



응력상태와 함수비에 대한 시험도로 노상토의 회복탄성거동

Effect of Stress State and Moisture Condition on the Resilient Behavior of Subgrade Soils in Test Roads

박 성 완* 이 치 현** 황 규 영***
Park, Seong Wan Lee, Chi Hun Hwang, Kyu Young

Abstract

Resilient characteristics on unbound pavement materials have been adopted for design and nonlinear analysis of pavement structure under traffic loadings. However, relatively few studies have been done on the nonlinear resilient behavior of unbound materials in Korea. In addition to that, only the limited information is available for estimating the resilient modulus values on subgrade soils. In this study, a laboratory resilient-deformation test under repeated loadings is performed in order to establish the nonlinear characteristics of unbound subgrade soils in test roads. Then, a constitutive model that correlates the resilient modulus with moisture and stress state from field condition is proposed respectively. The results from all procedures are presented in this paper. Finally, a comparative analysis is conducted to identify the proper models in the stress dependent modulus and seasonal moisture condition of subgrade soils in test roads respectively.

Keywords : resilient modulus, subgrade soil, constitutive model, moisture condition

요 지

교통하중하의 포장구조에 대한 설계나 비선형 해석에 있어 도로하부 재료의 회복변형 특성이 활용되고 있다. 그러나 국내에서의 관련 연구가 매우 미진한 실정이다. 또한 매우 제한적인 범위의 자료만이 노상토의 회복탄성계수를 추정하는데 활용되고 있다. 이에 본 논문에서는 시험도로 입상 노상토를 대상으로 비선형 특성을 알아보기 위하여 반복재하 회복탄성계수 시험을 수행하였다. 현장조건을 반영하여 함수비와 응력조건을 고려한 회복탄성계수 구성방정식을 제안하였다. 이를 통하여 응력조건을 고려한 회복탄성계수 예측모델과 적합한 응력의존 모델을 결정하고 계절적인 함수비 변화가 고려된 회복탄성계수 모델을 각각 비교하였다.

핵심용어 : 회복탄성계수, 노상토, 구성방정식, 함수비

* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사

** 단국대학교 토목환경공학과 · 공학석사

*** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 · 박사과정



1. 서론

도로포장시스템의 설계에 있어 노상토의 특성 및 거동평가는 매우 중요한 요소로 고려된다. 그러나 국내에서는 CBR과 같은 정성적인 방법을 통하여 노상토의 물성을 결정하여 포장하부 설계에 적용하고 있는 등 지반 물성을 보다 정확하게 나타내지 못하고 있는 실정이다.

현재 포장하부의 설계를 위한 보다 정량화된 방법으로는 차량하중에 의한 반복재하 조건에서 발생하는 포장 재료의 응력-변형률 관계를 합리적으로 반영할 수 있는 회복탄성계수(Resilient Modulus ; M_R)가 설계 및 해석의 입력물성 값으로 사용되고 있다. 또한 노상토의 회복탄성계수는 계절별 함수비의 변동에 따라 변화하며 반복적인 차량하중에 의하여 포장체에 다양한 응력의 변화 및 변형이 발생하게 되는 관계로 이를 고려한 물성의 정확한 획득이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 국내 노상토의 많은 부분을 차지하고 있는 화강풍화된 SW계열 노상토에 대하여 함수비, 하중조합, 상대다짐도 조건을 달리하여 반복재하식 회복탄성계수 실내시험을 실시하여 이에 따른 회복탄성계수 거동특성을 파악하였으며 시험결과와 국내·외 선행연구를 통해 제안된 회복탄성계수 예측모델들의 적용성을 평가하여 제시된 노상토에 가장 합리적인 모델을 선정하였다. 또한, 결과를 바탕으로 응력조건뿐만 아니라 함수비가 동시에 고려된 회복탄성계수 모델을 제시하였다.

2. 회복탄성계수

지반구조물의 해석 및 설계 시 사용되는 탄성계수는 정하중의 응력-변형률 관계에 따라 산정한다. 노상토층에서는 지반구조물에 의한 정하중이 아닌 차량하중에 의한 지속적인 반복하중이 작용하여 포장체 내부에 다양한 응력의 변화 및 변형이 발생하게

된다. 포장체 내부에 이러한 반복하중이 지속적으로 작용하게 되면 탄성변형과 회복변형이 반복되고 반복회수의 증가에 따라 소성변형도 누적되며, 반복재하회수가 어느 정도 이상 증가하면 그림 1과 같이 소성변형보다 회복변형이 지배적으로 나타나게 된다. 이때의 응력-변형률 곡선의 기울기를 회복탄성계수라고 정의하며 식 (1)과 같이 표현한다.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \tag{1}$$

- 여기서, M_R : 회복탄성계수
- σ_d : 반복축차응력
- ϵ_r : 회복변형률

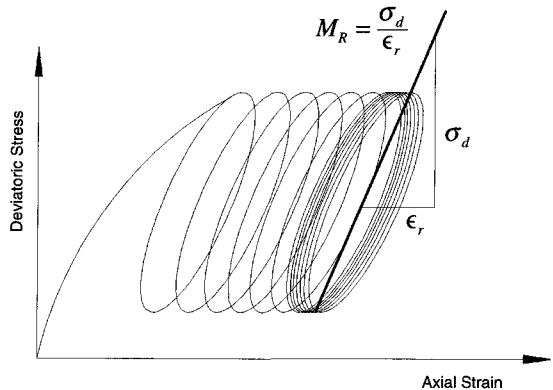


그림 1. 반복하중에 의한 포장체 내부의 응력-변형률 관계

노상토의 회복탄성계수는 함수비의 변동에 따라 크게 변화하는데, 일반적으로 함수비가 증가하면 회복탄성계수는 감소하며 그 변화의 크기는 흙의 종류나 분류에 따라 다르게 된다. 또한, 포장체에 작용하는 축차응력이나 구속응력의 변화는 노상토의 회복탄성계수에 많은 영향을 미치는데 조립토에서는 구속응력의 영향을 크게 받고 세립토에서는 축차응력의 영향을 더 크게 받는다(FHWA, 2000). 이러한 응력의 영향은 축차응력과 구속응력의 상호작용으로 나타나기 때문에 체적응력에 관한 관계로 표현하고 있다(Rada and Witzack, 1981; 권기철, 2000).



3. 반복재하식 회복탄성계수 실내시험 및 결과

수직압력 뿐만 아니라 전단변형도 발생시켜 현장다짐을 유사하게 모사하는 장점을 가지고 있다.

3.1 시료 및 시험조건

본 연구의 실험을 시료로 중부내륙고속도로 시험도로(KHC-test road)의 노상토를 선택하였고 그림 2와 3은 각각 입도분포곡선과 다짐시험 결과이며 표 1은 시료의 기본 물성값이다.

표 1. 지반의 물성값

구 분		시험도로 노상토
입도시험결과	D ₁₀	0.15
	D ₃₀	0.63
	D ₆₀	2
	C _c	1.3
	C _u	13.3
	#200 통과율	4.92
	#4 통과율	93.82
비 중		2.653
소성지수(PI, %)		NP
흙 분류	토질분류	SW
다짐시험결과	최적함수비(%)	9.5
	최대건조단위중량(kN/m ³)	18.87

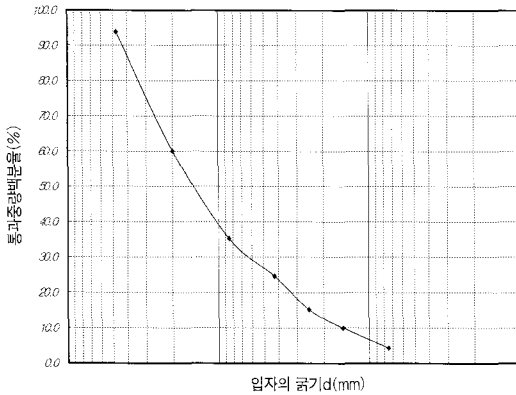


그림 2. 입도분포곡선

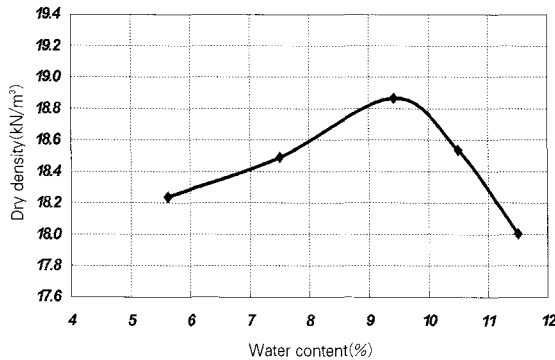


그림 3. 다짐시험결과

반복재하식 회복탄성계수 실내시험을 위해 그림 4와 같이 UTM-25 만능시험기를 사용하였고 공시체는 직경 100mm에 높이 150mm로 그림 5와 같은 전단다짐의 원리를 이용한 선회다짐기(gyratory compactor)를 활용하여 성형하였다. UTM-25는 일정한 주기의 반복하중을 가하여 실제 노상토층의 응력변화를 유사하게 모사할 수 있으며, 선회다짐기는

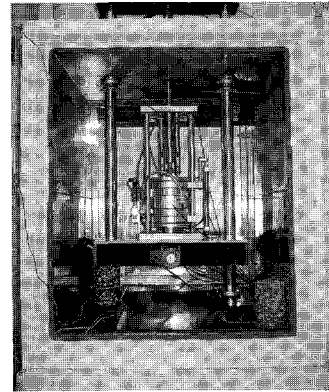


그림 4. UTM-25

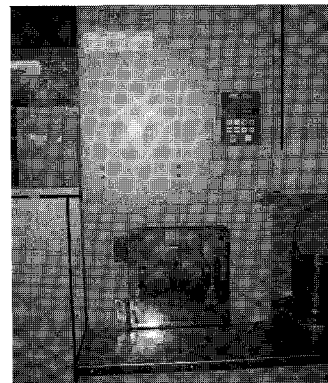


그림 5. 선회다짐기



실내시험은 회복탄성계수의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 함수비, 응력조건 및 상대 다짐도를 다르게 조합하여 수행하였다. 시험도로 노상토의 연중함수비 변화폭은 최적함수비를 기준으로 $\pm 2\%$ 로 밝혀져(박성완 등, 2006), 이를 참조하여 최적함수비 9.5%를 기준으로 $\pm 2\%$ 인 7.5%, 9.5%, 11.5%로 결정하여 건조축과 습윤축의 함수비 영향을 평가하였으며, 상대다짐도에 따른 영향 평가를 위한 시험조건으로는 한국도로공사 시방기준으로 노상토 상대다짐도가 95%이상인 것을 고려하여, 최대건조밀도를 기준으로 95%, 98%, 그리고 100%로 산정하여 실험을 진행하였다. 또한 하중조건은 미국 AASHTO의 TP46-94 규정을 사용하였으며 1 cycle마다 0.1초의 하중재하 후 0.9초의 휴지기를 가지는 반정현 형태의 하중을 재하하여 수행하였다.

표 2. 회복탄성계수 시험조건

순서	단위중량 (kN/m ²)	상대다짐도 (%)	중량당 함수비 (%)
1	17.93	95%	7.5
2			9.5
3			11.5
4	18.50	98%	7.5
5			9.5
6			11.5
7	18.87	100%	7.5
8			9.5
9			11.5

3.2 시험 결과

주어진 실험조건하 결과는 표3과 같으며 회복탄성계수는 함수비 7.5%, 상대다짐도 100%, 구속응력 41.4kPa, 축차응력 13.8kPa의 조건에서 173.6MPa로서 최대값을, 함수비 11.5%, 상대다짐도 95%, 구속응력 13.8kPa, 축차응력 13.8kPa의 조건하에서 33.72MPa로 최소값으로 계산되었다.

그림 6은 상대다짐도가 100%이고 구속응력이

표 3. 회복탄성계수 시험 결과

구분	응력조건		회복탄성계수(MPa)								
			상대다짐도 100%			상대다짐도 98%			상대다짐도 95%		
			함수비			함수비			함수비		
구속응력 (kPa)	축차응력 (kPa)	7.5%	9.5%	11.5%	7.5%	9.5%	11.5%	7.5%	9.5%	11.5%	
1	41.4	13.8	173.60	127.46	110.51	152.30	124.83	111.51	133.07	117.66	108.74
		27.6	170.03	131.61	123.48	152.69	123.33	117.95	131.72	120.51	115.32
		41.4	166.84	123.24	114.99	151.24	118.99	111.83	128.08	114.08	108.51
		55.2	171.02	124.42	116.08	154.48	117.90	109.25	127.16	112.13	103.50
		68.9	171.12	124.31	118.10	158.67	117.13	103.20	130.60	111.56	94.96
2	27.6	13.8	137.53	83.46	75.82	115.21	75.96	63.45	94.97	70.21	63.80
		27.6	124.10	85.10	80.37	110.49	81.21	69.97	93.89	73.83	64.75
		41.4	131.04	92.41	86.16	117.77	87.23	75.68	97.19	80.00	74.80
		55.2	137.34	100.56	82.45	123.32	93.23	81.36	109.37	89.35	78.48
		68.9	145.45	100.82	88.39	132.74	89.59	79.41	108.45	90.14	73.25
3	13.8	13.8	96.46	49.92	44.40	79.85	45.68	34.55	60.03	35.94	33.72
		27.6	93.26	50.19	51.04	81.37	50.44	42.55	62.48	39.88	41.51
		41.4	100.97	59.65	61.66	88.50	60.07	53.76	70.70	48.15	51.71
		55.2	111.66	59.04	64.83	101.05	67.15	57.69	79.96	57.80	55.09
		68.9	124.11	70.60	62.50	100.38	66.86	55.57	81.31	59.80	52.54

41.4kPa일 때 함수비 조건에 따른 회복탄성계수의 변화로 함수비가 작아질수록 회복탄성계수가 증가하는 경향을 보여 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 OMC(9.5%)를 기준으로 건조축에서 회복탄성계수의 변화폭이 큰 차이를 보이는 반면 습윤축에서 건

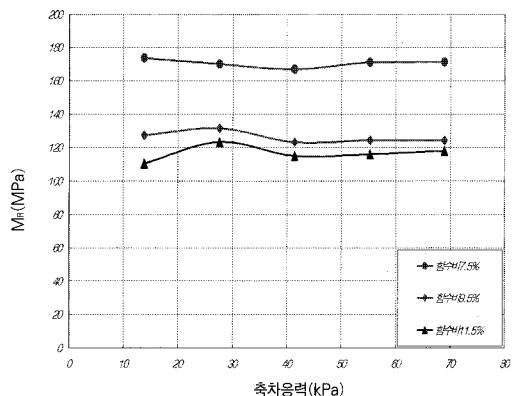


그림 6. 함수비에 따른 회복탄성계수의 변화(상대다짐도 100%, 구속응력 41.4kPa)



조측에 비해 상대적으로 작은 회복탄성계수 차이를 나타내어 건조측과 습윤측에서의 회복탄성계수의 변동폭이 상이함을 알 수 있었다.

그림 7은 상대다짐도 100%, 함수비 7.5%일 때의 응력조합에 따른 회복탄성계수의 변화를 표현한 것으로서 구속응력이 증가할수록 회복탄성계수는 증가하고 있다. 또한 가장 큰 구속응력인 41.4kPa에서는 축차응력이 회복탄성계수의 변화에 큰 영향을 미치지 않고 거의 일정한 경향을 나타내는 반면 27.6kPa, 13.8kPa의 구속응력에서는 축차응력이 커질수록 회복탄성계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 SW계열 노상토에서 회복탄성계수는 구속응력뿐만 아니라 축차응력에 대한 영향도 받으며, 구속응력 크기에 따라 축차응력에 대한 민감도가 변화하는 것으로 판단된다.

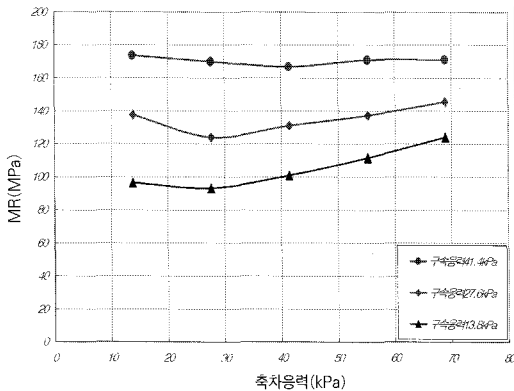


그림 7. 응력조건에 따른 회복탄성계수의 변화(상대다짐도 100%, 함수비 7.5%)

그림 8은 동일한 함수량과 각각의 구속응력 조건에서 상대 다짐도에 따른 회복탄성계수의 변화를 나타낸 것으로서 상대다짐도가 커질수록 회복탄성계수는 증가하는 경향을 보이는데 이는 상대다짐도가 증가할수록 흙 속의 간극이 줄어들어 강도가 증가하며 작용응력에 대한 변형률이 작아짐에 따른 현상이다. 그러나 상대다짐도 증가에 따른 회복탄성계수의 변화는 함수비 및 응력조건변화에 따른 영향에 비해 그 변화폭이 다소 작은 경향을 나타내었다.

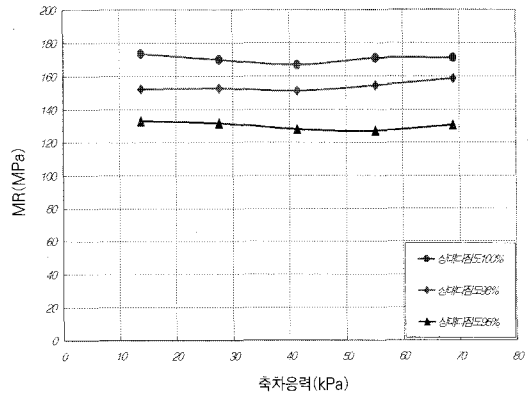


그림 8. 상대다짐도에 따른 회복탄성계수의 변화(함수비 7.5%, 구속응력 41.4kPa)

4. 회복탄성계수 예측모델의 적용성

4.1 응력의존 회복탄성계수 변화

회복탄성계수 예측모델의 적용성은 SW계열 노상토의 회복탄성계수가 체적응력 및 축차응력에 의해 어떠한 변화경향을 나타내는지 알아보기 위해 각각 체적응력(θ)과 축차응력요소(τ_{oct})에 대한 회복탄성계수의 변화를 살펴보았다. 그림 9, 그림 10에서 체적응력이 증가할수록 회복탄성계수는 증가하는 경향을 나타내었으나, 축차응력에 대한 회복탄성계수의

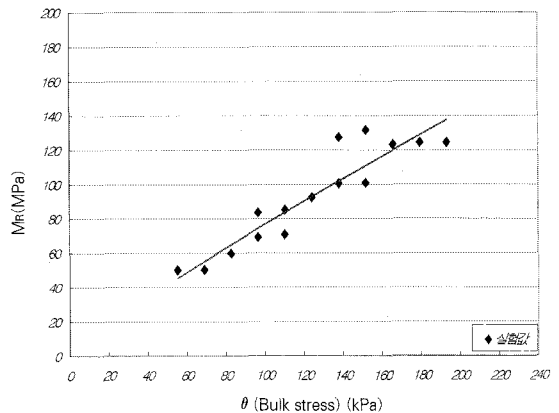


그림 9. $M_R - \theta$ 의 관계

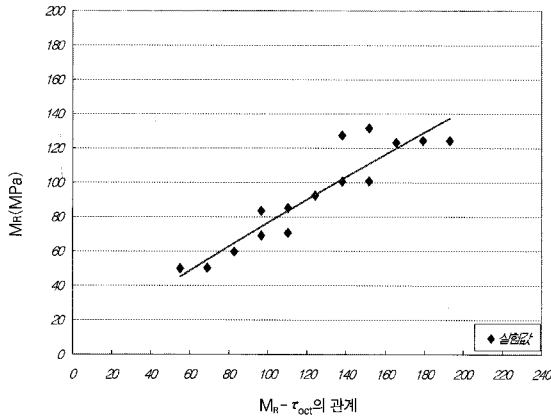


그림 10. $M_R - \tau_{oct}$ 의 관계

변화는 일정한 경향을 나타내지 않고 상대적으로 높은 분산을 나타내어 체적응력에 비해 회복탄성계수에 대한 상관성이 상대적으로 낮게 나타나 SW계열 노상토의 경우에 있어서는 경화(stiffening)거동이 지배적인 체적응력모델이 더 적합한 것으로 판단된다.

이러한 응력과 회복탄성계수의 관계를 바탕으로 국내외 문헌에서 제시된 각 회복탄성계수 실내시험 조건에 따른 7가지의 회복탄성계수 예측모델들을 표 4와 같이 선정하여 적용성을 평가하였다.

표 4. 회복탄성계수 예측모델의 모델계수

모델형태	계수	상대다짐도								
		100%			98%			95%		
		함수비								
		7.5%	9.5%	11.5%	7.5%	9.5%	11.5%	7.5%	9.5%	11.5%
$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2}$ Biarez(1962)	k_1	9.190	1.273	1.385	5.789	1.337	0.645	3.077	0.470	0.714
	k_2	0.562	0.889	0.857	0.633	0.868	0.992	0.725	1.067	0.963
	R^2	0.852	0.891	0.897	0.899	0.885	0.883	0.893	0.906	0.850
$M_R = k_1 \cdot \tau_{oct}^{k_3}$ (Mossazadeh, 1981)	k_1	113.65	63.624	57.074	92.164	60.644	48.075	74.687	48.864	50.115
	k_2	0.058	0.116	0.129	0.088	0.114	0.148	0.093	0.156	0.119
	R^2	0.025	0.041	0.055	0.047	0.041	0.053	0.040	0.052	0.035
$M_R = k_1 \cdot P_a \times \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3}$ (Uzan, 1985)	k_1	921.00	517.89	512.98	820.24	499.25	422.52	628.09	417.83	387.88
	k_2	0.685	1.057	1.000	0.746	1.031	1.159	0.862	1.250	1.151
	k_3	-0.149	-0.205	-0.174	-0.138	-0.198	-0.203	-0.168	-0.223	-0.230
	R^2	0.970	0.985	0.968	0.984	0.976	0.952	0.989	0.984	0.939
$M_R = k_1 \cdot \left(\frac{J_2}{\tau_{oct}}\right)^{k_2}$ (Johnson et al. 1986)	k_1	110.99	60.704	54.173	88.933	57.897	45.275	71.912	45.872	47.750
	k_2	0.058	0.116	0.129	0.088	0.114	0.148	0.093	0.156	0.119
	R^2	0.025	0.041	0.055	0.047	0.041	0.053	0.040	0.052	0.035
$M_R = k_1 + k_2 \cdot \theta$ (건설교통부, 2004)	k_1	56.146	10.931	11.678	40.472	11.927	2.420	26.958	-1.401	4.635
	k_2	0.651	0.660	0.599	0.651	0.612	0.607	0.593	0.667	0.564
	R^2	0.835	0.849	0.861	0.890	0.824	0.807	0.854	0.845	0.757
$M_R = k_1 + k_3 \cdot \log(\sigma_d)$ (건설교통부, 2004)	k_1	114.06	65.183	55.461	88.332	64.414	52.434	75.198	52.099	57.934
	k_2	14.727	17.788	19.666	21.217	15.145	16.326	16.328	18.838	10.785
	R^2	0.017	0.025	0.037	0.038	0.020	0.023	0.026	0.027	0.011
$M_R = k_1 + k_2 \cdot \theta + k_3 \cdot \log(\sigma_d)$ (건설교통부, 2004)	k_1	110.43	61.558	52.234	84.822	61.024	49.097	71.945	48.451	54.751
	k_2	0.793	0.792	0.705	0.767	0.741	0.730	0.711	0.797	0.696
	k_3	-46.25	-43.13	-34.55	-37.78	-41.83	-39.76	-38.32	-42.47	-42.69
	R^2	0.958	0.953	0.940	0.979	0.932	0.898	0.957	0.942	0.870



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

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

P_a : 대기압 (100kPa)

$$J_2 : J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \text{ (kPa)}$$

σ_d : 축차응력 (kPa)

$k_1 \sim k_5$: 모델계수

분석결과, SW계열 노상토는 구속응력의 영향을 크게 받으나 축차응력의 영향도 있어 이들을 동시에 고려한 Universal 모델을 활용할 경우 SW계열 화강풍화 노상토에 가장 만족스러운 결과를 나타냄을 알 수 있다.

Universal 모델에서 회복탄성계수의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 모델계수는 k_1 으로서 함수비 및 상대다짐도에 따른 변화는 그림 11과 같다.

최적함수비에서 건조축으로 갈수록 모델계수 k_1 은 급격한 변화를 나타내고 있으나 습윤축으로 갈수록 그 변화양상은 상대적으로 미미한 경향을 나타내고 있는데, 이는 그림 6에서 나타난 경향과 일치하는 것으로 모델계수 k_1 의 변화가 회복탄성계수 변동에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한 상대다짐도가 증가함에 따라 모델계수 k_1 도 증가하는 경향을 나타내었으나 함수비 변화에 따른 변동보다는 그 영향 정도가 적은 경향을 나타내었다.

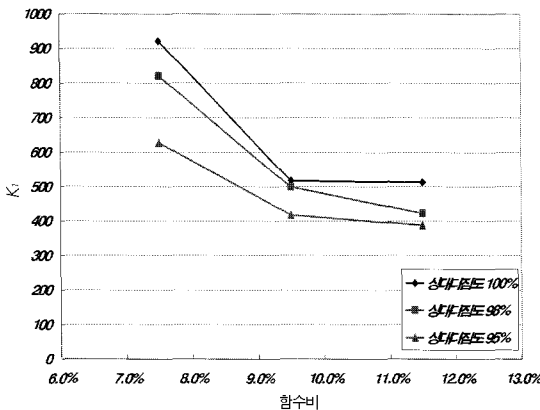
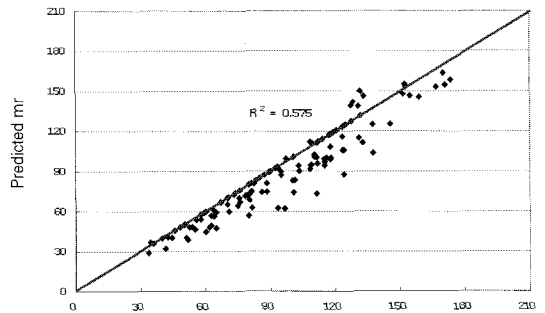


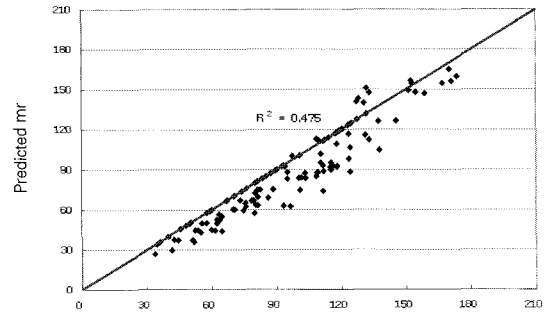
그림 11. 실험조건에 따른 모델계수 k_1 의 변화

4.2 함수비를 고려한 회복탄성계수 모델

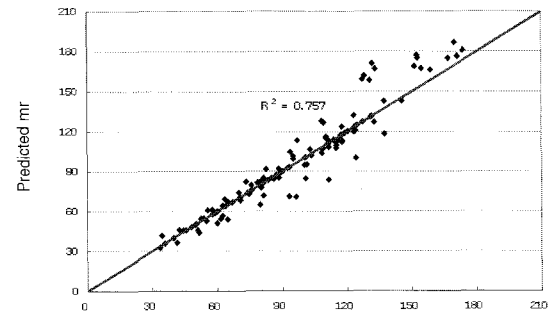
앞서 언급한 바와 같이 함수비변화에 따라 회복탄성계수의 값에 많은 영향을 미치고 있어 함수비 영향을 고려한 선형, 포물선, 그리고 지수형태 회복탄성계수의 예측 모델(Witczak et al, 2000)을 통하여 본 실험에서 실시한 결과에 적용하였으며 그 결과는



(a) 지수 모델



(b) 선형 모델



(c) 포물선 모델

그림 12. 함수비 영향을 고려한 회복탄성계수 예측모델을 통한 시험결과와 예측결과와의 비교



표 5와 그림 12와 같다.

표 5. 함수비 영향을 고려한 회복탄성계수 예측모델

모델 형태	구분
$\frac{M_R}{M_{R_{opt}}} = 10^{k_w(\omega - \omega_{opt})}$	지수 모델
$\frac{M_R}{M_{R_{opt}}} = 1 + k_1(\omega - \omega_{opt})$	선형 모델
$\frac{M_R}{M_{R_{opt}}} = 1 + k_1(\omega - \omega_{opt}) + k_2(\omega - \omega_{opt})^2$	포물선 모델

그림 12(a)에 나타난 지수모델은 2002년 미국 AASHTO Guide 에서 적용하고 있는 모델이나 실험값보다 예측값이 다소 작게 나타나 국내 SW계열 노상토에 대한 적용은 어렵다고 판단된다. 또한 그림 12(b)에 나타난 바와 같이 선형 모델은 지수모델보다 적용가능성은 더 낮으며 포물선 모델은 지수모델이나 선형모델에 비해 결정계수는 높으나 화강풍화 노상토에 대한 적용성은 다소 낮은 것으로 판단된다. 따라서 회복탄성계수의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 함수비 변화를 고려한 회복탄성계수 예측모형으로 Universal 모델을 기초로 시행착오 기법을 통하여 식 (2)의 형태로 도출하였다.

$$M_R = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}}\right)^{k_4} \quad (2)$$

여기서, θ : 체적응력 ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kpa)

$$\tau_{oct} : \tau_{oct} = \frac{1}{3} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (\text{kpa})$$

P_a : 대기압 (100kPa)

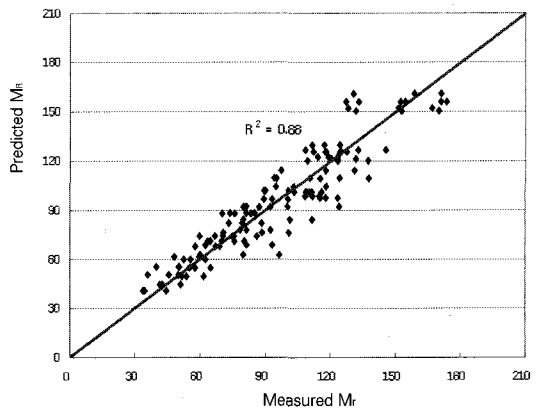
ω : 함수비 (%)

ω_{opt} : 최적함수비(OMC) (%)

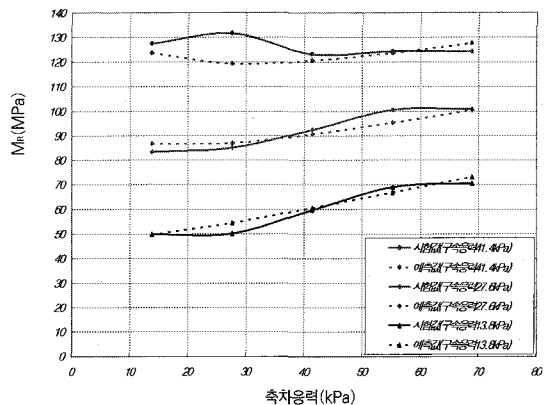
$k_1 \sim k_4$: 모델계수

그림 13(a)는 반복재하식 회복탄성계수 실내시험 결과와 함수비 변화를 고려하여 제시된 모델을 이용하여 산정된 회복탄성계수를 나타낸 것으로 제시한

기존 예측모델보다 비교적 상관성이 좋게 나타나 주어진 조건에서 시험된 대상 노상토에 적용성이 양호하다고 판단된다. 그림 13(b)는 상대다짐도 100%, 최적함수비조건에서 실내시험 결과와 식 (2)에 제시된 모델을 이용하여 추정한 회복탄성계수를 비교한 것이다. 본 연구를 통해 제시된 모델과 실내시험을 통한 회복탄성계수의 차이는 구속응력의 크기에 따라 다소 오차를 포함하고 있으나 거의 유사하게 변화하는 경향을 나타냈다. 결과적으로 본 연구를 통해 제시된 함수비 변화를 고려한 예측 모델의 적합성을 판단할 수 있었으며, 실제 SW계열 노상토에서 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.



(a) 시험과 예측값의 비교



(b) 상대다짐도 100%, 최적함수비 조건

그림 13. 식 (2) 모형을 통한 비교



5. 결 론

국내 도로하부의 많은 부분을 차지하고 있으며 시험도로 하부에 활용된 SW계열 노상토의 역학적 특성을 평가하기 위하여 함수비, 응력, 그리고 다짐 조건에 따른 각각의 회복탄성계수 실내실험을 수행한 후 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 선회다짐과 반복재하식 회복변형시험을 통하여 획득한 회복탄성계수는 최적함수비를 기준으로 건조측에서 증가하였고 습윤측에서는 감소하나 그 변화폭이 매우 상이함을 알 수 있다.
2. 회복탄성계수 예측 모델들에 대한 분석결과 SW계열 노상토의 경우 회복탄성계수는 체적응력의 영향을 많이 받으나 축차응력의 영향도 있어 이를 동시에 고려함이 필요하다.
3. 상대다짐도가 커질수록 회복탄성계수는 증가하는 경향을 나타내었으나, 함수비 및 구속응력의 변화에 따른 영향은 상대적으로 작다.
4. 적용한 Universal모델에서 계수 k_1 은 회복변형에 가장 많은 영향을 미치고 있어 향후 예측식으로 활용할 수 있다.
5. 체적과 축차응력을 동시에 고려한 Universal 모델이 SW계열 노상토의 비선형 회복탄성계수를 가장 적합하게 표현하며 함수비 변화를 고려한 확장된 모델로 적용이 가능하다.
6. 실험에서 제안된 비선형 회복탄성계수 모델과 확장 모델은 다양한 재료의 적용성 평가와 현장 검증이 필요하며 추후 이를 위한 연구를 실시할 예정이다.

참고문헌

건설교통부(2004), "아스팔트 포장 설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구", 1단계 3차년도 최종보고서.
 권기철(2000), "국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델", 대한토목학회논문집 제20권 제3-D호 pp.301~310.

박성완, 이치현(2005) "반복삼축압축시험에 의한 화강 풍화 노상토의 회복변형 특성", 한국도로학회 2005 학술발표회 논문집, pp.337~343.

박성완, 이치현, 황규영(2006), "Water Content Reflectometer로 측정된 현장노상토의 함수량에 대한 다짐도 영향 평가" 한국도로학회 논문집 제8권 제3호 pp.115~127.

이치현(2005) "계절별 함수비를 고려한 화강 풍화 노상토의 회복변형거동 연구", 단국대학교 석사학위 논문.

Biarez, J. (1962), "Contribution a l'Etude des Proprieties Mecaniques des Sols et des maeriau Pulverulents.", D.Sc. Thesis, University of Grenoble

Dr. Ali Maher, Mr. Thomas Bennert, Dr. Nenad Gucunski, and Mr. Walter J. Papp, Jr.(2000), "Resilient Modulus Properties of New Jersey Subgrade Soils", FHWA NJ 2000-01, FHWA, New Jersey Department of Transportation.

F. Lekarp, Ulf Isacsson, and Andrew Dawson.(2000), "State of the Art.:Resilient Response of Unbound Aggregates." *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, 126(1), 66-75.

Johnson, T. C., Berg, R. L., and Dimillio, A.(1986), "Frost action predictive techniques : An overview of research results.", Transportation Research Record 1089, National Research Council, Washington, D.C., pp. 147-161

Moossazadeh, J. M., and Witzczak, W.(1981), "Prediction of subgrade Moduli for soil That Exhibits Nonlinear Behavior.", Transportation Research Record 810, National Research Council, Washington D.C., pp. 9-17

Rada, G. and Witzczak, M.W.(1981), "Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Material.", Transportation Research Record 810, National Research Council, Washington, D.C., pp. 23-33.



Uzan, J.(1985), "Characterization of Granular Material", Transportation Research Record 1022, National Research Council, Washington D.C., pp. 52-59

Witczak M.W., Houston W.N., and Andrei D.(2000), "Resilient Modulus as Funtion of Soil Moisture - A Study of the Expected Changes in Resilient Modulus of the Unbound Layers with Changes in Moisture for 10 LTPP

Sites", *Development of the 2002 Guide for the Development of New and Rehabilitated Pavement Structures*, NCHRP 1-37 A

접 수 일: 2007. 1. 23
심 사 일: 2007. 2. 2
심사완료일: 2007. 3. 12