

# 화강 풍화 노상토의 함수특성 거동

## Hydraulic Behaviors of Weathered Granite Pavement Subgrades

박성완\* · 황규영\*\* ·

Park, Seong-Wan · Hwang, Kyu Young

### 1. 서론

일반적으로 노상토 함수량의 변화는 노상토의 지지력에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서, 우리나라와 같이 기후가 사계절인 지역에서는 포장의 설계에 있어서 계절적인 영향의 변화를 적절하게 고려한 설계가 필요하다. 또한 86'AASHTO 포장 설계법에서도 노상층의 설계 회복 탄성계수(Resilient Modulus) 값을 계절적 함수량 변동을 고려한 유효 회복탄성계수(Effective Resilient Modulus)값으로 적용하도록 규정하고 있다. 그러나, 현재 국내 노상토의 연중 함수량 변화에 대한 자료는 전무한 실정이며 이러한 함수량 변화에 가장 많은 영향을 미치는 흙의 흡수력(Suction)변화에 관한 자료도 전무한 실정이다.

현재 중부내륙고속도로 시험도로(Test Road)에서 WCR(Water Content Reflectometer)형태의 함수량계를 이용하여 연중 함수량이 측정되고 있으나 함수량계에 대해 보정이 실시되지 않은 상태로 측정되고 있으므로, 본 연구에서는 실내 보정실험을 통해 현장 함수량의 자료를 보정하였으며, 불포화(Unsaturated)상태로 존재하는 노상토에 대하여 함수특성시험으로 흡수력-함수량의 관계를 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve)으로 수립하였다. 이를 통해 화강풍화 계열의 노상토에 대한 계절별 함수량과 흡수력의 변화폭을 제시하고 계절적인 영향을 고려한 노상토의 함수특성 거동을 평가하였다.

### 2. 실내실험

#### 2.1 기본 물성 실험

본 연구에서는 WCR방식의 함수량계가 설치되어있는 시험도로의 노상토를 이용하여 시험을 수행하였으며, 표 1은 노상토 시료의 기본 물성치를 나타내고 있으며 그림 1의 입도분포 시험결과로부터 시료는 통일분류법에 의해 SW로 분류되었고 그림 2의 다짐시험 결과로부터 최적함수비는 9.42%, 최대 건조단위중량은 1.924t/m<sup>3</sup>으로 나타났다.

표 1. 노상토 시료의 기본 물성치

구 분		시험값
비 중		2.65
소성지수(PI, %)		NP
흙 분류	통일분류	SW
다짐시험결과	최적함수비(%)	9.42
	최대건조단위중량(t/m <sup>3</sup> )	1.924

\* 단국대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사 · 02-799-1363 (E-mail : spark@dankook.ac.kr)

\*\* 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 02-709-2555 (E-mail : hky21th@hanmail.net)

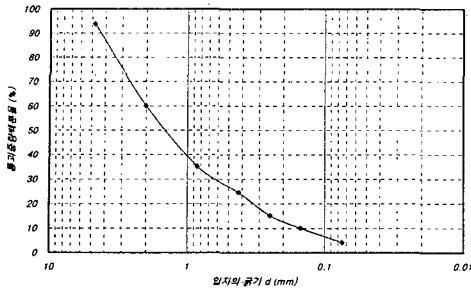


그림 1. 노상토의 입도분포 곡선

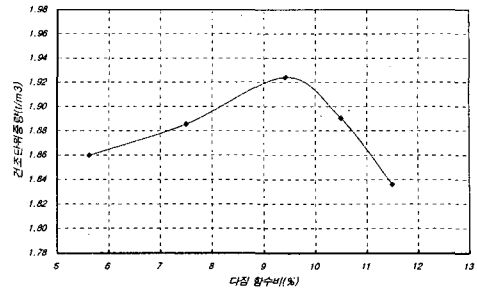


그림 2. 노상토의 다짐시험 결과

## 2.2 함수량계측 결과의 보정 실험

현재 시험도로내 노상토에 계절적인 함수량변화를 주기적으로 측정하기 위해 WCR방식의 함수량계를 아스팔트 및 콘크리트 포장체에 깊이별로 설치하여 운용중에 있다. 그러나, WCR방식의 함수량계는 흙의 종류, 밀도 및 환경조건 등에 따라 측정치가 다소 달라지며, 또한 저주파대를 사용하는 장비의 특성으로 인한 오차가 다소 발생하고 있는 실정으로 그에 따른 보정이 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 상기 영향들을 고려하여 현장조건에 적합한 보정방정식을 구하여 보다 정확한 노상토 함수량예측이 이루어지도록 하였다. 그림 3에서 5와 같이 실내에서 모형 토조 및 원형 셀 실험을 실시하여 보정방정식을 제시하였으며, 시험도로 현장에서 Coring을 실시해 보정을 통한 함수량 예측 값을 검증하였다.

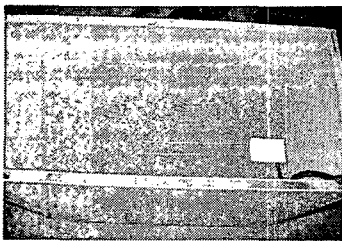


그림 3. 모형 토조 실험

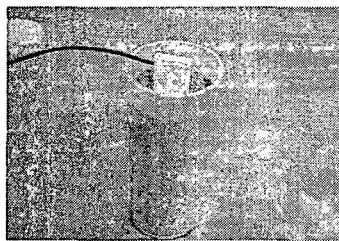


그림 4. 원형 셀 실험

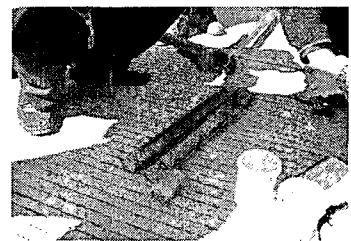


그림 5. 현장 Coring

그림 6은 2003년 7월부터 2004년 6월까지 계속된 시험도로의 대표적인 아스팔트 포장 하부 노상토의 깊이별 함수량의 변화이고 그림 7은 실내 보정실험을 통해 구하여진 보정방정식을 이용하여 계측된 함수량을 보정한 결과이다. 강수량이 많은 여름철에는 높은 함수량을 나타내고 있으며 건기인 겨울철에는 낮은 함수량을 나타내어 일반적인 경향과는 유사한 결과를 나타내었으나, 함수량 보정 후인 그림 7을 보면 여름철의 함수량이 보정 전보다 작게 나타내어 현재 함수량 계측은 과대한 계측값을 측정하고 있음을 판단할 수 있다. 함수량 보정방정식의 검증을 위해 시험도로 현장에서 Coring을 실시하여 보정 후의 함수량변동과 비교한 결과 보정 전 보다는 현장 함수량에 상당히 근접한 결과를 나타내었다.

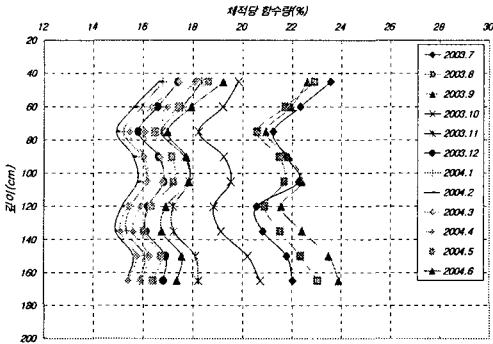


그림 6. 깊이별 체적당 함수량의 변화 (보정전)

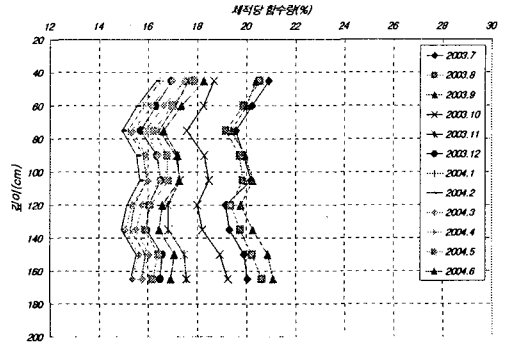


그림 7. 깊이별 체적당 함수량의 변화 (보정후)

2.3 불포화 함수특성 실험

대부분의 노상토는 완전 포화 또는 완전 건조한 상태로 존재하지 않고 불포화의 상태로 존재하게 된다. 따라서 노상토의 계절별 변동에 따른 거동을 분석하기 위해서는 불포화 토질역학적인 해석이 필수적이라 할 수 있다. 불포화 상태에서 흙에 대한 특성을 판단하기 위한 기본요소는 흙의 부압(negative pore pressure)에 의한 흡수력(suction)이다. 일반적으로 불포화된 노상토는 포화지반과는 달리 흙 입자와 물, 그리고 공기 사이의 모세관 현상으로 포화토와는 매우 다른 거동특성을 나타낸다. 그러므로 모관흡수력(matric suction)의 차이에 따라서 불포화 노상토의 거동이 특성화 된다고 할 수 있다.

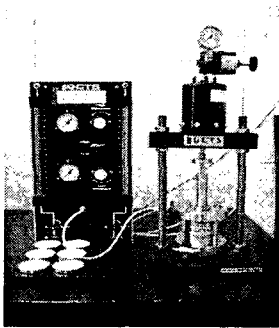


그림 8. 흡수력 측정기

따라서, 불포화 노상토의 거동특성을 설명하는 가장 중요한 흙의 흡수력을 알기 위해 불포화 함수특성 실험을 통해 흙의 흡수력과 함수량과의 관계로 나타나는 함수특성곡선(SWCC)을 구하였다. 불포화 함수특성 실험을 수행하기 위해 그림 8과 같이 축변환(Axis Translation)기법을 활용한 압력계를 사용하여 대상 노상토의 흡수력을 측정하였다. 실험 장치는 크게 패널부와 압력셀로 구분되는데, 공기압축펌프로 연결되어진 패널부는 압력을 제어할 수 있는 조절 밸브와 게이지가 있고 최대 2000kPa까지 조절이 가능하다. 양쪽에 volume tube가 있어 시료에서 빠져나온 물의 양을 체크하는데, 양쪽 volume tube의 수위가 같아지고 더 이상의 눈금 변화가 없으면 평형상태에 도달하였음을 나타낸다. 패널 내의 공기 압력게이지에서 제어된 압력이 시료가 거치된 셀(cell) 내부로 연결할 수 있는데, 셀(cell)부의 바닥판은 다공판과 시료가 놓여진다.

시료거치 후 충분히 밀폐시키고 다공판과 volume tube를 연결하는 과정에 있어서 기포가 섞이지 않고 물로만 채워질 수 있도록 한 후 5, 10, 50, 100, 200kPa로 압력게이지를 조정하여 각각의 함수량을 체크하였다. 흙의 거동특성상 함수특성곡선(SWCC)에서 보이는 건조과정과 습윤과정의 곡선의 형태가 서로 다르게 나타나므로, 본 연구에서는 건조과정과 습윤과정에 대한 실험을 실시하여 Fredlund & Xing(1994)이 제시한 식 (1)을 이용하여 함수특성곡선(SWCC)을 그림 9와 같이 제시하였다. 또한, 수치해석을 통해 각 흡수력에 따른 상대 투수계수비와 포화투수계수를 이용하여 흡수력에 따른 불포화투수계수를 식 (2)를 통해 산출하였고 그림 10에 흡수력과 불포화 투수계수의 관계를 나타내었다.

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

여기서, C(ψ) : 보정계수  
 θ<sub>s</sub> : 포화 체적당 함수량(%)  
 a, n, m : 모델계수

$$K_r(\psi) = \Theta^a(\psi) \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\Theta(e^y) - \Theta(\psi)}{e^y} \Theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{av})}^b \frac{\Theta(e^y) - \Theta_s}{e^y} \Theta'(e^y) dy} \quad (2)$$

여기서,  $K_r(\psi)$  : suction( $\psi$ )에 따른 상대투수계수  
 $\Theta^a(\psi)$  : suction( $\psi$ )에 따른 보정계수  
 $b$  :  $\ln(10^6)$ , kPa  
 $\psi_{av}$  : air-entry pressure, kPa  
 $y$  :  $\ln(\psi)$ 에 해당되는 적분상수

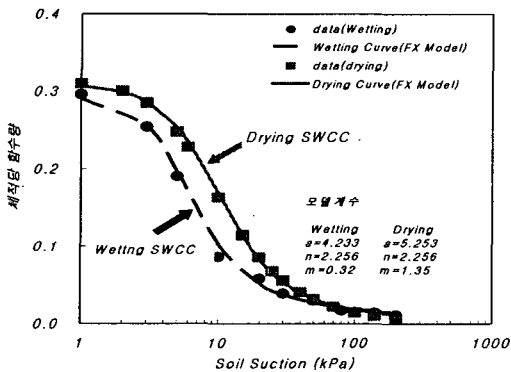


그림 9. 함수특성곡선(SWCC)

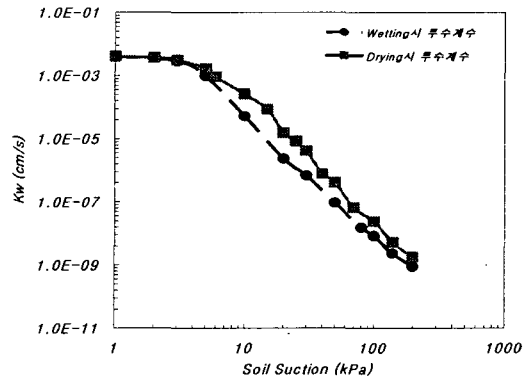


그림 10. 흡수력과 불포화 투수계수와의 관계

실험결과, 건조와 습윤과정의 함수특성곡선과 불포화투수계수가 이력현상으로 인하여 다소 차이가 나타났으며, 흡수력의 범위는 약 0~200kPa 정도로 공기흡입치는 매우 작은 흡수력 범위에서 추정되었다.

### 3. 흡수력에 따른 노상토 함수량의 변화

그림 11은 아스팔트 포장체 하부 노상토의 함수량 보정 후 깊이에 따른 계절별 함수량 변동폭을 나타내고 있는데, 여름과 가을철에는 최적함수비보다 습윤측으로 약 4% 증가하였으며 겨울과 봄철에는 최적함수비보다 건조측으로 약 3% 정도가 감소하였다. 이를 일반적으로 사용하는 중량당 함수량으로 표현하면 최적함수비에서 ±2%의 함수량 변화가 계절별로 나타나는 것으로 화강풍화 계열의 노상토는 계절에 따라 함수량 변화폭이 크게 나타나지 않았다.

또한 깊이별로 함수량의 변화를 보이는데, 흡수력과 관계를 비교하면 높은 함수량에서 낮은 흡수력을 나타내고 낮은 함수량에서는 높은 흡수력 값을 보인다. 이는 상대적으로 낮은 흡수력에서는 간극수압의 영향이 작아 높은 함수량을 보이고 상대적으로 높은 흡수력에서는 작용할 수 있는 부(-)의 간극수압(negative pore pressure)이 커져 낮은 함수량의 특징을 보이기 때문이다. 계절별 흡수력변동은 4.5~7kPa로 약 2.5kPa의 작은 변화를 나타내고 불포화 투수계수가 약  $10^3 \sim 10^4$  cm/s로 비교적 안정적으로 나타나 화강 풍화 계열 노상토에서 배수상태가 매우 양호하다고 판단된다.

그림 12에서는 연중 노상토 함수량 변화, 흡수력변화와 강수량의 관계를 나타내었다. 함수량의 변화를 확연하게 구별하기 위해 노상토 함수량계의 설치위치별로 상부 Top, 중간 Middle, 하부 Bottom으로 구분하여 그 경향을 살펴 본 결과, 겨울과 봄철인 12월에서 5월까지의 함수량이 최적함수비보다 건조측으로 나타났으



며 6월에서 11월까지는 습윤층으로 나타났다.

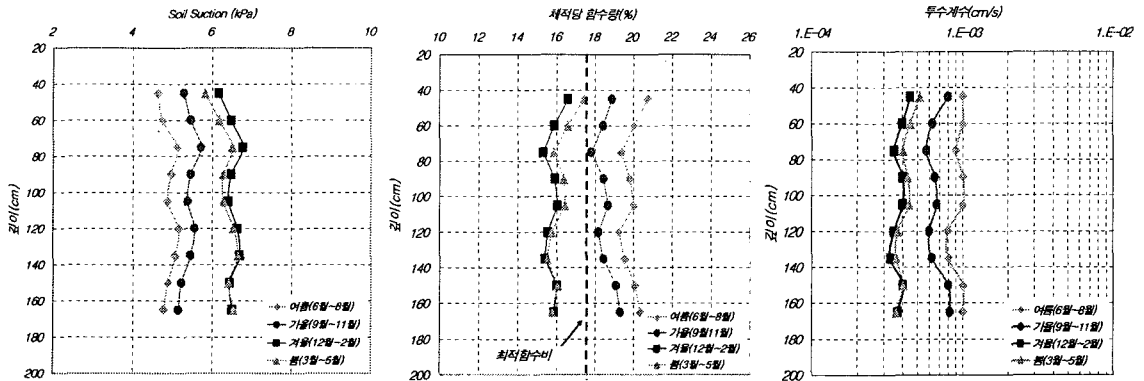


그림 11. 흡수력, 함수량 및 불포화 투수계수의 깊이별 변화

또한, 연중 함수량의 변화는 흡수력의 변화에 관계되는 경향을 나타내므로 흡수력은 노상토내 수분이동과 방향을 결정하는 매우 중요한 인자로 판단된다. 그러므로 노상토가 불포화인 특성으로 흙에 대한 함수량의 영향들은 흡수력의 특성을 통하여 표현될 수 있다. 전형적으로 환경변화와 적용된 하중의 변화는 노상토의 함수량 변화를 가져오며 이러한 함수량의 변화는 직접적으로 흡수력과의 관계에서 주로 나타난다. 따라서, 함수량 변화는 에너지의 변화로 표현할 수 있는 흡수력으로 나타내어 정량화할 수 있으므로 흡수력을 이용하여 계절적인 영향을 고려한 노상토의 유효회복탄성계수와와의 관계를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

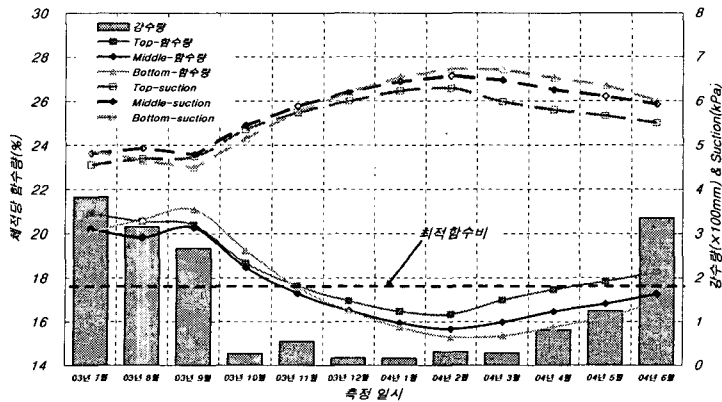


그림 12. 흡수력, 함수량 및 강수량의 연중 변화

#### 4. 종합

화강 풍화 계열 노상토에 대한 계절적인 영향을 고려한 흡수특성 거동에 대한 실험과 분석을 종합하면 다음과 같다.

- 연중 노상토 함수량의 변화는 최적함수비에서 ±2% 정도로 화강풍화 계열의 노상토의 함수량 변화폭은 크게 나타나지 않았다.
- 연중 흡수력의 변화는 약 2.5kPa로 화강풍화 계열 노상토에서는 흡수력의 변화가 매우 작아 상부층의 불



투수 상태가 매우 양호한 것으로 추정된다.

- 연중 불포화 투수계수가 약  $10^3 \sim 10^4 \text{cm/s}$ 로 나타나 화강풍화 계열 노상토의 불포화투수계수는 비교적 크게 나타나 배수 특성이 양호하다고 판단된다.
- 노상토 함수량의 변화는 흡수력의 차이에 따른 경향으로 흡수력은 노상토내 수분이동과 방향을 결정하는 매우 중요한 인자이므로 노상토에 대한 함수량의 변화들은 흡수력의 특성을 통하여 표현될 수 있다.

본 연구에서는 아스팔트 포장 하부 노상토에 대한 함수량 및 흡수력의 변화를 살펴보았으나, 향후 콘크리트 포장 하부 노상토에 대해서도 변화를 살펴 포장형식별 특성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 이러한 함수량 및 흡수력의 변화를 고려하여 노상토의 변형특성과의 관계를 도출할 수 있으리라 판단된다.

### 참고문헌

1. Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve." Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No. 4, pp.521-532.