분포형 TDR센서를 이용한 화강풍화토 대형모형제방의 침투거동 해석

Seepage Analysis of Weathered Granite Model Embankment Using TDR Sensor

김 진 만¹ Kim, Jin-Man

박 민 철² Park, Min-Cheol

조 원 범³ Jo, Won-Beom

한 희 수⁴ Han, Heui-Soo

Abstract

In this study, the seepage behavior has been analyzed, which is the most important in determining the stability of the embankment. Large-scale embankment of weathered granite has been installed and TDR (time domain reflectory) sensors were used to detect the seepage lines. The TDR graphs could be separated into 3 sections, which are initial, unsaturated and saturated zones. TDR sensor can detect seepage line more easily than point sensor without analysis. Comparisons of the results of numerical analyses and the TDR sensors showed differences at water level rising condition, and then Comparisons of the results generally showed good agreement at another condition.

요 지

본 연구에서는 제방의 안정성 판단에 가장 중요한 침투거동을 파악하기 위하여 대형모형제방 실험을 수행하였다. 화강풍화토로 대형모형제방을 축조하고 분포형 TDR센서를 설치하여 침투거동을 파악하였다. TDR그래프(전기적 파형)는 3단계의 직선구간으로 간략화하여 나타낼 수 있으며 상부부터 건조 또는 초기영역, 중간부의 침투에 의한 불포화영역, 하부는 침투에 의한 포화영역으로 나타난다. 이를 이용하면 별도의 정량화 과정을 거치지 않고도 지점형 센서에 비해 제체 내의 침윤선을 쉽게 파악할 수 있다. 분포형 TDR센서에 의한 침윤선과 수치해석 결과와 비교하면, 초기에는 TDR센서의 측정 결과와 차이가 있으나 시간이 지날수록 결과가 일치하는 양상을 보여준다.

Keywords : TDR sensor, Sensing line, Embankment, Seepage, Numerical analysis

1. 서 론

제방에서 발생하는 침투거동은 제내지와 제외지의 수두차에 의해 발생되며, 이러한 침투현상으로 인해 유

선이 집중되어 파이핑이 발생된다. 결과적으로 제방 제체의 안정성을 감소시켜 붕괴를 유발시킨다. 또한 일반적으로 정상류 상태일 때보다 홍수나 집중 호우에 의한 비정상류 상태일 때 붕괴가 일어나므로 비정상류 상태

1 정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 선임연구위원 (Member, Senior Research Fellow, Geotechnical Engrg. Research Division, Korea Institute of Construction Technology)

2 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology, Tel: +82-54-478-7618, Fax: +82-54-478-7618, xlage0@naver.com, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 박사후연구원 (Member, Post doc., Geotechnical Engrg. Research Division, Korea Institute of Construction Technology)

4 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

의 침투거동을 파악하는 것이 중요하다. 하지만 비정상류 상태의 침투거동은 시간 변화에 따라 제방 제체의 함수비 및 간극수압의 변화가 급격히 발생된다. 이를 측정하기 위해서는 정확한 함수비 또는 간극수압계가 필요하며, 기존의 지점형 센서로는 이러한 침투거동 현상을 정확히 파악하는데 한계가 있다. 지점형 센서의 단점을 개선하기 위해 최근 분포형 센서에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 분포형 센서에는 빛을 이용하는 OTDR(Optical Time Domain Reflectometry) 방식과 전기펄스를 이용하는 TDR(Time Domain Reflectometry) 방식으로 나뉜다(Park et al., 2012). 본 연구에서는 후자인 TDR 방식을 이용하였다.

초기 TDR(Time Domain Reflectometry)은 통신 분야에서 케이블의 불연속위치를 식별하는 데 사용되었다. 이러한 목적 때문에 TDR의 통신분야에서의 명칭은 케이블 테스터(Cable tester)였다. 흙의 함수비 측정에 활용된 것은 Topp(1980) 등에 의해 연구되었으며, 이후 수자원과 농업 분야에서 지속적인 연구가 이루어졌다. 이들 초기 연구자들은 유전상수(Dielectric constant)와 흙의 함수비(Water content)의 관계를 이용하여 함수비 측정에 활용하고자 하였다. 미국의 경우 TDR센서를 이용하여 현장의 함수비와 다짐도를 측정하는 기준을 제시하였으며 이에 맞는 TDR장비들이 상용화되어있다(ASTM D6780). 최근 들어 교량기초 하부의 세굴을 측정하기 위한 연구(Xinbao Yu, 2009; Dowding and Pierce, 1994) 등이 활발히 진행 중이다. 하지만, 이들 연구 및 상용화된 TDR센서는 지점형 TDR센서이며 타센서에 비해 정확도와 활용성이 높지만 지점형 센서의 한계를 벗어나지 못하는 단점이 있다(Park et al., 2012). 함수비 측정을 위한 분포형 TDR센서 연구는 Kim et al.(2011)에 의해 수행되었으며, 제방 함수비 및 지하수위 파악에 분포형 TDR센서를 활용하였다.

제방의 침투거동을 파악하기 위해 분포형 TDR센서가 적용된 사례는 국외에서는 Worsching et al.(2006)과 Scheuermann et al.(2009)이 있으며 국내에서는 Park et al.(2012)이 있다. Fig. 1(a)는 Worsching et al.(2006)이 제방 모니터링을 위하여 사용한 폴리에틸렌(PE)으로 코팅된 3-core flat-ribbon 케이블을 보여준다. 이 케이블은 독일 IMCR(Insitute for Meteorology and Climate Research) 연구소가 개발 및 특허를 등록하였다. 양방향 측정을 위하여 센서라인의 양끝은 두 가닥의 전선에 의해서 조정되는 고주파 스위치가 제공되며 TDR신호의 입력도

선(Lead wire)은 50Ω-Loss의 동축케이블을 사용하였다. Fig. 1(b)는 모형제방 실험 전경을 나타낸 것이며 독일 Karlsruhe 대학 Theodor-Rehbock-Laboratory(TRL) 내, 경사 비탈면 1 : 2.5, 둑마루 폭 1m, 높이 1.4m, 저판 폭 8m, 둑마루 연장 약 2.2m 등으로 제작되었다. 이때, 실험용 외벽은 경계면을 따라 물길을 최소화하기 위하여 약 2° 경사를 주었다. 수조는 각 제방 모델의 습윤면 상류에서 수위를 조절하도록 되어 있다. 제체는 수두 측정을 위한 압력계, 모세관현상 측정을 위한 인장력계, 흙의 전단강도 측정을 위한 베인시험 등과 함수비를 측정하기 위한 28~200cm 길이의 절연된 Flat-ribbon 케이블로 연결된 20개의 TDR 센서가 매설되었다. 센서는 단면에 대해 수직으로 12개, 수평방향으로 8개씩 매설하였다.

Fig. 1(c)는 Scheuermann et al.(2009)이 제작한 TDR 계측선이며 Flat-ribbon 케이블을 제작하였으며 폴리에틸렌(PE)으로 피복된 3개의 구리선으로 구성되어 있다. Flat-ribbon 케이블의 장점은 파의 진행에 있어서 전기 전도도의 영향을 감소시킬 수 있다는 점이다. 이러한 장점은 Flat-ribbon 케이블의 길이를 40m까지도 연장시킬 수 있게 한다. Fig. 1(d)는 실험용 모형으로 독일 Karlsruhe 대학 내 Federal Waterways and Research Institute(FWRI)에 설치되었으며 직경 0.2~2.0mm의 균질한 모래를 이용하여 간극률 37%로 축조되었다. 비탈면 경사는 제외지 측 1:2.0, 제내지측 1 : 2.25로 하였으며 20cm정도 복토하였다. 간극수압을 측정하기 위하여 피에조미터가 설치되었으며 1~3m 길이의 12개의 Flat-ribbon 케이블이 설치되었다.

Fig. 1(e)는 Park et al.(2012)이 열수축 튜브와 Flexible flat 케이블을 이용하여 제작한 함수비측정용 TDR계측선을 나타낸 것이다. Flexible flat형태로 제작하여 현장 제방 및 사면에 설치할 경우 운반이 용이하고 현장 설치 시 다른 재료와의 결합이 가능한 장점이 있다. Fig. 1(f)는 실험에 사용된 대형토조를 나타낸 것이며 길이 7m, 폭 5m, 높이 2m이며, 여기에 사면경사 1 : 2로 높이 1.2m의 제방을 축조하였으며 TDR계측선은 수평방향으로 총 6개소 설치하여 제방의 침투거동을 파악하였다. 이들 모두 유전상수와 함수비와의 직접적인 상관관계를 이용하였고, TDR신호의 파형을 역해석하여 제방 내의 함수비 분포를 측정하고 모형제방의 침투거동을 파악하였다.

Park et al.(2012)은 조립질 모래로 모형제방을 축조하

(a) Sensing line (Worsching et al., 2006)

(b) General view (Worsching et al., 2006)

(c) Sensing line (Scheuermann et al., 2009)

(d) General view (Scheuermann et al., 2009)

(e) Sensing line (Park et al., 2012)

(f) General view (Park et al., 2012)

Fig. 1. Cases of the embankment model test using TDR sensor

고 분포형 TDR센서를 이용하여 침투거동을 파악하였다. 일반적인 하천 제방과는 달리 파이핑을 유도하기 위해 침투에 취약한 조립질 모래를 제방 제체의 재료로 사용하였다. 그 결과, 투수계수가 상대적으로 커 침투거동이 빠르게 발생되었고 불포화영역이 상대적으로 작게 분포되었다.

본 연구에서는 Park et al.(2012)에 수행된 모형제방실험과 달리 제방 제체의 재료를 국내에 널리 분포하는 화강풍화토를 이용하였다. 또한, 화강풍화토를 하천설계기준에 제시된 제방 제체의 기준에 맞추어 대형모형 제방을 축조하였다. 분포형 TDR센서는 현장 제방의 설치조건과 동일하게 연직으로 8개소 설치하여 침투거동

을 파악하고자 하였다. 또한, 분포형 TDR센서에 의한 침투거동을 수치해석(SEEP/W)과 비교하였다.

2. TDR센서와 함수비 측정용 TDR계측선

TDR계측 시스템은 250mVolt의 전기펄스를 출력단자에 보낸 후 동일 단자에서 돌아온 반사파를 측정하는 장치로서, TDR센서는 전기펄스를 발생시키고 반사파를 감지하는 역할을 한다. 발생된 전기펄스는 동축케이블을 통해 계측지점까지 노이즈 없이 이동하게 되고 사용자가 원하는 계측재료(Sensing Material)를 따라 이동하며 함수비, 온도차, 변위 등에 의해 그 값이 변하게 된

다. 반사되어온 전기펄스를 TDR센서가 감지하며, 이 감지된 데이터를 TCP/IP통신을 이용하여 컴퓨터에 Spread Sheet형태로 전송하게 되고 TDR소프트웨어로 이를 저장하여 최종적으로 TDR데이터를 획득하게 된다. TDR데이터는 가로축은 전기펄스의 왕복시간(10^{-9} 초, nano-second)으로 나타나고 세로축은 각 지점의 전기펄스 값(mVolt)으로 나타난다(Park et al., 2012).

본 연구에서 사용된 TDR센서는 Hyperlab, inc.에서 생산하는 HL8200USB를 선정하였다. Kim et al.(2011)과 Park et al.(2012)의 연구에서는 TDR센서로 HL8200NET을 사용하였으며 별도의 전원공급이 필요한 단점이 있다. 본 연구에서 사용된 HL8200USB는 USB케이블을 이용하여 데이터 전송과 전원공급이 동시에 가능하므로 계측수행이 많이 간편해진 장점이 있다.

본 연구에서는 Kim et al.(2011)에 의해 개발된 철선을 이용한 TDR계측선과 Park et al.(2012)에 의해 개발된 TDR계측선을 바탕으로 현장적용성과 시공성을 고려하여 TDR계측선을 새롭게 개량하였다. 본 연구에서 사용된 함수비 측정용 TDR계측선은 전기펄스가 흐르는 케이블은 SUS재질의 평각선(FFC, Flexible Flat Cable)을 이용하였고 피복은 PVC재질을 이용하였다. Fig. 2(a)와 같이 평각선 형태로 제작되어 있어 운반 및 현장적용성이 매우 뛰어나고 PVC재질로 피복하여 부식방지 및 내구성을 크게 향상시켰다. 공장 제작된 TDR계측선을 동축케이블(RG58)과 연결하기 위해 납땜하여 함수비

측정용 TDR계측선을 제작하였다(Fig. 2(b)).

3. 대형모형제방의 침투실험

본 연구에서는 Park et al.(2012)에 수행된 대형모형제방 실험과 달리 제방 성토에 많이 쓰이는 화강풍화토로서 경기도 마주시역에서 채취한 실트질 모래(SM)을 이용하였다. 제방 축조에 사용된 화강풍화토의 물성치는 Table 1에 제시하였다.

일반적으로 하천설계기준은 축제재료의 경우 1) 최대 치수 100mm, 2) 투수계수 10^{-3} cm/sec이내, 다짐기준의 경우 일반구간 상대다짐도 90%(A 다짐시험) 관리 등을 권장하고 있다. 본 실험에 사용된 모형제방은 재료의 선정과 다짐규정을 국가규정인 하천설계기준을 고려한 단계별 시공방법으로 축조되었다. 대형모형제방의 크기는 길이 7m, 폭 5m, 높이 2m이며, 사면경사 1 : 2로 높이 1.2m이다. 모형제방은 20cm 높이로 성토 및 다짐시공한 후 현장 다짐시험(모래치환법)을 실시하여 다짐도를 확인하였다(Fig. 3(a)와 (b)). 모형제방에 대한 들밀도 시험결과, 최대 건조단위중량은 16.2~16.4kPa으로 상대다짐도는 92.6~93.7%로 나타났으며, 하천설계기준의 다짐기준을 만족하는 것으로 나타났다.

화강풍화토로 대형모형제방을 축조한 후 함수비 측정용 TDR계측선을 설치하였다. 대형모형제방에 전동 오거를 이용하여 80cm간격으로 독마루 2공, 제내지 3

(a) TDR sensing line

(b) Accessories of TDR sensing line

Fig. 2. TDR sensing line for measuring water content

Table 1. Properties of weathered granite soil

Material	$\gamma_{l\max}$ (kN/m ³)	e	k_s (m/sec)	c (kPa)	ϕ (°)	USCSIndex
Weathered granite soil	17.5	0.41	2.83×10^{-4}	13.2	30.16	SM

공, 제외지 3공 등 총 8공을 천공하였다(Fig. 3(c)). 플라스틱 관의 표면에 함수비 측정용 TDR계측선을 부착하고 시추공에 설치하였다. Park et al.(2012)에 의해 수행된 실험은 TDR계측선을 모형제방을 축조하면서 수평방향으로 설치하였지만 본 연구에서는 현장적용성을

고려하여 모형제방을 설치한 후 연직으로 설치하였다. Fig. 4는 함수비 측정용 TDR계측선이 설치된 대형모형제방의 삼차원 배치도를 나타낸 것이다. 분포형 TDR계측선은 수평으로 0.8m 간격으로 총 8개소 설치하였으며, 센서의 길이는 2.0m이다.

(a) Compaction

(b) Field density test

(c) Augering

(d) General view

Fig. 3. TDR sensor installation and general view of experimental embankment

Fig. 4. 3D-view of a embankment body showing the TDR sensor

제외지의 적용수위조건은 수위상승과 하강시간의 비율(1 : 2)을 고려하였다. 저수위(0m)에서 6시간동안 상승하여 최고수위(1.2m)에 도달하고, 이 후 제체 내의 포화 영역이 최대한 발현하도록 60시간동안 최고수위(1.2m)를 지속시킨 후 12시간동안 수위가 하강하여 저수위(0m)

Fig. 5. Variation of water level

에 도달하도록 하였다. Park et al.(2012)에 의해 수행된 실험은 제내지의 수위변화가 없이 최고수위일 때의 침투거동을 측정하였지만 본 연구에서는 수위상승과 최대수위 유지, 수위하강으로 나누어 분포형 TDR센서로 침투거동을 파악하였다.

4. 분포형 TDR센서에 의한 침투거동

제외지의 수위변화에 따른 침투거동을 분포형 TDR센서를 이용하여 측정하였다. TDR센서의 측정은 제외지의 수위변화에 따라 수위상승과 최고수위 유지, 수위하강으로 나누어 측정하였다. 수위상승 시에는 제외지의 수위 20cm, 40cm, 60cm, 최고수위 120cm일 때 수행하였다(Fig. 7). 최대 수위유지 시에는 시간경과에 따

Fig. 6. TDR raw data of water level rising

Fig. 7. TDR raw data at the maximum water level (1.2 m)

라 24시간, 36시간, 48시간, 최종 60시간일 때 수행하였으며(Fig. 8), 수위하강 시에는 제외지의 수위 100cm, 80cm, 60cm, 40cm, 20cm, 저수위 0cm일 때 수행하였다(Fig. 9).

Fig. 7~9는 분포형 TDR센서의 raw data를 나타낸 것이다. 세로축은 전기펄스의 왕복시간(10^{-9} sec)을 센서의 길이로 변환하여 나타내었으며, 가로축은 계측선의 전기펄스값(mV)을 나타낸다. 대형모형제방의 침투거동으로 인해 제체내의 함수비가 변화하게 되고 이로 인해 유전상수가 변화하게 된다. 제내지의 수위가 증가함에 따라 제체 내의 포화영역이 증가되어 유전상수가 증가하게 된다. 이 때 분포형 TDR센서를 이용하여 측정하면 계측선의 각 지점에서 전기펄스의 왕복시간과 전기펄스값이 동시에 변화하게 되며, 전기펄스의 그래프는

왼쪽하향으로 이동되는 것을 알 수 있다. 이는 Kim et al.(2011)에 수행된 결과와 그래프가 변화되는 경향은 유사하지만 별도의 필터링과 보정과정 없이도 일정하게 왼쪽하향으로 이동되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 TDR그래프의 특징을 나타낸 것이다. TDR 그래프(전기적 파형)는 3단계의 직선구간으로 간략화하여 나타낼 수 있으며, 상부부터 건조 또는 초기영역, 중간부의 침투에 의한 불포화영역, 하부는 침투에 의한 포화영역으로 나타난다(Park et al., 2012).

각 수위조건에 따라 센서별 TDR데이터를 분석한 후 세 가지 영역으로 구분한 후 포화영역을 연결하여 침윤선을 작도하였다. 이는 분포형 TDR센서를 이용한 기존의 제방실험 사례와 동일한 방법으로 필터링과 보정방법에는 다소 차이가 있지만 측정된 계측데이터를 이용

Fig. 8. TDR raw data of water level decreasing

Fig. 9. Property of the TDR graph

Fig. 10. Seepage lines and TDR graph of the embankment by TDR sensor

Fig. 11. Geometry and Mesh

하여 직관적으로 침윤선과 불포화영역을 판단할 수 있는 것에 큰 장점이 있다(Park et al., 2012).

Fig. 10은 TDR센서의 계측데이터를 이용하여 제체의 침윤선을 작도한 것이다. 분포형 TDR센서는 별도의 정량화 과정을 거치지 않고도 지점형 센서에 비해 쉽게 침투거동의 파악할 수 있는 것을 알 수 있다.

5. 수치해석

분포형 TDR센서에 의해 측정된 대형모형제방의 침

투거동을 수치해석과 비교하였다. 수치해석을 이용한 침투거동은 Geostudio사의 SEEP/W를 이용하였다. 침투해석을 수행하기 위한 요소망은 패턴을 사각형으로 대략적인 요소의 크기를 0.2m로 설정하여 총 667개의 절점과 612개의 요소로 세분화하였다. 또한, 경계조건은 실험과 동일하게 제외지층의 수위조건을 설정하였다.

화강풍화토에 대한 함수특성곡선은 이미 국내에서 많은 연구가 진행되었으며, 이성진(2004)은 국내 여러지역에서 채취한 화강풍화토를 대상으로 압력판 추출시험을 수행하고 그 결과를 토대로 Fredlund와 Xing(1994) 모델의 곡선맞춤변수값을 획득하였다. 그 중 서창지역에서 채취한 시료를 다짐도 95%로 수행된 연구결과가 본 모형제방의 제체 재료와 다짐조건이 유사하므로 그 결과를 수치해석에 적용하였다(Table 2 참조).

Fig. 12는 수치해석에 적용된 제방 제체의 불포화 특성을 나타낸 것이다. 이성진(2004)에 의해 수행된 Fredlund

와 Xing(1994) 모델의 곡선맞춤변수값을 SEEP/W에 적용하였으며, Fig. 12(a)는 함수특성곡선이며, Fig. 12(b)

Table 2. Parameters obtained by Fredlund & Xing equation (Lee, S. J., 2004)

Sample	θ_s	s	a	n	m
S-C2(0.4)-4	0.286	0.409	78.90	0.875	1.435

(a) Soil water characteristic curve

(b) Unsaturated permeability

Fig. 12. Characteristic of unsaturated soil

(a) Water level : approaching 60 cm

(b) Water level : approaching 120 cm

(c) Maximum water level (1.2 m) after 18 hr

(d) Maximum water level (1.2 m) after 42 hr

(e) Maximum water level (1.2 m) after 60 hr

(f) Water level : decreasing at 80 cm

(g) Water level : decreasing at 40 cm

(h) Water level : decreasing at 0 cm

Fig. 13. Pore-pressure behaviors by variation of the water level (Unit : kPa)

는 불포화 투수계수를 나타낸 것이다.

Fig. 13은 수위변화에 따른 간극수압의 분포를 나타낸 것이다. 침투거동은 수위상승과 수위하강의 영향에 따라 침투거동이 주로 나타났으며, 최대수위 유지 후 42 시간 경과 후부터는 제체 내의 침투거동이 나타나지 않았다.

Fig. 14. Seepage differences between numerical analysis and TDR data

Fig. 14는 분포형 TDR센서의 계측데이터를 이용한 결과와 수치해석에 의한 침윤선을 비교한 것이다. 제방 내의 계측지점이 각각 달라 계측데이터와 수치해석 결과의 차이를 통계적 기법으로 표현할 수 없다. 그러므로 침윤선의 각 계측지점별 차이를 정량적으로 나타내기 위하여 수직 높이 차이를 제시하고, 각 실험조건에 따른 차이 변화를 비교하였다.

Fig. 14(a)와 같이 최대수위 120cm 도달 직후의 침투 거동은 계측데이터에 의한 결과가 크게 나타났으며, 제방의 중앙부분에서의 침투거동의 차이가 크게 나타났다. TDR센서의 결과를 기준으로 수치해석 결과의 차이는 최소 3.52cm에서 최대 33.03cm까지 나타났다. Fig. 14(b)와 같이 최대수위 도달 후 60시간 경과 시에는 결과의 차이가 최소 6.7cm에서 최대 24.21cm로 감소되었으며, Fig. 14(c)와 같이 저수위 도달 직후에는 두 결과가 매우 유사하게 나타났으며, 최소 1.79cm에서 최대

14.46cm로 두 결과의 차이가 크게 감소되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 제방의 안정성 판단에 가장 중요한 침투 거동을 파악하기 위하여 대형모형제방 실험을 수행하였다. 화강풍화토로 대형모형제방을 축조하고 분포형 TDR 센서를 설치하여 침투거동을 파악하였다. 또한, 분포형 TDR센서에 의한 침투거동을 수치해석(SEEP/W)과 비교하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) TDR그래프(전기적 파형)는 3단계의 직선구간으로 간략화하여 나타낼 수 있으며 상부부터 건조 또는 초기영역, 중간부의 침투에 의한 불포화영역, 하부는 침투에 의한 포화영역으로 나타난다. 이를 이용하여 분포형 TDR센서를 이용하면 별도의 정량화

과정을 거치지 않고도 지점형 센서에 비해 제체 내의 침윤선을 쉽게 파악할 수 있다.

- (2) 분포형 TDR센서에 의한 침윤선과 수치해석 결과와 비교하면, 수위상승 조건에는 TDR센서의 측정 결과와 차이가 있으나, 시간이 지날수록 결과가 일치하는 양상을 보여준다. 즉, 축제 재료의 불균질성 및 다짐정도의 차이를 고려하더라도 두 결과가 거의 유사함을 알 수 있다.

본 연구에서는 분포형 TDR센서를 이용하여 대형모형제방의 침윤선과 침투거동을 파악하였다. Park et al. (2012)에 수행된 연구는 조립질 모래의 모형제방을 이용하였고 본 연구에서는 화강풍화토를 이용하였다. 투수계수가 상대적으로 큰 모래에 대한 침투거동을 파악하였으므로 추후 모관흡수도가 높은 실트와 점토에 대해서도 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(유비쿼터스 기법을 활용한 하천시설물 재해종합관리시스템 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 대해 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. ASTM, D6780 (2002), Standard Test Method for Water Content and Density of Soil in Place by Time Domain Reflectometry (TDR), *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.4. No.9, and is available as a separate from ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, Pennsylvania, USA 19428-2959.
2. Dowding, C. H. and Pierce, C. E. (1994), Use of Time Domain

- Reflectometry to Detect Bridge Scour and Monitor Pier Movement, *Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*, Evanston, Illinois, Sept 7~9, U.S. Bureau of Mines, Special Publication, SP 19-94, NTIS PB95-105789, pp.579-587.
3. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), Equation for the Soil-water Characteristic Curve, *Canadian Geo-technical Journal*, Vol.31, pp. 533-546.
 4. Kim, K. Y., Han, H. S., Lee, J. H., and Park, M. C. (2011), Analysis of Saturation and Ground Water Level at Embankment by TDR Sensor, *Journal of Korea Geotechnical Society*, Vol.27, No.2, pp. 63-72.
 5. Lee, S. J. (2004), Estimation of unsaturated shear strength and soil water characteristic curve for weathered granite soil, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST).
 6. 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.
 7. 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.
 8. Topp, G. C., Davis, J. C., and Annan, A. P. (1980), Electromagnetic Determination of Soil Water Content : Measurements in Coaxial Transmission Lines, *Water Resources Research*, Vol.16, No.3, pp. 574-582.
 9. Xinbao Yu (2009), Experimental Study of an Innovative Bridge Scour Sensor, Ph. D. Dissertation, *Case Western Reserve University*, pp.15-35.
 10. 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.

Received : June 4th, 2013

Revised : January 8th, 2014

Accepted : March 10th, 2014