

조립질 지반재료로 이루어진 기초의 불포화 침투 및 배수성능 평가

Infiltration and Drainage Capacity of Unsaturated Soil-Aggregate Foundation System

성열정¹⁾, Yeoul-Jung Sung, 박성완²⁾, Seong-Wan Park, 태두형³⁾, Doo-Hyung Tae

¹⁾ 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg, Dankook University

²⁾ 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg, Dankook University

³⁾ 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg, Dankook University

SYNOPSIS : Soil-aggregate system in pavement foundations exist in unsaturated conditions. However, change in water content on foundation layers due to joint and structural cracks during rainfall may cause problems like layer deformations or partial settlements. Therefore, a need exist to evaluate the infiltration and drainage capacity of soil-aggregate foundation system under both saturated and unsaturated conditions.

To do that, a laboratory soil-water characteristic curve and permeability under unsaturated conditions are assessed to establish hydraulic properties of geomaterials and limited numerical analysis are performed respectively. As a result, it was found that suction profiles and drainage process was greatly influenced by the initial suction of soil-aggregate system at the time of infiltration, soil water characteristics curves, and hysteresis effects.

Keywords : infiltration, drainage, unsaturated, soil-aggregate, pavement foundation

1. 서론

계절적인 영향으로 인한 도로지반에서의 급격한 수분 변화는 국부적으로 하부 기초에 대한 변형 및 침하 등의 문제점을 야기 시킨다. 특히 강우시 도로구조물을 구성하고 있는 지반재료는 함수량 변화에 따라서 균열 및 내구수명 단축을 촉진 할 수 있으며, 최악의 경우 붕괴의 우려가 있다. 도로구조물의 지반재료는 강도적인 측면에서 많은 연구가 활발히 진행된 반면 내구적인 부분에 대한 검토는 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 국내 도로구조물을 구성하는 대표적인 지반재료를 활용하여 불포화 함수특성 시험을 실시하고 불포화 투수계수를 추정하였다. 이후 2차원 유한요소 프로그램, SEEP/W, 를 활용하여 강우조건에서 조립질 지반재료 기초에서 침투 및 배수성능을 평가하였다.

2. 불포화 함수특성 시험

본 논문에서 사용된 조립질 지반재료는 표 1과 같은데 SW과 SM계열이다. 포화투수계수는 도로구조물의 구속압력상태를 고려하여 구속압력 34.5kPa으로 시험을 실시하여 각각의 값을 획득하였는데 SM시료에 비해 SW시료가 약 10배정도 크게 추정되었다.

표 1. 대상재료의 기본 물성값

구분기호		SW	SM
비 중		2.653	2.689
소성지수(%)		NP	6.8
입도 시험	#200 통과율(%)	4.92	24.26
	#4 통과율(%)	93.82	85.30
분류	통일분류(USCS)	SW	SM
다짐 시험	최적함수비(%)	9.50	15.80
	최대건조밀도(t/m ³)	1.92	1.81
투수시험	포화투수계수(k, cm/sec)	5.15×10 ⁻⁵	3.95×10 ⁻⁶

일반적으로 도로기초부의 지반재료는 불포화상태로 존재하게 되는데 이는 전체적으로 지하수위 상부에 존재함에 따라 계절적인 영향으로 함수비의 변동이 있으며 강우의 유입이 될 경우 불포화-포화조건 의 평가가 반드시 필요하다. 따라서 불포화조건에서 흙의 흡수력과 함수량의 관계로 나타나는 함수특성 곡선을 그림 1의 축변환기법을 활용한 흡수력 측정 장치로 건조와 습윤 과정을 각각 측정하였다. 결과를 활용하여 Fredlund와 Xing이 1994년 제안한 식(1)을 이용하여 3계수 비선형 함수특성곡선식을 수립 하였다. 또한 흡수력에 따른 상대 투수계수와 포화투수계수를 이용하여 Fredlund 등(1994)이 제안한 흡수력에 따른 불포화투수계수를 식(2)로 추정하였다.

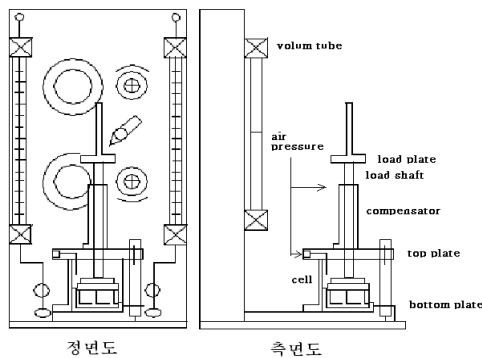


그림 1. 흡수력 측정 장치

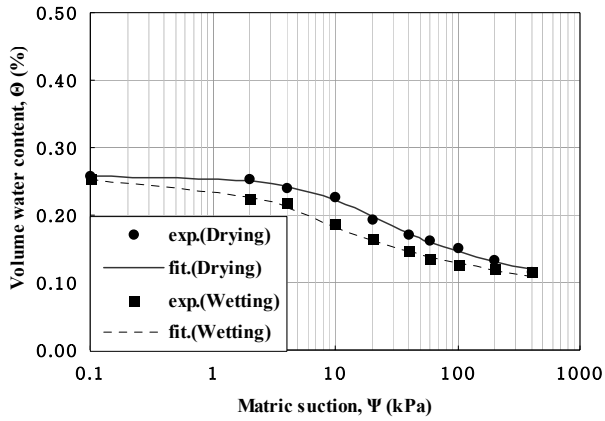
$$\theta = C(\psi) \theta_s \left[\frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right]^m \quad (1)$$

여기서, $C(\psi)$: 보정계수
 θ_s : 포화 체적당 함수량(%)
 a, n, m : 모델계수

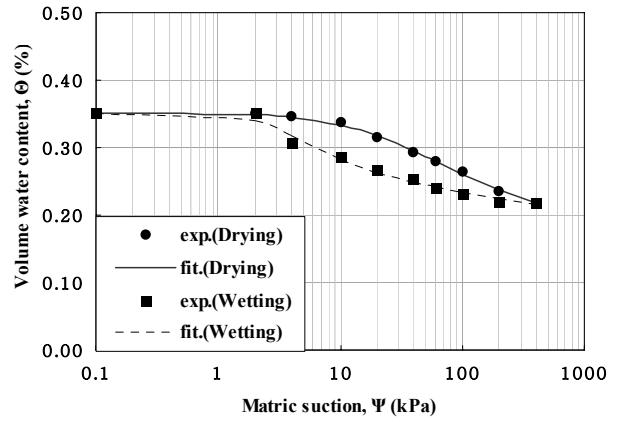
$$K_r = \Theta^q(\psi) \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{ave})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (2)$$

여기서, K_r : 흡수력에 따른 상대투수계수
 $\theta^a(\psi)$: 흡수력에 따른 보정계수
 b : $\ln(10^6)$, kPa
 ψ_{aev} : 공기함입값, kPa
 y : $\ln(\psi)$ 에 해당하는 적분상수

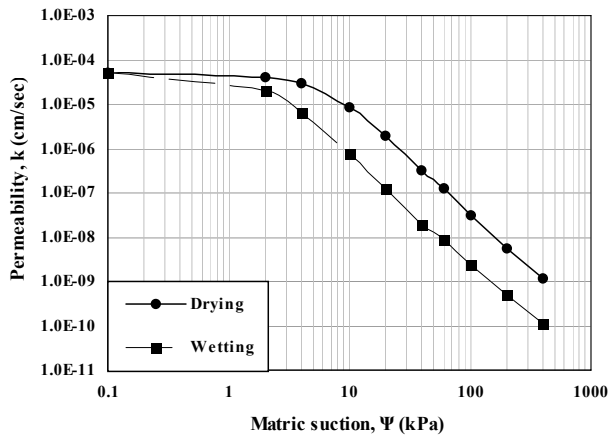
그림 2는 시험결과를 제시된 모델식에 적용하여 SM 및 SW 시료에 대하여 함수특성곡선과 불포화투수계수를 각각 나타낸 것이다.



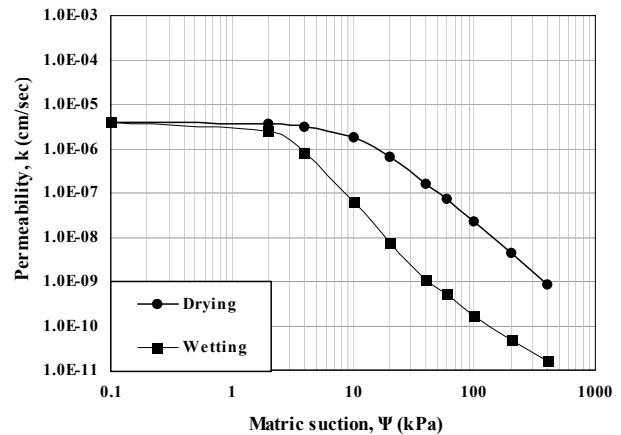
(a) 함수특성곡선(SW)



(b) 함수특성곡선(SM)



(c) 흡수력에 따른 투수계수(SW)



(d) 흡수력에 따른 투수계수(SM)

그림 2. 함수특성곡선 및 흡수력에 따른 불포화투수계수

그림2에서 건조와 습윤 경로의 이력현상이 존재하며 SM시료의 경우가 상대적으로 큼을 알 수 있다. 또한 흡수력의 범위는 약 0~400kPa이며 공기함입값은 SM계열보다 SW계열에서 작은 것으로 추정되었다.

3. 불포화조건에서의 흐름

함수특성곡선의 형태는 비선형적인 특징을 가지므로 흡수력에 따른 체적함수비의 변화를 나타내는 습윤용적과 확산은 불포화토 부정류해석에 있어서 매우 중요하다. 습윤용적은 함수특성곡선의 체적함수비(θ)와 모관흡수력(ψ)간 기울기를 나타낸다. 습윤용적은 식 (3)과 같이 나타내는데 습윤용적과 불포화투수계수와와의 관계를 나타내는 확산은 식 (4)와 같다.

$$C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \quad (3)$$

여기서, $C(\theta)$: 습윤용적
 θ : 체적함수비
 ψ : 모관 흡수력

$$D(\theta) = \frac{k_w(\theta)}{C(\theta)} \quad (4)$$

여기서, $D(\theta)$: 확산
 k_w : 불포화 투수계수

따라서, 함수특성곡선의 부정류해석은 불포화투수계수와 습윤용적 그리고 확산에 대한 관계로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_w(\theta) = D(\theta)C(\theta) = D(\theta) \left(\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right) \quad (5)$$

그림 3은 대상 재료에 대한 습윤용적을 나타낸 것이다. 재료의 흡수력에 대한 습윤용적의 습윤경로에 대한 크기는 작은 흡수력에서 SW계열이 높은 값을 보이나 약 7kPa을 지나면서 SM계열이 높은 값을 보임을 알 수 있었다. 이는 습윤경로의 습윤용적은 체적함수비와 모관흡수력의 기울기로 나타나게 되며 이때 SW계열의 기울기는 작은 흡수력일때 SM계열보다 크고 흡수력이 커질수록 SM계열보다 작아지기 때문이다. 또한 전반적으로 건조경로보다 습윤경로측이 큰 습윤용적을 나타냈으며, 건조경로측의 습윤용적은 SM계열보다 SW계열에서 크게 나타났다.

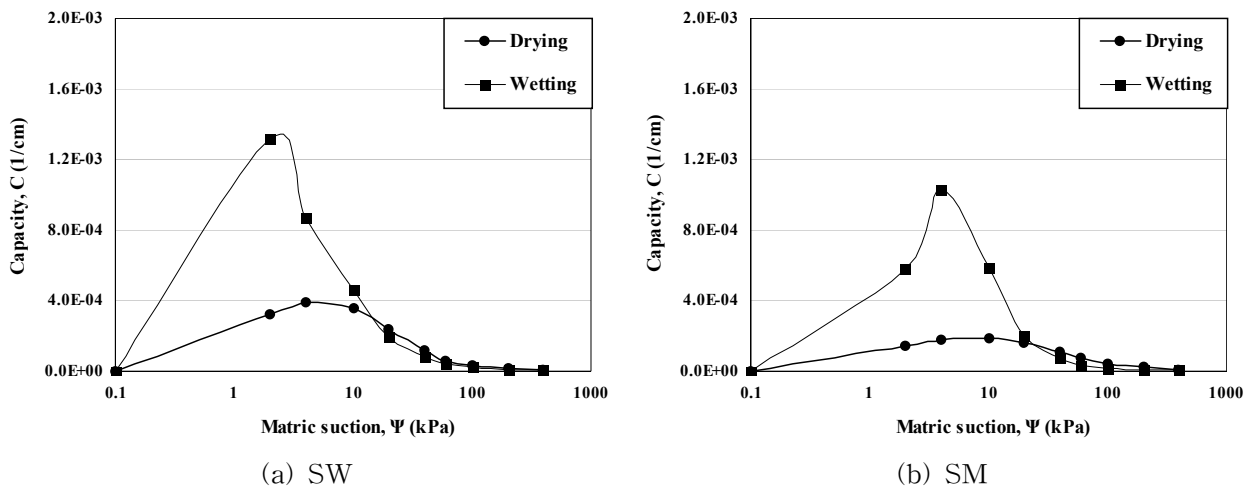


그림 3. 흡수력에 대한 습윤용적

그림 4는 흡수력에 대한 확산을 나타낸 것이다. 그 결과 습윤경로와 건조경로측에서 SW계열재료가 SM계열재료보다 큰 확산의 값을 갖는 것을 알 수 있었다. 또한 확산은 투수계수와 습윤용적의 비로써 포화에 가까울수록 확산의 값은 커지며 건조상태에서는 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. 흡수력에 따른

확산은 함수특성곡선의 건조경로에서의 확산이 습윤경로보다 크며, 세립분을 많이 함유한 시료보다 조립질 시료에서 확산의 크기가 큼을 알 수 있었다. 이는 투수계수의 영향보다는 습윤용적의 영향이 더 크게 기인하는 것으로 추정된다.

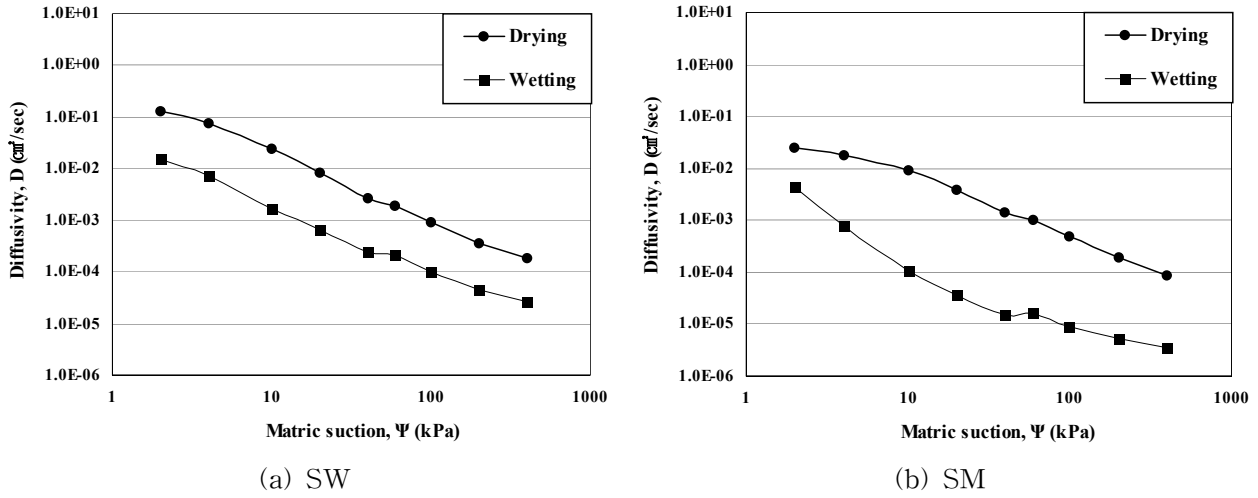


그림 4. 흡수력에 대한 확산

4. 침투 및 배수 성능 해석

침투 및 배수 성능을 살펴보기 위해 그림 5과 같이 높이 1m, 폭 0.5m인 단순 지반체를 가정하여 모델링 하였고 획득한 함수특성곡선 및 불포화투수계수를 해석에 활용하였다. 기존의 불포화 침투에 대한 사면 관련 연구(이인모 등 2003, 신길호 등 2006)와 실내시험 연구(Indrawan 등 2007)에서 물의 침투시 흡수력은 습윤경로와 근접한 범위에서 분포하며 실내 침투장치와 수치해석을 비교한 결과 침투시는 습윤경로, 배수시에는 건조경로가 잘 일치한다고 보고된 바 있다. 따라서 침투와 배수를 고려하여 침투시에는 습윤경로와 배수시에는 건조경로를 적용하여 표 2와 같은 조건으로 침투 및 배수 성능을 살펴보았다. 침투시 초기흡수력에 따른 간극수압분포와 침투성능을 살펴보았는데 침투율은 시간에 따라 침투되는 물의 양에 대한 완전포화시 물의 양 비로 식 (6)으로 산정하였다. 또한 배수율은 강우강도 후에 대상 재료의 완전포화시 시간에 따라 배수되는 물의 양의 비로 나타내어 성능을 평가하였고 식 (7)과 같다.

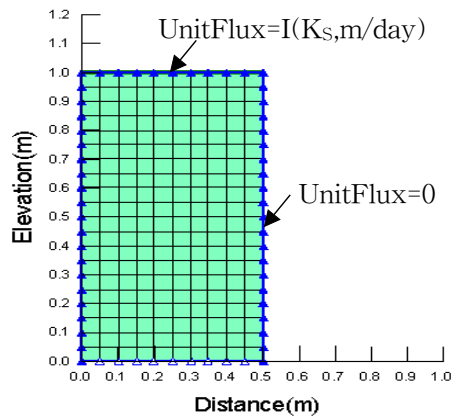


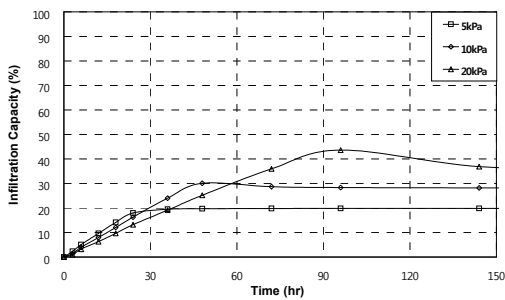
그림 5. 침투 및 해석을 위한 요소망

$$\text{침투율}(\%) = \frac{\text{시간에 따라 침투되는 물의 체적}(m^3)}{\text{대상재료 포화시 전체 물의 체적}(m^3)} \times 100 \quad (6)$$

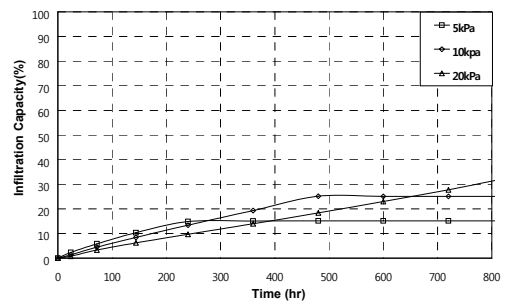
$$\text{배수율}(\%) = \frac{\text{시간에 따라 배수되는 물의 체적}(m^3)}{\text{대상재료에 침투된 물의 체적}(m^3)} \times 100 \quad (7)$$

표 2. 해석시 적용된 입력 물성

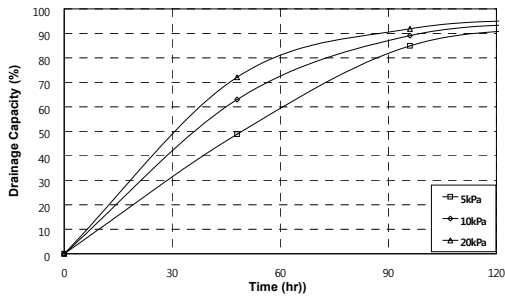
구분	함수특성곡선	초기 흡수력(kPa)	포화투수계수(cm/sec)	비고
SW	침투시 건조 및 배수시 습윤경로	5, 10, 20	5.15×10^{-5}	강우강도(I) = 포화투수계수(Ks)
SM			3.95×10^{-6}	



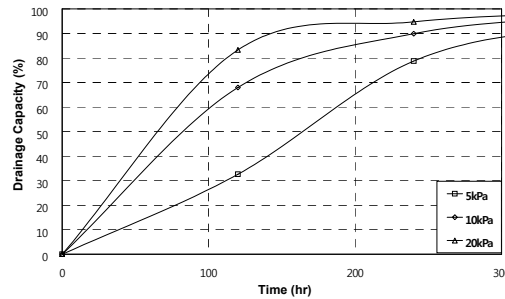
(a) 침투시 (SW)



(b) 침투시 (SM)



(c) 배수시 (SW)



(d) 배수시 (SM)

그림 8. 초기흡수력에 따른 침투 및 배수성능(습윤경로)

그림 8은 식 (6)과 식 (7)을 적용하여 침투 및 배수 성능을 나타낸 것이다. 침투시 초기흡수력에 따라서 침투수의 양이 달라지며 침투되는 시간도 흡수력이 커질수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 강우시 지표면으로부터 침투되는 침투수는 흡수력이 클수록 물을 함유하고자 하는 힘이 커지는 불포화투수 특성의 영향을 받아 시간이 증가하였다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 흙과 쇄석이 조합된 조립질 지반재료에 대하여 불포화함수특성 시험 및 수치해석을 실시하여 침투 및 배수성능을 살펴보았으며, 결과를 바탕으로 다음과 같은 부분적인 결과를 간략하게 요

약할 수 있다.

- (1) 흡과 왜속 등이 조합된 조립질 지반재료에서도 이력현상으로 인하여 건조경로보다 습윤경로에서 흡수력에 따른 큰 투수계수 값을 나타내었다. 또한 세립분이 작은 시료에서 확산의 크기가 크게 나타나는데 이는 투수계수의 영향 보다는 습윤 용적의 영향이 크게 기인하는 것으로 추정된다.
- (2) 침투평가지 초기흡수력에 따라 침투수의 양과 침투되는 시간이 차이가 나타나며 배수시에는 배수율 약60%까지 포화투수계수의 영향을 받으며, 그 이상에서는 불포화 투수계수의 영향을 받아 배수 시간이 증가하는 것으로 분석되었다.
- (2) 지하수면 상부에 위치하는 다져진 조립질 지반재료에 대한 침투 및 배수성능 평가는 강우로 인한 침투에 따른 습윤 전면부의 움직임과 재료의 함수특성 이력에 따라 배수성능에 많은 차이가 있음으로 평가지 보다 현실적인 조건을 고려할 수 있는 조건의 설정이 매우 필수적임을 알 수 있다.

참고문헌

1. 신길호, 박성완(2006), “풍화계열 사면의 불포화 함수특성곡선 이력이 강우 침투에 미치는 영향”, 한국지반공학회논문집 제22권 제7호, pp.55-64
2. 이인모, 조성우, 김영욱, 정상규(2003), “풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압변화에 대한 실험연구”, 한국지반공학회논문집 제19권, pp.41-49.
3. Fredlund, D. G. and A. Xing(1994), "Equations for the Soil-Water Characteristics Curve," Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 521-532.
4. Fredlund, D. G., A. Xing, and S. Huang(1994), "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristics Curve," Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 533-546.
5. Indrawan, I.G.B., Rahardjo, H., and Leong, E.C.,(2007) "Drying and Wetting Characteristics of a Two-layer Soil Column" Canadian Geotech. J., Vol. 44, pp 20-32.