수경사를 감소시키고, 활동에 대한 안전성을 확보하기 위한 방법이다. 피복 기법은 강우나 하천수가 제방으로 침투되는 것을 방지 및 억제하기 위해 제외지층 사면을 차수 시트나 불투수성 재료로 피복하는 방법이다. 그리고 배수공을 이용하는 기법은 제방 내부의 침투수를 신속하게 배수하는 것을 목적으로 제내지층 비탈면 끝에 쇄석 등 투수성이 큰 배수 재료를 설치하는 방법이다.

본 연구에서는 다양한 제방 제체의 침투 방지 기술 중

배수공을 이용하는 방법에 대하여 검토하였다. 배수공은 형상과 위치에 따라 다양한 형태가 존재하는데, 연구에서는 미 공병단과 일본의 국토개발기술연구센터에서 제시하고 있는 배수공 가운데 비교적 시공이 간단한 삼각형 배수공과 사각형 배수공에 대하여 모형실험과 수치모의를 수행하였다. 각각의 배수공에 대한 형상은 Fig. 2와 같다.

2.2 제방의 침투실험

2.2.1 제방 모형의 설계

제방 침투실험을 위한 제방 모형은 $12.48 \times 0.6 \times 1.6$ m의 수조 내부에 제작되었다. 제방 침투에 따른 제체 내의 위압수두(piezometric head)를 측정하기 위해 0.20 m 간격으로 13개의 위압수두계(piezometer)와 출자를 설치하였다. 제작된 제방 모형의 형상은 Fig. 3과 같다. 제체의 하부 폭은 2.6 m, 둑마루폭은 0.4 m로 하였고, 제방 사면의 경사는 1:2, 제체의 높이는 0.55 m로 제작하였다. 그리고 실험 시 제외지의 수위는 0.50 m를 유지하도록 관리하였다.

한국수자원학회(2009)는 제방의 비탈경사를 1:3으로 제시하고 있다. 본 연구에서는 덜 안전한 규격의 제방에

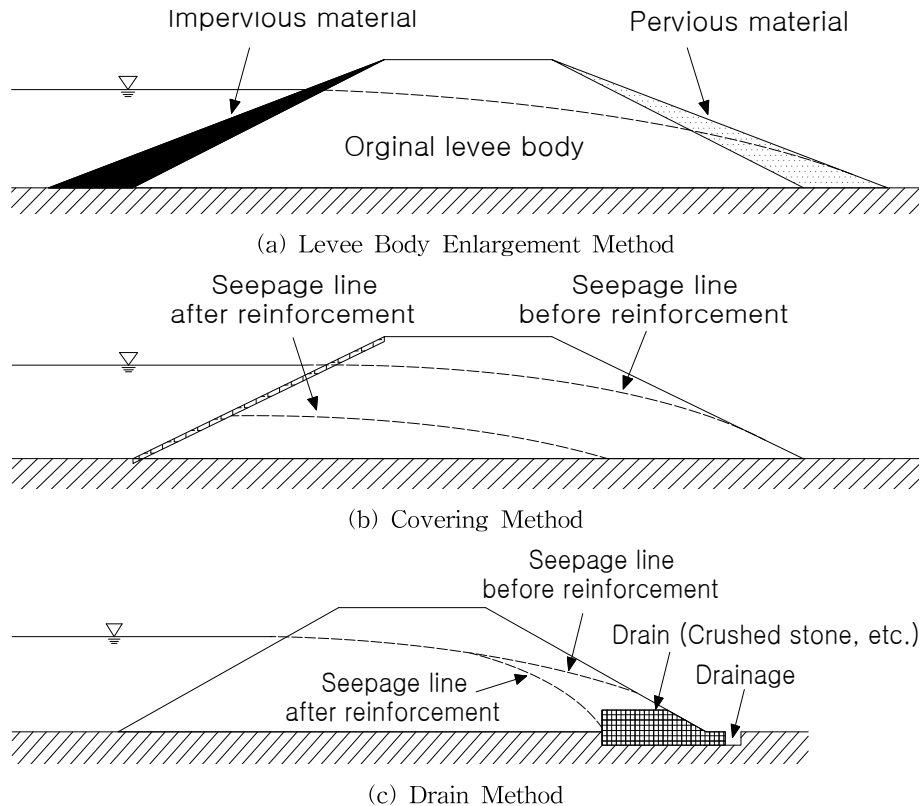


Fig. 1. Major Seepage Control Methods for a Levee (JICE, 2002)

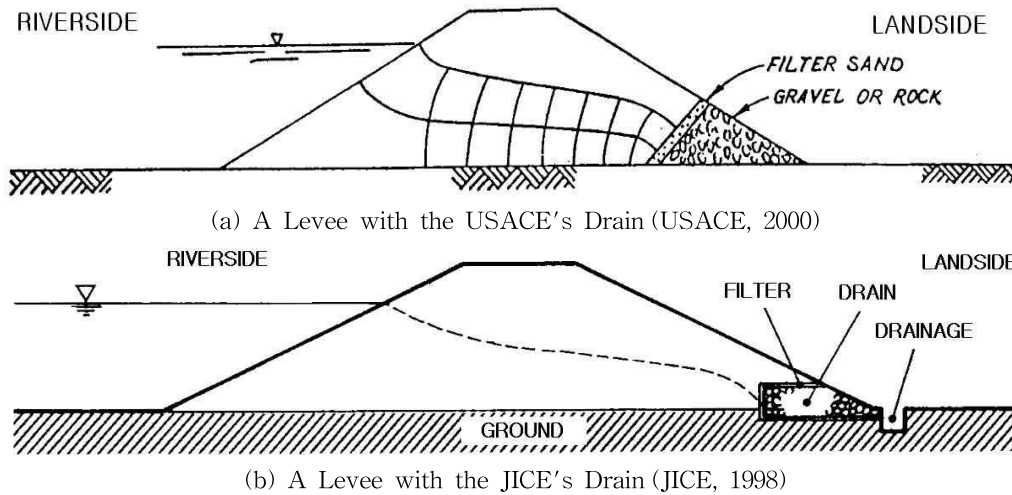


Fig. 2. Levees with the Drains Used in the Study

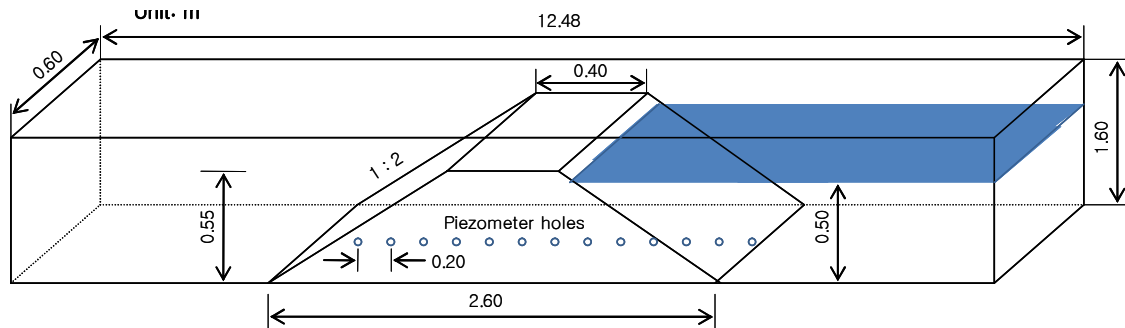


Fig. 3. A Schematic Diagram of Seepage Experiment for a Levee

대한 침투 현상과 이에 대한 배수공의 효과를 검토하기 위하여 표준 비탈경사보다 경사가 급한 1:2로 제방을 제작하였다. 또한, 비탈경사가 1:3으로 개정된 것은 2005년으로서 기 설치된 제방의 대다수는 비탈경사가 1:2이므로 연구 진행에 적합한 조건으로 판단된다.

2.2.2 배수공의 규격 설계

미 공병단과 일본의 국토개발기술연구센터는 배수공의 설치 규격에 대하여 명확하게 제시하고 있지 않다. 다만, 국토개발기술연구센터(1998)에서는 배수공 폭의 하한을 제방 하부폭의 1/10 이상, 상한을 평균 동수경사가 0.3 이하가 되도록 개략적으로 제시하고 있다.

본 연구에서는 침투조절에 사용되는 배수공 규격의 설계를 위하여 Table 1과 같이 불투수층 상에 축조된 제방의 제내 포화표면 길이 산정식(Das, 2005)을 활용하였다. 계획한 제방 모형의 형상에 따라 결정된 제내지층 포화표면의 길이(L)는 318mm이다. 이에 근거하여 배수공의 바닥폭을 400mm로 결정하였다. 결정된 배수공의 폭은 제

방 하부폭의 1/6.5이고, 배수공에 의한 평균 동수경사는 0.023으로서 일본 국토기술연구센터식 배수공의 설계 기준을 만족하는 범위에 있다.

2.2.3 제체 및 배수공의 재료

연구에서는 제방 침투실험뿐만 아니라 동일한 조건에 대한 수치모의를 수행하였다. 제방 제체의 침투 수치모의를 수행하기 위해서는 제체 재료에 대한 물리적 특성이 요구된다. 따라서 제방 모형에 사용된 제체 재료에 대한 입도분석과 투수시험을 수행하였다. Tables 2 and 3은 각각의 실험에 의해 결정된 흙의 물리적인 특성을 나타낸다. 제방 침투실험에 사용된 제체의 재료는 모래가 약 75%로서, 통일분류법(Unified Soil Classification System; USCS) 상 실트질 모래(SM)와 입도분포가 양호한 모래(SW)로 분석되었다. 그리고 투수계수는 8.6×10^{-3} cm/sec 인 것으로 나타났다.

참고로 본 연구에서 사용한 제체의 재료는 경상북도 구미시 해평면의 실제 제방 시공 현장에서 채취한 흙 가운

Table 1. Calculation for the Length of Saturation Surface on the Land Side of the Levee

	α	$\alpha = \tan^{-1} 0.5 = 26.565^\circ$
	Δ	$\Delta = 500 \times 2 = 1,000 \text{ mm}$
	d	$d = 2,600 - 0.7\Delta = 2,600 - 700 = 1,900 \text{ mm}$
	L	$L = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}}$ $= \frac{1,900}{\cos(\tan^{-1} 0.5)} - \sqrt{\frac{1,900^2}{\cos^2(\tan^{-1} 0.5)} - \frac{500^2}{\sin^2(\tan^{-1} 0.5)}}$ $= 318 \text{ mm}$

Table 2. The Results of Particle Size Analysis for the Material of the Levee Models

USCS	Specific Gravity (G_s)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
SM-SW	2.607	16.77	74.65	4.57	4.01

Table 3. The Parameters of the Material in the Levee Models

Water Content, ω (%)	Wet Specific Weight, γ_t (gf/cm ³)	Dry Specific Weight, γ_d (gf/cm ³)	Initial Void Ratio, e_0	Hydraulic Conductivity, k (cm/sec)
5.43	1.833	1.739	0.499	8.60E-03

데 호박돌과 같은 큰 돌을 제거한 흙이다. 그럼에도 불구하고 한국수자원학회(2009)에서 제시하고 있는 제체 재료의 투수계수 기준인 1.0×10^{-3} cm/sec를 8배 이상 초과하는 것으로 나타났다. 실제로 다수의 제방 축조 현장에서는 제방 성토 시 하상토를 이용하여 성토하므로 제체의 투수계수가 기준에 부합하기 어렵다. 따라서 배수공 등을 이용한 적절한 침투조절 방법의 유용성이 있다.

한편, 국토개발기술연구센터(1998)는 배수공에 대하여 제체의 투수계수보다 100배 이상 큰 재료를 사용하도록 제시하고 있다. 이에 따라 연구에서는 약 5cm 입径의 자갈을 배수공의 재료로 사용하여 배수공의 투수계수가 제체의 투수계수보다 충분히 커지도록 하였다. 실제로 Das (2005)에 의하면, 자갈의 투수계수는 1~100 cm/sec로서 연구에서 사용된 제체 재료의 투수계수를 100배 이상 상회하는 것을 알 수 있다.

2.2.4 침투실험의 조건과 제방 모형의 제작

제방 침투실험은 미 공병단식 배수공과 일본의 국토개발기술연구센터식 배수공의 효과를 검토하기 위해 세 가지 경우에 대하여 수행되었다. 구분된 실험조건은 배수공이 없는 제방, 공병단식 배수공을 포함한 제방, 국토개발

기술연구센터식 배수공을 포함한 제방이고, 각각을 순서대로 Case-1~Case-3으로 명명하였다.

제방 모형의 제작에 사용된 배수공의 재료는 자갈이고 제체의 흙과 배수공 재료의 분리를 위한 필터 재료로는 부직포를 사용하였다. Fig. 4는 제작된 제방 모형을 나타낸다. Fig. 4(a)는 배수공이 없는 상태의 제방(Case-1)에 대한 전체 형상이고, Fig. 4(b) and (c)는 각각 시공된 공병단식 배수공(Case-2)과 국토개발기술연구센터식 배수공(Case-3)을 확대 촬영한 그림이다.

연구에서 제작된 제방 모형은 제방 원형(prototype)의 약 1/10~1/20에 해당한다. 일반적으로 모형실험은 대상 원형을 축소하여 수행되므로 상사법칙(similarity law)이 적용되어야 한다. 하지만, 제방을 구성하고 있는 제체 재료의 상사성을 구현하는 것은 매우 어렵다. 실제로 국내외의 제방 실험 연구 사례를 조사하더라도 제체 재료의 상사성을 맞추어 실험한 사례는 찾아보기 어렵다. 연구에서도 정교한 상사법칙을 적용하지는 못하였고, 단지 모형 제방 축조 시 실제 하천 제방에 포함되어 있던 호박돌과 자갈 등과 같은 입径이 큰 재료는 제거하여 모형을 제작하였다.

모형제방은 제방축조 방법과 유사하게 흙을 쌓으면서



(a) The Levee Model Constructed (Case-1)



(b) The Levee Model with the USACE's Drain (Case-2)



(c) The Levee Model with the JICE's Drain (Case-3)

Fig. 4. Experimental Levee Models Constructed for Seepage Control with Drains

0.20m 높이마다 살수와 다짐을 수행하였다. 다짐방법은 고무망치를 이용한 층 다짐을 하였다. 최종 완성된 제방 모형의 들밀도실험 결과, 건조단위중량과 다짐도는 각각 1.71 g/cm^3 , 93%로 측정되었다.

2.3 수치모의 모형

본 연구에서는 모형실험 결과를 이용하여 수치모의를 수행하였다. 연구에서 사용한 수치모의 프로그램은 캐나다의 GEO-Slope International에서 개발한 SEEP/W이다. SEEP/W는 정상 및 비정상 상태의 해석이 가능하고, 비등방성 및 비균질성 토질에 대한 해석이 가능한 프로그램으로서 연구에서는 제체 내부로 침투하는 물의 정상상태 해석을 실시하였다.

SEEP/W의 지배방정식은 Eq. (1)과 같은데, 외부에서 유입되는 유량과 요소 내의 유량 변화량의 합은 체적함수비의 시간에 따른 변화율과 같음을 의미한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 H는 전수두, k_x 와 k_y 는 각각 x, y 방향의 투수계수, Q는 적용된 경계 유량, θ 는 체적함수비, t는 시간이다.

정상상태의 경우에는 임의의 시간에서 유입 유량과 유출 유량이 같으므로 우변이 0이 되며, 체적함수비는 응력 상태와 흙의 성질에 따라 Eq. (2)와 같이 변화한다.

$$\partial \theta = m_v \partial u_w \quad (2)$$

Eq. (2)에서 m_v 는 저류계수, u_w 는 간극수압을 나타낸다. 그리고 전수두는 Eq. (3)과 같이 압력수두와 위치수두의 합으로 표현될 수 있고, Eq. (3)은 Eq. (4)로 다시 나타낼 수 있다.

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (3)$$

$$u_w = \gamma_w (H - y) \quad (4)$$

여기서, γ_w 는 물의 단위중량, y는 위치수두이다. Eq. (4)를 Eq. (2)에 대입하면 Eq. (5)와 같이 되고, Eq. (5)를 Eq. (1)에 대입하면 Eq. (6)을 얻을 수 있다. 그리고 위치수두

는 일정하므로 시간에 관한 y 항이 없어지고 최종적으로 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다(Geo-Slope Interantional Ltd., 2007).

$$\partial\theta = m_w\gamma_w\partial(H-y) \quad (5)$$

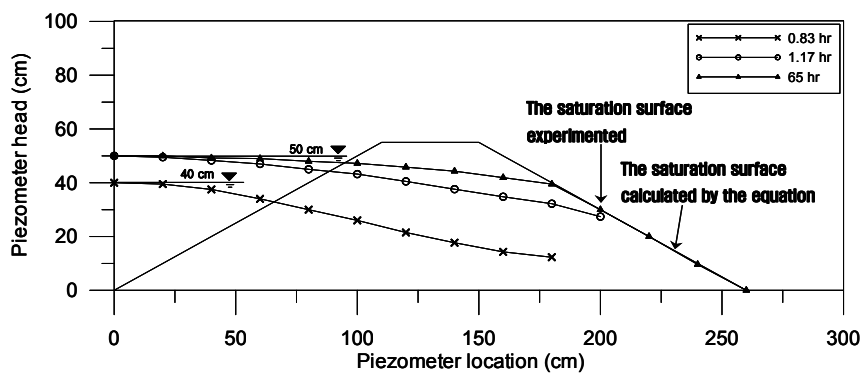
$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k_x\frac{\partial H}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[k_y\frac{\partial H}{\partial y}\right] + Q = m_w\gamma_w\frac{\partial(H-y)}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k_x\frac{\partial H}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[k_y\frac{\partial H}{\partial y}\right] + Q = m_w\gamma_w\frac{\partial H}{\partial t} \quad (7)$$

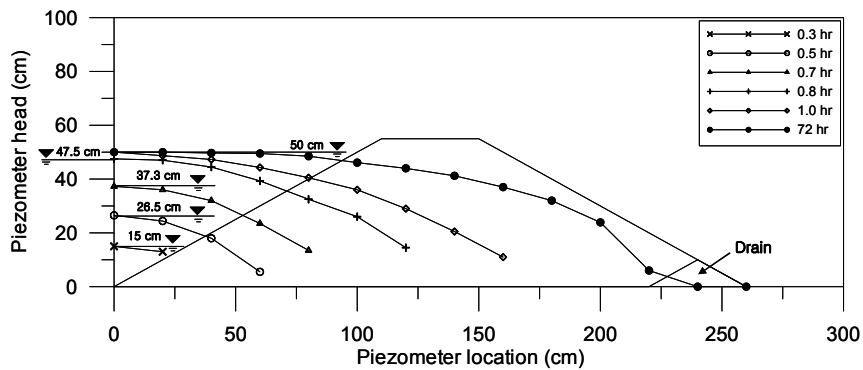
3. 연구결과

3.1 침투실험 수행의 결과

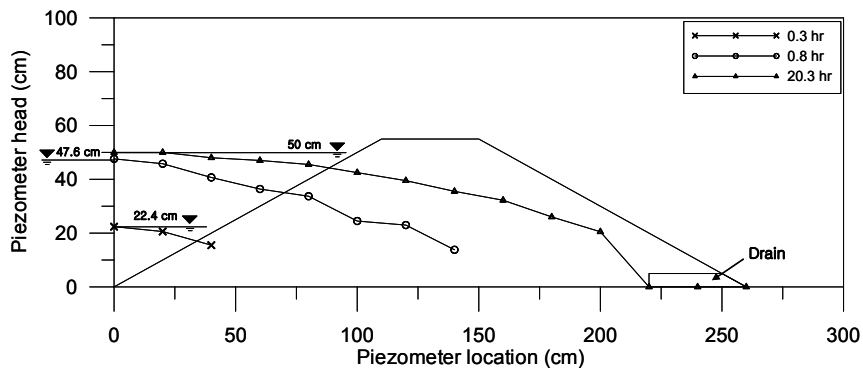
연구에서는 정상 상태의 침투실험을 목표로 수행하였다. 하지만 수위를 순간적으로 목표 높이까지 채우기란 매우 어렵다. 이에 따라 연구에서는 수위를 0.50 m까지 천천히 올린 후, 수위를 유지하면서 위압수두의 변화를 측정하여 침투 실험을 수행하였다. 위압수두계의 측정값은 위압계 자유수면의 높이이며 부착된 줄자의 눈금을 읽어 측정되었다. 측정시간 간격은 위압수두계가 빠르게 변화



(a) Variation of Seepage Line by Time (Case-1)



(b) Variation of Seepage Line by Time (Case-2)



(c) Variation of Seepage Line by Time (Case-3)

Fig. 5. The Results of the Seepage Experiments for Levees

한 초기에는 10~20분 간격으로 하였고, 시간의 경과에 따라 측정시간 간격을 늘렸다. 측정은 위압수두가 안정상태에 도달할 때까지 수행되었다.

Fig. 5는 제방 침투실험의 Case별 시간의 경과에 따른 침윤선의 변화 양상을 나타낸다. 하지만 이는 제외지 측에 물을 채우는 과정에서 생성된 침윤선을 표현한 것이지만 정상 상태의 실험을 수행하기 위한 그림은 아니다. Fig. 5(a)는 배수공이 없는 상태의 제방, (b)는 공병단식 배수공을 포함한 제방, (c)는 국토개발기술연구센터식 배수공을 포함한 제방의 침투실험 결과이다. 배수공이 없는 상태의 제방과 공병단식 배수공을 포함한 제방에 관한 침투실험은 약 70시간 동안 진행되었다. 이에 반해 수위조절에 실패하여 조기에 파괴된 국토개발기술연구센터식 배수공을 포함한 제방의 경우 20시간 동안 진행되었으나, 이미 수두가 안정화되었기 때문에 결과를 도출하기에는 충분하였다.

Table 1에서 계산된 이론적 제내지층 포화표면 발생 지점은 비탈끝에서 318mm이었다. 하지만 모형실험에 의해 결정된 제내지층 포화표면의 발생 지점은 비탈끝에서 670.8mm로 나타났다(Fig. 5(a)). 이러한 포화표면 발생 위치의 차이는 Table 1에 제시된 수식이 제체 재료의 입도와 투수계수 등과 같은 재료의 특성을 반영하지 않은 개략적인 계산식인 것에 근거하는 것으로 판단된다.

Fig. 5(a)의 이러한 제내지 사면의 누수 현상은 실험시작 100분 후부터 발생하였다. 이에 반해 공병단식 배수공과 국토개발기술연구센터식 배수공이 설치된 Fig. 5(b) and (c)에서는 배수공 부근에서 침윤선이 급격히 하강하여 배수공으로 침투수가 완전히 배수되었다. 즉, 제내지층 사면에 포화표면이 발생하지 않았다.

3.2 수치모의 결과

3.2.1 침투해석 모의 모형의 보정

연구에서는 유한요소법(Finite Elements Method; FEM)

을 이용하여 해석하는 SEEP/W 프로그램을 사용하여 수치모의를 수행하였다. SEEP/W 프로그램은 정상 상태(steady state) 해석과 비정상 상태(transient) 해석이 가능한 모형이다. 연구에서는 모형실험과 동일하게 정상류 흐름 해석을 수행하였다.

수치모의를 수행하기 위해서는 격자의 크기, 경계조건, 매개변수 등의 설정이 요구된다. 한국건설교통기술평가원(2005)은 일본의 하천제방설계지침과 기존의 연구 및 해당 연구를 통해 격자크기를 제체 높이의 1/10 이하로 적용하는 것이 타당한 것으로 제시하고 있다. 연구에서는 해당 내용을 고려하고, 미국의 공병단식 배수공을 모사할 수 있도록 격자의 크기를 제체 높이의 약 1/20인 2.5 × 2.5 cm로 설정하였다.

SEEP/W의 경계조건은 전 수두(head), 압력 수두(pressure head), 총 유량(total flux), 단위 유량(unit flux) 등을 정의하여 설정할 수 있고, 유입유량을 설정하는 총 유량 또는 단위 유량의 경계조건 설정 시 침윤 가능면(potential seepage face)을 정의할 수 있다. 연구에서는 제외지의 수면과 접하는 부분의 경계조건은 전 수두(0.5m)로 설정하였고(Fig. 6(a)), 침윤선이 예상되는 제내지층 사면에는 총 유량을 0으로 두고 침윤 가능면으로 설정하여 침투수가 제방을 통과하여 유출이 가능하도록 하였다(Fig. 6(b)).

정상상태 해석에 있어서 SEEP/W 프로그램의 주요 매개변수는 수평·수직 투수계수의 비와 투수계수-간극수압의 관계이다. 연구에서는 수평·수직 투수계수를 동일한 것으로 설정하였다. 그리고 상대적으로 규명이 어려운 투수계수-간극수압의 관계를 모형 보정에 사용하였다.

수치모의 모형의 보정은 배수공이 없는 상태의 조건(Fig. 5(a))에 대하여 수행되었다. 수치모의 모형은 모형실험에 의해 분석된 위압수두계별 위압수두와 수치모의에 의해 결정된 위압수두의 오차가 최소가 되도록 투수계수와 간극수압의 관계를 추정하여 보정되었다. 투수계수와 간극수압의 관계는 직선으로 가정하였고, 투수계수의

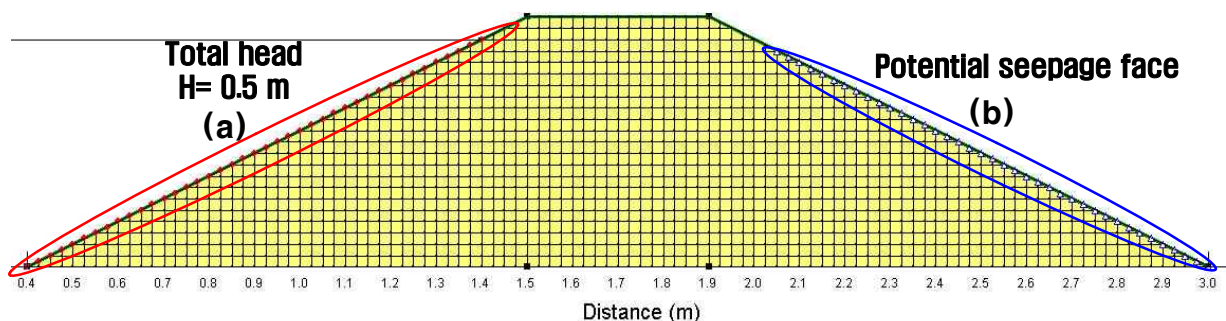


Fig. 6. Definition of Boundary Conditions for the Numerical Analysis

값은 Table 3의 투수시험 결과(8.60×10^{-3} cm/sec)를 이용하여 보정하였다. 그리고 간극수압의 범위는 0부터 5 kN/m²로 하였는데, 5 kN/m²의 의미는 제외지층에 유입되는 수심(0.5 m)에 대한 최대 정수압의 크기를 반영한 값이다. 최종적으로 추정된 투수계수와 간극수압의 관계는 Fig. 7과 같다. 상기의 조건을 이용하여 분석된 수치모의 모형의 보정 결과, 평균제곱오차의 제곱근(root mean square error; RMSE)은 1.6 cm인 것으로 분석되었다(Fig. 8).

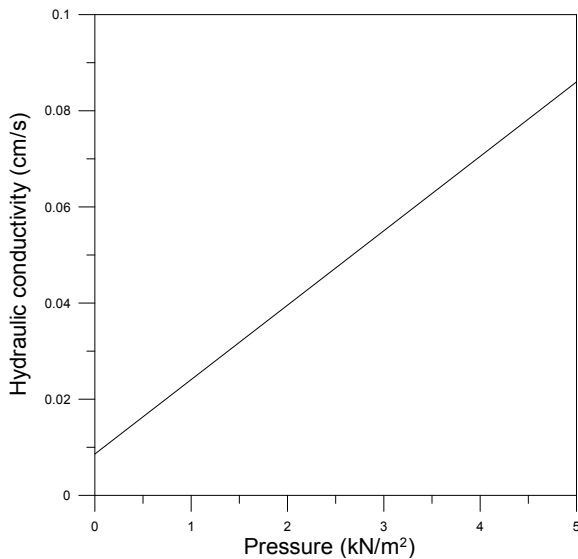


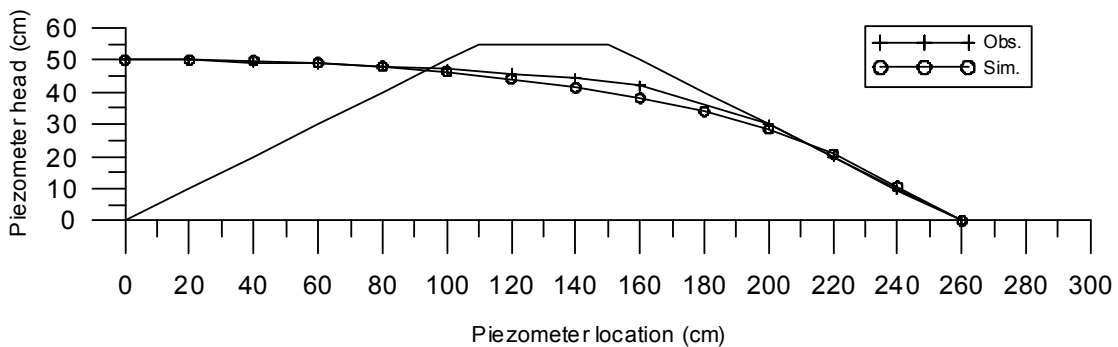
Fig. 7. The Conductivity Function Estimated

3.2.2 배수공을 설치하지 않은 제방의 침투에 대한 안전성 평가

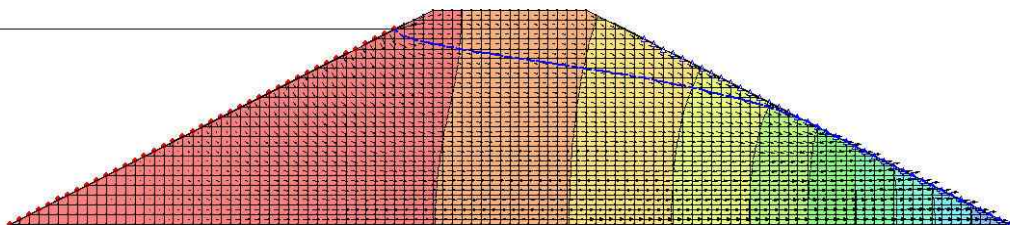
앞서 배수공을 설치하지 않은 제방의 경우, 제내지 사면에 포화표면이 발생하였다. 이렇게 포화표면이 발생하게 되면, 제방은 침투에 대하여 불안정한 상태가 되어 파괴될 수 있다. 따라서 실험에 사용된 제방의 침투에 대한 안전성을 평가하였다. 우리나라에서는 제방의 침투에 대한 안전성을 평가 방법으로서 한계동수경사 방법과 한계유속 방법을 사용하고 있으므로 이를 검토하였다.

한국수자원학회(2009)에 의하면, 한계동수경사 방법은 Eq. (8)의 Terzaghi식으로 한계동수경사를 산정하고, 침투류 해석에 의해 산정된 동수경사가 한계동수경사의 1/2 이하가 되어야 안전한 것으로 설정하고 있다. 한계유속 방법(Justin 방법)은 제체 및 기초의 토립자 입경에 대하여 소류력에 의하여 입자가 밀려나가는 한계의 침투유속과 실유속을 산정하여 안전성을 평가하는 기법이다. 이때, 한계유속은 제체 재료의 특성치를 이용하여 Eq. (9)와 같이 산정된다. 한국수자원학회(2009)에서는 침투류 해석에서 얻어지는 침투류의 실유속이 한계유속의 1/100 이하가 되도록 해야 함을 기준으로 하고 있다.

$$i_c = \frac{h}{d} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (8)$$



(a) Comparison of the Experiment and Numerical Analysis Results for the Levee without Drain



(b) The Results of the Numerical Analysis for the Levee without Drain

Fig. 8. The Calibration Results for the Case without a Toe Drain

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{Wg}{A\gamma_w}} = \sqrt{\frac{2}{3}(G_s - 1)gd_{10}} \quad (9)$$

Eqs. (8) and (9)에서 i_c 는 한계동수경사, h 는 제방의 전 수두(m), d 는 분사지점의 수두(m), G_s 는 토립자의 비중, e 는 흙의 간극비, V_{cr} 은 한계유속, W 는 토립자의 수중 중량(g), A 는 물의 흐름을 받는 토립자의 면적(cm^2), γ_w 는 물의 단위중량(g/cm^3), g 는 중력가속도(cm^2/s^2), d_{10} 은 토립자의 유효입경이다.

Tables 2 and 3에서 제시한 제방 침투실험에 사용된 제체의 재료에 대한 입도분석과 투수실험 결과를 이용하여 한계동수경사와 한계유속을 산정하였다. 그리고 Fig. 8에서 SEEP/W를 이용하여 분석한 최대의 동수경사와 한계유속을 도출하였다. 이를 통해 제방의 안전성을 평가한 결과, 한계동수경사 방법의 경우 안전율이 2 이상인 우리나라 기준에 다소 미치지 못하는 1.98로 분석되었다. 반면에 한계유속 방법의 경우 안전율이 8.81로서 안전한 것으로 평가되었다(Table 4).

최정진(2007)에 의하면, Justin에 의해 제안된 한계유속 방법은 수식의 출처가 불분명하고, 실제보다 과대평가 되는 것으로 언급하였다. 따라서 해당 수식에 의해 검토된 제방의 안전성은 신뢰하기 어렵다. 또한, 한국건설교통기술평가원(2004)에 의하면, 일본, 네덜란드, 미 해군시설공학사령부에서는 제방의 침투에 대한 안전성 평가 기준으로 최대의 동수경사가 0.5보다 작도록 설계하고 있다. 이는 우리나라의 한계동수경사 방법과 유사한 방법으로서 일반적으로 한계동수경사가 1 정도의 값을 갖는 것에 근거하여 안전율이 2 이상이 되도록 설정한 기준이다. 종합하면, 우리나라의 침투에 대한 안전성 평가 기준은 한계동수경사 방법과 한계유속 방법이 있으나, 한계동수경사 방법에 의한 결과가 보다 신뢰적이다. 따라서 본 연구에서 수행된 배수공이 없는 상태의 제방의 경우, 침투에 대하여 다소 불안정하여 파괴될 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 배수공 등에 의한 침투조절이 요구되는 것으로 나타났다.

3.2.3 침투해석 모의 모형의 검증 및 배수공의 효과

보정된 수치모의 모형을 이용하여 공병단식 배수공과 국토개발기술연구센터식 배수공을 포함한 제방인 Case-2와 Case-3에 대하여 수치모의 모형을 검증하였다. 모형의 검증에 사용된 수치모의 모형은 모형 보정에 사용된 수치모의 모형의 격자 크기, 경계조건, 매개변수와 모두 동일하게 적용되었다. 즉, 검증에 사용된 수치모의 모형의 격자 크기는 $2.5 \times 2.5 cm$ 이고, 경계조건도 Fig. 6에서 제시된 조건과 동일하다. 매개변수의 경우에도 수평·수직 투수계수의 비가 같게 설정되었고, 투수계수-간극수압의 관계도 모형 보정 시 추정된 Fig. 7을 이용하였다. 다만, 배수공의 투수계수는 제체의 투수계수보다 100배 큰 $8.60 \times 10^{-1} cm/sec$ 로 가정하였다. 이는 모형실험에서 약 5cm 입경의 자갈을 배수공의 재료로 사용하여 배수공의 투수계수가 제체의 투수계수보다 100배 이상 커지도록 한 것에 근거한 가정이다.

상기의 내용을 반영하여 수치모의 모형을 검증한 결과, Case-2와 Case-3의 수치모의와 실험에 의해 결정된 위압 수두에 대한 평균제곱오차의 제공근이 각각 1.2, 2.0cm로 분석되었다(Table 5). 따라서 구성된 제방 침투 및 배수공을 이용한 침투조절에 관한 수치모의 모형이 적절한 것으로 평가되었다. 이는 배수공에 의한 제방의 침투조절을 수치모의를 통해서도 검토할 수 있음을 의미한다.

앞서 배수공을 포함하고 있지 않은 제방과 달리 공병단식 배수공과 국토개발기술연구센터식 배수공을 포함한 제방의 경우 제내지 사면에 포화표면이 발생하지 않았다. 따라서 이론적인 방법으로 침투에 대한 안전성을 평가할 수 없으나, 침투로 인한 파괴가 발생하지 않는 것은 명백하다.

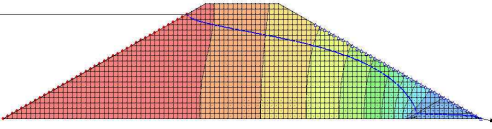
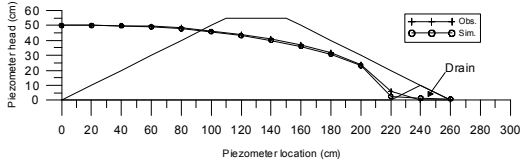
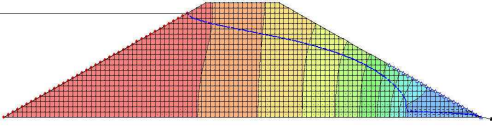
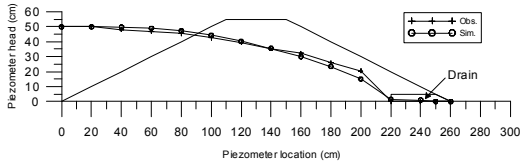
3.2.4 공병단식 배수공과 국토개발기술연구센터식 배수공의 효과 비교

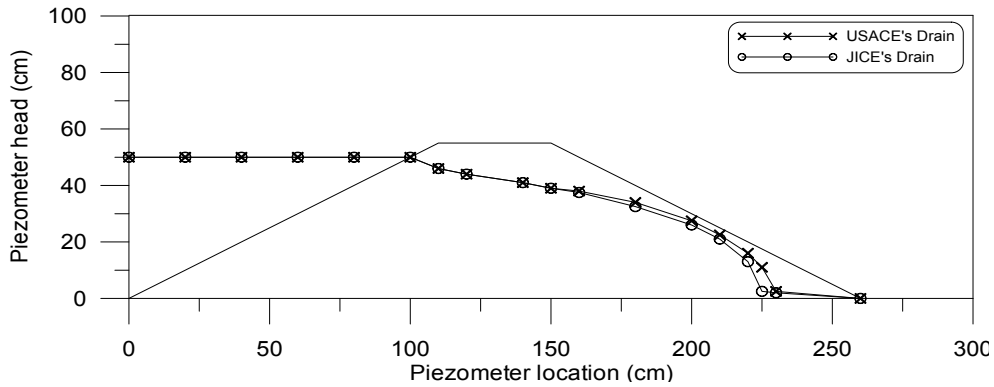
보정 및 검증된 수치모의 모형을 이용하여 미국의 공병단과 일본의 국토개발기술연구센터식 배수공의 폭을 5cm

Table 4. Evaluation of Safety for the Piping of the Levee Model without Drain

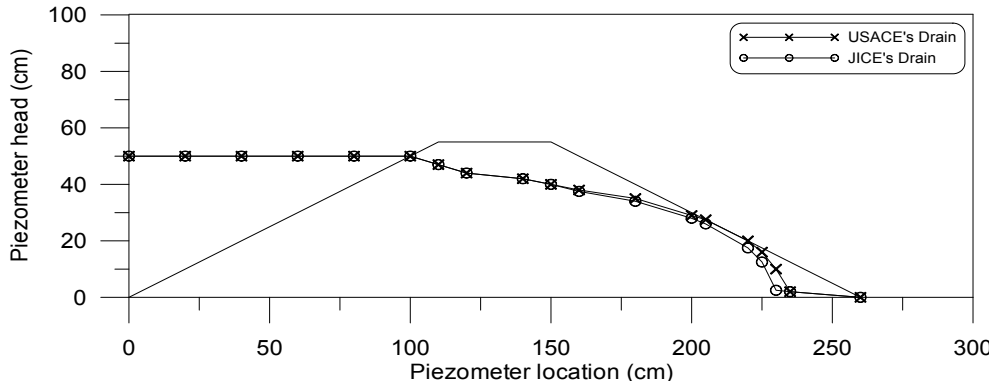
Critical Hydraulic Gradient Method			Critical Velocity Method		
Critical Hydraulic Gradient i_c	Max. Hydraulic Gradient by Numerical Analysis i	Safety Factor $\frac{i_c}{i}$	Critical Velocity V_{cr} (m/s)	Max. Velocity by Numerical Analysis V (m/s)	Safety Factor $\frac{V_{cr}}{V \times 100}$
1.07	0.54	1.98	4.13×10^{-2}	4.69×10^{-5}	8.81

Table 5. Verification for the Numerical Analysis Model by the Model Experiment Case-2 and Case-3

Item	Numerical Analysis Results	Comparison of Experiment and Numerical Analysis	RMSE (cm)
Case-2			1.2
Case-3			2.0



(a) The Seepage Lines of the Levees with the USACE's Drain and JICE's Drain of 35 cm



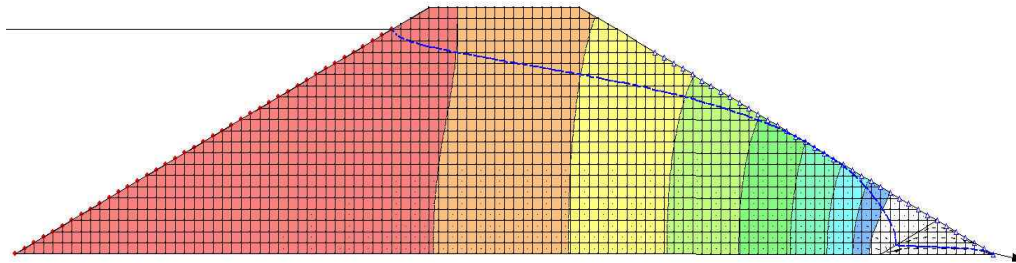
(b) The Seepage Lines of the Levees with the USACE's Drain and JICE's Drain of 30 cm

Fig. 9. Comparisons of Seepage Control Effect between the USACE's Drain and the JICE's Drain

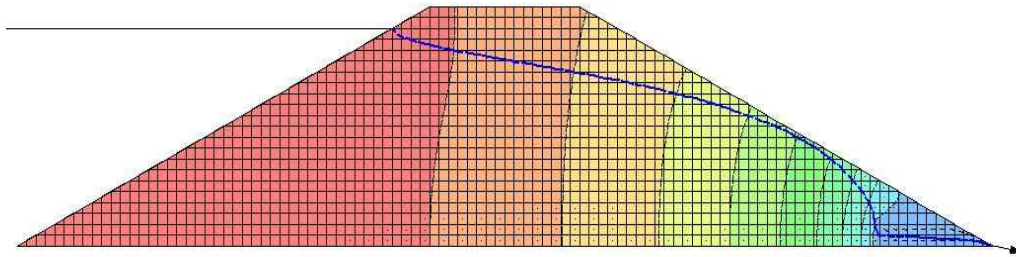
씩 줄어가면서 침투 양상을 모의하였다. 이는 두 배수공의 효과를 비교하기 위함이다. 분석 조건은 검증에 사용된 모형의 격자크기, 경계조건, 매개변수와 동일하다.

Fig. 9는 국토개발기술연구센터식 배수공과 공병단식 배수공의 폭을 35 cm와 30 cm로 각각 설정하여 수치 모의된 위압수두를 비교하여 나타낸 그림이다. 두 개의 조건에서 모두 배수공의 영향을 받지 않는 제외지측 사면

근처에서는 두 배수공에 의한 위압수두가 동일하게 형성되나, 제외지측에서 160 cm 떨어진 지점부터 배수공에 따른 위압수두가 달리 형성되었다. 즉, 국토개발기술연구센터식 배수공을 포함한 제방의 위압수두가 공병단식 배수공을 포함한 제방의 위압수두보다 큰 폭으로 감소되었다. 이는 국토개발기술연구센터식 배수공이 공병단식 배수공보다 배수 효과가 더 큰 것을 의미한다.



(a) The Seepage Analysis Results through the Levee with the USACE's Drain



(b) The Seepage Analysis Results through the Levee with the JICE's Drain

Fig. 10. The Numerical Analysis Results for Levees with a Drain Width of 30 cm

특히, 배수공의 폭이 30cm일 경우에는 공병단식 배수공을 포함한 제방의 경우 침윤선이 제내지측 제방 사면에 접하여 누수가 발생하였다. 하지만 국토개발기술연구센터식 배수공을 포함한 제방은 30cm의 배수공에서도 포화표면이 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 즉, 국토개발기술연구센터식 사각형 배수공이 공병단식 배수공보다 다소 안정한 것으로 분석되었다. Fig. 10은 폭이 30cm인 공병단식 배수공과 국토개발기술연구센터식 배수공을 포함한 제방의 수치모의 결과를 나타낸 그림이다.

두 배수공의 비교를 통해 국토개발기술연구센터식 배수공이 공병단식 배수공에 비해 침투조절 효과가 미소하게 큰 것으로 분석되었다. 이는 배수공의 형상에만 기초한 결과로서, 본 연구에서는 이에 대한 원인과 이론적 근거는 제시하지 못하였다. 하지만 분명한 것은 배수공을 통해 제방의 침투조절이 가능하다는 것과 배수공의 형상에 있어서 국토개발기술연구센터식 사각형 배수공이 보다 효과적인 것이다. 또한, 국토개발기술연구센터식 배수공은 공병단식 배수공에 비해 시공이 쉬운 장점이 있다. 따라서 향후 우리나라에서 배수공을 이용한 제방의 침투조절 계획 시 국토개발기술연구센터식 사각형 배수공을 이용하는 것이 보다 적절할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 하천 제방의 침투 방지 대책 중 하나인

제내지측 사면에 배수공을 설치하는 방법에 대한 효과를 검토하였다. 배수공에 의하여 조절되는 하천 제방의 침투양상을 침투실험과 침투 모의 프로그램인 SEEP/W를 사용하여 검토하였고, 배수공의 유용성을 확인하였다. 배수공의 형상으로 적용한 것은 미국의 공병단식 삼각형 모양의 배수공과 일본의 국토개발기술연구센터에서 제시한 사각형 모양의 배수공이다.

배수공의 설치 유무에 따른 침투실험 결과, 배수공을 설치하지 않은 제방에서는 제내지측 사면에 포화표면이 발생하였지만, 적절한 규모의 배수공을 설치한 제방에서는 침윤선이 하강하여 누수가 발생하지 않았다. 그리고 침투실험의 결과를 활용하여 SEEP/W 수치모의 모형을 보정하고 검증하였다. 구현된 수치모의 모형을 이용하여 배수공의 폭을 줄여가며 수치모의를 수행한 결과, 배수공의 폭이 30cm인 경우, 공병단식 배수공을 설치한 제방에서는 제내지측 사면에서 포화표면이 발생하였으나, 국토개발기술연구센터식 배수공을 설치한 제방에서는 제내지측 사면에서 누수가 발생하지 않았다. 이를 통해 일본 국토개발기술연구센터식 배수공이 미국의 공병단식 배수공보다 다소 안정한 것으로 분석되었다.

우리나라에서는 제방 제체의 침투 방지 기술로서 주로 제방 단면을 확대하거나 제외지 사면의 피복기법을 사용한다. 제방 단면을 확대하기 위해서는 제방 부지의 확보뿐만 아니라 제체 재료의 확보, 제방 성토에 필요한 공사비 등 많은 비용과 노력이 요구된다. 사면 피복기법의 경

우에도 제외지층 사면을 콘크리트 타설 등을 통해 보호해야 하므로 시공에 어려움이 있고, 많은 비용이 소요된다. 반면에 본 연구에서 검토된 제내지 비탈 끝의 배수공 설치로 침투를 조절하는 방법은 시공이 간단하고, 쇄석 등의 배수공과 필터층, 소규모의 배수로만을 이용하기 때문에 타 기술에 비해 경제적이다. 특히, 배수공을 이용한 침투조절 방법은 침투과피의 가능성이 있는 기설 제방에 대한 보강 기술로 활용성이 높을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 제방의 기초지반을 통한 침투에 대한 분석은 수행하지 못하였다. 따라서 향후 배수공을 이용한 제방 기초지반의 침투조절에 관한 연구 수행이 요구된다.

감사의 글

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

참고문헌

강명수 (2004). 낙동강 유역특성을 고려한 제방안정에 관한 연구. 석사학위논문, 연세대학교.
 신방웅, 강중범 (1999). “모형실험에 의한 토공구조물의 침투거동특성.” **한국산업안전학회지논문집**, 한국산업안전학회, Vol. 14, No. 4, 158-167.
 신방웅, 강중범, 방성택, 경구현 (2000). “파이핑 현상에 따른 하천제방의 안정성 평가.” **건설기술연구소논문집**, 충북대학교 건설기술연구소, Vol. 19, No. 2, pp. 157-

167.
 윤광석 (2004). “하천제방 붕괴 유형분석 및 설계방안.” **물과 미래**, 한국수자원학회, Vol. 37, No. 5, pp. 50-60.
 최정진 (2007). 하천제방의 합리적인 침투방지대책. 석사학위논문, 경북대학교.
 한국건설교통기술평가원 (2004). 하천제방 관련 선진기술개발 최종보고서, R&D/기술혁신15, 건설교통부.
 한국건설교통기술평가원 (2005). 하천 제방 설계기술 - 침투, R&D/03산학연 C01-01, 건설교통부.
 한국건설교통기술평가원 (2006). 제방침투 보강기법 분석, R&D/03산학연 C01-01, 건설교통부, pp. 43-62.
 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준 해설.
 Das, B.M. (2005). Principles of geotechnical engineering. Geo-Slope International Ltd. (2007). Seepage Modeling with SEEP/W 2007. Calgary, Alta., Canada.
 U.S. Army Corps of Engineers (1993). Seepage Analysis and Control for Dams. CECW-EG, EM 1110-2-1901, Washington, D.C.
 U.S. Army Corps of Engineers (2000). Design and Construction of Levees. CECW-EG, EM 1110-2-1913, Washington, D.C.
 國土開發技術研究センター (1998). ドレイン工設計マニュアル.
 國土開發技術研究センター (2002). 河川堤防の構造検討の手引き.

논문번호: 12-013	접수: 2012.02.12
수정일자: 2012.03.08	심사완료: 2012.03.08