Journal of the Korean Geo-Environmental Society
17(7): 5～13. (July, 2016) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI http://dx.doi.org/10.14481/jkges.2016.17.7.5

취약대를 가진 모형제방의 침투거동에 관한 연구

A Study on the Seepage Behavior of Embankment with Weak Zone using Numerical Analysis and Model Test

박 민 철[1] · 임 은 상[†] · 이 석 영[1] · 한 희 수[1]
Mincheol Park · Eunsang Im · Seokyoung Lee · Heuisoo Han

Received: March 7th, 2016; Revised: March 9th, 2016; Accepted: May 30th, 2016

ABSTRACT : This research is focused on the seepage behavior of embankment which had the weak zone with big permeability. The distributed TDR (Time Domain Reflectometer) and point sensors such as settlement gauge, pore water pressuremeter, vertical total stressmeter, and FDR (Frequency Domain Reflectometer) sensor were used to measure the seepage characteristics and embankment behavior. Also, the measured data were compared to the data of 2-D and 3-D numerical analysis. The dimension of model embankment was 7 m length, 5 m width and 1.5 m height, which is composed of fine-grained sands and the water level of embankment was 1.3 m height. The seepage behavior of measuring and numerical analysis were very similar, it means that the proper sensing system can monitor the real-time safety of embankment. The result by 2-D and 3-D numerical analysis showed similar saturation processing, however in case of weak zone, the phreatic lines of 2-D showed faster movement than that of 3-D analysis, and finally they converged.

Keywords : Model embankment, Weak zone, Seepage, Phreatic line, Distributed TDR

요 지 : 본 연구는 투수계수가 큰 취약대가 제방에 존재할 경우의 침투거동에 관한 것이다. 침하계, 간극수압계, 수직 토압계 및 FDR 센서로 구성된 지점형 센서와 분포형 TDR 센서를 이용하여 제방의 침투특성 및 제방거동을 계측하였다. 계측결과들은 2차원 및 3차원 수치해석결과들과 비교·분석되었다. 모형제방은 길이 7m, 폭 5m, 높이 1.5m의 크기이며 제외지 수위는 1.3m인 세립질 모래로 조성된 제방이다. 계측 및 수치해석의 침투거동이 거의 유사하여 적절한 계측시스템으로 제방의 안정성을 실시간 모니터링 할 수 있음을 알 수 있었다. 수치해석의 경우 정상단면에서는 2차원 및 3차원 해석결과가 거의 동일하나, 취약단면을 고려할 경우 2차원 해석의 침윤선이 3차원 결과보다 빠르게 진행된 후 두 결과가 수렴되었다.

주요어 : 모형제방, 취약대, 침투, 침윤선, 분포형 TDR

1. 서 론

하천제방은 하천 구역에 흙으로 축조된 둑을 말하는 것으로써 통산 평균 높이가 0.6m 이상의 것을 의미한다. 하천수를 계획된 하도 내로 국한시켜 하천수가 제내지로 범람하는 것을 방지하고 홍수 소통을 원활하게 하기 위하여 하천의 연장을 따라 제방을 축조하게 된다(Korea Geotechnical Society, 2012). 하천제방의 파괴는 다양한 원인으로 인해 발생되는데 Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(2004)에 의해 조사된 758건의 붕괴사례 중 침식 300건(39.6%), 월류 295건(38.9%), 제체 불안정 87건(11.5%), 구조물에 의한 파괴 76건(10.0%)으로 나타났다. 제방의 침투거동은 제내지와 제외지의 수위차이로 인해 발생되며, 제체 내의 유선이 집중으로 파이핑 등을 유발하여 제방의 파괴에 이를 수 있다. 또한, 일반적으로 정상류 상태일 때보다 홍수나 집중 호우에 의해 제체가 비정상류 상태일 때 붕괴가 일어나므로 비정상류 상태의 침투거동을 파악하는 것이 중요하다(Kim et al., 2014).

Choi(2006)는 제방 현장에서 구한 시료를 대상으로 실내실험을 통해 물리적 특성을 구하고 만수위와 저수위 조건에서 제체가 포화 또는 불포화일 때 등의 대표적인 경우를 산정하여 안전율을 예측하였다. Kwak(2007)은 제방의 단면형상이 제방 뒷비탈 기슭의 이탈동수경사에 미치는 영향을 분석하였으며, 설계 시와 제체 보강 시 파이핑에 대한 안정성 예측이 가능한 침투설계도표를 제시하였다. Yang(2011)은 제방의 모형실험과 수치해석으로 침투에 의한 파괴거동을

1) Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology
† Infrastructure Research Center, K-water Institute (Corresponding Author : esim89@kwater.or.kr)

해석하였다. 모형실험의 침윤선이 수치해석보다 비교적 빨리 정상화되었으며 최종 정상상태에서의 침윤선은 거의 일치하는 것으로 판단하였다. 하지만 수치해석만으로 지반의 비균질, 비등방성 등의 다양한 원인으로 인해 하천제방의 침투거동을 정확히 해석하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하고자 하천제방의 침투거동을 측정하기 위한 계측시스템에 대해 연구되고 있다. 주로 제체의 침투거동과 직접적으로 연관된 함수비와 간극수압을 측정하였다. 하지만 한 지점의 물리량만을 측정하는 지점형 센서로는 제방의 침투거동을 정확히 파악하는 데에 한계가 있으며 최근에는 분포형 센서에 대한 연구가 수행되고 있다. 분포형 센서에는 빛을 이용하는 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer) 방식과 전기펄스를 이용하는 TDR(Time Domain Reflectometer) 방식으로 나뉜다. 이 중 후자인 TDR 방식은 함수비와 유전상수와의 직접적인 관계를 이용하므로 정확성이 높고 OTDR 방식에 비해 계측선의 재료가 금속이므로 내구성이 높은 장점이 있다(Park et al., 2012).

분포형 TDR 센서를 이용한 제방 실험은 대표적으로 Worsching et al.(2006)과 Scheuermann et al.(2009), Park et al.(2012), Kim et al.(2014)에 의해 수행되었다. 이들은 함수비 측정에 대한 분포형 TDR 센서의 정확도와 측정된 TDR 데이터의 해석기법에 대한 연구를 수행하였다. 설계기준을 만족하는 양질의 토사로 축조된 모형 제방을 대상으로 하여 제외지의 수위변화에 따른 침투거동을 평가하였다. 분포형 TDR 센서의 검증은 수두값을 측정하는 피에조미터나 간극수압계를 이용하였다.

하천제방의 파이핑은 제방 내 침투에너지의 집중으로 발생하므로 본 연구는 투수계수가 큰 취약대가 내부에 설치된 모형제방을 이용하여 제방 내 침투에너지의 제어, 파이핑 유발 후 침투거동 및 제체의 안정성 등을 평가하고자 하였다. 모형제방 내 침투거동을 계측하기 위하여 본 연구 역시 최근 사용이 급증하고 있는 분포형 TDR 센서를 이용하였다(Worsching et al., 2006; Scheuermann et al., 2009; Park et al., 2012). 지점형 센서인 FDR(Frequency Domain Reflectometer) 센서를 설치하여 해당 지점의 TDR 센서의 계측값을 비교·검증하였다. 또한, 계측결과에 따른 제방 내 침투거동은 수치해석 결과와 비교·검토되었다. 2차원 및 3차원 수치해석을 수행한 후 모형제방 실험결과와 비교하여 모형제방의 침투거동과 제체의 비탈면 안정성을 평가하였다.

2. 모형제방 및 계측기기

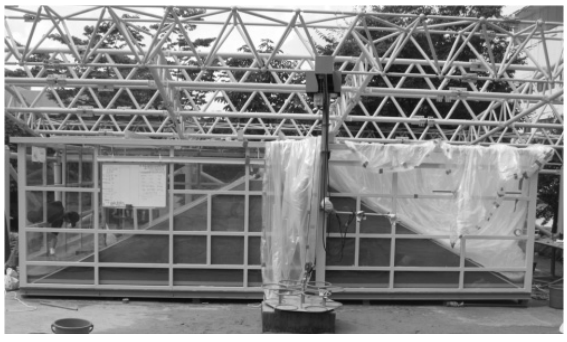
본 모형제방 실험은 한국수자원공사 K-water 연구원과 대우건설기술연구소에 의해서 수행되었다. 모형제방은 길이 7.0m, 폭 5.0m, 높이 1.5m의 크기를 가지며 제외지 수위는 1.3m이다(Fig. 1).

실험에 사용된 토사는 침투에 취약한 하상재료인 세립질 모래를 이용하였으며 통일분류법상 SP이다. 제방의 중앙단면에는 자갈과 모래를 혼재하여 투수계수가 약 4배 큰 취약대를 설치하였다. 실험과정은 제외지측 사면에 비닐막을 설치하고 1.3m의 수위를 조성한 후 비닐막을 제거하여 제방 제체로의 침투를 발생시켰다(K-water Institute, 2011).

실제 하천제방의 수위는 점진적인 변화를 나타내지만 본 실험에서는 제외지의 1.3m에서 동시에 부하하였다. 이는 점진적으로 수위가 변화되는 것보다 동시에 수위를 부하하는 것이 제방의 침투거동을 급격하게 유발하기 때문이다. 결과적으로 급격한 횡 방향 침투거동으로 인해 취약부로의 침투수가 집중되어 제방 붕괴를 유발시키기 위함이다.

모형실험에는 지점형 센서와 분포형 센서를 이용하였다. 지점형 센서로는 침하계, 수직 토압계, 간극수압계와 FDR 센서가 있으며 분포형 센서로는 TDR 센서를 이용하였다. 침하계와 수직 토압계, 간극수압계는 취약대에 2개소, 정상단면에 2개소로 총 4개소를 설치하였다. FDR 센서를 취약대에 25개(높이 0.35m, 0.55m, 0.80m, 1.20m)를 설치하였다. 분포형 TDR 센서는 취약단면과 비취약단면에 각 3개소씩

(a) General view



(b) Side view

Fig. 1. Model embankment (K-water Institute, 2011)

총 6개소(높이 0.35m, 0.80m, 1.20m)를 설치하였다(Fig. 2).

FDR 센서로는 습윤율의 분포를 산정하였으며 분포형 TDR 센서로는 침윤선을 산정하였다. 실험결과는 2차원과 3차원 수치해석 결과와 비교·검토하였다.

3. 실험결과

Fig. 3은 제방 뒷비탈의 변화를 나타낸 것이다. 침투 30분 경과 후에는 뒷비탈 하부에 포화대가 나타났으며, 60분 경과 후에는 뒷비탈에 파이핑에 의한 비탈면 파괴가 발생되었다. Fig. 3(b)와 같이 120분 경과 후에는 뒷비탈의 중앙 부분까지 포화되어 파이핑이 발생하는 것으로 나타났다.

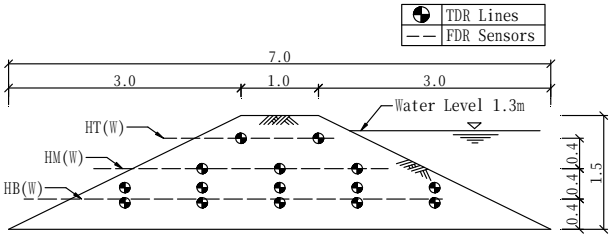


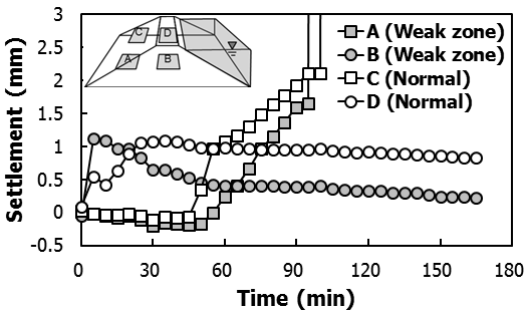
Fig. 2. Side view of embankment model and sensor arrangement

(a) 60 min

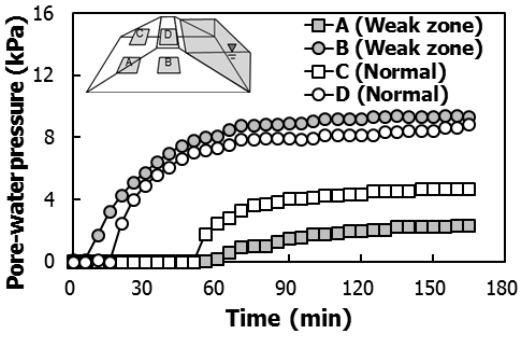
(b) 120 min

Fig. 3. Variation of back slope

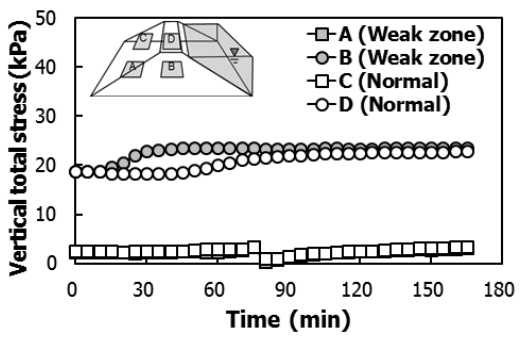
Fig. 4는 지점형 센서인 침하계와 간극수압계, 수직 토압계의 계측결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 침하계는 제외지에 설치된 A와 C 센서의 경우 약 60분 경과 후부터 비탈면 활동으로 인해 과도한 변위가 발생되어 측정이 불가능하였다. 제체의 단면 중앙부에 위치한 B와 D 센서의 경우 약 1mm 정도의 미소한 변위가 발생된 후 특이한 거동을 나타내지 않았다. Fig. 4(b)는 간극수압계의 계측결과이다. 제체의 단면 중앙부에 위치한 B 센서와 D 센서의 경우 취약대에 위치한 B 센서가 9.4kPa로 D 센서의 8.5kPa에 비해 약 1.0kPa 높게 나타났다. 뒷비탈면에 위치한 A 센서와 C 센서의 경우 정상단면에 위치한 C 센서가 4.7kPa로 취약대의 A 센서에 비해 약 2.3kPa 높게 나타났다. Fig. 4(c)는 수직 토압계의 계측결과이다. 제체의 단면 중앙부에 위치한 B 센서



(a) Settlement



(b) Pore-water pressure



(c) Vertical total stress

Fig. 4. Result of point sensors

와 D 센서의 경우에는 약 20kPa의 토압이 작용되었다. 뒷비탈면에 위치한 A와 C 센서는 특이한 거동을 나타내지 않다가 침투 후 약 80분 경과 시에 비탈면의 활동이 발생되어 토압이 약 3.0kPa 감소되었다.

분포형 TDR 센서는 전기펄스의 파형으로 계측데이터가 획득되며, 제방의 포화 영역과 불포화 영역을 구분할 수 있다. 분포형 TDR 센서를 이용하여 침윤선을 산정하는 자세한 해석과정은 Park et al.(2012)의 논문에 기술되어있다.

Fig. 5는 분포형 TDR 센서에 의한 침윤선을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)와 같이 30분 경과 시에는 취약대에서 침투거동이 빠르게 일어나는 것으로 나타났다. 60분 경과 후에는 취약대와 정상단면의 차이가 발생되었지만 30분 경과 시보다는 감소되었다(Fig. 5(b)). 120분 경과 시에는 취약대와 정상단면의 침윤선이 거의 동일하게 나타났다(Fig. 5(c)).

분포형 TDR 센서를 이용한 본 실험의 침투거동 계측결과 역시 기존의 분포형 TDR 및 FDR 센서를 이용한 제방의 침투거동 계측결과와 거의 유사하였다. 이는 분포형 TDR 센서의 계측원리가 함수비와 유전상수와의 직접적인 상호관계를 이용하기 때문이다(Topp et al., 1980).

또한, 25개의 FDR 센서로 측정한 습윤율을 이용하여 모형제방 내 침투거동을 분석하였다(Fig. 6). Fig. 6에서 보는 바와 같이 하얀색으로 표시되는 포화대가 시간에 따라 제체 내에서 이동되는 현상을 확인할 수 있다. 포화대의 시간대별 이동현상을 분포형 TDR 센서에 의한 Fig. 5와 비교하면 FDR 센서에 의해서도 침투거동이 거의 유사하게 계측되었음을 볼 수 있다.

Fig. 7은 FDR 센서로 측정한 제방의 온도분포를 나타낸 것이다. 분포형 TDR 센서를 이용한 Fig. 5의 침윤선 변화와 FDR 센서를 이용한 Fig. 6의 습윤율 분포와 달리 제방 내의

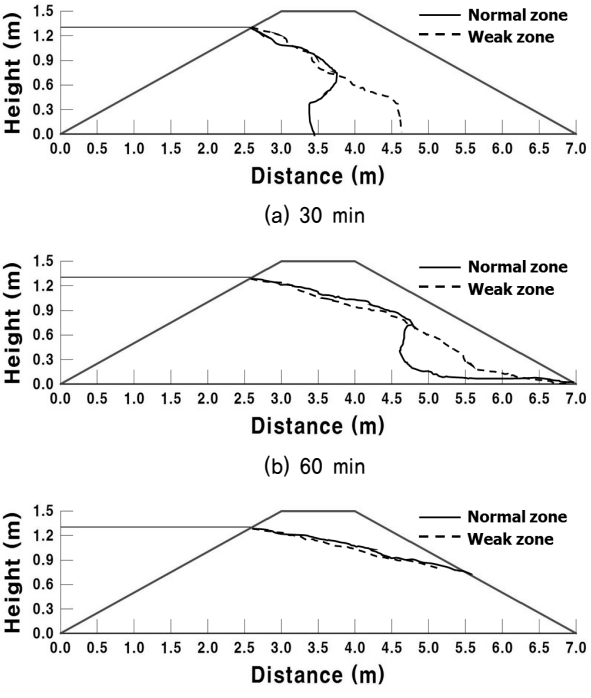


Fig. 5. Phreatic lines by TDR sensing

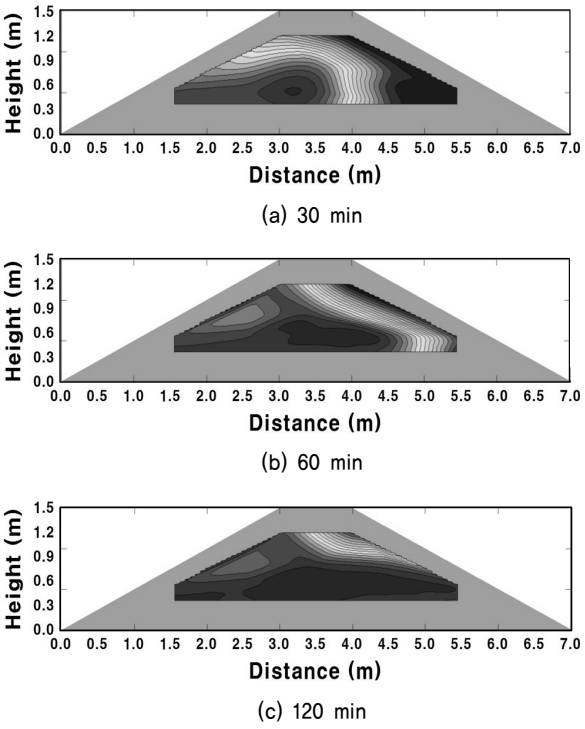


Fig. 6. Distribution of saturation degree by FDR sensors

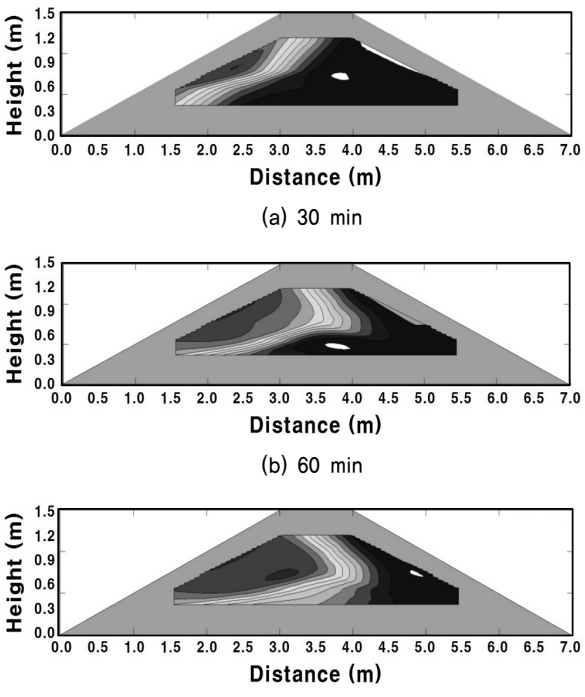


Fig. 7. Temperature distribution by FDR sensors

온도변화는 거동이 상당히 느리게 발생하는 것을 알 수 있다.

이는 열전달 거동이 침투거동보다 상당한 시간을 요하기 때문으로 열전달 거동으로 침투거동을 해석하는 데 한계가 있다는 것을 의미한다. 즉 간극수의 침투거동은 간극수를 직접적으로 측정할 수 있는 계측시스템이 필요하며, 온도를 통한 침투거동을 해석하는 간접적 방법은 적용하기 곤란하다. 또한, 모든 물리량을 측정하는 계측시스템은 측정하는 물리량을 직접적으로 측정해야 계측시스템으로 사용될 수 있다는 것을 의미한다. 결과적으로 분포형 TDR 센서와 지점형 FDR 센서는 함수비와 전기적 신호의 변화를 이용하는 직접적인 방법으로 하천제방의 침투거동을 측정하는 데에 적합하다. 이는 앞서 언급된 문헌과 동일한 결과이다.

4. 수치해석

4.1 해석조건

제방의 침투해석 모델은 정상 침투해석과 비정상 침투해석으로 구분할 수 있다. 모형실험에서는 제외지측에 수위를 재현하고 시간경과에 따라 계측을 수행하였으므로 침투해석 역시 이를 재현하고자 비정상 침투해석을 수행하였다. 침투해석의 지배방정식은 Eq. (1)과 같다.

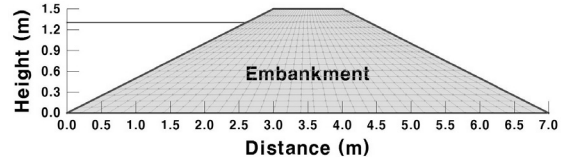
$$\frac{\partial h}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial h}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial h}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)+q_0=\alpha\cdot S_s\cdot\frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, x, y, z는 좌표축, k_x, k_y, k_z는 각 좌표축 방향의 투수계수, h는 전수두(total head), q_0는 비유량(specific flow rate), S_s는 비저류계수(specific storage coefficient), α는 포화계수(coefficient of saturation)이다.

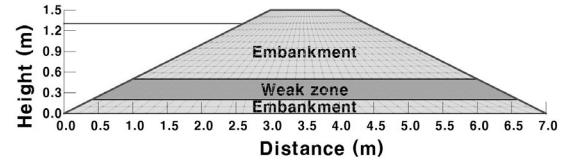
본 연구에서는 2차원과 3차원 침투해석을 수행하였다. 2차원 해석은 Geostudio사의 SEEP/W를 이용하였으며 SLOPE/W를 이용하여 한계평형해석으로 비탈면 안전율을 산정하였다. 3차원 해석은 MIDAS사의 GTS NX 버전을 이용하였으며 지배방정식과 해석조건은 SEEP/W와 동일하다.

침투해석을 수행하기 위해 Fig. 8과 같이 요소망을 생성하였다. 경계조건은 제방의 뒷비탈에서는 지하수가 유출될 수 있도록 설정하였으며 앞비탈에 1.3m의 압력수두를 설정하였다. Fig. 8(a)는 정상단면이며 Fig. 8(b)는 자갈과 모래를 섞은 취약대 단면의 요소망이다. Fig. 8(c)는 3차원 해석의 요소망이다. 해석조건 및 경계조건은 2차원 해석과 동일하다.

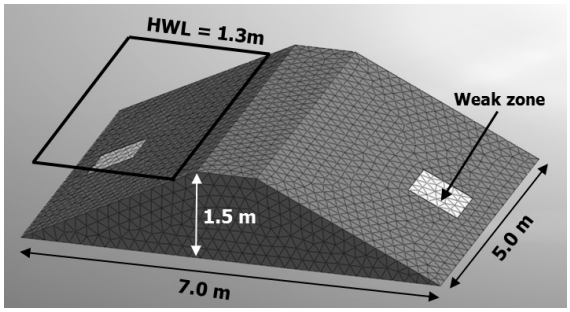
함수특성곡선(SWRC, Soil Water Retention Curve)은



(a) Normal section



(b) Weak section



(c) 3D analysis

Fig. 8. Geometry of seepage analysis

Fredlund-Xing이 제안한 Eq. (2)을 이용하였다.

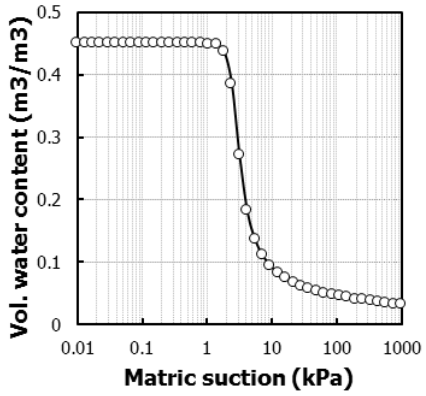
$$\theta=C_{(\Psi)}\left[\frac{1}{\ln\left(e+\left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right)}\right]^m \quad (2)$$

여기서, θ_w는 체적함수비, C_Ψ는 보정계수, θ_s는 포화체적함수비, Ψ는 모관흡수력, e는 공극비, 3개의 곡선 맞춤 변수이다. 계수 a는 공기함입치(AEV, Air Entry Value)와 관계를 갖는 계수로서 변곡점에서의 흡입력(Suction)에 해당하는 계수이며, n은 곡선 직선부의 기울기이고, m은 높은 흡인력단계(잔류함수비)에서의 그래프 모양에 관계된다. γ_t는 전체단위중량(kN/m^3), c'는 점착력(kPa), ϕ'는 내부마찰각(°)이다.

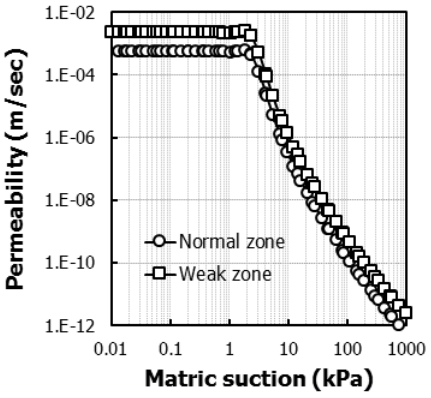
Fig. 9와 Table 1은 수치해석에 적용된 불포화 물성을 나타낸 것이다. 포화투수계수는 정수위 투수시험에 의해 산정되었으며, 취약대가 정상단면의 포화투수계수보다 약 4배 정도 크게 나타났다.

4.2 해석결과

2차원 및 3차원 수치해석을 수행하여 모형제방 내 침투거동을 분석하였다. 정상단면 및 취약대 단면을 구분하여



(a) Soil water retention curve



(b) Permeability

Fig. 9. Unsaturated soil properties of model embankment

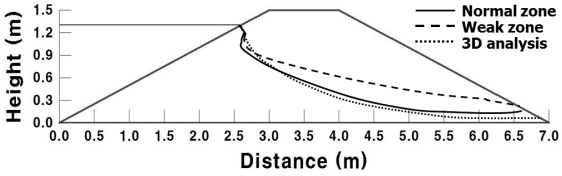
Table 1. Soil properties applied to numerical analysis

Analysis	Parameter	Sand	Weak zone
Seepage analysis	θ_s (m^3/m^3)	0.45	0.50
	θ_r (m^3/m^3)	0.02	0.02
	k_s (m/s)	5.55E-04	2.22E-03
	a	2.5	
	n	7	
	m	0.7	
Slope analysis	γ_t (kN/m^3)	18.9	18.9
	c' (kPa)	0.5	0.5
	ϕ' (°)	30.0	30.0

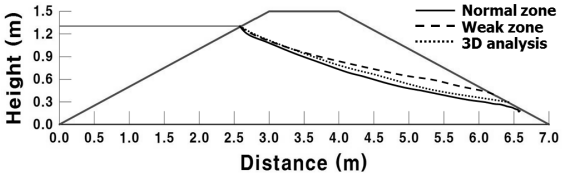
해석을 수행하여 침윤선, 동수경사 및 유출속도 등을 비교·분석하였다.

Fig. 10은 시간경과에 따른 침윤선을 비교한 것이다. Fig. 10(a)와 같이 30분 경과 후에는 2차원 침투해석에서의 취약대 단면에서 거동이 가장 크게 나타났으며, 정상단면과 3차원 해석에서는 거의 동일한 결과가 나타났다. 60분 경과 후에는 그 격차가 감소되었으며(Fig. 10(b)), 120분 경과 후에는 2차원 해석과 3차원 해석에서 거의 동일한 침윤선을 나타내었다(Fig. 10(c)).

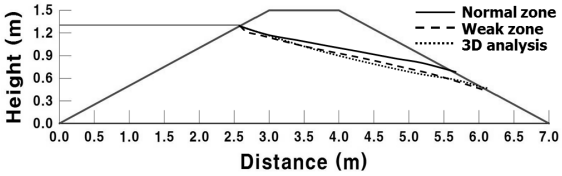
Korea Geotechnical Society(2009)는 Eq. (3)과 같이 파이



(a) 30 min



(b) 60 min



(c) 120 min

Fig. 10. Phreatic lines as time goes by

핑에 대한 한계동수경사를 제시하였다. 침투해석에서 산정된 유출 동수경사가 한계동수경사의 1/2 이하가 되도록 해야 하며 이에 대한 안전율을 산정하여야 한다.

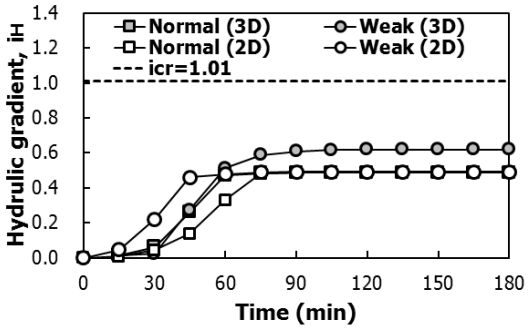
$$i_c = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = (1 - n)(G_s - 1) \tag{3}$$

여기서, i_c는 한계동수경사, γ_{sub}는 토립자의 수중단위 중량(kN/m^3), γ_w는 물의 단위체적 중량(kN/m^3), G_s는 토립자의 비중, e는 흙의 간극비, n은 흙의 간극율이다. 실험에 적용된 세립질 모래의 비중은 2.65이며 간극비는 0.5이다. 따라서 한계동수경사는 1.10이다.

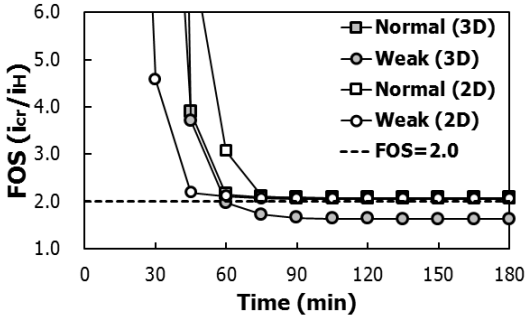
Fig. 11은 시간경과에 따른 동수경사와 안전율을 나타낸 것이다. Fig. 11(a)와 같이 2차원 해석에서는 취약대 단면에서의 동수경사가 먼저 증가되었으며, 0.49로 수렴되었다. 하지만 3차원 해석에서는 취약대 단면에서 동수경사가 0.62로 더 크게 나타났다. 이는 3차원에서는 취약대로 y 방향으로 침투가 추가적으로 발생되기 때문이다. 정상단면에서는 2차원과 3차원 해석결과가 동일하게 나타났다.

Fig. 11(b)는 한계동수경사와 산정된 유출동수경사에 의한 안전율을 보여준다. 3차원 해석에서 취약대 단면에서만 설계기준에서 제시된 안전율 2.0보다 작은 값이 산정되었다.

Korea Water Resources Association(2009)에서는 흙 입자의 입경에 따른 한계침투 유속을 Eq. (4)와 같이 제시하였다. 침투 유속이 한계침투 유속을 넘으면 파이핑이 발생한



(a) Hydraulic gradient



(b) Factor of safety

Fig. 11. Hydraulic gradient and factor of safety as time goes by

Table 2. Critical velocity according to diameters (Korea Water Resources Association, 2009)

No.	Particle size (mm)	Critical velocity (cm/sec)
1	4.0～4.8	0.200
2	2.8～3.4	0.170
3	1.0～1.2	0.100
4	0.7～0.85	0.085
5	0.4～0.7	0.070
6	0.25～0.5	0.042
7	0.11～0.25	0.035
8	0.075～0.11	0.025
9	0.044～0.075	0.020

다고 본다. 실제 현장 토사는 다양한 입경의 토사가 혼합되어 있으므로 입경의 기준을 정하기 어렵다. 따라서 침투해석에서 얻어진 침투속도가 Table 2에 제시된 입경에 대한 한계 유속의 1/100 이하가 되도록 하여야 한다.

$$V = \sqrt{\frac{Wg}{A\gamma_w}} \tag{4}$$

V는 침투 유속(m/sec), W는 토립자의 수중중량(kN), A는 물의 흐름을 받는 토립자의 면적(m^2), γ_w는 물의 단위체적 중량(kN/m^3), g는 중력가속도(m/sec^2)이다. 본 연구에서 사용된 세립질 모래는 입도 분포곡선으로 분류하면 통일분류법상 SP이며, 입경은 0.4～0.7mm에 분포한다. 따라서 한계 유속은 0.07cm/sec이다.

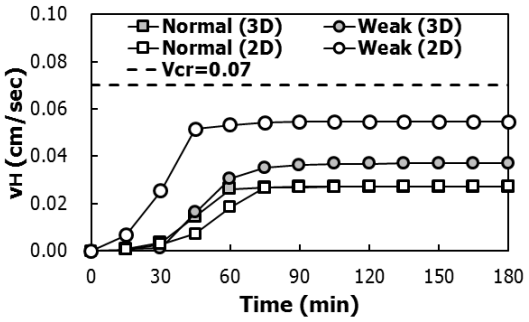


Fig. 12. Seepage velocity as time goes by

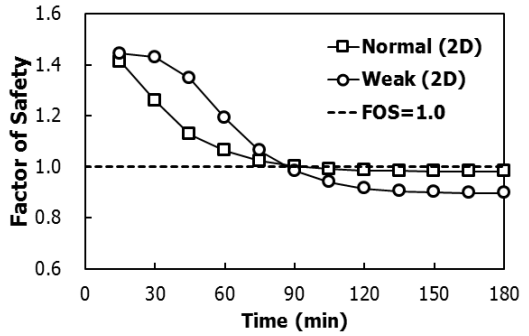


Fig. 13. Slope safety factor as time goes by

Fig. 12는 시간경과에 따른 침투속도를 나타낸 것이다. 정상단면에서는 2차원 해석과 3차원 해석에서 동일한 0.0272 cm/sec로 산정되었지만, 취약대 단면에서는 2차원 해석에서 0.0546cm/sec로 3차원 해석의 0.0368cm/sec보다 매우 크게 산정되었다.

침투해석과 연계하여 비탈면 안정해석을 수행하였으며, 한계평형해석으로 안전율을 산정하였다(Fig. 13). 해석결과 약 90분 후에 안전율 1.0 이하로 비탈면 파괴가 발생하는 것으로 나타났다.

5. 실험과 수치해석의 결과비교

모형실험과 수치해석의 침윤선 결과를 비교하였으며, 정상단면에서 실험과 침투해석의 침윤선을 비교한 결과는 Fig. 14에 도시하였다. Fig. 14(a)와 같이 침투 30분 경과 후에는 제체 중앙부에서는 모형제방의 침투거동이 더 빠르게 발생되었으며 제체 하부에서는 수치해석의 결과가 더 빠르게 발생되었다. Fig. 14(b)와 같이 침투 60분 경과 후에는 그 격차가 감소되었으며, 120분 경과 후에는 거의 동일한 값을 나타내었다(Fig. 14(c)).

Fig. 15는 취약대 단면에서 실험과 침투해석의 침윤선을 비교한 것으로 Fig. 15(a)와 같이 침투 30분 경과 후에는 정

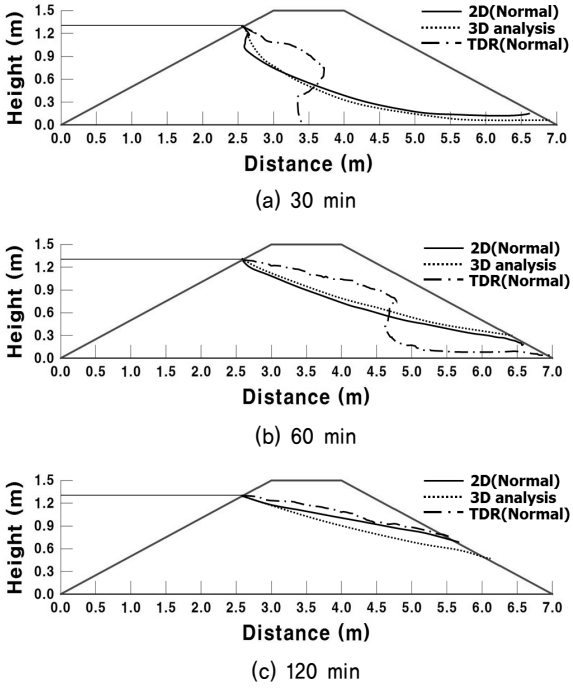


Fig. 14. Phreatic-line comparison of normal section from numerical analysis and experiment

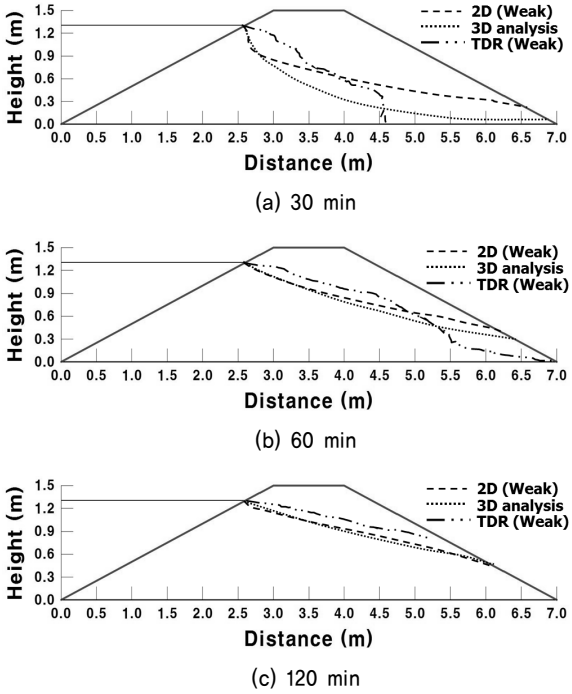


Fig. 15. Phreatic-line comparison of weak zone from numerical analysis and experiment

상단면과 동일하게 제체 중앙부에서는 모형제방의 침투거동이 더 빠르게 발생되었으며 제체 하부에서는 수치해석의 결과가 더 빠르게 발생되었다. 침투 60분 경과 후에는 취약대의 침투거동이 빠르게 발생되어 수치해석과의 차이가 작게 감소되었다(Fig. 14(b)). 120분 경과 후에는 거의 동일한

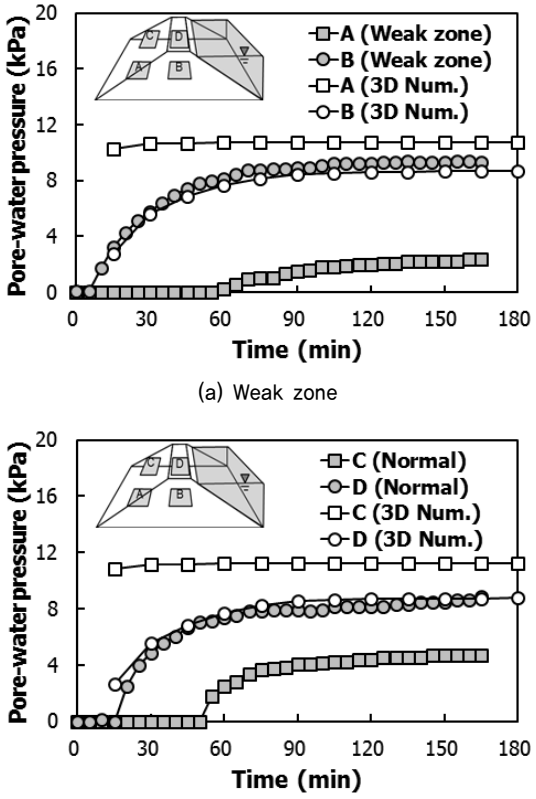


Fig. 16. Pore water pressure comparison from experiment and numerical analysis

값을 나타내었다(Fig. 14(c)).

모형실험과 수치해석의 침윤선을 비교하면 침투 초기(30분 경과)에는 제체 상부에서 실험결과가 수치해석보다 빠른 침투거동을 나타내었다. 이는 모형제방의 세립질 모래로 축조되면서 동일한 다짐을 수행하였지만, 상대적으로 하부보다 상부의 다짐도가 작아 침투거동이 빨리 발생되었다. 하지만 수치해석에서는 제체 단면은 균일한 물성치로 적용되므로 실험결과와 차이가 발생되었다.

Fig. 16은 실험과 침투해석의 간극수압을 비교한 것이다. Fig. 16(a)는 취약대 단면의 결과로 제체 중앙부의 B 센서의 결과는 실험과 해석에서 거의 유사하게 나타났다. 하지만 제방의 뒷비탈에서는 실험과 해석 결과가 큰 차이를 나타내었다. Fig. 16(b)는 정상단면을 나타낸 것이다. 취약대 단면과 동일한 경향을 나타내었다.

6. 결 론

본 논문에서는 취약대를 가진 모형제방의 침투거동에 대해 연구하였다. 모형제방의 침투실험을 통해 파이핑을 발생시켰으며 지점형 센서와 분포형 센서로 침투거동을 측정하

였다. 또한, 2차원과 3차원 수치해석을 통해 이를 비교·검토하였다. 본 연구의 결론을 정리하면 아래와 같다.

(1) 취약대를 가진 모형제방은 제외지부터 시작된 침투에 의해 약 30분 후부터 뒷비탈 하부에 포화대가 나타났으며, 60분 후 뒷비탈에 파이핑이 발생되어 120분 후 뒷비탈 중앙 부분까지 포화되어 파이핑이 발생되었다.
(2) 침하계와 수직 토압계에서는 명확한 거동이 나타나지 않았으며, 뒷비탈에 설치된 침하계는 약 60분 경과 후 측정이 불가능하였다. 수직 토압계측 자료는 비탈면 활동으로 인해 조금 감소되었지만 추후 특별한 거동을 나타내지 않았다. 이들 센서로는 침투로 인한 제방의 변위나 토압변화를 측정하기 어려운 것으로 나타났다.
(3) 온도와 습윤율을 측정할 수 있는 FDR 센서로 침투거동을 파악하기에는 습윤율을 이용하는 것이 적절하다. 또한, 제방의 가로 방향으로 설치된 분포형 TDR 센서는 침윤선 산정이 가능하며, FDR 센서에 의한 습윤거동과 유사한 거동을 나타내었다.
(4) 하천제방의 침투거동을 측정하기 위해서는 간극수를 직접적으로 측정하는 계측시스템이 필요하다. 함수비와 전기적 신호의 변화를 직접적으로 이용하는 TDR 센서와 FDR 센서가 침투거동 측정에 유리한 것으로 나타났다.
(5) 시간경과에 따른 2차원 및 3차원 수치해석의 침투거동은 모형제방의 계측결과와 상당히 유사하였다. 침투 초기에는 투수계수가 큰 취약단면에서 큰 동수경사 및 빠른 침윤선의 이동현상을 확인할 수 있었으나, 시간경과에 따라 동수경사 및 침윤선이 정상단면 및 취약단면에서 모두 수렴함을 확인할 수 있었다.
(6) 정상단면 침투해석의 경우 침윤선의 이동과정은 2차원 및 3차원 침투해석에서 유사한 진행과정을 보였다. 취약단면의 경우 초기에 2차원 해석의 침윤선이 3차원 결과보다 빠르게 진행된 후 최종적으로 거의 같이 수렴되었다.

분포형 TDR 센서와 다수의 FDR 센서를 이용하여 계측된 제방의 침투거동은 충분한 신뢰성이 있음을 수치해석을 통하여 확인할 수 있어 적절한 계측시스템으로 제방의 안정성을 모니터링할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 제방 내부에 취약대가 존재한다면 2차원 단면해석을 수행할 경우 정상단면 및 취약단면으로 구분하여 해석해야 할 뿐 아니라 두 단면 사이의 지하수 흐름을 고려한 침투해석을 할 수 없다. 3차원 침투해석을 하면 제방의 구성재료의 다양성에 따른 침투거동을 보다 명확히 분석할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(15SCIP-B065985-03)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Choi, Y. H. (2006), Case study on the stability interpretation of embankments, Master's thesis, Chonnam National University, pp. 1~55.
2. Kim, J. M., Park, M. C., Jo, W. B. and Han, H. S. (2014), Seepage analysis of weathered granite model embankment using TDR sensor, Journal of Korea Geotechnical Society, Vol. 30, No. 3, pp. 17~28.
3. Korea Geotechnical Society (2009), Structural design criteria based commentary, Korea Geotechnical Society, pp. 16~25 (in Korean).
4. Korea Geotechnical Society (2012), Dam and embankment design and construction safety management technology, Goomibook, pp. 391~573 (in Korean).
5. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2004), The final report of the river embankment related advanced technology development, pp. 23~31, pp. 68~78 (in Korean).
6. Korea Water Resources Association (2009), Design criteria rivers Commentary, pp. 354~371 (in Korean).
7. Kwak, H. S. (2007), Influence of embankment shape on exit gradients in levee, Master's thesis, Kyunghee University, pp. 1~63.
8. K-water Institute (2011), Installation of embankment leakage monitoring system, K-water, pp. 315~361 (in Korean).
9. Park, M. C., Lee, J. W., Kim, Y. S. and Han, H. S. (2012), Seepage analysis of large-Scale embankment model by revised TDR sensor, Journal of Korea Geotechnical Society, Vol. 28, No. 11, pp. 53~67.
10. Scheuermann, A., Huebner, C., Schlaeger, S. and Wagner, N. (2009), Spatial time domain reflectometry and its application for the measurement of water content distributions along flat ribbon cables in a full-scale levee model, Water Resources Research, Vol. 45, pp. 1~15.
11. Topp, G. C., Davis, J. C. and Annan, A. P. (1980), Electromanetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines, Water Resources Research, Vol. 16, No. 3, pp. 574~582.
12. Worsching, H., Becker, R., Schlaeger, S., Bieberstein, A. and Kudella, P. (2006), Spatial-TDR moisture measurement in a large scale levee model made of loamy soil material, Proceed TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA, Sept. 2006, Paper ID 33, pp. 1~15.
13. Yang, M. Y. (2011), Analyses on infiltration and failure of levees with numerical models and lab.experiments, Master's thesis, Dongeui University, pp. 1~47.