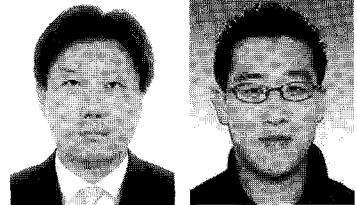


도로지반재료의 회복탄성계수(M_R)



박성완 | 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수
황규영 | 정회원 · (주)건화 도로공항부 부장 · 공학박사

1. 서론

기존의 경험적인 도로포장 설계방식은 아스팔트층의 두께가 포장공용성에 관계한다는 것이었으나, 현재까지 분석된 포장의 공용성을 보면 많은 포장체들이 재료의 두께에 직접적으로 관계되기 보다는 포장구조체의 역학적인 특성들과 직접적으로 관계한다는 것이 밝혀졌다. 이러한 이유로 현재 도로포장의 설계법들은 국내외적으로 역학-경험적인 방식으로 전환하는 추세에 있으며, 포장하부구조 재료분야에서도 역학적인 접근방식으로 지반재료상수와 응력의존 모형 등이 고려되고 있는 실정이다.

그 중 포장하부구조재료의 회복탄성계수 (Resilient Modulus)는 차량하중의 반복재하조건에서 유발되는 재료의 응력과 변형 상태를 반영한 특성 값으로, 역학적인 포장설계 및 해석에 기본이 되는 입력물성이다. 따라서, 도로의 특성을 가장 합리적으로 반영할 수 있다고 평가되고 있다. 실제로 포장하부구조의 설계상수로 사용되는 회복탄성계수는 교통하중을 반영한 반복하중 재하시 매우 비선형적이며 응력의 수준에 따라서 각기 다른 거동을 하는 것으로 알려져 있다.

따라서 본 기사에서는 역학-경험적 포장설계시 활용되고 있는 회복탄성계수 모형 및 재료상수의 범위에 대해 기술하여 포장하부구조 재료의 응력의존적 해석을 위한 입력변수에 대해 보다 활발한 활용과 적용의 계기를 마련하고자 한다.

2. 포장 하부구조재료의 응력의존 특성

일반적으로 지반구조물의 해석 및 설계시 사용되는 탄성계수는 정하중에 의한 응력-변형을 관계를 이용하여 산정한다. 하지만 도로포장체에는 정하중이 아닌 차량의 통행으로 인하여 반복적인 윤택하중이 작용하게 되어 포장체 내부의 응력변화는 매우 복잡한 형태로 나타나며 다양한 응력의 변화 및 변형이 발생한다.

그림 1은 포장체 내부의 응력변화 상태로서 교통하중이 포장체 내부의 어느 한 요소에 접근함에 따라 수직과 수평응력은 점차적으로 증가하여 요소 중심에 올 때 최대값을 가지고 점차 멀어짐에 따라 감소하나 전단응력은 교통하중이 요소 중심을 지날 때 부호가 바뀌는데, 이는 주응력축의 회전에 의한 영

향이다. 이러한 교통하중은 도로의 개방 후 지속적으로 발생하며 포장체 내의 한 요소는 반복적인 축차응력을 지속적으로 경험하게 되므로 탄성적인 변형과 회복변형이 반복되어 반복회수가 증가함에 따라 영구변형도 누적되게 된다.

력의 영향만을 고려한 회복탄성계수모델은 식(2)와 같다.

$$M_r = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \quad (1)$$

$$M_r = k_1 \times \theta^{k_2} \quad (2)$$

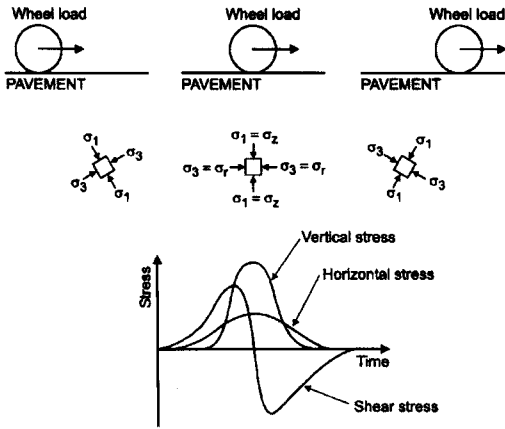


그림 1. 운하중에 의한 도로기초 내부의 응력변화 (Lekarp, 2000)

포장하부구조 재료의 탄성계수의 변화에는 많은 인자들이 관련되어 있지만 가장 많은 영향을 미치는 요소는 작용응력(축차응력, 구속응력, 체적응력 등)이다. 포장하부구조 설계시 가장 중요한 입력물성인 회복탄성계수(resilient modulus; M_r)는 응력의존적인 물성으로 반복하중에 의한 응력-변형률 관계를 이용하여 구성방정식을 산출하는 것이 합리적이다. 세립토의 회복탄성계수는 축차응력(σ_d)이 증가함에 따라 회복탄성계수가 감소하고 구속응력(σ_3)의 영향은 작은 반면, 조립토의 회복탄성계수는 축차응력의 영향은 작고 구속응력 또는 체적응력이 증가함에 따라 회복탄성계수가 증가한다. 미국 AASHTO T294-92I에서는 노상토의 경우 축차응력의 영향만을 고려한 모델과 기층 재료의 경우는 체적응력의 영향만을 고려한 모델을 적용하고 있다.

축차응력의 영향만을 고려한 회복탄성계수모델은 식(1)과 같이 표현되며 log-log 축척에서 회복탄성계수와 축차응력이 직선의 관계로 나타나고 체적응

여기서, σ_d = 축차응력 (kPa)

θ = 체적응력 ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa)

k_1, k_2 = 시험으로부터 결정되는 재료상수

그러나 여러 국내의 연구들에 의하면 상기 모델들은 포장하부구조재료의 회복특성에 대한 전단응력의 영향이 전혀 고려되지 않은 것으로서 지반재료의 장기변형에 큰 영향을 미치는 응력의존 회복탄성계수의 예측이 부정확하다고 알려져 있다. 포장하부구조는 실질적으로 축차응력과 체적응력에 대해 동시에 영향을 받고 있으며 국내에서 사용되는 주된 조립재료의 경우 축차응력뿐만 아니라 구속응력에도 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있어 실제적인 응력변화 조건을 표현하기에 한계가 따르고 있다(권기철, 2000). 1992년 Uzan은 축차응력과 체적응력을 동시에 고려할 수 있고 응력변화에 따른 포와송비의 변화와 응력의존 회복탄성계수모델(Universal 모델)을 제안하였으며 식(3)과 같이 표현된다.

$$M_r = k_1 \cdot P_a \times \left(\frac{I_1}{P_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3} \quad (3)$$

여기서,

I_1 = 체적응력 ($I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa)

$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ (kPa)

P_a = 대기압 (100kPa)

k_1, k_2, k_3 = 시험으로부터 결정되는 재료상수

재료상수인 k_1, k_2, k_3 는 회복탄성계수시험으로부터 얻어진 결과를 회귀분석을 통하여 결정할 수 있

다. 또한 비선형 응력의존 특성을 대변하는 첫 번째 응력불변방향인 k_2 항은 응력강화(Stress-Hardening) 영향에 관계되고 정팔면체 전단응력항인 k_3 항은 응력연화(Stress-Softening) 영향에 연 관된다.

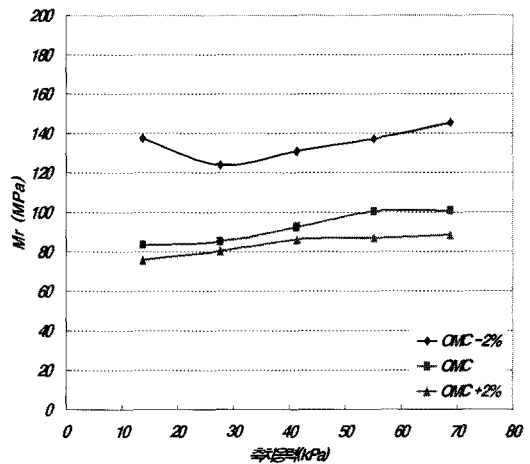
3. 응력의존 탄성계수의 함수비 변화에 따른 특성

대부분의 포장하부구조재료의 회복변형특성에 함수비나 포화도는 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Hayne & Yoder(1963)는 포화도가 70%에서 97%로 증가할수록 자갈질 재료에서의 회복탄성계수는 50%가 감소한다고 하였으며, Hicks & Monismith(1971)은 최적함수비 이상으로 함수비가 증가하면 회복탄성계수는 계속해서 감소한다고 제안하였다. 포화된 입상재료가 반복하중을 받게 되면 과잉간극수압이 발생하게 되고 이로 인해 유효응력이 감소하여 결과적으로 재료의 강성은 감소하게 된다.

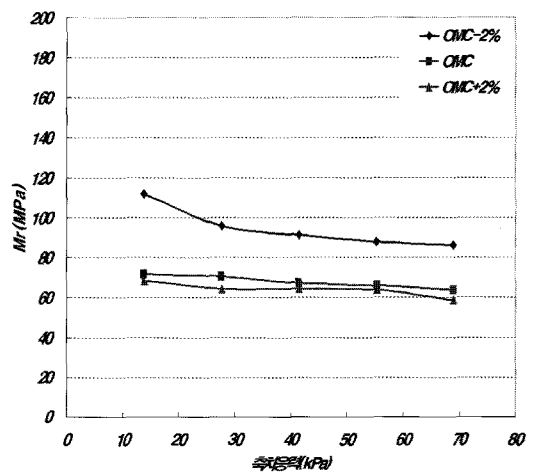
Fredlund et al(1975, 1977)의 연구에 의하면 세립토에서의 회복탄성계수는 일반적으로 고려되는 영향요소인 구속응력과 축차응력뿐만 아니라 흡입자 사이에 존재하는 모관흡수력의 변화와 선형적인 상관관계를 가진다고 제안하였다. 세립토에서 함수비가 변하면 그에 따른 유효응력이 변하게 되는데, 이는 불포화도에서 함수비가 변함에 따라 흙의 모관흡수력이 변하게 되는 것으로 설명되고 흙에서 함수비가 감소할 경우 모관흡수력, 유효응력, 강도 등은 공기 함입치(Air Entry Value)에 이를 때까지 증가하게 된다(Hardcastle, 1992).

그림 2는 대표적인 국내 노상토 재료에 대한 함수비 변화에 따른 응력의존 회복탄성계수의 변화로서 시험재료 모두 함수비변화에 대해 회복탄성계수의 변화가 확인하였으며, 함수비가 증가할수록 회복탄성계수는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서

함수비변화는 회복탄성계수 특성에 큰 영향을 미치는 영향인자로 판단되므로, 시공 후 계절에 따른 함수비 변화로 인한 영향과 시공단계에서 포장하부구조재료의 다짐시공을 하는데 필수적으로 고려해야 하는 중요한 영향요소를 알 수가 있다.



(a) SW계열 노상토



(b) SM계열 노상토

그림 2. 함수비 변화에 따른 응력의존 회복탄성계수의 변화

전반적으로 최적함수비(OMC)의 건조측에서 회복탄성계수 변화폭이 다소 큰 차이를 보이는 반면 습윤측에서는 상대적으로 작은 회복탄성계수 차이를 나타내어 건조측과 습윤측에서의 회복탄성계수 변화

폭이 상이하다. 이는 최적함수비를 기준으로 함수비가 건조측으로 갈수록 모관흡수력이 급격히 증가하고, 습윤측으로 갈수록 완만한 모관흡수력 감소를 나타내는 현상 때문인 것으로 알려져 있다.

4. 응력의존 탄성계수 예측모델의 적용성

포장하부구조 재료는 앞서 언급한 바와 같이 응력의존적인 물성치이므로 체적응력뿐만 아니라 축차응력의 영향도 대단히 크게 받고 있어 체적응력과 축차응력의 영향을 동시에 고려할 수 있는 Universal 모델을 활용할 경우 가장 만족스러운 결과를 나타낸다고 알려져 있다. 축차응력 모델이나 체적응력모델보다 많은 영향요소들을 고려하는 Universal 모델이 다른 모델에 비하여 적합성이 크게 평가되는 것은 당연한 결과이나 모델에서 영향요소가 증가하여 결정하여야 하는 계수가 증가하면 회귀분석으로 모델변수를 합리적으로 결정하는 것이 어려워지는 단점을 지니고 있다. 그러나 국내 포장하부구조재료의 경우에는 체적응력 또는 축차응력 하나만을 변수로 한 모델을 적용하면 오차가 크게 발생하기 때문에 모델계수가 증가하여도 적합성이 높은 Universal 모델과 같은 체적응력과 축차응력을 동시에 고려할 수 있는 모델이 적용되어야 한다.

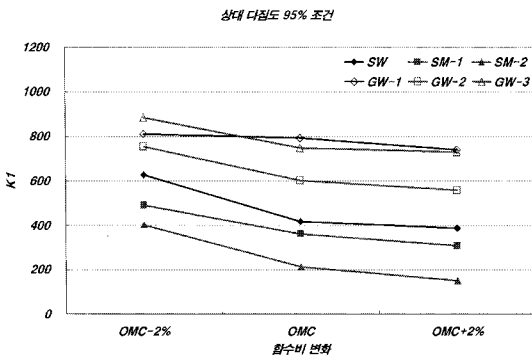


그림 3. 함수비 변화에 따른 Universal 모델계수 k_1 의 변화

그림 3은 함수비 변화에 따른 Universal 모델의

모델계수 k_1 의 변화로서 재료의 종류와 관계없이 최적함수비에서 건조측으로 갈수록 모델계수 k_1 은 증가하고 습윤측으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 SW와 SM계열의 재료에서는 최적함수비를 기준으로 건조측에서 k_1 의 변화폭이 다소 큰 차이를 보이는 반면 습윤측에서는 상대적으로 작은 k_1 의 변화 차이를 나타내어 그림 2에 나타난 회복탄성계수의 변화경향과 일치하는 경향을 보이고 있다. 이상의 결과로부터 모델계수 k_1 의 변화는 회복탄성계수의 변화와 일치하는 경향으로 모델계수 k_1 의 변화가 회복탄성계수의 변동에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

표 1은 미국 FHWA에서 제시한 포장하부구조재료의 일반적인 Universal 모델계수의 범위와 국내 포장하부구조재료의 모델계수 범위를 비교한 것으로, 국내 노상토의 모델계수는 FHWA LTPP(Richter, 2006)에서 제시한 모델계수의 범위 중에서 Silt나 Sand의 계수범위에 있으며, 보조기층재료는 FHWA에서 제시한 Gravel의 범위와 매우 유사하다.

표 1. Universal 모델계수 범위 비교 (박성원 등 2008)

Material	평균 k_1 (범위)	평균 k_1 (범위)	평균 k_1 (범위)
FHWA (Silt)	426 (136~838)	0.42 (-0.05~0.66)	-0.23 (-0.57~0.05)
FHWA (Sand)	598 (103~3494)	0.44 (-0.33~0.99)	-0.12 (-0.43~0.89)
FHWA (Gravel)	836 (229~3172)	0.23 (-0.27~0.59)	-0.08 (-0.33~0.67)
국내 노상토	SW 계열 569 (387~921)	0.99 (0.68~1.25)	-0.18 (-0.23~-0.14)
	SM 계열 452 (414~519)	0.42 (0.33~0.50)	-0.24 (-0.29~-0.20)
국내 보조기층	GW 계열 809 (750~889)	0.68 (0.61~0.73)	-0.09 (-0.14~-0.03)

그림 4는 현장 노상토의 특성을 대변하는 경험적 물성치인 CBR과 역학적 물성인 회복탄성계수의 영향을 가장 적절하게 반영하는 Universal 모델계수

k_1 과의 관계이다. 그림에 나타난 바와 같이 CBR과 Universal 모델계수 k_1 과의 관계는 거의 없는 것으로 나타나 포장하부구조재료의 역학적 특성을 CBR로 평가하거나 CBR로부터 회복탄성계수를 추정하여 역학-경험적 포장설계에 적용하는 것은 많은 오차를 내포할 가능성이 큰 것으로 예상된다.

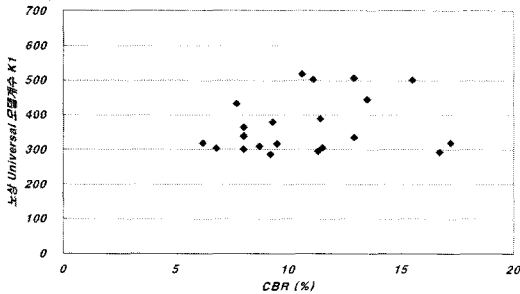


그림 4. Universal 모델계수 k_1 과 CBR 비교

6. 결론

앞서 살펴본 바와 같이 포장하부구조 지반재료는 보조기층, 노상토, 성토 및 뒤채움으로 많이 활용되고 있다. 현재까지 기존의 국내 설계에서는 CBR 방식을 선호하고 있으나 전반적인 품질관리나 유지관리 측면에서 탄성계수의 적극적인 활용이 요망된다. 또한 역학-경험적인 도로포장설계에 의한 공용성 예측에 있어 적절하게 적용할 경우 그 효과는 클 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 권기철(2000), "국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델", 대한토목학회논문집 제20권 제3-D호 pp.301-310.
2. 박성완, 황규영 (2008), "도로기초 지반재료의 회복 변형 및 응력의존예측" 한국도로학회논문집 제10권 제1호 pp.63-74.

3. Fredlund, D.G., Bergan, A.T., and Sauer, E.K. (1975). "Deformation Characterization of Subgrade Soils for Highways and Runways in Northern Environments", Canadian Geotechnical Journal Vol. 12, 213-223.
4. Fredlund, D.G., Bergan, A.T., and Wong, P.K. (1977). "Relation Between Resilient Modulus and Stress Conditions for Cohesive Subgrade Soils", Transportation Research Record Vol. 642, 73-81.
5. Hardcastle, J.H. (1992), "Subgrade Resilient Modulus for Idaho Pavements", FHWA Report No. RP110-d, Idaho Transportation Department.
6. Haynes, J.G. and Yoder, E.J. (1963). "Effect of Repeated Loading on Gravel and Crushed Stone Base Course Materials Used in the AASHO (American Association of State Highway Officials) Road Test." Highway Research Record, No.39.
7. Hicks, R.G. and Monismith, C.L. (1971). "Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials." Highway Research Record 345, pp.15-31.
8. Lekarp F., Isacsson U., and Dawson A. (2000), "State of the Art I.: Resilient Response of Unbound Aggregates." Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp.66-75.
9. Richter, C. A. (2006), "Seasonal Variations in the Moduli of Unbound Pavement Layers", Research Report, FHWA-HRT-04-079, Federal Highway Administration, Department of Transportation, U.S.
10. Uzan, J. (1992), "Resilient Characterization of Pavement Materials", International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, Chichester, NY, 16(6), 435-459.