

노상토의 불포화 전단강도 및 흡수응력 추정

Estimation of Unsaturated Shear Strength and Suction Stress of Subgrade Soils

전혜지* · 박성완**

Jeon, Hye-Ji · Park, Seong-Wan

1. 서론

특수한 경우를 제외한 일반적인 도로구조물들은 포화상태라는 가정 하에 설계되고 있으나 대부분의 경우 성토 및 절토 혹은 지하수위면 이상에 건설되는 등 구조물 하부가 불포화 상태로 존재하고 있다. 최근 이러한 불포화상태 특성을 적용한 지반의 지지력 상태를 평가하고자 하는 필요성이 대두되어 관련 연구가 진행되어 왔다(서원석 2005; 태두형 등 2010; Oloo et al.1997; Vanapalli et al. 2010). 그러나 지반의 불포화특성을 반영한 불포화 전단강도를 맞게 적용하고 이에 따른 설계 적용과 도로구조물과 같은 다층구조물에 대한 적용은 미미한 상황이다.

이에 본 논문에서는 불포화상태 특성을 반영하기 위해 노상토를 대표하는 SW, SM계열의 재료들을 대상으로 삼축압축시험과 불포화 함수특성곡선 시험 결과를 활용하였으며 함수특성곡선에서 나타나는 이력현상과 함수비 변화를 고려하여 불포화 전단강도와 흡수응력을 추정해 보았다.

2. 불포화 지반의 함수특성과 전단강도

함수특성곡선(SWCC, Soil-Water Characteristic Curve)은 지반의 불포화 상태를 재료의 간극공기압과 간극수압과의 차이인 흡수력(suction)과 함수비간의 관계로 표현되고 있다. 불포화 상태에서 지반에 대한 특성을 반영하는 중요한 요소는 흡수력으로 그 변화에 따라 지반은 수분을 보유하고자 하는 정도가 달라지며, 재료의 전단강도 및 지반의 지지력에 많은 영향을 미친다. 본 논문에서는 함수특성곡선시험기를 활용하여 각 흡수력에 대한 함수비를 측정하고 획득 후 연속적인 관계를 추정하기 위해 식(1)과 (2)와 같은 Fredlund & Xing(1994)의 3계수 비선형 모형식을 활용하였다.

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

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right] \quad (\text{식 2})$$

여기서, θ : 체적함수비, θ_s : 포화체적함수비, $C(\psi)$: 보정계수, ψ : 흡수력.

또한 함수특성곡선은 습윤과정과 건조과정에 대한 경로가 서로 다르게 나타나는 이력(Hysteresis)현상을

* 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 · 공학사(E-mail : hyeji8706@nate.com)

** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : spark@dankook.ac.kr)

보이고 있다. 실제 현장의 지반은 수없이 많은 습윤과 건조과정을 반복하게 되며 이를 함수특성곡선에 표현할 경우 건조곡선과 습윤곡선 안쪽으로 경로를 이동하는 것을 볼 수 있다. 즉 계속된 반복과정을 거친 실제 지반의 경우 임의의 포화도에 대하여 일정한 흡수력을 갖는 지반으로 존재함을 알 수 있다(박성완 등 2010).

불포화 지반재료는 부(-)의 간극수압을 가지며, 이에 의해 유효응력이 비선형적으로 증가한다. 불포화 전단강도를 결정하는 방법은 주로 삼축압축시험을 토대로 이루어져 왔는데 유효응력과 독립상태변수를 사용한 접근법이 있다. 전자의 경우 Bishop & Blight(1963)는 유효응력의 비선형 증가를 나타내기 위해 식 (3)과 같은 계수 χ 를 사용하였다.

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (\text{식 3})$$

여기서, σ : 전응력, u_a : 간극 공기압, u_w : 간극 수압, χ : 유효응력 상수 ($0 \leq \chi \leq 1$).

이를 활용하여 불포화 전단강도는 식 (4)와 같다.

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (\text{식 4})$$

여기서, c' : 유효점착력, ϕ' : 순연직응력에 대한 유효마찰각.

후자의 경우 Fredlund와 Morgenstern(1977)의 제안식으로 포화도의 전단강도로부터 서로 독립적인 상태변수인 순연직응력($\sigma_n - u_a$)과 모관흡수력($u_a - u_w$)을 활용하여 불포화 전단강도 식 (5)와 같다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (\text{식 5})$$

여기서, ϕ' : 순연직응력에 대한 유효마찰각, ϕ^b : 모관흡수력에 대한 겉보기 마찰각, u_a : 파괴면의 간극공기압, u_w : 파괴면의 간극수압.

이후 실험에 의거한 추정방식을 통하여 전단강도를 획득하게 되었는데 Vanapalli 등(1996)은 식 (5)를 확장하여 불포화 함수특성곡선과 포화시의 전단강도를 활용한 식 (6)을 통하여 불포화 전단강도를 추정하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [(\tan \phi') \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)] \quad (\text{식 6})$$

여기서, θ_s : 포화체적함수비, θ_r : 체적함수비, θ_w : 잔류체적함수비.

식 (5)에서 사용되는 포화체적함수비(θ_s), 잔류체적함수비(θ_r) 및 각 흡수력에서의 체적함수비(θ_w)는 함수특성곡선으로부터 얻을 수 있다.

3. 흡수응력(Suction Stress)

함수특성곡선에서 건조와 습윤곡선이 같은 흡수력에서 서로 함수량을 나타내는 것은 간극에서의 간극수 분포경향이 다르기 때문이다. 그림 1과 같이 Karube와 Kato(1994)는 불포화 지반에서의 간극수를 흡입자들 사이의 간극을 차지하고 있는 bulk water와 흡입자들의 점점에 존재하는 meniscus water로 제안하였다.

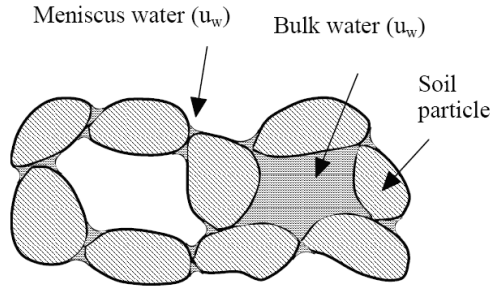


그림 1. 불포화 지반에서의 bulk water와 meniscus water(Karube and Kato, 1994)

모관흡수력(matric suction)은 bulk water와 meniscus water의 영향을 받으며 이는 흙입자의 골격에 서로 다른 영향을 미친다. meniscus water는 흙입자간의 인력을 증가시킴으로써 흙 골격의 강성을 증가시킨다. bulk water는 흙 골격의 강성을 증가시키는 것 뿐만 아니라 흙 입자들의 접점에서 미끄러짐이 유발되어 체적을 감소시킨다. Karube et al.(1996)은 bulk water와 meniscus water에 의해 발생하는 응력들을 각각 p_b 과 p_m 으로 정의하였으며 흡수응력(suction stress)을 식 (7)과 같이 두 응력의 합으로 제안하였다.

$$p_s = p_m + p_b = \frac{S_r - S_{ro}}{100 - S_{ro}} \cdot s \quad (식 7)$$

여기서, p_s : 흡수응력, p_m : meniscus 응력, p_b : bulk 응력, S_r : 포화도, S_{ro} : 잔류포화도, s : suction.

그림 2(a)와 같이 흡수응력은 3차원($\sigma - u_a, \tau, s$)공간에 표현될 수 있으며 일정한 흡수력 상태에서 불포화토의 파괴포락선은 포화상태의 파괴포락선과 같은 내부마찰각을 가진다. 또한 불포화토의 파괴포락선은 흡수응력 p_s 를 ($\sigma - u_a$)축의 절편으로 가진다. 이를 활용하여 그림 2(b)와 같이 O와 O'을 일치시켜 포화토와 불포화토의 파괴선을 2차원으로 나타내었다.

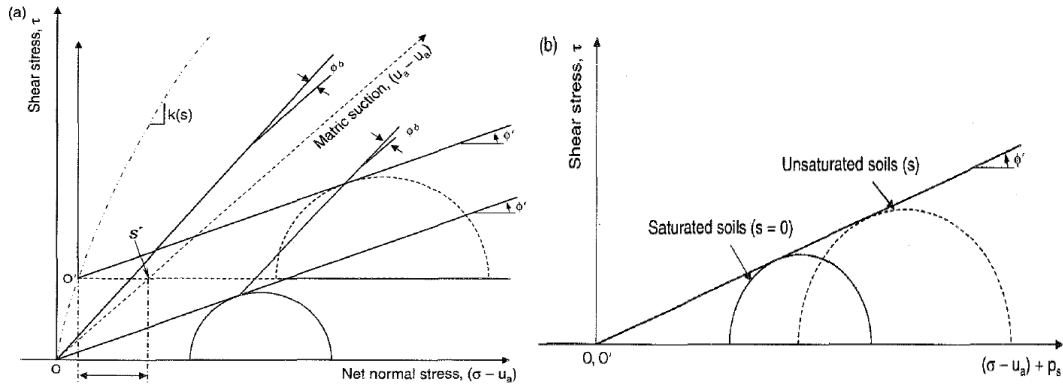


그림 2. 흡수응력의 적용에 따른 포화토와 불포화토의 Mohr의 응력원 비교(Kim et al, 2010)

4. 노상토의 불포화 전단강도 및 흡수응력

도로지반의 경우 현장에서 활용되는 보조기층 재료는 약 80% 이상이 GW계열로, 노상토는 약 70% 이상이 SM, SW계열로 구성되어 있다. 본 논문에서는 노상토의 불포화 전단강도와 흡수응력을 추정하기 위해 SM과

SW계열의 재료를 선정하였다. 그림 3은 대상재료들의 입도분포곡선이며 그림 4는 시험과정을 달리하여 구축된 함수특성곡선으로 이력현상을 뚜렷하게 보여주고 있다. 표 1은 각 재료들을 대상을 실시한 삼축압축시험을 통해 획득된 포화 시의 강도정수 값이며 지반재료들의 기본물성은 표 2와 같다.

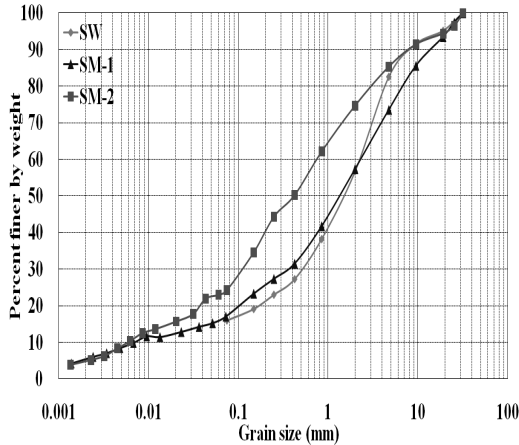


그림 3. 지반재료의 입도분포곡선(황규영, 2008)

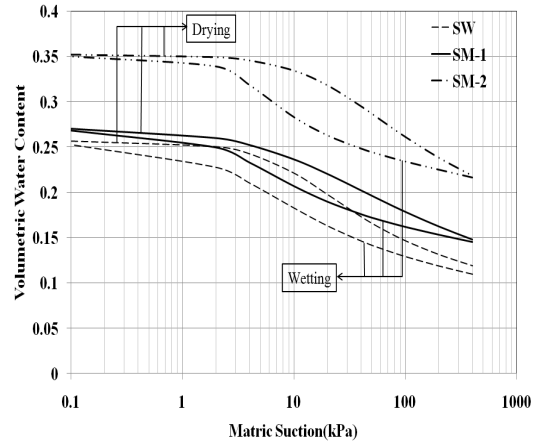


그림 4. 노상토의 함수특성곡선

표 1. 재료의 포화 강도정수

구 분	노상토		
구분기호	SW	SM-1	SM-2
c(kPa)	0	33.35	22.75
$\phi(^{\circ})$	44.19	30.13	36.76

표 2. 재료들의 기본 물성(황규영, 2008)

구 분	노상토			
구분기호	SW	SM-1	SM-2	
비 중	2.653	2.677	2.689	
소성지수(%)	NP	NP	6.8	
입도시험결과	#200 통과율(%)	4.92	18.84	24.26
	#4 통과율(%)	93.82	73.55	85.30
분류	통일분류	SW	SM	SM
다짐시험결과	최적함수비(%)	9.50	10.10	15.80
	최대건조밀도(kN/m^3)	18.86	20.68	17.74

본 논문에서는 시간과 비용적 측면에서 불리한 불포화 삼축압축시험을 피하고 함수특성곡선과 포화시의 전단강도로 불포화 전단강도를 예측 할 수 있는 장점을 가진 Vanapalli 등(1996)이 제안한 모델인 식 (6)을 활용하였으며 불포화 전단강도를 구하기 위해 각 시료들을 대상으로 한 삼축압축시험과 함수특성곡선 시험 결과를 활용하였다(박성완 등 2011). 함수특성곡선은 앞서 언급한 바와 같이 동일한 시료임에도 불구하고 건조와 습윤과정에 따라 곡선의 차이가 발생한다. 여기서, 건조과정은 수분이 흙 입자에 탈착되어 간극수가 감소하는 과정을 말하며 습윤과정은 수분이 흙입자에 흡착되어 간극수가 증가되는 현상을 말한다. 이와 같이 추정된 노상토의 불포화 전단강도는 표 3에 나타내었다. 또한, 노상토의 함수량 변화는 최적함수비를 기준으로 연간 $\pm 2\%$ 범위 내에 존재한다는 기존의 연구결과(Hassan, 2004; 진정훈, 2004)를 바탕으로 함수비 변화에 따른 불포화 전단강도를 추정하였다.



표 3에서 볼 수 있듯이 재료의 종류와는 상관없이 함수비가 증가함에 따라 불포화 전단강도가 감소하는 경향이 나타난다. 또한, 습윤과정의 불포화 전단강도 값보다 건조과정의 값이 더 크게 추정된 것을 볼 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이 대부분의 노상토는 최적함수비를 기준으로 $\pm 2\%$ 범위 내에 존재한다는 점을 고려하여 추정된 결과 함수비의 변화에 따라 크기는 25kPa 이상의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 추정된 불포화 전단강도는 결론적으로 불포화 시 흡수력에 의한 재료의 겔보기 점착력이 증가한 것으로 판단된다.

표 3. 노상토의 불포화 전단강도

구분		SW		SM-1		SM-2		
		건조	습윤	건조	습윤	건조	습윤	
불포화 전단강도 (kPa)	함수비	OMC-2%	30.4045	13.5686	58.5113	41.7138	61.9984	31.5848
		OMC	15.7422	5.3099	41.9195	35.9443	46.6317	26.7390
		OMC+2%	7.4516	2.1683	35.0588	33.8486	33.5505	25.0158

한편, 노상토의 흡수응력(suction stress)을 추정하기 위해 위에서 구한 불포화 전단강도와 삼축압축시험을 통해 획득한 포화 시의 강도정수를 활용하였다. 그 결과는 표 4와 같다. 흡수응력은 앞서 설명한바와 같이 재료의 강성을 증가시킨다. 그러므로 노상토의 불포화 전단강도와 같이 습윤과정보다는 건조과정에서 더 큰 값을 나타내고 함수비가 감소함에 따라 더 큰 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

표 4. 노상토의 흡수응력

구분		SW		SM-1		SM-2		
		건조	습윤	건조	습윤	건조	습윤	
P _s (kPa)	함수비	OMC-2%	31.2766	13.9578	43.3532	14.4110	52.5409	11.8269
		OMC	16.1937	5.4622	14.7653	4.4700	31.9698	5.3400
		OMC+2%	7.6653	2.2305	2.9443	0.8591	14.4584	3.0332

5. 종합

본 연구에서는 노상토의 불포화 전단강도와 흡수응력을 추정하기 위해 노상토를 대표하는 SW와 SM계열의 재료들을 대상으로 삼축압축시험과 함수특성곡선시험을 실시하였으며 이에 대한 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 노상토의 불포화 전단강도를 추정한 결과, 건조과정일 경우 습윤과정보다 더 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 함수비가 감소함에 따라 불포화 전단강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 불포화 전단강도와 포화 시의 강도정수를 활용하여 흡수응력을 추정한 결과, 불포화 전단강도와 마찬가지로 습윤보다 건조과정일 경우, 함수비가 감소할수록 큰 값을 나타냈다. 또한 각각의 경우를 비교했을 경우 흡수응력의 증가량이 클수록 불포화 전단강도의 증가량이 큰 것을 확인하였다.
- (3) 현재 불포화 전단강도와 흡수응력 추정에 대한 기초적인 연구뿐만 아니라 추가적으로 실험과 해석을 통해 보다 정량화된 불포화 전단강도와 흡수응력의 특성에 대한 연구가 진행 중이다.

감사의 글

본 연구는 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0016050). 연구지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] 박성완, 박재영, 태두형, 심영중 (2010), “상재하중과 점토함유량이 불포화 풍화토의 함수특성에 미치는 영향,” 대한토목학회 논문집, 제30권 1C호, pp. 53-63.
- [2] 박성완, 성열정 (2011), “다져진 도로기초 재료의 불포화 투수특성 평가(1): 실내시험,” 대한토목학회 논문집, 제31권 1D호, pp 1-10.
- [3] 서원석(2005), “현장 함수비 변화를 고려한 노상토의 실내 및 현장 변형계수 평가기법 개발“, 박사학위논문, 한국과학기술원.
- [4] 진정훈(2004), “도로노상토의 동결깊이 예측모델 개발“, 박사학위논문, 인천대학교.
- [5] 태두형, 박성완, 권흥기 (2010), “다짐된 고풍토의 불포화 전단강도 특성”, 한국지반공학회 봄 학술발표회, pp. 649-655.
- [6] 황규영(2008), “반복하중을 받는 도로기초의 변형특성에 대한 역학-경험적 평가”, 박사학위논문, 단국대학교.
- [7] Bishop, A. W. and Blight G. E. (1963), “Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partially Saturated Soils”, *Geotechnique*, Vol 13, pp. 177-197.
- [8] Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), “Stress State Variables for Unsaturated Soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 103, /no. 5, pp. 447-466.
- [9] Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), “Equations for the Soil-Water Characteristic Curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No.4, pp.521-532.
- [10] Hassan Mohamed (2004), “Quantification of Environmental Impacts on the Performance of Asphalt Pavements”, Ph.D Dissertation, Univ. of Idaho.
- [11] Karube, D. and Kato, S. (1994), “An ideal unsaturated soil and the Bishop’s soil”, In Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India, 5-10 January, Taylor & Francis, New York. 1: 43-46.
- [12] Karube, D., Kato, S., Hamada, K., and Honda, M. (1996) “The relationship between the mechanical behavior and the state of pore-water in unsaturated soil” *Geotechnical Engineering Journal*, JSCE, 535(III-34): 83-92.
- [13] Kim, B.S., Shibuya, S., Park, S.W. and Kato, S. (2010) “Application of suction stress for estimating unsaturated shear strength of soils using direct shear testing under low confining pressure” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, No. 9, pp. 955-970.
- [14] Oloo, S. Y., Fredlund, D. G. and Gan, J. (1997), “Bearing Capacity of Unpaved Roads”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, pp. 398-407.
- [15] Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996), “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp.379-392.