

다져진 보조기층 재료의 불포화 전단강도 및 항복하중 평가

Estimating Unsaturated Shear Strength and Yield Load of Compacted Aggregate Sub-base Materials

전혜지* · 박성완**

Jeon, Hye-Ji · Park, Seong-Wan

Abstract

In general, conventional road pavements are designed under the assumption that the shear strength of geomaterials are under saturated state. In reality, however, most of the pavement geomaterials exists under the unsaturated state. To deal with this gap between saturated and unsaturated conditions, in this paper, unsaturated shear strength was estimated using the results from the triaxial compression test and soil-water characteristics curves. Then, yield loads were assessed using 2-Dimensional finite element method with the selected nonlinear elastic model and the Mohr-Coulomb yield criteria. In addition, various unsaturated condition and surface layer effects on the yield load of granular materials were identified. Therefore, the results demonstrated would provide a possibility to estimate bearing capacity of paved or unpaved roads using unsaturated soil mechanics.

Keywords : base materials, yield load, yield function, shear strength, unsaturated soils

요 지

일반적으로 도로구조물들은 포화상태라는 가정 하에 설계되고 있으나 실제 도로구조물의 재료인 입상지반재료는 대부분 불포화 상태에 존재하고 있다. 이러한 부분을 반영하기 위하여 본 논문에서는 다져진 입상지반재료를 대상으로 삼축압축시험과 함수특성곡선 시험 결과를 활용하여 다양한 조건에서의 불포화 전단강도를 추정하였다. 이를 바탕으로 비선형 모형을 활용한 2차원 유한요소해석을 실시하고 Mohr-Coulomb항복조건을 통하여 항복하중을 규명하였다. 또한, 입상재료의 항복하중에 대한 도로구조물 표층두께의 변화에 따른 영향을 확인하였다. 해석 결과 입상지반재료의 불포화도 이론을 고려하여 포장 혹은 비포장 도로의 지지력을 예측할 수 있음을 보여주고 있다.

핵심용어 : 보조기층재료, 항복하중, 항복함수, 전단강도, 불포화도

1. 서 론

대표적인 육상교통시설인 도로는 다양한 재료와 단면으로 구성된 다층 평면구조물로, 사용 재료에 대한 하중 및 강도 특성이 구조물의 지지력 및 사용성을 판단하는 중요한 인자로 고려되고 있다. 또한 특수한 경우를 제외한 일반적인 도로구조체는 성토 및 절토 혹은 지하수위면 이상에 건설되는 등 구조물 하부가 불포화 상태로 존재하고 있다. 최근 이러한 불포화상태 특성을 반영한 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 전단강도를 불포화조건에 맞게 적용하고 이에 따른 지지력의 설계 적용과 도로포장체와 같은 다층구조에 대한 적용은 미미한 상황이다.

이에 본 논문에서는 기초연구의 일환으로 다져진 도로하부

보조기층재료에 대하여 삼축압축시험과 불포화 함수특성곡선 시험 결과를 활용하여 불포화 전단강도를 추정하였다. 이후 결과를 활용하여 2차원 유한요소해석을 실시하고 재료의 항복과 불포화상태의 관계를 고려하여 일반적으로 보조기층을 보유한 도로 3층 구조체를 대상으로 항복하중을 예측해 보았다.

2. 불포화 지반의 함수특성과 강도

일반적으로 함수특성곡선은 불포화상태를 지반재료의 간극 공기압과 간극수압과의 차이인 흡수력과 보유 함수비간의 관계를 표현되고 있다. 이러한 불포화 상태에서 지반에 대한 특성을 반영하는 중요한 요소는 흡수력으로 그 변화에 따라 재료의 전단강도 및 지반의 지지력에 많은 영향을 미친다. 실험적으로 함수특성곡선은 보통의 경우 흡수력 측정이 가

*단국대학교 토목환경공학과 석사과정

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

능한 시험기를 활용하여 각 흡수력에 대한 함수비를 측정하고 획득 후 연속적인 관계를 수립하는데 그 모양에 따라 직선 혹은 비선형 모형을 적용할 수 있다. 본 논문에서는 식 (1)과 (2)와 같이 1994년 Fredlund & Xing의 3계수 비선형 모형식을 활용하였다.

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

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

여기서, θ : 체적함수비, θ_s : 포화체적함수비, $C(\psi)$: 보정계수, ψ : 흡수력, ψ_r : 잔류 흡수력, a, n, m : fitting parameters.

또한 함수특성곡선은 습윤과정과 건조과정에 대한 경로가 서로 다르게 나타나는 이력현상을 보이고 있다. 현장의 지반은 수없이 많은 습윤과 건조과정을 반복하게 되며 이를 함수특성곡선에 표현할 경우 건조와 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 Bishop과 Blight(1963)는 유효응력의 비선형적 증가를 나타내기 위해 식 (3)과 같은 계수 χ 를 사용하였다.

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (3)$$

여기서, σ : 전응력, u_a : 간극 공기압, u_w : 간극 수압, χ : 유효응력 상수.

후자의 경우는 Fredlund와 Morgenstern(1977)의 제안식으로 식 (4)와 같이 포화도의 전단강도로부터 서로 독립적인 상태변수인 순연직응력($\sigma_n - u_a$)와 모관흡수력($u_a - u_w$)을 활용하여 불포화 전단강도를 추정한다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (4)$$

여기서, c' : 유효점착력, 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)이 식 (4)를 확장하여 불포화 함수특성곡선과 포화시의 전단강도를 활용한 식 (5)를 통하여 불포화 전단강도를 추정하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w) \left[(\tan\phi) \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (5)$$

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

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

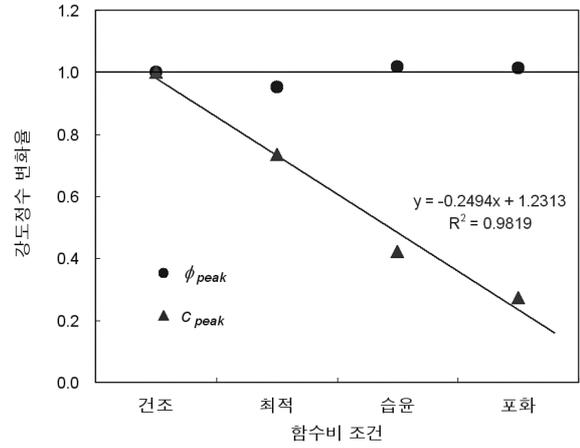


그림 1. 함수비 조건에 따른 Mohr-Coulomb 강도정수의 변화(김범주 등, 2008)

본 논문에서 활용한 Vanapalli 등(1996)이 제안한 모델은 시간과 비용적 측면에서 함수특성곡선과 포화시의 전단강도로 불포화 전단강도를 예측할 수 있는 장점이 있어 본 연구에서는 식 (5)를 통하여 불포화 전단강도를 구하기 위해 각 시료들을 대상으로 삼축압축시험과 함수특성곡선 시험 결과를 활용하였다(박성완 등, 2011). 함수특성곡선은 앞서 언급한 바 같이 동일한 시료임에도 불구하고 건조와 습윤과정에 따라 곡선의 차이가 발생한다. 여기서, 건조과정은 수분이 흡입자에 탈착되어 간극수가 감소하는 과정을 말하며 습윤과정은 수분이 흡입자에 흡착되어 간극수가 증가되는 현상을 말한다.

한편 추정된 조립지반재료의 불포화 전단강도를 식 (4)에 적용시켜 겉보기 내부마찰각을 산정하였다. 기존의 연구에서 살펴보면 조립지반재료에 대한 실험적 결과에서 그림 (1)과 같이 포화도가 증가함에 따라 내부 마찰각 ϕ 는 미세하게 증가하는 경향을 보이기는 하나 거의 같은 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다(Kutara and Ishizuka, 1982; Fredlund and Rahardio, 1995; 김범주 등, 2008; Ling et al., 2009). 이러한 현상학적인 결과를 토대로 흡수력에 따른 점착력의 변화를 살펴보면 식 (4)에서 $(u_a - u_w)\tan\phi^b$ 는 겉보기 내부마찰각이 포함된 항으로써 점착력의 증분으로 표현된다. 따라서 불포화시의 마찰각은 포화시의 마찰각과 거의 동일하다는 가정하에 점착력은 $c = c' + \Delta c = c' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$ 로 표현할 수 있다.

3. 보조기층 재료의 불포화 전단강도

국내 도로지반의 경우 현장에서 활용되는 보조기층 재료는 약 80% 이상이 GW계열로, 노상토는 약 70% 이상이 SM, SW계열로 구성되어 있다. 본 논문에서는 조립지반재료의 전단강도를 추정하기 위해 보조기층은 GW계열의 재료로, 노상토는 SW계열의 재료로 선정하였다. 그림 2는 대상재료의 입도분포곡선이며 그림 3은 보조기층재료들을 대상으로 시험과정을 달리하여 구축된 함수특성곡선이며 이력현상을 뚜렷하게 보여주고 있다. 여기서 사용된 함수특성곡선 시험기는 공기 압축기로부터 들어오는 압력을 제어하기 위한 장치인 패널부와 시료를 구속시키는 셀부로 구분된다. 또한 흡수

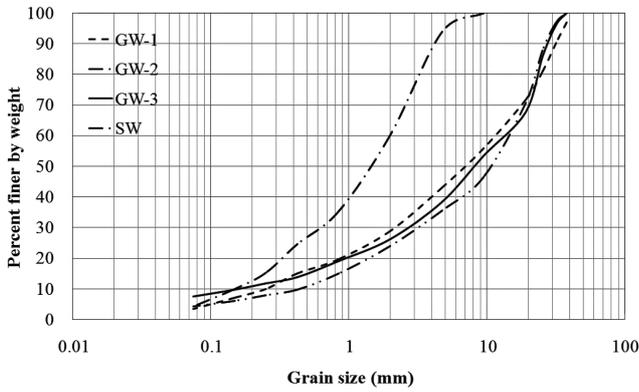


그림 2. 지반재료의 입도분포곡선(황규영, 2008)

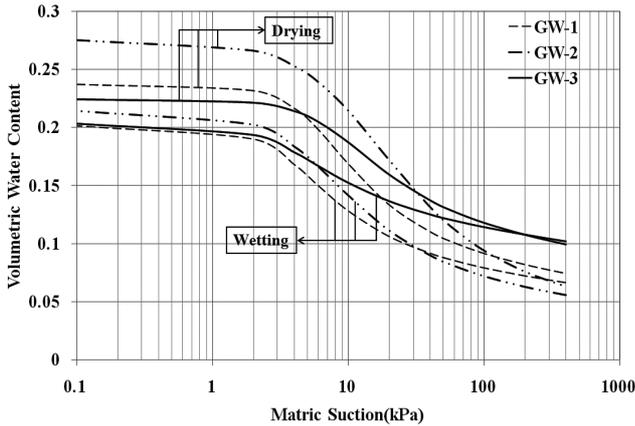


그림 3. 보조기층 재료의 함수특성곡선(박성완 등, 2011)

력에 따라 변화하는 함수량을 측정하기 위해 동일한 직경과 높이의 volume indicator tube가 양쪽에 하나씩 설치되어있으며, volume indicator tube을 통해 셀부에서 빠져나온 물과 공기압과의 에너지 평형을 확인할 수 있다. 에너지 평형이 일어난 순간 간극수압계를 통해 수압의 변화인 흡수력과 수위를 측정하여 데이터를 구축할 수 있다(박성완, 2011). 표 1은 각 재료들을 대상으로 압밀 비배수 삼축압축시험을 실시하여 획득한 포화시의 강도정수의 값과 지반재료의 기본물성을 보여준다.

Vanapalli 등(1996)이 제안한 식 (5)를 활용하여 추정된 보조기층의 불포화 전단강도는 표 2에 나타내었다. 또한, 보조기층에서 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 2에서 볼 수 있듯이 재료의 종류와 상관없이 함수비가 증가할수록 불포화 전단강도가 감소하는 경향이 나타난다. 또한, 대체적으로 건조과정의 결과 값이 습윤과정의 결과 값

표 1. 재료들의 기본 물성(황규영, 2008)

구분	보조기층			노상토
	GW-1	GW-2	GW-3	
구분기호	GW-1	GW-2	GW-3	SW
비 중	2.717	2.709	2.703	2.653
소성지수(%)	NP	NP	NP	NP
c(kPa)	0	0	0	0
$\phi(^{\circ})$	53	48	50.82	44.19
입도시험 결과	#200 통과율(%)	3.38	4.28	4.92
	#4 통과율(%)	43.09	35.62	93.82
분류	통일분류	GW	GW	SW
다짐시험 결과	최적함수비(%)	5.51	6.20	9.50
	최대건조밀도 (kN/m^3)	21.58	20.54	18.86

보다 크게 추정된 것을 볼 수 있다. 대부분의 보조기층에서의 함수비가 최적 함수비를 기준으로 $\pm 2\%$ 범위 내에 존재한다는 점을 고려하여 불포화 전단강도를 추정한 결과 크기는 30kPa이상의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 추정된 불포화 전단강도는 결론적으로 불포화 시 흡수력에 의한 지반재료의 겔보기 점착력이 증가한 것으로 판단된다.

4. 수치해석

4.1 개요

본 연구에서는 도로구조체를 모형화한 뒤 재하 하중을 변화시키며 유한요소해석을 실시하여 다져진 도로하부 입상재료의 항복하중을 평가하였다. 또한, 기하구조적으로 보조기층과 노상층의 두께는 고정하며 아스팔트층의 두께를 변화시켜 입상재료의 항복하중에 대한 아스팔트층 두께의 영향을 살펴보았다. 본 연구에서 사용된 유한요소해석 프로그램 FERUT은 Park and Lytton(2004)에 의해 개발되었으며 응력의존 비선형 탄성계수 모델을 해석할 수 있다. 또한, 이 프로그램은 사용자의 임의에 따라 다양한 경계조건과 해석망을 구성할 수 있다. 해석 시 사용된 도로구조체는 가로 130cm 세로 250cm 크기로 모델링하였으며 이를 2차원 축대칭과 상하 대칭을 적용하면 3차원의 도로구조체를 구현할 수 있다. 항복이 일어날 것으로 예상되는 보조기층의 경우 다른 곳에 비해 많은 요소의 수로 구성하였다. 해석 시 사용된 도로구조체의 유한요소망과 경계조건은 그림 4와 같다.

해석프로그램에서 활용된 회복탄성계수 예측모델은 축차응력과 체적응력을 동시에 고려하는 비선형 응력의존모델 Uzan(1992)로 식 (6)과 같다.

$$M_R = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P}\right)^{k_3} \quad (6)$$

표 2. 보조기층 재료의 불포화 전단강도

구분		GW-1		GW-2		GW-3		
과정		건조	습윤	건조	습윤	건조	습윤	
불포화 전단강도(kPa)	함수비	OMC-2%	23.01	21.61	23.95	11.57	33.22	35.08
		OMC	11.89	8.00	16.51	7.72	15.43	8.20
		OMC+2%	9.38	4.65	13.29	4.77	8.34	2.74

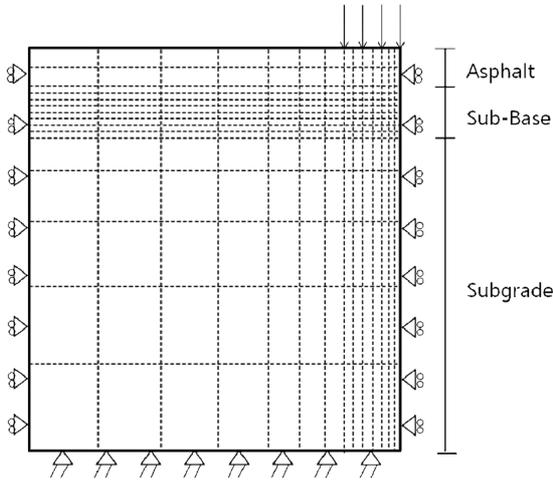


그림 4. 도로구조체에 대한 유한요소망

여기서, θ : 체적응력($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)(kPa), P_a : 대기압(100 kPa), τ_{oci} : $(1/3) \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ (kPa), k_1 - k_3 : 재료 모델계수

재료모델계수인 k_1, k_2, k_3 는 회복탄성계수시험으로부터 얻어진 결과를 선형회귀분석을 통하여 결정할 수 있다. 또한 비선형 응력의존 특성을 대변하는 첫 번째 응력불변량항인 k_2 항은 응력경화(hardening) 영향에 연관된 것으로 간주되고 정팔면체 전단응력항인 k_3 항은 응력연화(softening) 영향에 연관된 것으로 간주된다.

일반적으로 항복이라 함은 재료가 어느 응력상태에 이를 때, 탄성적 성질을 잃고 소성상태로 들어가는 거동을 말하며, 항복조건은 항복이 시작할 때의 조건으로서 항복이 생긴 이후의 응력의 구속조건을 의미한다. 본 연구에서 사용한 항복 조건은 Mohr-Coulomb의 조건으로서 이는 흙, 암, 콘크리트에 주로 적용되고 있다. 일반적으로 항복조건은 $f(\sigma, \tau) = 0$ 과 같은 조건식으로 표시되고 이를 항복함수라 정의한다. 본 연구에서 사용한 항복함수는 식 (7)와 같으며 수치해석 시 구하여지는 항복하중은 항복함수의 값이 음수에서 양수로 넘어가는 순간으로 정의하였다.

$$f = \frac{I_1}{3} \sin \phi + \sqrt{J_2} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \sqrt{\frac{J_2}{3}} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \sin \phi - c \cos \phi \quad (7)$$

여기서, I_1 : $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (kPa), J_2 : $(1/6) \times [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ (kPa), θ : Lode angle.

4.2 해석 조건

다져진 입상지반재료의 항복하중을 평가하기 위한 수치해석 조건은 황규영(2008)의 기존연구에서 변수들을 활용하였는데 표 3과 같다. 아스팔트층은 선형탄성으로 가정하였으며, 탄성계수는 Tan(1994)가 제시한 값인 5000MPa로 고정하여 적용하였다. 보조기층과 노상층은 각 지반 재료에 대한 비선형 탄성계수 모델을 사용하였다. 또한, 아스팔트 층 두께의 영향을 알아보기 위하여 기하학적으로 보조기층과 노상층의 두께는 모두 고정하였고 지중은 고려하지 않은 상태에서 아스팔트층의 두께만 10cm와 20cm로 변화시켰다. 이러한 조건에서 재하 하중조건을 변화시켜가며 해석을 각각 실시하였다. 또한, GW계열인 보조기층의 지반재료를 변화시켜가며

표 3. 수치해석 조건(황규영, 2008)

총 구분	두께 (cm)	탄성계수 및 모델계수			포이송비 (v)	
		k_1	k_2	k_3		
아스팔트 표층	10	5000MPa			0.30	
	20					
보조기층	30	GW-1	874.62	0.669	-0.093	0.35
		GW-2	719.95	0.667	-0.050	
		GW-3	843.77	0.717	-0.123	
노상층	SW	∞	517.89	1.057	-0.205	0.40

총 3가지에 대한 해석이 실시되었는데 함수비 조건은 아스팔트층과 노상층은 고정된 상태이고, 보조기층은 최적함수비와 이를 기준으로 $\pm 2\%$ 에 대해 해석을 진행하였다.

5. 결과 및 분석

5.1 보조기층 재료의 함수상태에 따른 항복하중

본 연구에서는 재료의 함수상태에 따른 항복하중을 비교 및 평가하기 위해 포화와 불포화 상태로 분류하여 해석하였다. 일반적으로 S계열과 GW계열의 도로하부 지반재료의 초기 흡수력은 10kPa이하이며 GW계열이 S계열의 지반재료에 비해 작은 값을 가지고 있다(박성완 등, 2011). 이와 같이 실제 현장의 불포화 상태를 구현하기 적합한 조건은 함수비 OMC+2%일 경우 함수특성곡선에서 습윤 경로이다. 그림 2의 함수특성곡선을 확인해 보면 GW계열 지반재료 3가지 모두 초기 흡수력이 10kPa 이하임을 확인할 수 있다. 또한, 해석 시 입력한 불포화 강도정수도 위 조건에서 추정된 값을 사용하였다. 그림 5는 입상지반재료의 함수상태에 따른 항복하중을 나타내고 있다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 세 종류의 지반재료의 상태를 비교해 보았을 때 불포화 상태일 경우 포화상태에서의 항복하중 값보다 600-900kPa 정도의 큰 지지력을 가지는 것으로 나타내고 있다. 이는 상태의 변화에 의한 강도정수의 변화에 따라 나타난 결과로 흙의 점착력이 증가함에 따라 전단강도가 증가하였으며 결과적으로 구조체의 지지력이 증가하였음을 보여주고 있다. 표 4에서 그림 5에 대한 항복하중

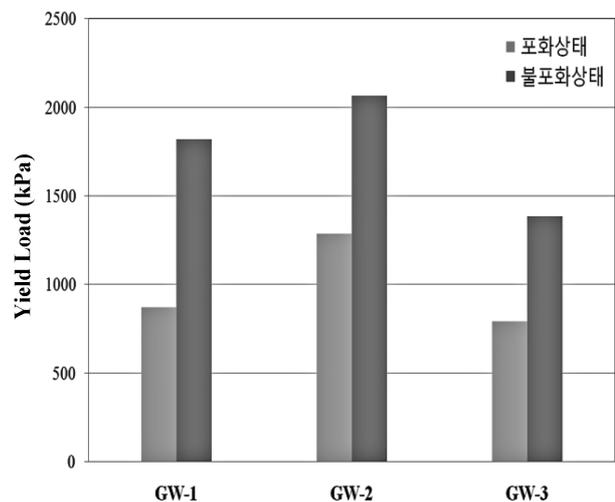


그림 5. 재료의 함수상태에 따른 항복하중

표 4. 재료의 상태에 따른 항복하중

구분	포화 상태	불포화 상태	하중 증가량
GW-1	870kPa	1819kPa	109.08%
GW-2	1285kPa	2065kPa	60.70%
GW-3	790kPa	1384kPa	75.19%

값과 함수상태 변화에 따른 하중 증가량을 제시하였다.

5.2 불포화 시 함수비 변화에 따른 항복하중

재료가 불포화일 경우 함수비 조건을 변화시켜가며 해석을 실시하였으며 해석 시 입력한 강도정수 값은 5.1에서 제시한 것과 같이 함수특성곡선에서 습윤 경로의 값을 사용하였다. 또한, GW계열인 총 3종류의 다져진 입상지반재료의 함수량 변화는 최적함수비를 기준으로 ±2% 범위 내에 존재함으로 해석 시 함수비 조건을 OMC-2%, OMC, OMC+2%로 변화시켰다. 해석 결과는 OMC+2%인 경우의 항복하중을 ‘1’로 가정하였으며 그림 6과 같다.

증감정도는 지반재료에 따라 차이가 있으나 전체적으로는 함수비가 감소할수록 지반 재료의 항복하중이 증가하는 경향을 보였다. 이는 그림 3의 함수특성곡선에서 확인할 수 있듯이 함수비가 감소함에 따라 초기 흡수력이 증가하여 재료의 점착력이 커지기 때문이다. 그러나 함수비 변화에 따른 항복하중 증가량의 특정 관계는 정의할 수 없었다.

5.3 함수특성곡선 경로에 따른 항복하중

본 논문에서는 함수특성곡선 시험 시 건조과정과 습윤과정의 결과를 모두 획득함으로써 두 과정에 따른 항복하중의 차이를 확인할 수 있었다. 일반적으로 습윤과정보다 건조과

정에서 더 큰 전단강도 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 표 5은 함수특성곡선에서 경로에 따른 항복하중을 나타내고 있다.

표 5에서 볼 수 있듯이 한 경우를 제외하고 모두 건조과정 시 항복하중이 습윤과정 시의 값보다 크게 나타난다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 건조과정에서의 점착력이 더 크게 추정되어 전단강도가 더 크기 때문이다. 이에 반해 그림 3에서 GW-3의 함수특성곡선을 살펴보면 건조곡선과 습윤곡선이 교차하는 것을 확인할 수 있다. 이 때문에 GW-3의 함수비 OMC-2%의 경우 습윤과정 시의 항복하중이 더 큰 값을 가진다.

실제 현장에서 지반재료의 경우 수없이 많은 습윤과정과 건조과정을 반복하고 있다. 함수특성곡선 시험을 통해 습윤과정과 건조과정을 반복할수록 건조곡선과 습윤곡선이 이동을 하며 그 격차가 점점 좁혀지는 것을 볼 수 있다. 즉, 본 연구에서의 해석 값은 습윤과정과 건조과정의 경계조건에서의 값이라 할 수 있다.

5.4 표층 두께에 따른 항복하중

본 연구에서는 지중의 영향을 배제한 상태에서 기하구조적으로 보조기층과 노상층의 두께는 고정시키고 아스팔트층의 두께만 변화시켜가며 해석을 실시하였다. 이는 5.1~5.3의 결과는 다져진 입상지반재료의 특성을 고려한데 반해 도로구조체의 기하 구조적 변화에 따른 결과를 나타낸다. 아스팔트층 두께의 변화에 따른 항복하중은 그림 7과 같다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 아스팔트층 두께가 20cm일 경우의 항복하중은 10cm일 경우의 항복하중 값보다 2~3배 큰 값을 가진다. 일반적으로 아스팔트 포장의 경우 하중을 아래로 분산시켜 절감하는 형식이므로 아스팔트층의 두께가 두

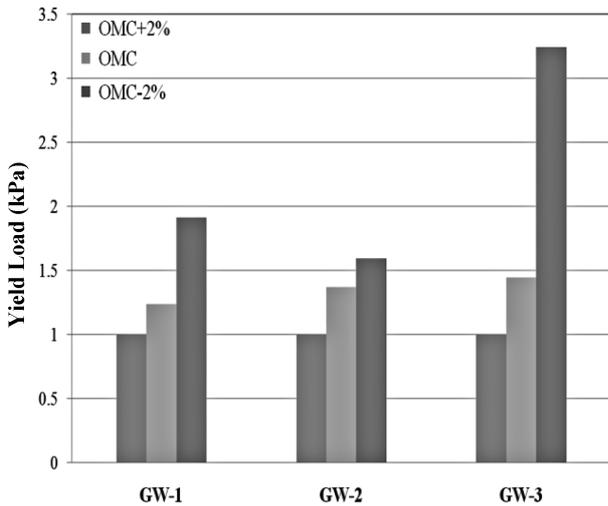


그림 6. 함수비 변화에 따른 항복하중

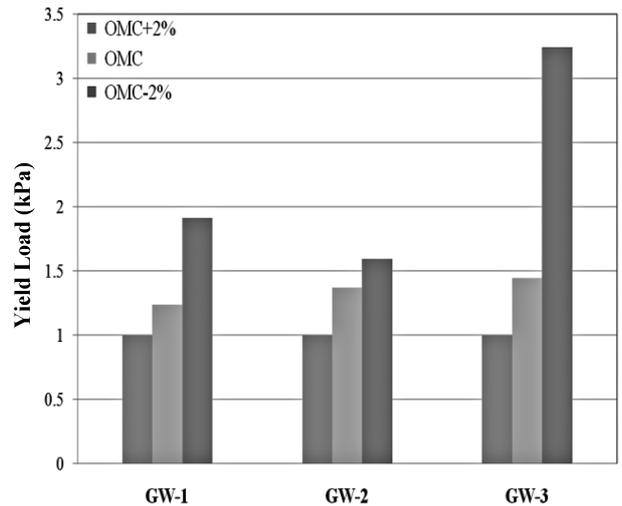


그림 7. 아스팔트층 두께의 변화에 따른 항복하중

표 5. 함수특성곡선 경로에 따른 항복하중

구분		GW-1		GW-2		GW-3		
과정		건조	습윤	건조	습윤	건조	습윤	
항복하중 (kPa)	함수비	OMC-2%	3591	3479	4608	3291	4214	4488
		OMC	2590	2250	3890	2827	2809	1999
		OMC+2%	2369	1819	3500	2065	2022	1384

꺼워짐에 따라 지지할 수 있는 하중 또한 커진다. 또한, 그림 7에서 확인했듯이 보조기층에 전달되는 하중의 크기는 줄어든다. 이는 도로구조체에서 입상재료의 항복하중을 결정하는데 기하구조적 영향도 크다는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 다져진 도로하부 입상지반재료의 불포화 전단강도 및 항복하중 평가를 위하여 불포화상태 전단강도를 추정하고 유한요소해석을 실시하여 일반적으로 보조기층을 보유한 도로 3층 구조체를 대상으로 항복하중을 예측해 보았다. 이에 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 도로하부 지반재료의 상태에 따른 항복하중 평가결과, 불포화 상태일 경우 포화 상태보다 지지력 차원에서 600~900 kPa 정도의 큰 하중을 견딜 수 있는 것으로 나타났다. 다만 조립재료의 경우 일정한 한계까지 강도가 증가하는 특성이 있어 추후연구를 통하여 적용 흡수력 범위를 규명하는 일이 필요하다.
2. 일정한 범위 내에서 불포화 시 지반재료의 함수비가 감소함에 따라 초기 흡수력이 증가하였으며 입상지반재료의 항복하중 또한 증가하는 것으로 나타났다. 또한 함수특성곡선에서 건조곡선을 따라 구한 항복하중의 경우 습윤곡선을 따라 구한 값보다 크게 나타났다.
3. 아스팔트층 두께가 증가할수록 보조기층에 전달되는 하중이 감소하여 입상지반재료의 항복하중은 증가하며 이를 결정하는데 도로구조체의 기하 구조적 영향도 큰 것으로 나타났다.
4. 도로 지반재료의 불포화 전단강도와 항복함수를 통해 얻은 항복하중을 구함으로써 현재 설계된 도로구조물들의 지지력 측면에서의 여유도(Redundancy)를 평가할 수 있다. 이러한 측면에서 2m 이상의 성토 혹은 지하수위면 이상에 건설되는 도로의 경우 실제 입상재료는 불포화 상태로 존재하므로 불포화 특성을 고려하면 보다 합리적인 설계가 가능하리라 판단된다.
5. 불포화 전단강도의 추정 및 그의 적용을 통한 항복하중에 대한 기초적인 연구가 진행되었으나, 이후의 추가적인 연구를 통하여 보다 정량화된 불포화 전단강도특성과 도로하부의 지지력을 평가할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(KRF-2009-0075914). 연구지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

김범주, 김기웅, 이승호, 황영철, 박동순(2008) 지반의 함수비 조건에 따른 Mohr-Coulomb 강도 정수의 변화, **한국지반환경**

공학회 논문집, 한국지반환경공학회, 제9권 1호, pp. 47-54.
 박성완, 박재영, 태두형, 심영중(2010) 상재하중과 점토함유량이 불포화 풍화토의 함수특성에 미치는 영향, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제30권 제1C호, pp. 53-63.
 박성완, 성영정(2011) 다져진 도로기초 재료의 불포화 투수특성 평가(1): 실내시험, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제31권 제1D호, pp. 1-10.
 서원석(2005) **현장 함수비 변화를 고려한 노상토의 실내 및 현장 변형계수 평가기법 개발**, 박사학위논문, 한국과학기술원.
 김정훈(2004) **도로노상토의 동결깊이 예측모델 개발**, 박사학위논문, 인천대학교.
 태두형, 박성완, 권홍기(2010) 다짐된 고령토의 불포화 전단강도 특성, **한국지반공학회 봄 학술발표회**, 한국지반공학회, pp. 649-655.
 황규영(2008) **반복하중을 받는 도로기초의 변형특성에 대한 역학-경험적 평가**, 박사학위논문, 단국대학교.
 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.
 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.
 Fredlund, D. G. and Rahardio, H. (1995) *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons Inc., pp. 217-296.
 Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994) Equations for the Soil-Water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532.
 Hassan Mohamed (2004) *Quantification of Environmental Impacts on the Performance of Asphalt Pavements*, Ph.D Dissertation, Univ. of Idaho.
 Kutara, K., and Ishizuka, H. (1982) Seepage flow in the embankment and stability of slope during rain., Tsuchi-to-kiso, paper No. 1330, Japan Geotechnical Society (in Japanese).
 Ling, H. I., Wu, M., Leshchinsky, D. and Leshchinsky, B. (2009) Centrifuge Modeling of Slope Instability, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 135, No. 6, pp. 758-767.
 Oloo, S. Y., Fredlund, D. G. and Gan, J. (1997) Bearing Capacity of Unpaved Roads,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, pp. 398-407.
 Park, S. and Lytton, R. L. (2004) Effect of Stress-Dependent Modulus and Poisson's Ratio on Structural Responses in Thin Asphalt Pavements, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp. 387-394.
 Tan, W.A., Low, B. H. and Fwa, T. F. (1994) Behavior of Asphalt Concrete Mixtures in Triaxial Compression, *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM, Vol. 22, No. 3, pp. 195-203.
 Uzan, J. (1992) Resilient Characterization of Pavement Materials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 16, Issue. 6, pp. 453-459.
 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.
 Vanapalli, S. K. and Oh, W. T. (2010) Mechanics of Unsaturated Soils for the Design of Foundation Structures, *Proc. of 3rd International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology*, pp. 363-377.

(접수일: 2011.2.1/심사일: 2011.3.18/심사완료일: 2011.5.3)