개량된 TDR센서를 이용한 대형 모형제방의 침투 해석

Seepage Analysis of Large-Scale Embankment Model by Revised TDR Sensor

박 민 철¹ Park, Min-Cheol이 중 옥² Lee, Jong-Wook김 유 석³ Kim, You-Seok한 희 수⁴ Han, Heui-Soo

Abstract

In this research, stainless steel and heat-shrinkage tube were used for new TDR sensing line to solve the problems of ordinary TDR system. The new TDR line improved the sensitivity of water content and endurance, and reduced the data noise. The saturation degree test and acryl model test were done by revised TDR sensor. From the results, without additional data filtering and quantitative analysis, the raw data were separated into 3 zones; saturated, unsaturated and dried zones easily. In addition, the revised TDR sensor was installed in large-scale embankment model to perform the seepage test. The raw data of the model tests showed the distributed seepage behaviors and separated zones clearly, which were almost the same tendencies as the lab test results.

요 지

본 논문에서는 기존에 사용되던 철선 TDR계측선의 문제점을 해결하기 위해 스테인리스 스틸과 열수축튜브를 이용해 개량된 TDR계측선을 개발하여, 함수비에 대한 민감도를 높이고 노이즈를 줄이며 내구성을 향상시켜 TDR시스템의 현장적용성을 높였다. 개량된 TDR계측선을 이용하여 실내에서 포화도 변화실험과 아크릴모형실험을 수행하였으며, 실험결과 별도의 필터링 및 정량화 과정을 거치지 않은 초기 계측 그래프만으로 쉽게 포화, 불포화 및 건조구간을 파악할 수 있었다. 이후 대형 모형제방에 개량된 TDR센서를 설치하여 침투실험을 수행하였으며 그 결과, 실내시험과 같은 명확한 지하수 분포형태 파악이 가능하였으며, 침투 시간경과에 따른 각 구간의 지하수 분포변화를 파악할 수 있었고 손쉽게 모형제방의 침투선을 작도할 수 있었다.

Keywords : TDR Sensor, Sensing line, Embankment, Ground-water, Seepage line

1. 서 론

지반에서 발생하는 침투현상은 양단면의 수두차에 의해 발생되며, 제방에서의 침투현상으로 인해 유선이

집중되면 파이핑이 발생되고 제방 제체의 안정성을 크게 저해하여 붕괴를 유발시키기도 한다. 하지만 실제 제방의 침투과정을 정확히 해석하기 위해서는 함수비 또는 간극수압을 측정할 수 있는 센서가 필요하며, 기존의

1 정희원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

2 정희원, 수자원공사 기반시설연구소 책임연구원 (Principal Researcher, Infrastructure Technology Center, K-Water Institute, KOWACO, Tel: +82-42-870-7606, Fax: +82-42-870-7619, geoljw@kwater.or.kr, 교신저자)

3 정희원, 대우건설기술연구원 책임연구원 (Principal Researcher, Institute of Construction Technology, DAEWOO Engineering & Construction Co. Ltd.,)

4 정희원, 금오공과대학교 토목공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 5월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

지점형 센서로는 이러한 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.

초기 TDR(Time Domain Reflectometry)은 통신 분야에서 케이블의 불연속위치를 식별하는 데 사용되었다. 이러한 목적 때문에 TDR의 통신분야에서의 명칭은 케이블 테스터(Cable Test)였다. 흙의 함수비 측정에 활용된 것은 Topp(1980) 등에 의해 연구되었으며, 이 후 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 정확성과 활용성이 높지만 지점형 센서의 한계를 벗어나지 못하는 단점이 있다.

본 연구에서는 지점형 센서들의 단점을 개선하기 위해 분포형 TDR계측선을 제작하여 제방의 침투거동을 파악하고자 하였다. 분포형 TDR센서를 이용하여 제방의 침투거동을 파악하기 위한 연구는 Kim et al.(2011)에 의해 진행되어 철선을 이용한 함수비 측정용 TDR계측선을 개발하였다. 이를 이용하여 실내 실험을 통해 정량화 및 현장적용성을 검증한 후 실제 제방에 설치하여 제방의 침윤선을 작도하였다. Kim et al.(2011)의 연구에서 사용된 TDR계측선은 피복이 되어 있지 않은 철선($\Phi 1.2$)을 사용하여 함수비에는 민감하지만 노이즈가 많고 부식 등의 내구성이 떨어지는 문제점이 있었다.

본 연구에서는 첫째, 선행 연구에서 개발된 함수비 측정용 철선 TDR계측선의 문제점을 해결하여 함수비에 민감하고 내구성이 높은 분포형 TDR계측선으로 개량하고자 하였다. 둘째, 개량된 TDR계측선을 이용한 실내 아크릴모형실험을 통해 제방의 지하수위 및 침투거동을 재현하고 이를 해석해 분포형 TDR센서의 현장적용성을 증명하고자 하였다. 마지막으로, 대형 모형제방에 분포형 TDR센서를 설치하고 실제 제방에서의 침투과

정을 재현하여 모형제방의 포화도 및 침윤선을 파악하고자 하였다.

2. TDR센서 및 개량된 TDR계측선

2.1 TDR 센서 개요

본 연구에서 사용된 TDR센서는 Hyperlab, inc.에서 생산하는 HL8200NET을 선정하였다. 그 이유는 이 제품의 가격이 타센서에 비해 경제적이고 크기가 작아 현장에서 휴대용으로 노트북 컴퓨터에 연결하여 쓸 수 있어 현장적용성이 높기 때문이다. 또한 데이터전송방식이 TCP/IP로 차후 원격무선계측의 응용에 용이하고, 무엇보다도 Labview프로그램으로 쉽게 소프트웨어를 제작할 수 있기 때문이다(Kim et al., 2011).

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 되며 반사되어온 전기펄스를 TDR센서가 감지하게 된다. 감지된 데이터를 TCP/IP통신을 이용하여 컴퓨터에 Spread Sheet형태로 전송하게 되고 TDR소프트웨어로 이를 저장하여 최종적으로 TDR데이터를 획득하게 된다. TDR데이터는 가로축은 전기펄스의 왕복시간(10^{-9} , nano-second)으로 나타나고 세로축은 각 지점의 전기펄스값(mVolt)으로 나타난다.

2.2 개량된 TDR계측선

다음 Fig. 1(a)는 Kim et al.(2011)에 의해 개발된 철선 TDR계측선이고, Fig. 1(b)는 본 연구에서 개발된 함수비 측정용 TDR계측선을 나타낸 것이다. 개량된 TDR계측선의 전기펄스가 이동하는 도체는 스테인리스 스틸을 이용하고 부식 방지 및 내구성을 높이기 위해 열수축 튜브($\Phi 12$, 30)를 이용하여 피복을 형성하였다. 그러므로, 개량된 TDR계측선은 전기펄스가 이동하는 도체(스테인리스 스틸)의 간격이 일정하고 열수축튜브로 인해 외부 자기장의 영향이 감소되어 노이즈가 크게 감소하였다.

(a) Sensing line made of iron wire(Kim, K. Y., et al, 2011)

(b) Developed sensing line for the research

Fig. 1. TDR measuring line for detecting water content

3. 실내실험

3.1 포화도 변화에 따른 TDR데이터

TDR센서로 함수비 혹은 포화도를 파악하기 위해서는 유전율과 함수비의 상관관계를 이용하게 된다. 유전율과 함수비의 관계에 대해서는 Topp et al.(1980)에 의해 보정식이 제안되었으며 분포형 TDR센서의 경우도 함수식 및 보정식을 별도로 파악하여야 한다. 이를 위해 먼저 본 연구에서는 포화도에 따른 TDR데이터의 변화를 파악하고자 하였다. 건조시와 포화도 30%, 60%, 100%일 때의 TDR데이터의 변화를 파악하기 위해 각각의 포화도에 대한 단위체적당 토립자의 무게와 물의 무게를 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$G_s \cdot w = S \cdot e \quad (1)$$

각각의 포화도에 대한 함수비를 구하기 위하여 식 (1)을 변환하면 다음 식 (2)와 같다.

$$w = \frac{S \cdot e}{G_s} \quad (2)$$

여기서, G_s 는 비중(모래 = 2.65), e 는 간극비(균질하고 느슨한 모래 = 0.8), S 는 포화도를 나타낸다. 식 (2)를 이용하여 각각의 포화도 30%, 60%, 100%에 대한 함수비를 구하면 9%, 18%, 30%가 된다. 포화도가 30인 함수비 9%의 시료를 만들기 위하여 표준사 1,000g당 물 90g을, 포화도가 60인 함수비 18%의 시료를 만들기 위하여 표준사 1,000g당 물 180g을, 포화도가 100인 함수비

(a) Upper 50cm

(b) TDR graph variation by saturation degree

Fig. 2. TDR data variation by saturation degree

30%의 시료를 만들기 위하여 표준사 1,000g당 물 300g을 배합하였다.

Fig. 2는 포화도 변화에 따른 TDR데이터를 측정하기 위한 Calibration과정을 나타낸 것이다. 먼저 플라스틱 U형 토조에 건조된 표준사를 깔고 TDR계측선을 설치한 후 TDR계측선의 상부를 건조된 표준사로 덮어 초기값을 계측하였다. 이 후 포화도 30, 60, 100%로 배합된 표준사를 TDR계측선의 상부, 중간부, 하부 50cm지점에 충전시켜가며 TDR데이터의 변화를 파악하였다. Fig. 2(a)는 상부 50cm 영역의 포화도를 Calibration하기 위해 표준사를 포화시킨 실험사진이다.

상부의 포화도 변화에 따른 TDR데이터를 그래프로 나타내면 Fig. 2(b)가 된다. 이들 그래프를 살펴보면 포화도가 커질수록 mVolt값이 크게 줄어들어 하향이동함을 볼 수 있다.

3.2 실내 아크릴파이프 모형실험

개량된 분포형 TDR센서를 이용하여 제방의 포화도 측정을 위한 현장적용성을 검증하기 위해 실내 아크릴파이프 모형실험을 수행하였다. 다음 Fig. 3(a)와 같이 아크릴($\Phi 80$, $t=3$) 파이프로 200cm 길이의 보링홀과 동일한 모형을 제작하여 수직으로 설치한 후 TDR계측선을 관입하였다. 현장의 지반조건을 표준화하기 위하여 충전재로 표준사를 자유 낙하시켜 아크릴파이프를 충전하고 Fig. 3(b)와 같이 TDR계측기와 노트북을 설치하였다. 지하수는 하부 20cm지점에 설치하여 포화영역과 모관상승에 의한 불포화영역을 TDR센서로 측정하였으

며, 하부 80cm지점에 측방침투를 발생시켜 이에 따른 포화도 변화를 측정하였다.

Fig. 4는 실내 아크릴모형실험에서 측정된 TDR데이터이다. 먼저 Fig. 4(a)는 아크릴파이프 하부 20cm지점에 지하수위를 재현하였을 때의 TDR데이터를 나타낸 것이며, 시간경과에 따라 TDR데이터의 변화가 하부 외에는 크게 발생되지 않는 것을 알 수 있다. 이는, 표준사의 경우 공극이 커서 모관상승고가 작으며, 이에 따른 불포화영역이 즉시 발생되기 때문이다. 그리고, 계측 그래프에서 건조영역과 모관상승에 의한 불포화 영역을 바로 구분할 수 있다.

Fig. 4(b)는 아크릴파이프 하부 80cm지점에 측방침투를 재현하였을 때의 TDR데이터 변화이다. 건조된 표준사 중간에 물을 침투시켜 80cm지점 하부가 3분 만에 포화되었으며 시간경과에 따라 측방침투압과 모관상승고에 의해 상부로 침투가 진행되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(a)와 (b)를 분석해 보면, 계측그래프가 Fig. 5에 보인 바와 같이 3단계로 명확히 구분되어짐을 알 수 있다. 지하수의 함유량에 따라 TDR 계측선 주변의 유전율이 달라지므로, 계측된 그래프 역시 포화도에 따라 명확히 구분된다. 즉, 지하수의 거동에 따라 지반은 건조, 불포화 및 포화의 3가지 영역으로 구분된다. 이는 Kim et al.(2011)의 논문에서도 확인할 수 있었다. 그 연구는 TDR계측선이 철선이므로, 노이즈가 다소 발생하였지만 TDR 계측그래프의 명백한 3가지 영역의 구분 및 반복성을 확인할 수 있었다.

또한, Fig. 4(b)에 보인 바와 같이 TDR계측기의 전기 펄스에 영향을 미치는 함수비가 증가하여 지하수위가

(a) Installation of acryl pipe and TDR sensing line

(b) TDR sensor and Notebook

Fig. 3. Laboratory acryl model test

(a) Ground water level at lower 20cm

(b) Lateral seepage at lower 80cm

Fig. 4. Measured TDR data at laboratory acrylic model test

상승할수록, TDR 계측그래프의 포화영역이 증가하는 것을 알 수 있으며 Fig. 5(a)와 같이 단순화할 수 있다. Fig. 5는 TDR계측 그래프의 특징을 나타낸 것이며 TDR 계측 그래프는 지하수의 침투 거동에 따라 두 가지의 뚜렷한 거동을 보이는데, 첫째, 함수비에 따라 건조, 불포화 및 포화영역이 구분되며 둘째, 지하수위의 변화에 따라 불포화영역의 사선구간부분과 포화영역의 직선구간의 경계지점이 이동하게 된다. 이를 이용하여 TDR센서로 지반의 함수비와 지하수위를 파악하게 된다.

그러므로, 기존에 필수적으로 행하던, 측정된 TDR 데이터를 포화도로 나타내기 위한 필터링 및 보정을 통한 정량화과정을 거칠 필요 없이 계측그래프를 보고 바로 건조, 불포화 및 포화영역의 구분이 가능하며, 불포화구간의 함수비도 계측그래프에서 즉시 알 수 있다(Fig. 5(b) 참조). Fig. 5(b)에서 건조구간과 포화구간의 전기펄스 차이는 포화도 100% 영역을 나타내며, 그 차이의 거리(l_u)는 불포화구간이다. 불포화구간이 1차 직선적으

로 증가하므로 포화도 증가율의 기울기 및 각 지점별 포화도는 식 (3)~(4)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{기울기} : \text{Slope} = \frac{100}{l_u} \quad (3)$$

$$\text{포화도} : S_x = \frac{100}{l_u} \cdot l_x \quad (4)$$

여기에서, l_u 는 불포화구간 길이, l_x 는 건조구간으로부터 불포화구간 내 각 지점까지 길이를 나타낸다.

4. 대형 모형제방실험

4.1 실험개요

실내실험을 통해 검증된 개량형 TDR계측선 및 계측

(a) Property by saturation degree

(b) Property of unsaturated zone

Fig. 5. Property of TDR graph

(a) General view

(b) Side view

Fig. 6. Large size soil box

(a) Section view

(b) General view

(c) Side of model embankment

Fig. 7. Installation of TDR sensor

시스템을 대형 모형제방에 설치하여 침투실험을 수행하였다. 실험에 사용된 대형토조는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 크기는 길이 7m, 폭 5m, 높이 2m이며, 여기에 사면경사 1 : 2로 높이 1.2m의 제방을 설치하였다.

제방 설치시 침투 거동의 차이를 보기위해, 제방 하부의 일부분은 자갈을 섞어 투수계수가 상대적으로 큰

취약부를 설치하였다. 침투 거동 파악을 위한 TDR센서는 비취약부와 취약부 2단면에 총 6개소(비취약부 3개소, 취약부 3개소)를 설치하였다. 각 단면에 하부로 부터 0.4m 높이차로 3개를 설치하였으며 TDR센서의 배치도는 Fig. 7과 같다. 침투 실험은 제외지에 비닐을 설치하여 물이 침투되지 않게 막고 물을 1.3m 수위까지

(a) After 1 hour : beginning of piping

(b) After 2 hours : piping completing

Fig. 8. Shape variation of embankment by time

담수한 후 비닐을 제거하여 배면 전체에서 동시에 침투 시켰으며 실험 중에는 1.3m 수위가 유지되도록 지속적으로 물을 공급하였다.

또한, 같은 제방모형에 따른 침투거동의 반복성을 확인하기 위해 TDR센서를 같은 위치에 설치하여, 1차와 2차 시험으로 나누어 두 번 행하였다.

4.2 실험결과

침투 시간 경과에 따른 대형 모형제방의 외형을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)와 같이 침투 1시간 경과시에는 하부 바닥면 15cm까지 습윤대가 나타났으며, 습윤대가 상승하면서 세굴이 진행되었다. 침투 2시간 경과시에는 Fig. 8(b)와 같이 하부 바닥면의 90cm까지 습윤대가 나타났으며 세굴이 상당히 진행되었음을 알 수 있다.

대형 모형제방의 침투 실험 결과는 데이터양이 많아 침투 후 30분, 1시간, 2시간의 데이터만을 나타내었으며 별도의 정량화를 위한 필터링 및 보정과정은 적용하지 않고 원데이터를 이용하여 건조, 불포화 및 포화 구간을 나타내었다. 이는 개량된 TDR계측선의 경우 노이즈가 비교적 적어 별도의 정량화 과정 없이도 침투 거동을 계측 그래프에서 바로 파악할 수 있기 때문이다. 또한 원 데이터를 이용한 침투거동해석 후 이를 토대로 제방의 침윤선을 작도하였다.

4.2.1 1차 실험 TDR데이터

다음 Fig. 9~14는 30분, 1시간 및 2시간의 침투시간 별 대형 모형제방내의 침투수에 대한 개량된 TDR센서의 계측자료를 나타낸 것이다. 설치된 TDR 계측선은 비취약부에 3개(모형 제방하부에서 40cm(HB), 80cm(HM)

(a) 30 mins

(b) 1 hour

(c) 2 hours

Fig. 9. HB(No weak zone, lower 40cm point)

및 120cm(HT))를 설치하였고, 자갈을 섞어 침투수의 거동을 빠르게 한 취약부 역시 3개(모형 제방하부에서 40cm(HBW), 80cm(HMW) 및 120cm(HTW))를 설치하여 총 6개의 계측선을 설치하였다. 모든 계측선에서 침투수의 거동에 따른 제방내의 건조, 불포화 및 포화구간의 진행과정 및 구분이 뚜렷히 나타남을 Fig. 9~14을 통해 알 수 있다. 그러므로 각 계측선의 건조, 불포화 및 포화구간을 시간별로 연결하면 제방내 침투수의 진

행에 따른 실시간 침윤선을 작도할 수 있다. 모든 TDR 계측선에서 건조 및 포화구간은 수평직선으로 나타났으며, 불포화구간의 경우 1차 직선 형태이지만 기울기는 제방내 불포화구간의 크기에 따라 다르게 나타났다. 그러므로 불포화 구간의 영역을 거리에 따라 구분하고, 포화구간은 포화도 100%, 건조구간은 포화도 0%로 하면 제방내 불포화구간의 위치별 포화도를 계측그래프만으로 바로 구할 수 있다.

(a) 30 mins

(b) 1 hour

(c) 2 hours

Fig. 10. HM(No weak zone, lower 80cm point)

(a) 30 mins

(b) 1 hours

(c) 2 hours

Fig. 11. HT(No weak zone, lower 120cm point)

나아가, 제방내 침투거동 뿐만 아니라 제방에서 발생하는 세굴 현상도 계측 가능하였다. Fig. 9의 HB 계측자료를 보면 시간에 따라 침투수의 포화구간이 증가하다가, 약 2시간 후에는 Fig. 8의 현장사진에 보인 바와 같이 세굴이 발생하여 계측선 주변에 유전율이 큰 물만 존재하므로 계측 그래프가 급격히 하강되었음을 볼 수 있다.

또한, TDR 계측에 의해 시간에 따른 불포화대의 이

동 및 포화대의 이동을 구할 수 있으면, 이는 불포화침투능 및 포화침투능을 구할 수 있다는 의미이다. 지반의 침투거동은 불포화침투 및 포화침투거동으로 구성되므로, 이들 값을 명확히 구할 수 있으면 지반의 침투량을 정확히 구할 수 있다.

4.2.2 2차 실험 데이터

개량된 TDR 계측선의 반복적인 정확도를 검증하기

(a) 30 mins

(b) 1 hours

(c) 2 hours

Fig. 12. HMW(Weak zone, lower 80cm point)

(a) 30 mins

(b) 1 hours

(c) 2 hours

Fig. 13. HBW(Weak zone, lower 40cm point)

위해 1차 실험 후 동일한 조건으로 2차 실험을 수행하였다. Fig. 15~20은 2차 시험의 30분, 1시간 및 2시간의 침투시간별 대형 모형제방내의 침투수에 대한 개량된 TDR센서의 계측자료를 나타낸 것이다. 설치된 TDR 계측선은 1차 시험과 마찬가지로 비취약부에 3개, 취약부에 3개를 설치하여 총 6개의 계측선을 설치하였다. 2차 시험 역시 침투수의 거동에 따른 제방내의 건조, 불포화 및 포화구간의 진행과정 및 구분이 뚜렷히 나타남을 확

인할 수 있었으며, TDR계측 위치별로 그래프가 1차 시험과 거의 유사함을 알 수 있다.

그리고, 1차 시험때 나타났던 세굴에 의한 거동을 방지하기 위해 2차 시험시 HB 지점의 계측선을 상향처리하여, 2차 시험시 HB 지점의 지표면 계측 그래프가 하향 이동되지 않고 수평거동을 보임을 알 수 있다(Fig. 9(c)와 Fig. 15(c) 비교 참조).

(a) 30 mins

(b) 1 hours

(c) 2 hours

Fig. 14. HTW(Weak zone, lower 120cm point)

(a) 30 mins

(b) 1 hours

(c) 2 hours

Fig. 15. HB(No weak zone, lower 40cm point)

4.3 침윤선 작도

TDR계측자료만으로 지하수의 침투에 따른 건조, 불포화 및 포화구간을 명확히 구분할 수 있으므로, 이를 이용하여 침투 시간 30분, 1시간 및 2시간 경과시 제방의 침윤선을 작도하였다. 다음 Fig. 21은 Fig. 9~14에 보인 1차 실험의 TDR계측자료를 이용한 제방의 침투거동을 작도한 것이다. 침투시간 30분 경과시에는 취약부

하부의 침투가 상당히 빨리 진행되고 있었지만 1시간과 2시간경과 시에는 취약부와 비취약부의 침투 거동이 거의 비슷해짐을 Fig. 21을 통해 알 수 있다.

Fig. 21의 시간별 불포화대의 이동거리를 통해 불포화침투능을 구할 수 있으며, 또한 시간별 포화대의 이동거리를 통해 포화침투능을 구할 수 있다. 각 지반의 침투능은 불포화침투능과 포화침투능의 합이므로, 이 값들을 이용해 현재 일반적으로 계측값 없이 이론식만을

(a) 30 mins

(b) 1 hours

(c) 2 hours

Fig. 16. HM(No weak zone, lower 80cm point)

(a) 30 mins

(b) 1 hours

(c) 2 hours

Fig. 17. HT(No weak zone, lower 120cm point)

적용하고 있는, 강우 등에 의한 지하수의 침투량을 정확히 측정할 수 있음을 의미한다.

다음 Fig. 22는 Fig. 15~20에 보인 2차 실험에서 측정된 포화대의 구분에 따른 제방의 침윤선 작도한 것으로, 1차 실험과 비슷한 경향을 나타내었다. 30분 경과시에는 취약부의 침투가 상당히 빨리 진행되고 있었지만 1시간과 2시간 경과시에는 취약부와 비취약부의 침투 거동이 거의 비슷해짐을 알 수 있다. 즉, 1차 실험과 2차

실험의 제방침투거동이 거의 비슷하여 실험과 예측시스템의 일관성 및 반복성이 유지되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 선행 연구에서 개발된 함수비 측정을 위한 철선 TDR계측선의 문제점을 해결하여 함수비에 민감할 뿐 아니라 내구성이 높은 분포형 TDR계측선의

(a) 30 mins

(b) 1 hours

(c) 2 hours

Fig. 18. HBW(Weak zone, lower 40cm point)

(a) 30 mins

(b) 1 hour

(c) 2 hours

Fig. 19. HMW(Weak zone, lower 80cm point)

(a) 30 mins

(b) 1 hour

(c) 2 hours

Fig. 20. HTW(Weak zone, lower 120cm point)

(a) 30 mins(No weak zone)

(b) 30 mins(Weak zone)

(c) 1 hour(No weak zone)

(d) 1 hour(Weak zone)

(e) 2 hours(No weak zone)

(f) 2 hours(Weak zone)

: Dried Zone
 : Unsaturated Zone
 : Saturated Zone

Fig. 21. Seepage lines by time(1st)

Fig. 22. Seepage lines by time(2nd)

로 개량하였다. 이를 이용한 실내 아크릴 모형실험을 통해, 제방의 지하수위 및 침투거동을 재현하여 현장적용성을 검증하였다. 마지막으로, 대형 모형제방에 개량된 분포형 TDR센서를 설치하고 실제 제방에서의 침투과정을 재현하여 제방의 포화도 및 침윤선을 파악하고자 하였다. 본 연구의 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 개량된 TDR 계측선에 의한 계측 그래프는 지하수의 거동에 따라 뚜렷한 거동을 보여, 기존 분포형 센서에서 필수적으로 행하던 계측자료의 필터링 및 보정을 통한 정량화과정을 거칠 필요 없이 계측그래프를 보고 바로 구간별 지하수의 함량을 파악할 수 있었다.
- (2) 실내실험 결과, 먼저 함수비에 따라 건조, 불포화 및 포화영역이 구분되며 지하수위의 변화에 따라 불포화영역의 사선구간부분과 포화영역의 직선구간의 경계지점이 이동하게 된다. 이를 이용하여 TDR센서로 지반의 함수비와 지하수위를 파악할 수 있었다.
- (3) 개량된 TDR계측선의 계측자료는, 지반의 포화도 변화에 따라 TDR계측 자료가 건조, 불포화 및 포화영역의 3단계로 명확히 구분되어지는 그래프로 나타났다. 불포화구간의 경우 1차 직선 형태이지만 기

울기는 제방내 불포화구간의 크기에 따라 다르게 나타났으며 이를 이용해 제방내 각 위치의 포화도를 계측그래프만으로 바로 구할 수 있다.

- (4) 대형 모형제방 결과, TDR센서의 계측자료를 이용하여 건조, 불포화 및 포화구간을 파악할 수 있었으며 시간별로 연결하여 제방내 침투수의 진행에 따른 실시간 침윤선을 작도할 수 있다.
- (5) 대형 모형제방에 세굴이 발생하여 계측선 주변에 유전율이 큰 물만 존재할 경우 계측 그래프가 급격히 하강되었으며 추후 현장 제방에서 발생하는 세굴 현상을 계측할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 개량된 TDR계측선을 제작하여 노이즈를 줄이고 내구성을 향상시켜 현장적용성을 상당히 높였다. 추후 연구를 통해 개량된 TDR계측선을 규격화, 공장화하여 다양한 지반의 침투거동 파악에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

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. Han, H. S. (2009), "Application of Nano-TDR Health Monitoring System in Civil Engineering", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol.13, No.5, pp.93-100.
 4. Hoekstra, P. and Delaney, A. (1974), "Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies", *Journal of Geophysical Research*, Vol.79, No.11, pp.1699-1708.
 5. 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.
 6. 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.
 7. Xinbao, Yu (2009), "Experimental Study of an Innovative Bridge Scour Sensor", Ph. D. Dissertation, *Case Western Reserve University*, pp.15-35.

(접수일자 2012. 7. 4, 심사완료일 2012. 11. 5)