

후자의 경우 Fredlund와 Morgnstern(1977)은 포화토의 전단강도식으로부터 서로 독립적인 상태변수인 순연직응력($\sigma_n - u_a$)과 모관흡수력($u_a - u_w$)을 사용하여 불포화 전단강도 식(2)를 제안하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

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

불포화토의 강도특성을 직접 실험을 통해 알아내려면 기술적인 문제와 상당한 시간이 소요되므로 Vanapalli 등(1996)은 Fredlund와 Morgenstern(1977)가 제안한 식을 확장하여 함수특성곡선과 포화시의 전단강도를 활용한 식 (3)을 이용하여 불포화 전단강도를 구하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[(\tan \phi') \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (3)$$

여기서, θ_s : 포화체적함수비 θ_w : 체적함수비
 θ_r : 잔류체적함수비

식(3)에서 사용되는 포화체적함수비(θ_s), 잔류체적함수비(θ_r) 및 각 흡수력에서의 체적함수비(θ_w)는 함수특성곡선으로부터 얻을 수 있다.

2.2 불포화 강도정수 추정

Vanapalli 등(1996)이 제안한 모델은 시간과 비용적 측면에서 불리한 불포화 삼축압축시험을 피하고 함수특성곡선과 포화시의 전단강도로 불포화 전단강도를 예측할 수 있는 모델이다. 본 연구에서는 포화 조건에서 각 시료들을 대상으로 삼축압축시험을 실시하여 얻은 포화강도정수와 불포화 함수특성곡선 시험을 통해 얻은 함수특성곡선을 이용하여 불포화 전단강도를 추정하였다.

또한 추정된 불포화 전단강도를 식(2)에 적용시켜 겉보기 내부마찰각 산정하였다. 겉보기 내부마찰각은 식(2)에서 $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ 로 점착력의 증분으로 표현된다. 즉, 불포화시의 마찰각은 포화시의 마찰각과 거의 동일하며 점착력은 $c = c' + \Delta c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$ 로 구할 수 있다.

3. 수치해석

3.1 개요

본 연구에서는 도로 입상재료의 한계하중을 구하기 위해 고정된 구조에서 하중을 변화시키며 유한요소해석을 실시하였다. 또한 응력의존 비선형 탄성계수 모델을 해석할 수 있는 유한요소해석 프로그램 FERUT(Park and Lytton, 2004)를 사용하였다. 이 프로그램은 사용자가 임의로 다양한 경계조건(boundary condition)과 해석망(mesh)을 구성할 수 있다. 해석 시 사용된 구조체의 유한요소망은 <그림 1>과 같다.

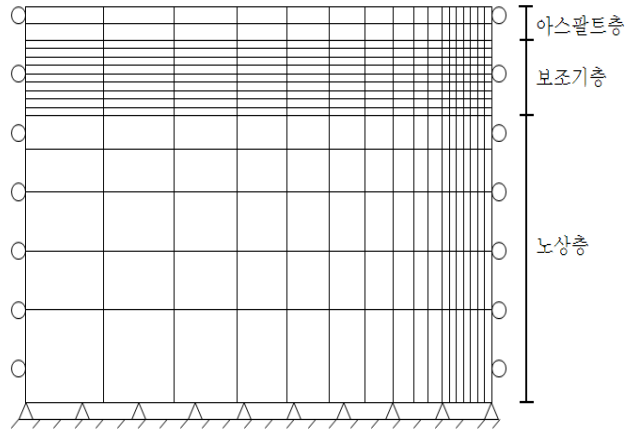


그림 1. 도로 포장구조체의 유한요소망

해석프로그램에서 활용된 회복탄성계수 예측모델은 Uzan(1985)이 제안하였으며 이미 국내외에서 검증된 식으로써 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_R = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3} \quad (4)$$

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

해석 시 구하여지는 파괴하중과 항복하중은 <표 1>과 같이 정의 된다. 파괴하중은 p-q 그림에서 한계상태선(K_f line)을 넘어가는 순간으로 정의하였고 탄성영역에서 소성영역으로 넘어가는 항복하중은 Mohr-Coulomb의 항복함수(Yield Function)를 활용하여 항복함수의 값이 음수에서 양수로 넘어가는 순간으로 정의하였다.

표 1. p, q와 항복함수의 정의

구분	p	q	Yield Function
식	$p = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$	$q = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$	$\frac{I_1}{3} \sin\phi + \sqrt{J_2} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) - \sqrt{\frac{J_2}{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \sin\phi - c \cos\phi$

3.2 해석 조건

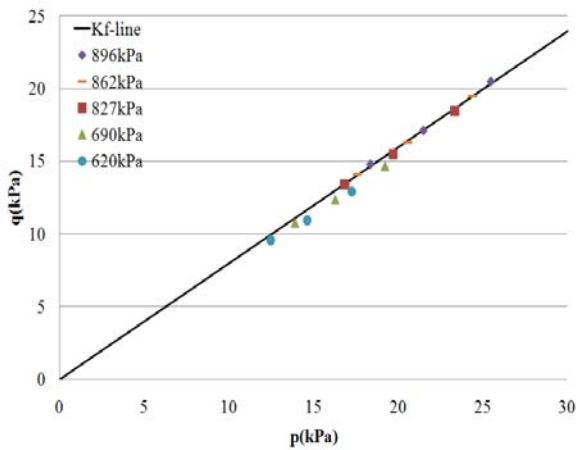
도로 입상재료의 한계하중을 평가하기 위한 해석조건은 표 2와 같고 도로 포장구조체의 기하학적 구조는 고정된 상태에서 하중조건을 변화시켜가며 해석을 실시하였다. 아스팔트층은 선형탄성으로 가정하였기 때문에 3000MPa로 고정된 값을 적용하였고 보조기층과 노상층은 비선형 탄성계수 모델을 사용하였다.

표 2. 수치해석 조건

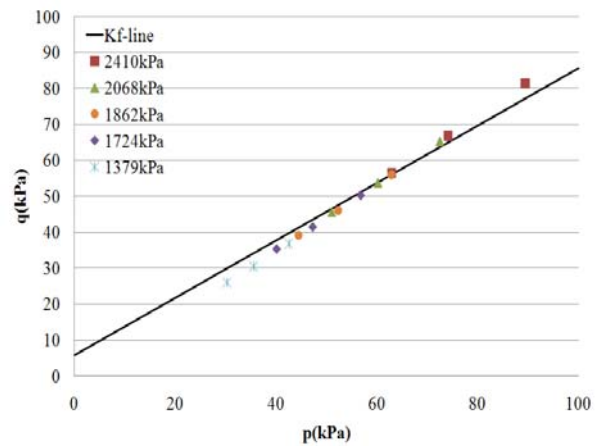
구분	두께 (cm)	함수비 (%)	탄성계수 및 모델계수			포아송비 (ν)
			K1	K2	K3	
아스팔트층	20	-	3000 MPa			0.35
보조기층 (GW)	30	OMC	874.62	0.669	-0.093	0.40
노상층 (SW)	∞	OMC	517.89	1.057	-0.205	0.45

4. 해석결과

그림 2는 도로 입상재료의 상태에 따른 파괴하중을 나타내고 있다. 수치해석 시 하중을 변화시켜가며 입상재료의 응력경로(Stress Path)를 나타내었다. 포화상태일 경우 입상재료를 대상으로 정적 삼축압축 시험을 실시하여 강도 정수 c, ϕ 값을 구하고, 불포화상태일 경우 포화 강도정수와 함수특성곡선을 활용하여 추정된 불포화 강도정수를 구한 뒤 각각의 강도정수를 사용하여 p-q 도표에서 한계상태선(K_f -line)을 작성하였다. 두 경우 모두 하중이 증가할수록 재료의 응력경로가 한계상태선에 가까워짐을 볼 수 있었다. 입상재료의 상태가 포화상태에서는 827kPa - 862kPa, 불포화 상태에서는 1860kPa의 하중을 주었을 때 한계상태선을 넘었다. 재료의 두 상태를 비교해 보았을 때 불포화 상태일 경우 포화상태에서의 값보다 1000kPa정도의 큰 지지력을 가지는 것으로 나타났다.



(a) 포화상태

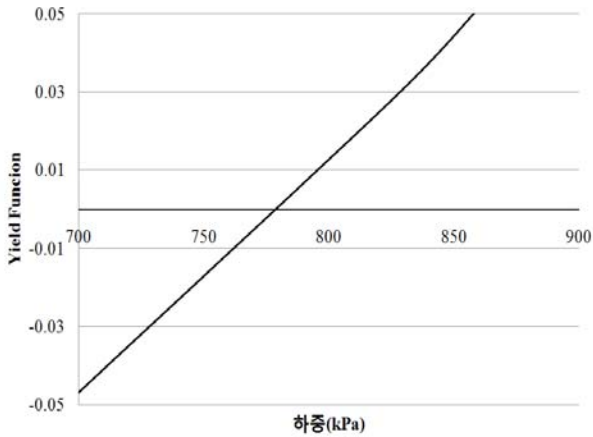


(b) 불포화 상태

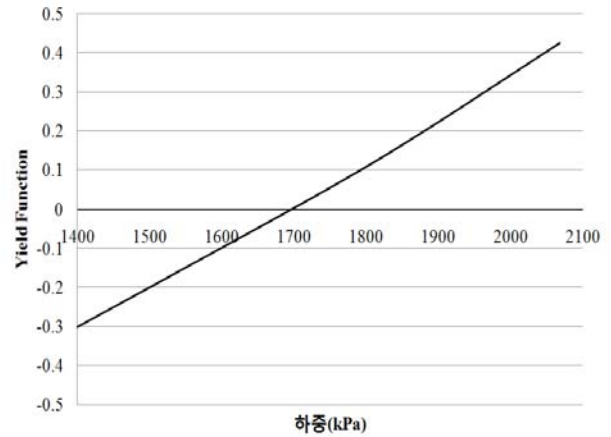
그림 2. 재료의 함수상태에 따른 파괴하중

그림 3은 도로 입상재료의 상태에 따른 항복하중을 나타낸 그림이다. 파괴하중을 구할 때와 동일하게 도로 포장구조체에 가하는 하중을 점점 증가시켜감에 따라 얻어지는 항복함수(Yield Function)의 값을 구하였다. 항복함수(Yield Function)의 값이 음수에서 양수로 넘어가는 순간을 항복하중으로 정의하였다. 항복하중은 입상재료의 상태가 포화상태, 불포화상태일 경우 모두 위에서 구하여진 파괴하중보다 작은 것으로 나타났다.

포화상태에서는 780kPa, 불포화상태에서는 1700kPa의 하중이 가하여졌을 때 입상재료가 항복하는 것으로 나타났다. 재료의 상태변화에 따라 항복하중의 변화가 큰 것을 알 수 있었으며 파괴하중의 경우와 비슷하게 불포화상태일 경우 포화상태의 경우보다 900kPa이상의 하중을 더 견딜 수 있는 것으로 나타났다.



(a) 포화상태



(b) 불포화 상태

그림 3. 재료의 함수상태에 따른 항복하중

표 3은 그림 2와 그림 3의 결과를 종합하여 제시하였다. 도로 포장구조체의 각 층은 고정하여 표층에 가하는 하중을 변화시키며 주어진 조건의 기하 구조에 만족하는 한계하중을 구하였다. 재료의 상태를 포화와 불포화로 나누어 각각의 경우에 따른 한계하중 값을 비교·분석한 결과 불포화 상태에서 포화상태의 경우보다 2배 이상의 하중을 더 견딜 수 있는 것으로 나타났다. 이는 상태의 변화에 의해 강도정수가 변함에 따라 나타난 결과이다. 현재 도로 포장구조체는 재료의 상태가 포화라는 가정 하에 설계되고 있으나 대부분의 도로 입상재료는 불포화상태로 존재하므로 설계하중보다 더 큰 하중을 견딜 수 있을 것으로 판단된다.

표 3. 재료의 상태에 따른 한계하중

	파괴하중	항복하중
포화 상태	860kPa	780kPa
불포화 상태	1860kPa	1700kPa

5. 종합

본 연구에서는 불포화 강도특성을 고려한 도로 입상재료를 대상으로 유한요소해석을 실시하여 재료의 상태에 따른 한계하중을 평가하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 입상재료의 상태에 따른 한계하중 평가결과, 불포화 상태일 경우 포화상태 보다 지지력 차원에서 2배 이상의 하중을 견딜 수 있는 것으로 나타났다.
- (2) 도로 입상재료의 응력경로와 항복함수 값을 활용하여 파괴하중과 항복하중을 구함으로써 재료의 지지력을 합리적으로 평가할 수 있다.
- (3) 2m 이상의 성토 혹은 지하수위면 이상에 건설되는 도로의 경우 실제 입상재료는 불포화 상태로 존재하므로 불포화 강도특성을 정량화하면 보다 합리적인 설계가 가능하리라 판단된다.

- (4) 향후 추가적인 연구로 불포화지반에서 발생하는 내부 응력의 직접적인 정량화를 통하여 비선형탄성 영역에 작용하는 하중 거동을 평가하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 2009년도 “도로동방방지층 효용성 검증” 과제와 한국연구재단 2009년도 “일반연구자지원사업”의 지원으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Uzan, J. (1985), "Characterization of Granular Material", *Transportation Research Record No. 1022*, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 52-59.
5. 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.