

접속부 궤도 성토재료의 함수특성곡선을 이용한 포화도 분포 산정

최찬용* · 이정민** · 권혁민*** · 오정호****

Choi, Chanyong*, Lee, Jungmin**, Kwon, Hyeok Min***, Oh, Jeongho****

Assessing Distribution of Degree of Saturation for Track Transition Zone Using Soil Water Characteristic Curve

ABSTRACT

The number of occurrence of differential settlement and track irregularity at track transition zone recently comes to increase, which leads to frequent maintenance activities that have an impact on train operation. Such track transition zone damages are attributed to the change of mechanical properties of fill materials due to environmental factors such as rainfall and freeze, and thaw. Consequently, this study attempts to establish the soil water characteristic curve (SWCC) of fill materials, and conduct seepage analysis to assess the distribution of degree of saturation (DOS) for track transition zone in case of rainfall. The SWCC of fill materials was successfully obtained using filter paper test method. The results of seepage analysis revealed that rainfall intensity, the slope of backfill, backfill condition (fill or cut), and SWCC are significantly influential in controlling the distribution of DOS.

Key words : Track transition zone, Soil water characteristic curve, Seepage analysis, Degree of saturation

초 록

최근 궤도 접속부에서의 부등침하 및 궤도틀림으로 잦은 유지보수 및 열차운영에 지장을 초래하는 경우가 많아지고 있다. 이는 주로 궤도 접속부 시공에 사용되는 다양한 성토재료의 강우나 동결융해 같은 환경적 인자에 의한 역학적 물성들의 변화에 기인한 것으로, 본 연구에서는 궤도 접속부 성토재료에 대한 함수특성곡선을 산정하고 강우 시 포화도 변화 추이를 알아보고자 침투해석을 수행 하였다. 필터페이퍼를 이용하여 다짐 성토의 함수특성곡선을 성공적으로 산정할 수 있었고, 함수특성곡선 데이터를 이용한 강우 시 침투해석을 수행한 결과 궤도 접속부 성토재료의 포화도 분포는 강우강도, 뒤채움재 경사, 성토 및 절토 여부, 그리고 함수특성곡선에 큰 영향을 받는 것을 확인 하였다.

검색어 : 궤도 접속부, 함수특성곡선, 침투해석, 포화도

1. 서론

철도노반 및 도상을 포함한 궤도 하부구조는 최근 철도 고속화 및 물류량 증가로 인한 통과톤수 증가에 대한 구조적 건전도를 확보함으로써 열차의 주행 안정성을 공용 수명동안 유지해야 하는 역할을 해야 한다. 이에 궤도하부구조의 설계는 경제적이면서 내구성이 보장되도록 궤도구조체의 효율적 두께와 층 재료를 선정할 수 있어야 한다. 궤도의 접속부는 지하구조물 또는 교대등에 궤도가 접하는 위치로써 접속구간에서 궤도 및 하부노반에서 궤도강성을 무리없이 변화시킬 수 있는 대책이 마련되어야한다(Korea Rail Network

* 정회원 · 철도기술연구원 고속철도연구본부 수석연구원 (Korea Railroad Research Institute · cychoi@krii.re.kr)

** 한국교통대학교 철도융합기술연구소 연구원 (Korea National University of Transportation · cyber-sarah@hanmail.net)

*** 한국교통대학교 철도시설공학과 석사과정 (Korea National University of Transportation · koreakm11@naver.com)

**** 정회원 · 교신저자 · 한국교통대학교 철도시설공학과 조교수 (Corresponding Author · Korea National University of Transportation · j-oh@ut.ac.kr)

Received February 6, 2015/ revised February 23, 2015/ accepted February 25, 2015

Authority, 2011). 기존의 연구 및 보고에 의하면, 노반재료의 성능은 함수비 변화에 민감한 것으로 알려져 있다(Chandra et al., 1989; Drumm et al., 1997; Ping et al., 2000; Oh et al., 2010). 일반적으로 최적 함수비 조건에서 다짐 시공을 하는 경우를 고려하면 공용기간동안 다양한 기후조건에 영향을 받아 현장 함수비가 변화하고 이는 노반재료의 탄성계수나 강도에 영향을 끼치게 된다. 특히, 집중호우 또는 적절치 못한 배수설계에 의해 최적 함수비에 비해 높은 현장 함수비를 보유하게 되었을 때, 노상재료의 전단강도 및 변형계수의 저하를 유발함으로써 부등침하 발생으로 인한 궤도 틀림이나 전단파괴 현상을 가져올 수 있다. 참고로, 국내 궤도에 대한 장기간 모니터링 데이터를 분석한 결과 노상의 함수비는 모든 계절에 걸쳐 최적 함수비 이상으로 관찰되었다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011). 효율적인 노반 토공 건설비 최적화를 이루기 위해서는 기존의 다짐도 측정에 의존하는 방식에서 역학적 설계에 사용할 수 있는 변형계수나 탄성계수를 측정함과 동시에 이들과 포화도와의 상관관계를 이용하여 공용수명을 예측할 수 있는 기법이 필요하다고 사료된다. 설계 시 흙 노반 재료의 변형계수나 탄성계수는 열차 하중에 대한 궤도하부구조의 거동을 해석할 때 사용하고 있으며, 기존의 국내의 연구들에 의하면 이러한 물성치들은 재료의 포화도 상태와 밀접한 관계를 가지고 있음이 확인 되었다.

Lee et al. (2002)는 국내 현장에서 채취된 비교란 시료를 이용하여 다짐조건에 따른 여러 다짐시료에 대한 불포화 삼축압축실험을 통해서 모관흡수력 증가에 따른 겉보기 점착력의 증가를 확인하고 이를 표현하는 비선형 관계식을 제안하였다. Zapata and Houston (2008)은 도로의 경험적-역학적 설계법에 기후인자를 고려하기 위한 모델을 검증하기 위해서 주로 도로의 기층 및 보조기층으로 사용되는 다양한 종류의 입상재료 및 노상재료들에 대한 함수특성곡선 데이터베이스를 구축하였으며, 이를 재료들의 물리적 물성치인 입도분포, 에트버그 한계지수, 현장 함수비등과의 상관관계를 제시 하였다. Oh et al. (2012)는 입상재료의 회복탄성계수를 실내 및 현장 비파괴 실험을 통해 산정하였을 때, 두 값들 간의 보정 계수를 제안하기 위해서 현장 함수비를 고려한 재료의 함수특성곡선을 이용한 방법을 제시하였다. 이는 회복탄성계수의 현장함수비에 대한 예민비를 고려함으로써 도로의 역학적 설계에 적용하고자 하는 것이다.

이에 본 연구에서는 접속부를 구성하고 있는 일반 토사, 시멘트 처리된 보조도상에 대한 함수특성곡선을 산정하고 침투해석을 실시하여 강우 시 포화도 분포를 확인함으로써, 추후 접속부의 성토재료의 포화도와의 상관관계를 고려한 역학적 설계에 대한 기틀을 마련하고자 한다.

2. 함수특성곡선 및 불포화 투수계수

2.1 함수특성곡선

모관흡수력은 불포화토 지반의 거동특성에 매우 중요한 역할을 하는 설계변수이므로, 불포화토와 관련된 흐름특성, 변형특성 및 강도특성을 적절히 고려하기 위해서는 모관흡수력의 영향을 반드시 고려해야 한다(Fredlund et al., 1994; Vanapalli et al., 1996). 함수특성곡선은 모관흡수력에 따른 흙 내부의 체적함수비와의 상관관계를 보여주며, 불포화 특성을 결정하는 기본물성이다. 일반적으로 함수특성곡선의 모양은 Fig. 1과 같이 S 자 형태를 나타낸다. 많은 연구자들이 대부분 실내 실험을 바탕으로 곡선맞춤(curve fitting)을 통해 함수특성곡선 함수를 표현하였다. 하지만 실험적인 제약 등에 의해 전체 모관흡수력 범위에 대해 만족할만한 함수를 제시하지 못하였으며, 공기 함입치 보다 작은 모관흡수력 범위에서만 신뢰할 수 있거나 그보다 큰 모관흡수력 범위에서만 신뢰할 수 있는 제한적인 함수들이 제시되었으며, Table 1에 정리되어 있다.

함수특성곡선을 측정하는 방법으로는 직접적 모관 흡수력 측정 방법과 간접적 모관 흡수력 방법으로 나눌 수 있다. 직접적 흡수력 측정방법은 세라믹 디스크 또는 세라믹 컵에 의하여 물과 공기를 단절 시킨 후, 세라믹에 의해 제한된 공기함입 값으로 최대 모관흡수력을 측정한다. 간접적 모관흡수력 측정 방법으로는 대표적으로 필터페이퍼를 이용한 방법과 상대습도 측정기를 이용하여 모관흡수력을 산정하는 방법을 들 수 있다. 이는 직접적 방법에 비해 일반적으로 간편하나 모관흡수력을 산정하기 위한 보정 단계를 거쳐야 하는 단점이 있는 반면, 직접적 측정방법에 비해 넓은 범위의 모관흡수력을 측정할 수 있다는 장점이 있다.

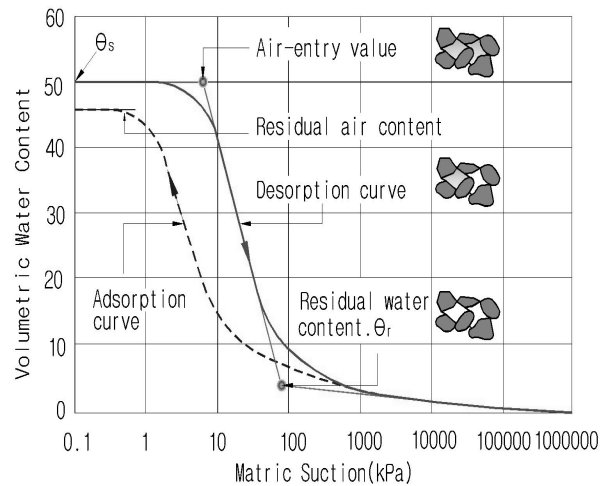


Fig. 1. Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Table 1. Summary of SWCC Model

Reference	SWCC equation	coefficient definition
Gardner (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + a\psi^n}$	$a, n = \text{constants}$
Brooks and Corey (1964)	$\theta = \begin{cases} 1 & \text{for } \psi \leq \psi_b \\ (\frac{\psi_b}{\psi})^\lambda & \text{for } \psi > \psi_b \end{cases}$	$\theta = \text{volumetric water content}$ $\lambda = \text{pore-size distribution index}$ $\psi_b = \text{air-entry value}$ $\psi = \text{matric suction}$
Van Genuchten (1980)	$\theta = [\frac{1}{1 + (a\psi)^n}]^m$	$a = \text{curve constant related with air-entry value}$ $n = \text{curve constant related with inflection slope of SWCC}$
Mckee and Bumb (1987)	$\theta = \frac{1}{1 + \exp(\frac{\psi - a}{b})}$	$a, b = \text{constants}$
Fredlund and Xing (1994)	$\theta_w = C(\psi) \frac{\theta_s}{\ln[e + (\frac{\psi}{a})^n]^m}$	$C(\psi) = 1 - \frac{\ln[1 + \frac{\psi}{\psi_r}]}{\ln[1 + \frac{1000000}{\psi_r}]}$ $a, n, m = \text{constants}$ $\psi = \text{matric suction at the residual water content}$

2.2 불포화투수계수 이론

불포화지반에서 간극유체는 액체와 기체의 2가지 상으로 이루어져 있다. 물과 공기로 이루어져 있는 간극유체의 흐름해석을 위해 흐름율(flow rate)과 작용 포텐셜(driving potential)의 상관관계를 알아야 하며, 이러한 상관관계를 나타내는 값을 투수계수(coefficient of permeability)라 한다. 하지만 불포화도의 흐름문제인 경우에는 물, 공기 그리고 흙 입자의 3상 구조물 지니고 있어서 물과 공기의 흐름을 동시에 고려해야 한다. 그리고 불포화도 내 물의 흐름은 간극 내 공기가 차지하는 부분으로는 일어나지 않는다. 즉 물의 흐름은 연속된 물로 이루어진 흐름통로(flow channel)를 통해서만 발생하며, 간극 내 공기는 흙 입자처럼 생각 할 수 있다. 따라서 불포화지반은 포화지반과 유사한 조건으로 볼 수 있으며 불포화도에서도 물의 흐름이 Darcy의 법칙을 만족함을 실험을 통하여 증명하였다(Childs and Collis-George, 1950). 불포화 지반의 침투 해석에서는 함수특성곡선과 함께 불포화투수계수가 중요한 역할을 하며, 이는 실험적으로 산정할 수 있거나 본 논문 4.2 절에 기술된 것처럼 함수특성곡선 데이터를 이용하여 산정할 수도 있다.

3. 실험방법 및 결과

3.1 기본 물성실험 결과

본 연구에서는 일반철도 노반토공 xx 구간 현장을 방문하여 실내시험을 수행하기 위한 접속부 케도 성토재료들을 채취하였다. Fig. 2는 현장 일부 및 채취한 시료들을 보여주고 있다.

Table 2는 기본 물성시험 결과를 보여주고 있다. 접속부 케도



Fig. 2. Snapshot of Field Site and Materials

성토재료는 모래질의 유사한 흙 분류를 보여주고 있으며, 소성이 없는 특성을 보여주고 있다.

3.2 필터페이퍼 시험 결과

본 연구에서는 필터 페이퍼를 이용한 실내 시험법을 이용하여 함수특성곡선을 산정하였다. 본 시험방법은 ASTM D5298에 근거하고 있으며 텐시오미터나 프레스 플레이트를 이용하여 모관흡수력(matric suction)을 측정하는 직접적인 방법대신 필터 페이퍼의 시료 수분 증발 및 흡수에 대한 평형상태를 측정하여 간접적으로 모관흡수력을 산정하게 된다(Bulut et al., 2001).

본 시험법에서는 총평형 상태에 이른 필터 페이퍼의 함수량을 측정하고 이를 Fig. 3과 같은 산정식을 이용하여 모관흡수력을 산정하게 되므로, 시험방법에서 제시한 특정 필터 페이퍼를 사용해야 한다. 본 과제에서는 Whatman No. 42 필터페이퍼를 이용하여 실험을 수행하였다. 측정된 체적 함수비와 모관 흡수력간의 관계는 다음과 같이 Fredlund and Xing (1994) 모델을 이용하여 함수특성

Table 2. Summary of Physical Properties of Materials Sampled

Specimen	#6 site top	#6 site bottom	#7 site top	#7 site bottom	#4 site top	#4 site bottom
$\omega_{opt}(\%)$	12.0	10.8	12.2	11.0	10.5	10.0
$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	1.96	1.98	1.95	1.93	1.90	1.88
Gs	2.65	2.67	2.63	2.65	2.64	2.64
LL	25.87	26.11	22.00	15.00	-	-
PI	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Cu	23.5	23.5	11.5	4.0	9.5	11.3
Cc	2.39	0.94	1.06	0.39	0.61	0.63
Soil Classification	SW	SP	SW	SP	SP	SP

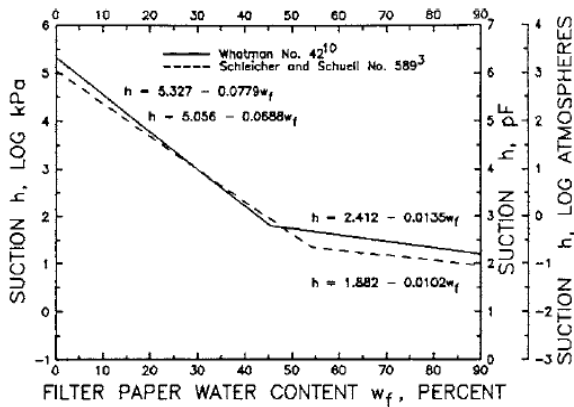


Fig. 3. Calibration Equation for Filter Paper (ASTM, 2010)

곡선을 도출하였다.

$$\theta_w = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1,000,000}{h_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\left\{ \ln\left[\left(e + \frac{\psi}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right\}^{c_f}} \right] \quad (1)$$

여기서, θ_w = 체적 함수비, θ_s = 포화체적 함수비, ψ = 모관흡수력 (kPa), a_f, b_f, c_f, h_r = 모델 상수(a_f and h_r in kPa).

ASTM D5298에 명시되어있는 시험방법은 다짐된 시료에 대한 측정법이 명시되어 있지 않으나, 기존의 문헌조사를 통해서 최대입경 4.75 mm를 갖도록 입도조정을 하고 다짐시험을 수행하고 최적 함수비 기준 건조축, 최적함수비, 최적함수비 기준 습윤상태를

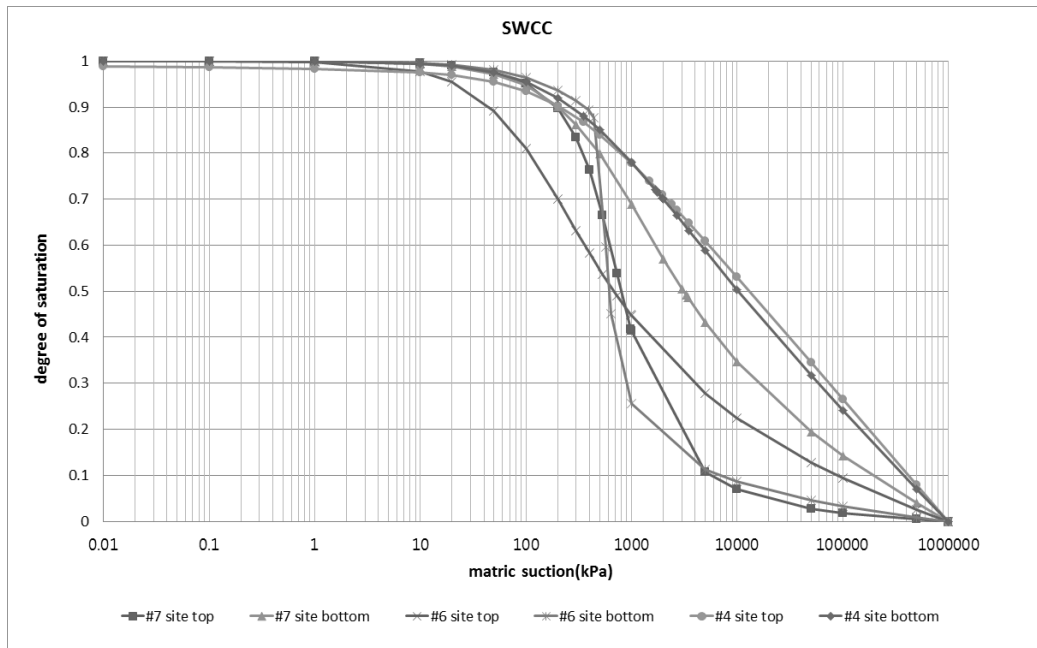


Fig. 4. Comparison of SWCC Curves

갖는 시편을 만들어 실험을 수행 하였다(Bicalho, K. V et al., 2009). 이는 다측점 데이터를 확보하여 보다 정확한 함수특성곡선을 산정하는데 이점이 있다고 판단된다. Fig. 4는 필터페이퍼 실험으로부터 얻은 함수특성곡선을 종합적으로 보여주고 있다.

위에서 볼 수 있듯이, 7공구 및 4공구 접속부 성토재료의 함수특성곡선은 상/하부 재료가 서로 유사한 경향의 곡선 형태를 보이는 반면, 6공구는 6공구 하부 재료 경우 상부재료와 비교하였을 때, 모관흡수력 증가에 따른 체적함수비 감소율이 상대적으로 큰 경향을 보인다. 이는 강우 시 우수가 침투하였을 경우 포화도 변화폭이 커지게 됨으로써, 짧은 기간에 포화도가 증가하지만 또한 투수성이 크므로 포화도가 단기간에 감소되는 경향을 보일 것으로 판단된다. 4공구 상부재료 경우 시멘트가 함유되어 있는 강화노반 재료이며 하부재료 역시 시료 채취 시 미세입자분이 많은 것으로 확인되었는데, 다른 현장들 재료에 비해 상대적으로 함수 보유율이 큰 경향을 보이고 있다. Fig. 5는 세 현장의 함수특성곡선을 비교하고 있으며, 일반적으로 최적함수비 시 포화도가 75~80% 분포함을 인지할 때 최적함수비 기준으로 습윤 혹은 건조 상태에서 모관흡수력의 변화가 3~10배 정도 비율의 증감을 보이고 있다.

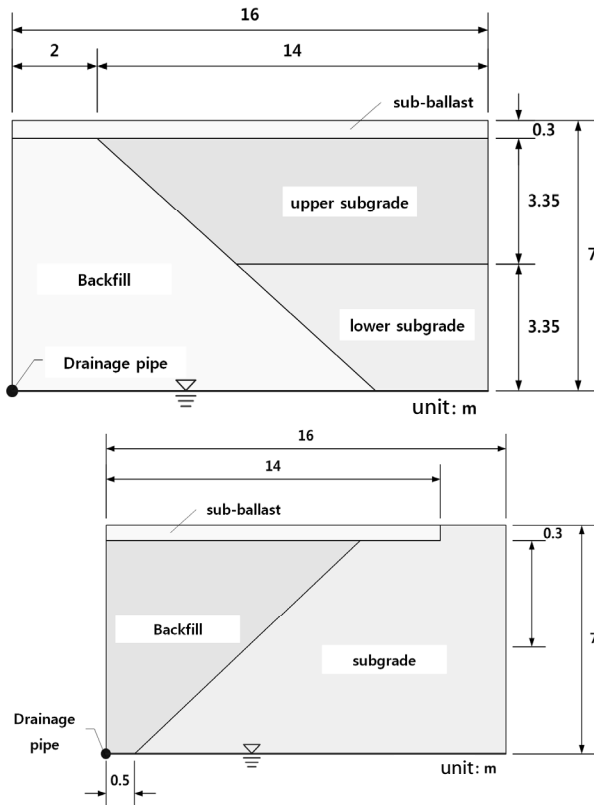


Fig. 5. Track Transition Zone for Numerical Analysis: (a) fill site and (b) cut site

4. 포화도 분포 해석

본 장에서는 수치해석을 이용하여 철도노반 구조물 접속부의 강우 시 포화도를 분석하였다. 강우 시 구조물 접속부의 포화도를 분석하기 위하여, 침투해석 프로그램인 SEEP/W를 이용하였다. 해석 단면은 일반철도 자갈케도 표준단면을 이용하였으며, 구조물 접속부의 뒤채움재 경사를 1:1.3, 1:1.5, 1:1.7로 바꿔가며 해석을 수행하였다. 최근 국내 기후 변화로 짧은 시간에 많은 양의 비가 내리는 국지성 강우가 빈번해지고 있으며 이는 노반토공 시공 단계나 혹은 조성된 사면 구조물의 안정성에 심각한 영향을 미치게 된다. 따라서, 강우 지속시간은 3일, 강우강도는 25 mm/hr, 50 mm/hr, 100 mm/hr로 나누어 해석을 진행하였다. 본 장에서 수행한 수치해석은 강우강도와 강우 지속시간에 따른 지하수위 및 간극수압 변화를 알아보려고 하였으며, 이를 바탕으로 포화영역 분포를 확인하였다.

4.1 수치해석 단면 및 경계조건

해석 단면은 일반철도 자갈케도 접속부의 표준단면을 이용하였다. 구조물 접속부의 쌓기, 깎기 해석 단면은 Fig. 5와 같이 나타내었으며, 전체 크기는 길이 16 m, 높이 7 m로 설정하였다. 구조물 뒤채움재 경사는 쌓기와 깎기 모두 1:1.3, 1:1.5, 1:1.7 세 가지 경우로 나누어 해석을 진행하였다. 해석 단면 좌측 하단에는 유공관을 배치하였으며, 지하수위는 맨 아래에 설정하였다.

구조물 접속부의 강우 시 포화도를 파악하기 위하여, Fig. 6(a)와 같이 해석 단면 상부에 강우를 나타내는 경계면 조건을 주었다. 강우 지속시간은 3일로 설정하였으며, 강우량은 Unit flux = 25 mm/hr, 50 mm/hr, 100 mm/hr 3가지 경우로 일정한 강우가 내리도록 하였다. 해석 단면 좌측에는 구조물을 나타내는 경계면 조건을 주었으며, 구조물 쪽으로의 물의 흐름은 없다고 보아 그 값을 Total flux 값을 0.0 m/s으로 주었다.

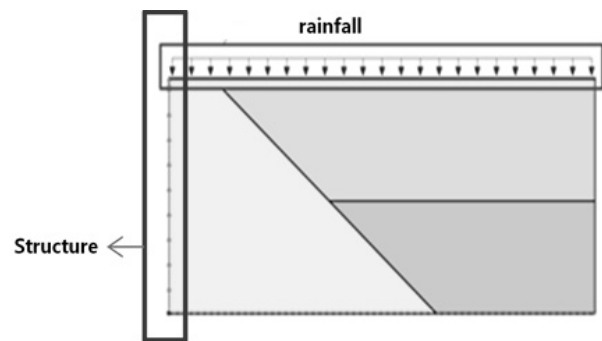


Fig. 6. Boundary Condition for Numerical Analysis

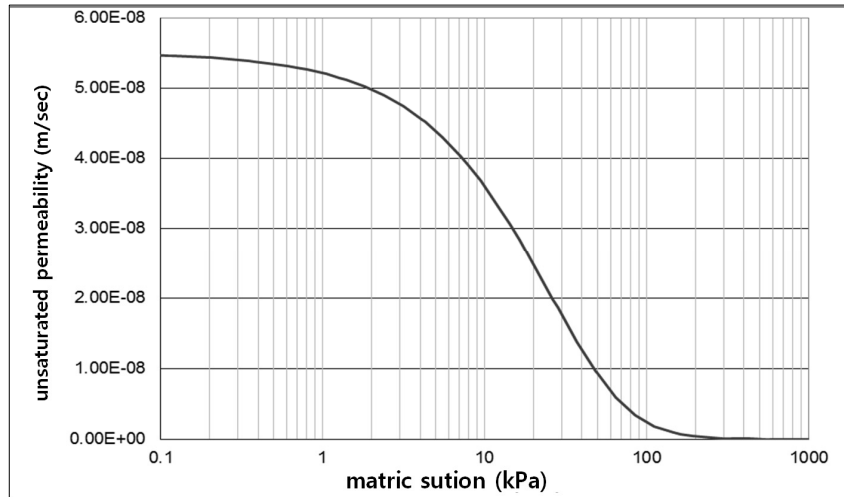


Fig. 7. Establishing Coefficient of Unsaturated Permeability Curve

4.2 수치해석 단면 및 경계조건

침투해석에서 가장 중요한 물성치는 함수특성곡선과 불포화투수계수 특성곡선으로 볼 수 있다.

함수특성곡선은 본 연구에서 수행한 필터 페이퍼 실험 결과를 이용하였다. 불포화 투수계수 특성곡선을 산정하기 위해서 Marshall (1958) and Kunze (1968)이 제시한 함수특성곡선을 이용하여 불포화투수계수 특성곡선을 산정하는 방법을 이용하였다. 이 방법에서는 함수특성곡선의 체적함수비 축을 균등하게 분할하여 Eqs. (2) and (3)을 이용하여 불포화투수 특성곡선을 Fig. 7처럼 산정하게 된다.

$$k_w(\theta_w)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \sum_{j=1}^m [(2j+1-2i)(\psi)_j^{-2}] \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$k_{sc} = A_d \sum_{j=1}^m [(2j+1-2i)(\psi)_j^{-2}] \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

여기서, $k_w(\theta_w)_i$ = 각 체적함수비에 상응하는 산정된 불포화투수계수, i =함수특성곡선의 체적함수비 축에서 최대 최소 체적함수비 사이의 등간격수, j =1부터 m 까지의 수, m : 총 등간격수, k_s = 측정된 포화투수계수, k_{sc} = 임의의 포화투수계수, A_d = 보정계수 = $\frac{T_s^2 \gamma_w \theta_s^p}{2\mu_w N} (m \cdot s^{-1} kPa^2)$, T_s = 물 표면장력, γ_w = 물의 단위중량, μ_w = 물의 절대점성계수, p = 다양한 간극의 크기의 상관관계를 나타내는 계수로써 일반적으로 2로 가정, N = 계산된 총 간격수. 여기서 보정계수 A_d 는 상수로써 Eq. (2)에서 알 수 있듯이 최종 불포화도 투수 계수의 산정에는 영향을 미치지 않으므로, 일반적으로 계산 과정의 편의를 위해 1로 가정한다.

4.3 수치해석 결과

4.3.1 쌓기 단면

4공구, 6공구, 7공구 각각의 함수특성곡선을 적용하고, SEEP/W 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행한 결과의 일부를 Tables 3 and 4와 같이 정리하였다. 그림에서 포화영역은 굵은 곡선 경계면으로 형성되는 곳을 의미하며 이는 초기에 불포화상태에서 강우침투로 인해서 포화조건으로 전이된 경우를 뜻한다. 쌓기의 경우 강우량에 따라 4공구, 6공구, 7공구 전부에서 포화영역을 볼 수 있는데, 25 mm/hr의 강우와 비교하였을 때 50 mm/hr과 100 mm/hr에서 더 많은 포화영역이 보였다. 이는 각 공구별 쌓기에서의 포화영역은 강우강도에 비례하는 것으로 판단된다. 구조물 뒤채움재 경사의 경우, 뒤채움재 경사가 1:1.3과 1:1.5에 비하여 1:1.7인 경우 포화영역이 상대적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 뒤채움재 경사가 1:1.7인 경우 상대적으로 투수성이 좋은 뒤채움재의 단면이 증가하여 강우침투를 향상 시킨 결과에 기인한다고 판단된다.

4.3.2 깎기 단면

4공구, 6공구, 7공구 각각의 함수특성곡선을 적용하고, SEEP/W 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 결과 일부를 Tables 5 and 6에 정리하였다. 깎기의 경우 강우량에 따라 4공구, 6공구, 7공구 전부에서 포화영역을 보였는데, 강우강도가 100 mm/hr의 경우 가장 넓은 포화영역을 보였다. 또한 뒤채움재 경사가 1:1.3과 1:1.7에 비하여 1:1.5 경우 포화영역이 상대적으로 감소하였다. 쌓기 단면과 달리 경사도에 따른 경향이 일정치 않았으나 대체적으로 쌓기에 비하여 깎기에서의 포화영역이 크므로 배수설계 및 재료성능 향상이 필요할 것으로 판단된다.

Table 3. Results of Seepage Analysis on Track Transition Fill Zone (1:1.3)

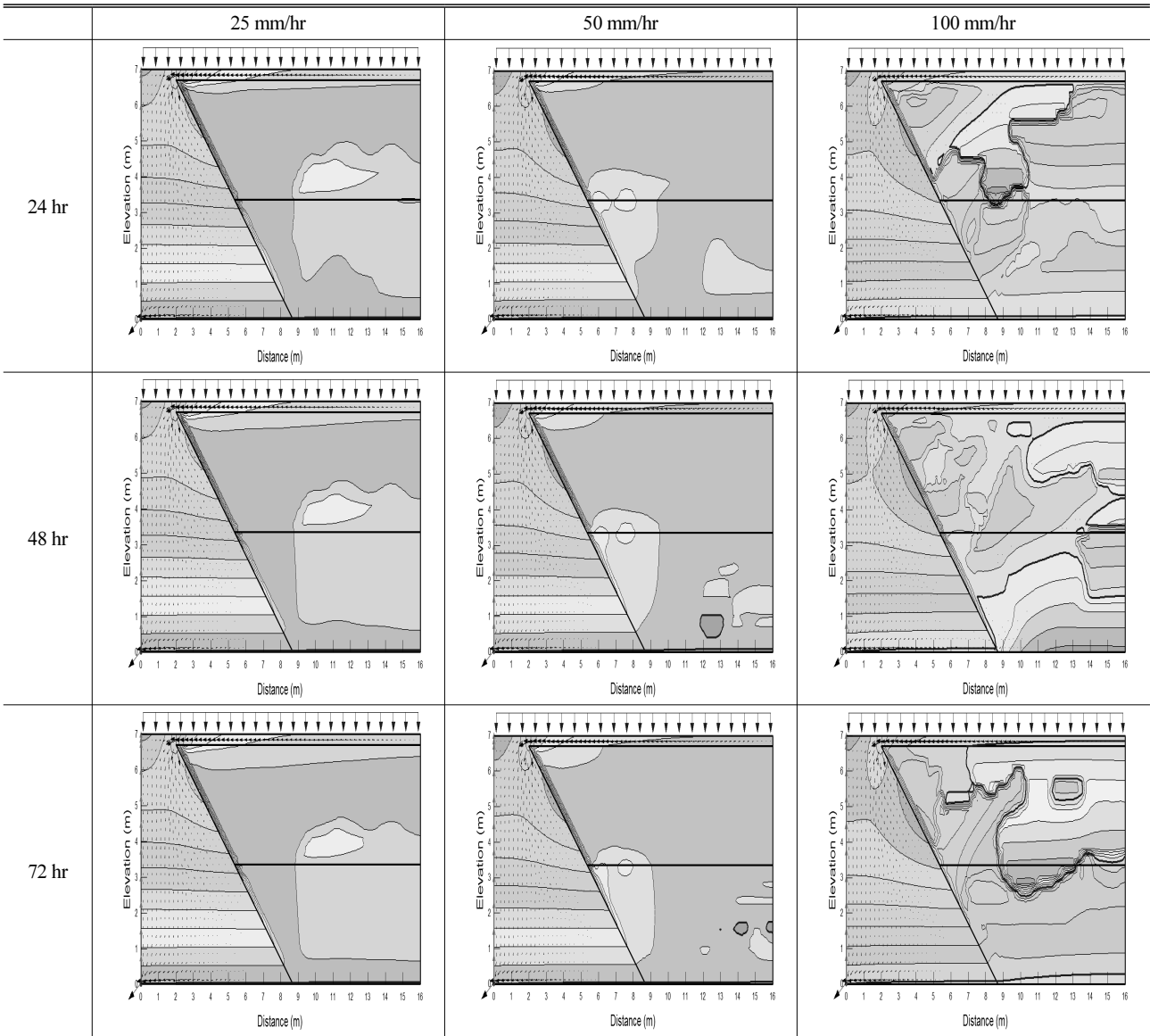


Table 4. Comparison of Saturated Zone for Different Slope on Fill Zone (100mm/hr, 72hrs)

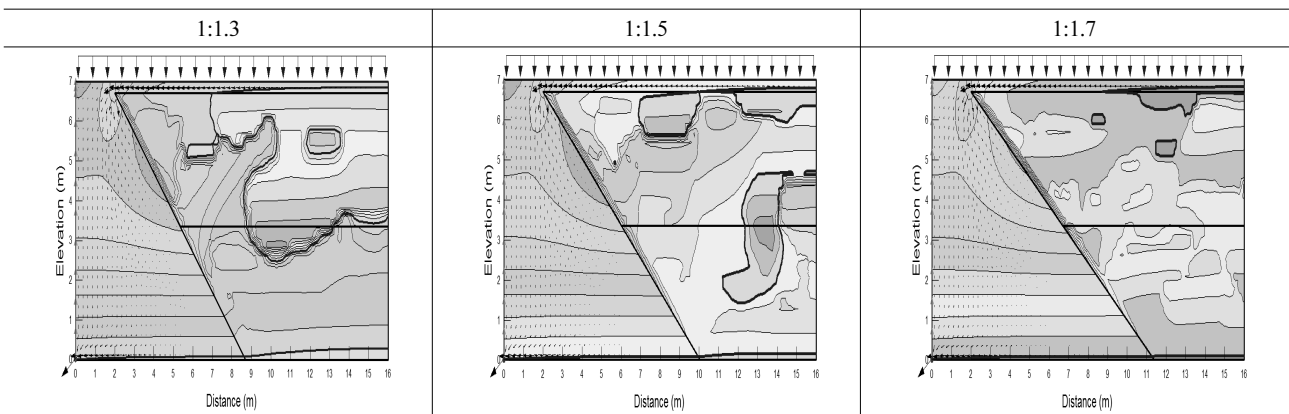


Table 5. Results of Seepage Analysis on Track Transition Cut Zone (1:1.5)

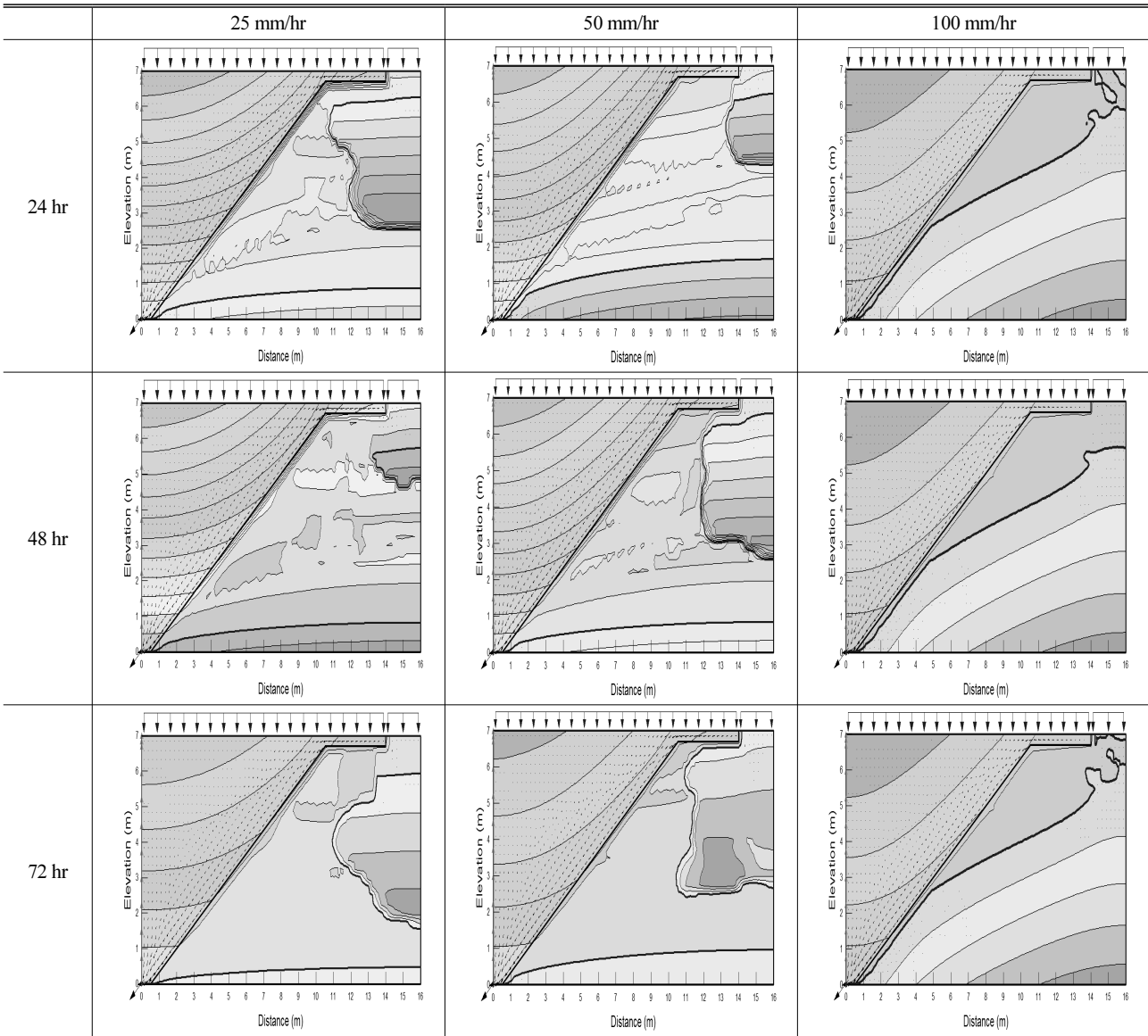
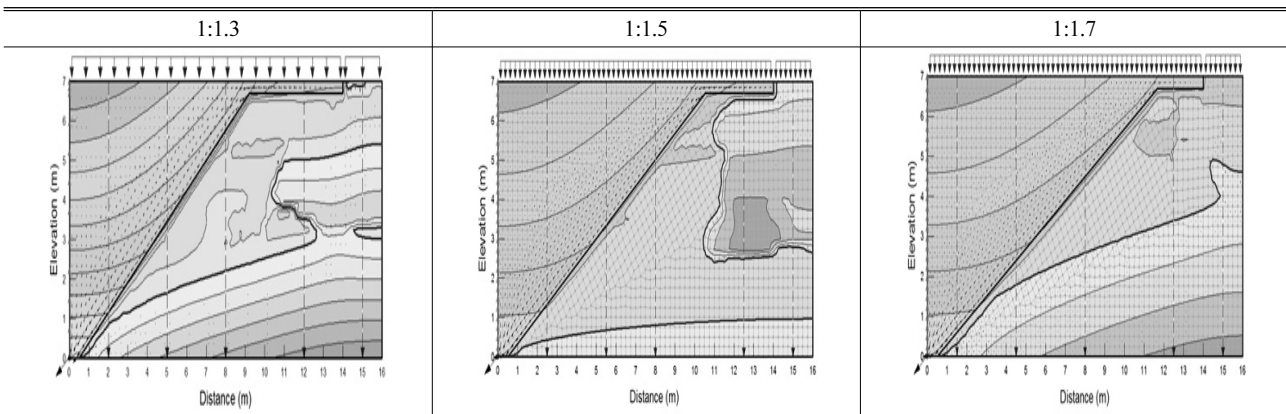


Table 6. Comparison of Saturated Zone for Different Slope on Cut Zone (50mm/hr, 72hrs)



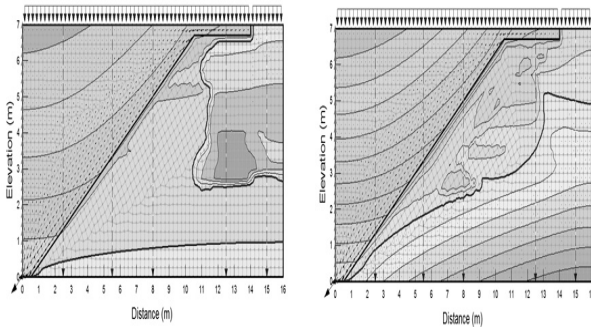


Fig. 8. Difference in Saturated Zone by SWCC

4.3.3 함수특성곡선 영향

Fig. 8은 6공구 및 7공구 접속부 절토구간 포화도를 비교하고 있다. 이는 같은 단면에서 뒤채움재로 사용된 6공구 상부 및 7공구 상부 재료의 함수특성곡선 및 불포화투수계수만의 차이로 포화도 분포가 다른 것을 확인 할 수 있다. 이는 Fig. 4에서처럼 동일한 모관 흡수력에서 상대적으로 높은 포화도를 갖는 7공구 함수특성곡선의 특성이 반영된 결과라고 판단되며, 포화도 분포를 위한 수치해석에 있어서 함수특성곡선 입력치의 중요성을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구는 접속부를 구성하고 있는 성토재료를 현장에서 채취하여 기본 물성 시험을 수행 하였다. 그리고, 다짐성토의 함수특성곡선을 필터 페이퍼를 이용한 실내 시험을 이용하여 산정하고 이를 침투해석에 이용하여 일반철도 자갈궤도 접속부 쌓기 및 깎기 다짐성토의 강우 시 침투해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 본 연구에서는 필터 페이퍼를 이용한 실내 시험법을 이용하여 현장에서 채취한 노반 재료에 대한 함수특성곡선을 도출하고자 하였다. 특히, 다짐성토의 함수특성을 파악하기 위해서 입도조정을 통한 다짐시험을 하여 최적다짐조건 및 최적다짐조건 기준 건조 및 습윤 조건을 대표할 수 있는 시료를 만들어 측정함으로써 실제 현장에서 예측되는 함수비 변화를 고려한 함수특성곡선을 제시할 수 있는 실험방법을 제안하였다.
- (2) 함수특성곡선 및 불포화투수계수 데이터를 이용하여 접속부 쌓기 및 깎기 성토단면에 대한 침투해석을 수행하였다. 포화도 존 분포는 강우지속시간 3일 동안 시간 경과에 따라서 그리고 강우 강도(20, 50, 100 mm/hr)에 비례하여 증가하였다.
- (3) 접속부 쌓기부 경우 뒤채움재 경사도가 1:1.7일 경우가 1:1.5 및 1:1.3인 경우보다 포화도존 영역이 확연히 감소하였으며

이는 상대적으로 투수성이 좋은 뒤채움재의 영역이 증가한 결과로 보인다. 반면, 깎기부 경우 경사도에 대한 경향이 일정치 않았으나, 대체적으로 쌓기부에 비해서 동일 강우 조건 및 강우지속시간인 경우 더 많은 포화 영역이 생성되었음을 확인 하였다. 이는 깎기부 시공 시 엄격한 배수 설계가 요구됨을 확인한 결과라고 보인다.

- (4) 동일한 조건에서 서로 다른 공구에서 얻은 함수특성곡선 데이터의 차이로 포화영역이 다른 것을 확인하였으며, 이는 침투해석 시 함수특성곡선 산정의 중요성을 확인하였다.
- (5) 본 연구에서 산정한 궤도 접속부 성토부의 포화도 분포는 향후 철도노반 역학적 설계 시 필요한 변형계수나 탄성계수와의 상관성 분석을 통해서 강우조건을 고려하였을 경우 장기적인 공용성능을 확인하는 데 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 “콘크리트궤도 철도교량의 신뢰도기반 설계법 개발 및 철도 토공노반설계 선형 기준 개선”연구비지원(14RTRP-B067919-02)에 의해 수행되었습니다.

References

ASTM D5298 (2010). *Standard test method for measurement of soil suction using filter paper*, Washington, D. C.

Bicalho, K. V., Marinho, F. A. M., Fleureau, J. M., Gomes C. A. and Ferreira, S. (2009). “Evaluation of filter paper calibrations for indirect determination of soil suctions of an unsaturated compacted silty sand.” *Proc. of the 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Eng.*, Egypt, 2009.

Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964). “Hydraulic properties of porous media.” *Hydrology Paper no.3*, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo, 1964.

Bulut, R., Lytton, R. L. and Wray, W. K. (2001) “Suction measurements by filter paper.” *ASCE Geotechnical Special Publication*, No. 115, pp. 243-261.

Chandra, D., Chua, K. M. and Lytton, R. L. (1989). “Effects of temperature and moisture on load response of granular base material in thin pavements.” *Transportation Research Record No. 1252*, National Research Council, Washington, D. C., pp. 33-41.

Childs, E. C. and Collis-George, N. (1950). “The permeability of porous materials.” *Proc. Royal Soc.*, Vol. 210, No. A, pp. 392-405.

Drumm, E., Reeves, J., Madgett, M. and Trolinger, W. (1997). “Subgrade resilient modulus correction for saturation effects.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 123, No. 7, pp. 663-670.

Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994). “Equations for the soil-water

- characteristic curve.” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532.
- Gardner, W. R. (1958). “Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application of evaporation from a water table.” *Soil Science*, Vol. 85, pp. 223-232.
- Korea Rail Network Authority (2011). *Railroad construction specification*, 11-B551219-000019-01
- Kunze, R. J., Uehara, G. and Graham, K. (1968). “Factors important in the calculation of hydraulic conductivity.” *Proc. Soil Sci.*, Vol. 32, pp. 760-765.
- Lee, S., Lee, S. and Jang, B. (2002). “Unsaturated shear strength characteristics of weathered granite soils.” *J. of the Korean Society of Civil Eng.*, Vol. 22, No. 1, pp. 81-88.
- Marshall, T. J. (1958). “A relation between permeability and size distribution of pores.” *J. Soil Sci.*, Vol. 9, pp. 1-8.
- McKee, C. R. and Bumb, A. C. (1987). “Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas.” In SPIE Formation Evaluation, December, pp. 599-608.
- Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs. (2011). *2011 Pavement structural design specification*.
- Oh, J., Fernando, E. G. and Lee, W. (2010). “Consideration of moisture effect on load bearing capacity in texas flexible pavements.” *KSCE J. of Civil Eng.*, Vol. 14, No. 4, pp. 493-501.
- Oh, J., Fernando, E. G., Holzschuher, C. and Horhota, D. (2012). “Comparison of resilient modulus values for florida flexible mechanistic-empirical pavement design.” *Int. J. of Pavement Eng.*, Vol. 13, No. 5, pp. 472-484.
- Ping, W. V., Wang, Y. and Yang, Z. (2000). *Field and laboratory evaluation of resilient modulus measurements of florida pavements soils*, Research Report No. FL/DOT/RMC/0636(F)-4538, FAMU-FSU College of Engineering, Tallahassee, Fl.
- Van Genuchten, M. T. (1980). “A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” *Soil Sci. Soc. Amer. Journal*, Vol. 44, pp. 892-898.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996). “Model of the prediction of shear strength with respect to soil suction.” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 379-392.
- Zapata, C., E. and Houston, W. N. (2008). *Calibration and validation of the enhanced integrated climatic model for pavement design*, NCHRP Report 602, Transportation Research Board, Washington, D.C.