강우시 불포화투수계수를 이용한 침투능 산정

Estimation of Infiltration Capacity by Unsaturated Permeability in Rainfall

이정식*, 조성근**, 신창동***

Jung Sik Lee, Sung Geun Cho, Chang Dong Shin

요 지

국내에서 사면 붕괴의 직접적인 원인은 강우에 의한 것으로 볼 수 있으며, 강우침투에 따른 지하수위 상승과 간극수압 증가, 강우강도 크기에 직접적으로 영향을 받는 지표면 유출로 인한 사면의 표면토사 유출 및 얕은 사면붕괴로 나타난다. 본 연구에서는 강우로 인한 지반내 침투로 불포화토가 포화토로 변화는 과정에서 침투능을 산정하고자 기존의 침투공식을 검토하고 TDR 센서를 이용한 실내실험을 통한 침투능 산정공식을 제시하였다. 제시한 침투능 산정공식을 검증하기 위한 침투실험을 수행하여 결과를 비교·분석하였으며, 이론적 해석 및 실내실험에 의한 결과는 다음과 같다. 첫째, 포화도 변화에 따른 TDR데이터 변화는 일정했으며 이를 회귀분석을 통하여 함수화하였고, 이 함수를 이용하여 지반의 포화도 및 함수비를 파악할 수 있었다. 둘째, 흡인수두항과 중력수두항이 결합된 연속적인 침투능 산정공식을 새로이 유도하였으며, 이를 이용한 결과와 TDR 센서를 이용한 실험결과와 거의 유사함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 불포화 투수계수, TDR, 연속지반침투

1. 서론

국내에서는 빈번한 태풍과 국지성강우로 사면붕괴 피해가 점점 증가하는 추세이며 이에 대한 대책이 미흡하다. 특히, 고속도로 및 국도 공사에 있어 사면 붕괴는 해마다 증가하고 있으며, 붕괴로 인한 인명피해와 재산피해 그리고 교통두절로 인한 지역 간의 고립으로 그 지역 주민들의 불편함이 가중되어 사회적 경제적으로 그 피해가 방대하다. 이러한 사면의 붕괴의 직접적인 원인은 강우에 의한 것으로 볼 수 있으며, 강우침투에 따른 지하수위 상승과 간극수압 증가, 강우강도 크기에 직접적으로 영향을 받는 지표면 유출로 인한 사면의 표면토사 유출 및 얕은 사면붕괴로 나타난다. 따라서 본 연구에서는 강우로 인한 지반내 침투로 불포화토가 포화토로 변화는 과정에서 흙의 포화도 또는 함수비 변화를 예측하여 침투로 인한 구조물의 안정 및 지하수 거동을 보다 정확히 해석하고자 한다.

일반적으로 기존의 침투능 산정식인 Horton 공식 및 Green-Ampt 공식으로 지반 내 침투능을 산정해 왔다. 기존의 Horton 공식의 경우 초기함수량에 따른 침투거동을 알 수 없고, Green-Ampt 공식의 경우 포화구간과 불포화구간의 불연속면을 가정하여 지반의 연속적인 침투거동을 나타내지 못한다. 실제 강우로 인한 지반 침투는 연속적으로 침투가 이루어지므로 이와 같은 불연속적인 침투량 산정공식의 단점을 보완하고자 본 연구에서는 연속적인 침투능 산정공식을 새로이 유도하였다. 또한 TDR센서를 이용한 실내실험을 통하여 본 연구에서 제안한 불투수계수를 이용한 침투능 산정공식과 기존공식들의 비교분석을 행하였다.

* 정회원·금오공과대학교 토목환경공학부 교수·E-mail : jungsik@kumoh.ac.kr

** 정회원·금오공과대학교 대학원 박사과정 토목공학과·E-mail : hydro99@chol.com

*** 정회원·(주)보원엔지니어링 부장·E-mail : sichado88@hanmail.net

2. 침투능 산정방법

2.1 기존의 침투능 산정방법

본 연구에서 기존의 침투능 산정방법으로 Horton 공식과 Green-Ampt 공식을 적용하였다. Horton 공식은 Horton이 실험을 통하여 제안한 침투능 공식이며, Green-Ampt 공식은 간단하고, 여러 다양한 토질에 적용이 가능하면서 또한 Darcy법칙에 따른 이론식의 대표적인 식으로 두가지 공식의 침투능 $f(t)$는 다음과 같다.

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \tag{1}$$

$$f(t) = K\left\{\frac{\Psi \Delta\theta}{F(t)} + 1\right\} \tag{2}$$

2.2 불포화투수계수를 이용한 침투능 산정방법

지반내의 공극은 지하수의 침투로 인하여 감소하며, 침투능은 공극의 크기, 물의 점성 등과 관련된 지반의 불포화투수계수와 직접적 관련이 있다. 불포화된 지반의 포화도변화에 따라 증가된 침투량은 시간의 역수단위를 사용하는 누적상수 K_a라는 개념을 도입하여 구할 수 있다. 침투거리는 침투속도(불포화투수계수)와 시간의 곱으로 표현된다. 이를 침투량으로 나타내면 침투능과 시간의 곱으로 표현할 수 있다. 지반의 침투속도, 즉, 침투능은 불포화투수계수로 표현되며, 이는 잔류함수량을 제외한 포화도인 유효포화도와 포화투수계수의 항으로 구성된 식 (3)을 이용할 수 있다.

$$K = K_s S_e^{\ a} (7) \tag{3}$$

여기서 K_s는 포화투수계수(㎝/s), K는 각 함수비에서 불포화투수계수(㎝/s), S_e는 유효포화도이며, a는 계수이다. Brook과 Corey(1964)는 입도 균등한 흙에 대해 a=3을 제안하였으며, Irmay(1954)는 이론적으로 a=3임을 밝혔고, 이후 이를 실험적으로 증명하였다.

불포화투수계수를 고려한 지하수증가량의 물질 수지식을 세우기 위하여, 누적상수 K_a를 도입하여 계산할 수 있으며, K_a는 식 (4)와 같다.

$$K_a = \frac{K_s S_e^{\ 3}}{\Delta h} \tag{4}$$

여기서 Δh는 침투거리이다.

전체 지하수증가량은 현장의 함수비와 불포화투수계수에 따른 누적상수와 단위시간당의 지하수 증가량의 곱으로 표현되며, 증가된 지하수량은 전체 지하수 증가량에서 기존의 지하수량을 제외하면 되므로 불포화된 지반의 연속침투방정식을 구하기 위한 전체 지배 미분방정식은 다음과 같은 식으로 나타내게 된다.

$$W_t = \frac{1}{K_a}\frac{dW_t}{dt} - W_0 \tag{5}$$

여기서 W_t는 침투지하수량이며, W_0는 기존 지하수량이다.

지배방정식을 일차미분방정식의 형태로 전개하여 $\beta = -K_a$, $\alpha = K_a W_0$로 둔다면, 다음 식과 같은 베르누이 비제차 방정식이 된다.

$$W_t' + \beta W_t = \alpha \tag{6}$$

식 (6)의 해를 구하면 식 (7)과 같이 현장의 기존 지하수량을 고려한 연속된 침투능 산정공식이된다.

$$W_t = W_0\left(e^{\frac{K_s S_e^3}{\Delta h}t} - 1\right) \tag{7}$$

여기서 W_t는 함수비 증가분, W_0는 초기함수비, K_a(1/sec)는 누적상수 또는 반응상수이다.

$e^{\frac{k_s s_e^3}{\Delta h}t}$ 항은 중력수두와 관련된 포화투수계수항 K_s와 유효포화도 S_e의 함수로 나타나는 matric suction에 의한 흡인수두항이 하나의 항으로 결합되어 지수적으로 변화하므로, 지수함수적으로 변하는 현장의 침투량 변화조건과 일치한다고 할 수 있다.

3. TDR센서를 이용한 실내모형실험

침투능 지배인자 중 중요한 인자인 강우시 지반의 포화도 혹은 함수비를 해석하기 위해서 아크릴(Φ 80, t=3) 파이프로 3m 길이의 모형에 TDR센서를 설치하여 실내모형실험을 행하였으며, 본 연구에서 실험에 사용한 시료는 충북 영동군에서 채취한 흙을 10번체(2㎜)에 체가름 후 주문진 표준사와 1:2비율로 교반하여 실트질 모래(2㎜~0.3㎜)를 만든 후 사용하였다. 본 연구에서는 건조상태에서 강우강도 10㎜/h의 강우를 5시간 재현한 후 10분 간격으로 5시간동안 TDR 센서로 계측하였다.

TDR센서 시스템은 전기펄스를 발생하고, 감지하는 TDR계측 시스템과 센서로 사용되는 전기케이블로 구성되며, 동축케이블을 그대로 센서로 사용한다. 이 동축케이블는 계측 대상 사면에 설치하는 분포형 센서로서, 많은 계측기를 설치할 필요 없이 그 자체가 수많은 계측점을 가지고 있다. 본 연구에서는 TDR데이터의 포화도를 파악하고 건조영역과 불포화영역, 그리고 포화영역을 구분하고 침투능과 침투량을 파악하였다. 계측자료는 항상 시간에 따른 불규칙 신호인 노이즈를 포함하고 있기 때문에 노이즈를 제거하기 위한 방법으로 2단계의 필터링기법을 사용하였고, 1단계로 이동평균법을 사용한 후 2단계로 Fourier 변환을 이용하였다. 그림 1은 10㎜/hr의 강우를 5시간 재현한 후 10분 간격으로 5시간동안 계측한 TDR 데이터이며, 그림 2는 TDR센서를 이용하여 측정된 포화도 값이다.

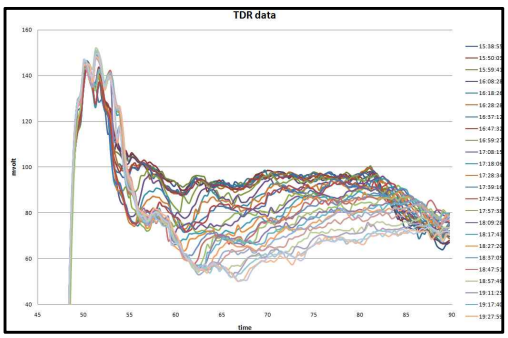

그림 1. TDR 원 데이터

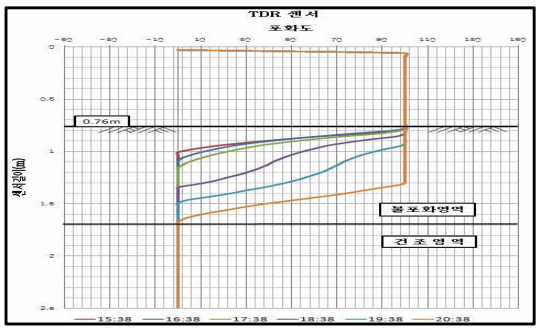

그림 2. TDR센서를 이용하여 측정된 포화도 값

4. 침투능 및 침투량 산정

4.1 불포화투수계수를 고려한 침투량 산정

불포화투수계수를 고려한 침투량 산정을 위하여 사용된 지반조건은 포화투수계수 2.99㎝/hr로 이는 실트질 흙에 해당되며, 이에 해당하는 간극비는 중간상태의 간극비 0.6, 함수비는 0.09, 비중은 2.65로 선택하였다. 표 1과 같은 지반상수값을 이용하여 함수비 변화에 따른 포화도, 불포화투수계수, 단위시간당 함수비증가량과 누가함수비를 산정하였으며, 산정결과는 표 2와 같다.

표 1. 불포화투수계수를 고려한 침투량 산정을 위한 지반조건

투수계수 K_s(㎝/hr)	Depth(㎝)	간극비	함수비	비중	포화도
7.89	300	0.5	0.09	2.43	0.3975

표 2. 불포화투수계수를 이용한 침투능 산정결과

시간(hr)	함수비	포화도	불포화투수계수 K_s(㎝/hr)	함수비 증가	누가함수비
0	0.090000	0.09	0.00018327	0	0
6	0.104437	0.507511	0.000286	1.09E-05	0.014459
9	0.116582	0.566507	0.000398	1.69E-05	0.026616
12	0.137538	0.668276	0.000654	3.27E-05	0.047505
15	0.193665	0.940588	0.001822	0.000128	0.103537
15.28	0.205839	0.999583	0.002187	0.000164	0.115839

본 연구에서 제안한 불포화투수계수를 이용한 침투능 산정공식으로부터 산정한 침투량은 표 3과 같다.

표 3. 불포화투수 침투량 산정결과

시간(hr)	0	1	2	3	4	5
침투량(㎝)	0.0	7.31	6.854	19.35	24.08	29.04

4.2 TDR 센서를 이용한 침투량 산정

TDR 센서를 이용한 침투량 산정을 위해 사용된 지반조건은 지반상수값을 공극비 0.45, 비중 2.43을 이용하여 TDR 센서로 측정한 값으로 침투량을 산정하였으며, 침투량 산정결과는 표 4과 같다.

표 4. TDR 센서를 이용한 침투량 산정결과

시간(hr)	0	1	2	3	4	5
TDR 계측	0.0	6.92	13.58	20.78	27.70	34.63

4.3 비교 고찰

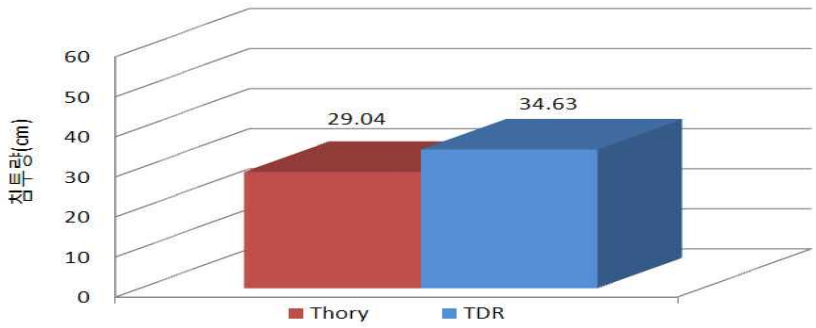

그림 3. 침투량 비교

본 연구에서 침투량 산정을 위해 분석한 기존식과 이론식의 지반포화시까지의 침투량을 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3을 살펴보면, 불포화 투수계수를 이용한 결과는 29.04㎝이며, 이는 TDR 센서를 이용한 실험결과와 유사함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 지반의 침투능을 계산하기 위해 기존의 침투공식을 검토하고 불투수계수를 이용한 침투능 산정공식을 제안하였다. 제안한 침투능 산정공식을 검증하기 위하여 TDR센서를 이용한 실내모형실험을 수행하였으며, 이론적 해석 및 실내실험에 의한 결과는 다음과 같다.

(1) Horton 공식의 경우 대상지반의 초기포화도 혹은 초기함수비에 대한 항이 없어 지반의 초기함수량에 따른 침투거동을 알 수 없으며, Green-Ampt 공식의 경우 대상지반의 초기포화도를 고려하였으나, 포화구간과 불포화구간의 불연속면을 가정하여 유도된 이론식으로 지반의 연속적인 침투거동을 나타내지 못하였다.

(2) 불포화투수계수(불포화시 흡인수두항과 중력수두의 항의 합)는 일정한 값이 아닌, 지반의 포화조건에 따라 변하는 종속변수이며, 이 값들은 지반의 포화도가 지수적으로 증가함에 따라 동시에 지수적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 완전히 포화된 후에는 일정한 종기침투능(포화투수계수)값을 가짐을 알 수 있다.

(3) 실내실험을 통하여 행한 결과 TDR센서를 이용하여 포화도 변화를 정확히 파악할 수 있었으며, 침투깊이도 정확히 그 위치를 파악할 수 있었다. 뿐만 아니라 강우로 인한 불포화영역 또한 정확히 파악할 수 있어 이를 근거로 TDR센서의 적용성을 증명할 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 한희수, 이정식, 장진욱, 양남용(2010), 불포화투수계수를 이용한 지반의 연속 침투능 산정, 대한지질공학회, Vol.20 No.2. pp.137-146.
2. Brook, R.H., and Corey, A.T.,(1964), Hydraulic Properties of Porous Media, Hydrology Papers, Colorado State University, Colorado.
3. Chen Li and Young, M H.(2006), Green-Ampt Infiltration Model for Sloping Sufaces, Water Resources Research, Vol, 42, W07420.
4. Collins, B.D. and Znidarcic, D(2004), Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, New-York, Vol. 130, No 4. pp. 362-372.
5. Irmay, S.(1954), On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Trans Am. Geophys. Union, 35(3), pp.463-467.
6. Surendra K.M. and P.S Vijay(2004), Validity and Extension of SCS-CN Method for Computing Infiltration and Rainfall-Excess Rates, Hydrological Processes. 18, pp.3323-3346.