

보조기층재료의 MR 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the M_R
Characteristics of Subbase Materials

이인모* · 김상균** · 이석근*** · 이우진****

Lee, In Mo · Kim, Sang Gyun · Rhee, Suk Keun · Lee, Woo Jin

Abstract

The resilient behavior of subbase materials, locally used in Korea, were evaluated in this study by performing laboratory M_R tests. The variations of the M_R value according to LVDT's location in experiments and moisture conditions, respectively, were evaluated. And, in order to determine the relevant M_R characteristics of the prototype materials, laboratory model tests containing smaller particles than those of the prototype were conducted. Based on above results, the relationship of the M_R and the bulk stress (θ) was suggested. The case using internal LVDT, gave much larger M_R value than that using external LVDT, since the external LVDT somewhat overestimates the resilient strain. The measured M_R in damp conditions ($S_r=40\%$) was larger than that in wet conditions ($S_r=70\%$) by about 10%. The relationship between the M_R and the void ratio was linear according to particle size effect. The relationship of the M_R and the bulk stress (θ) on subbase materials in damp conditions to be used in Korea could be recommended as $M_R=3960 \cdot \theta^{0.60}$ psi.

요 지

본 연구에서는 국내에서 사용되고 있는 보조기층재료에 대해 변형측정장치의 위치 및 포화도에 따른 M_R 값의 변화양상을 파악하고, 시료내의 입자크기(particle size)에 따른 치수효과(size effect)를 파악하여 적절한 M_R 관계식을 제시하였다. 외부변형측정장치를 사용한 경우의 M_R 값은 회복변형율을 과대평가하기 때문에 내부변형측정장치를 사용한 경우보다 작았고, 포화도에 따른 M_R 값은 wet 상태($S_r=70\%$)가 damp 상태($S_r=40\%$)보다 10% 정도 작게 나타났으며 시편을 구성하는 입자의 치수효과는 과대 입자(oversize particle)를 제거함에 따른 간극비의 변화와 직접적인 관계가 있음을 알 수 있었다. 이와같은 결과를 종합하여 보조기층의 M_R 관계식은 damp 상태의 포화도에서, $M_R=3960 \cdot \theta^{0.60}$ psi로 제안할 수 있다.

* 정희원 · 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

** 정희원 · 한국도로공사 도로연구소 연구원

*** 정희원 · 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

**** 정희원 · 삼성건설 기술연구소 선임연구원

1. 서 론

가요성포장(flexible pavement)도로의 설계 및 덧씌우기(overlay)설계에 있어서 포장층을 구성하는 재료의 회복탄성계수(resilient modulus; M_R)값을 파악하는 것은 필수적이다. 그러나 현재까지 국내에서 사용되는 포장재료중, 노상에 대한 연구성과는 있으나⁽¹⁾ 보조기층에 대한 연구성과가 없기 때문에 실무설계에 있어서 M_R 값을 외국의 일반적인 시험 성과나 현장시험에 의해 파악된 값을 사용하고 있는 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 국내에서 사용되는 보조기층재료의 회복탄성거동에 대한 특성을 파악하고자 한다. 이와 같은 연구에 있어서 보조기층으로 사용되는 입상재료는 아스팔트혼합물이나 노상재료와는 달리 일반적인 실내시험장비를 사용하여 M_R 시험을 수행할 경우, 원재료(prototype material)내에는 시험시편의 크기에 따라 제거되는 과대입자(oversize particle)가 포함되어 있는데, 이로 인해 입상재료의 공학적성질에 영향을 미치는 입도 분포나 간극비 등이 변하게 되어 M_R 시험시 원재료의 특성과 다른 결과를 보일 수 있다. 그러므로 과대입자의 제거로 인해 발생하는 치수효과(size effect)를 파악하여 실제 시공되는 원재료의 공학적특성을 예측하고, 또한 도로의 포장층은 계절에 따라 함수상태가 변하므로 포화도의 변화에 따른 M_R 값의 변화양상을 파악하며, 기존의 시험결과에 의하면 변형측정장치의 위치에 따라 M_R 시험결과가 상당히 달라진다고 알려져 있으므로 변형측정장치의 위치에 따른 M_R 값의 변화를 파악하여 실내시험에 의해 회복탄성특성을 적절히 예측할 수 있는 근간을 제공하고자 한다.

실내시험은 변형측정장치의 위치에 따른 M_R 값의 변화양상을 파악하기 위해 내부선형변위계(internal LVDT)와 외부선형변위계(external LVDT) 각각에 대해서 실시하였고 함수상태에 따른 보조기층의 회복탄성거동특성을 파악하기 위해 시료의 포화도를 달리하여 시험을 실시하였다. 그리고 시료내의 입자치수효과(grain size effect)를 파악하기 위해서 원재료와 과대입자를 제거한 모델시료의 토성시험 및 다짐시험을 실시하여 입상재료의 공학적 성질에 영향을 미치는 인자들의 변화양상을 파악한 후에, 모델링방법에 의해 제작된 시료와 수정된 원재료의

M_R 시험을 실시하였다.

상기의 실내시험결과를 토대로 국내 보조기층재료의 M_R 값의 예측식을 제안하였으며, 기존의 AA-SHTO, FHWA 등의 기관에서 추천한 값들과 비교하였다.⁽²⁾

2. 치수효과(size effect)에 의한 M_R 값의 변화 특성

일반적으로 삼축압축시험에 있어서 시편크기가 실험결과에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 시료내 최대입자크기가 시편직경의 1/6 이하이고 시편의 높이가 직경의 2배 이상 되어야 한다고 알려져 있다.⁽³⁾ 그런데 본 연구에서 사용한 보조기층재료의 최대입자크기는 50 mm이고, 시험시편의 크기에 따른 영향을 무시하기 위해서는 시편의 직경이 30 cm 높이가 60 cm 이상 되어야 한다. 그러나 본 연구를 위해 사용되는 M_R 시험장비 뿐만 아니라 일반적인 삼축시험장비로는 그만한 크기의 시료를 시험하는 것은 불가능하다. 그 이유는 첫째, 시편의 제작이 어렵고 삼축실의 크기가 그렇게 크지 않으며 둘째, 시험장비의 시스템이 그만한 크기의 시료에 적절한 구속응력 및 축차응력을 적용하는데 어려움이 있기 때문이다. 그래서 실내시험에 의해 사력댐(rockfill dam)이나 도로의 성토재료로 사용되는 입상재료의 공학적 특성을 파악하기 위한 연구는 원재료에서 과대입자의 제거에 따른 효과를 파악하여 적절한 모델링을 실시한 뒤 원재료의 공학적 특성을 모델 시료의 시험을 통해 예측하는 방법으로 수행되어 왔다.

이와 같은 모델링 방법들에 대해 지금까지 알려진 몇 가지를 살펴보면 다음과 같다.

- parallel gradation method(Marachi *et al.*, 1969)⁽⁴⁾

과대입자를 제거하고 세립분을 첨가하여 원재료의 입도분포를 평행이동시킨 시료를 가지고 시험 실시.

- scalp and replace method(Donaghe and Townsend, 1976)⁽⁵⁾

제거된 과대입자만큼을 시험이 가능한 크기의 입자로 대체하여 시험 실시.

- matrix method(Su, 1989)⁽⁶⁾

입자경계면 효과(grain boundary effect)를 고려

하여 원재료의 상대밀도와 같은 상대밀도를 보이는 모델시편을 가지고 시험 실시.

상기의 모델링방법 중에서 matrix method는 최근의 이론으로 생소한 감이 있어 부연해서 설명하면 다음과 같다.

시료를 구성하는 입자의 자체강도가 비교적 큰 입상시료에 있어서 그림 1과 같이 과대입자의 무게함량이 40% 이하일 때, 과대입자들은 상호간의 접촉점이 없이 작은 입자들에 의해 덮혀있게 된다. 그러므로 전체재료(total material)의 공학적 성질은 과대입자에 관계없이 작은 입자에 의해 좌우되며, 원재료의 공학적 성질을 모델시료로 파악할 수 있다는 것이 matrix method의 이론이다. 이러한 matrix method에 있어서 Su(1989)는 전체재료속의 matrix 입자의 건조밀도가 전체재료의 건조밀도와 같지 않기 때문에 건조밀도를 원재료에 맞추는 것이 아니라 모델시료의 상대밀도를 원재료와 같게 모델시편을 준비해서 시험을 수행해야 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다고 제안하였다.

본 논문에서 사용된 M_R 시험장비로 실험할 수 있는 입자의 최대크기는 25 mm이기 때문에 25 mm와 50 mm 사이의 입자는 과대크기가 되고 시험시 제거되어야 한다. 그러므로 보조기층의 M_R 특성을 원재료 내에 포함된 25 mm 이하의 입자들

만으로 시험하여 파악하기 위한 모델링이 필요하다. 그런데 상기의 모델링방법 중에서 Parallel gradation method는 입도분포를 평행이동하기 위해 세립분의 첨가가 필요하며 이는 보조기층의 공학적 성질을 변화시키므로 이와 같이 모델링된 시료는 원재료의 공학적 성질을 나타낼 수 없다고 판단된다. 또한 보조기층은 차량하중을 노상에 전달하는 기능 외에 동상방지나 배수유도의 기능이 있기 때문에 세립분을 첨가하고 시험을 수행하여 M_R 값을 얻는 것은 의미가 없는 일이라고 할 수 있다. 그러므로 원재료에서 입자의 크기가 25 mm 이하인 시료를 수정된 원재료로 하고 scalp and replace method와 matrix method로 최대입자 크기가 12.5 mm인 모델시료를 형성하여 M_R 시험을 실시하였다.

3. 시험시료 및 시험장치

3.1 시험시료

본 연구에서 사용된 보조기층재료는 석산에서 채취한 원석을 50 mm 이하로 과쇄하고 입도분포를 좋게 하기 위하여 모래를 혼합한 재료로서 현재 서해안 고속도로 공사현장에서 사용되고 있으며 입도분포는 그림 2와 같고 기본적인 재료의 성질은 표 1과 같다.

본 연구에서 사용된 M_R 시험장비가 시험할 수 있는 입자의 최대크기는 25 mm이기 때문에 변형측정장치의 위치에 따른 M_R 특성을 파악하기 위한

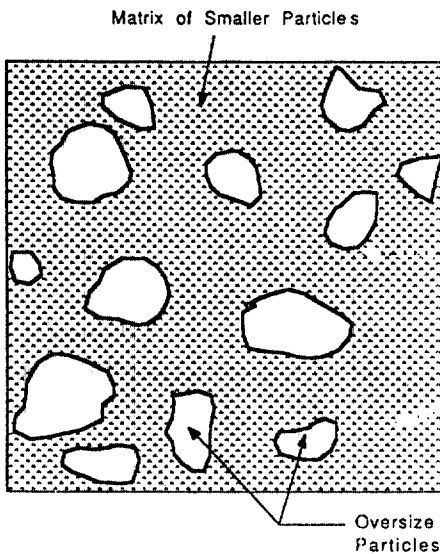


그림 1. 시료속의 입자구성상태(Su, 1989)

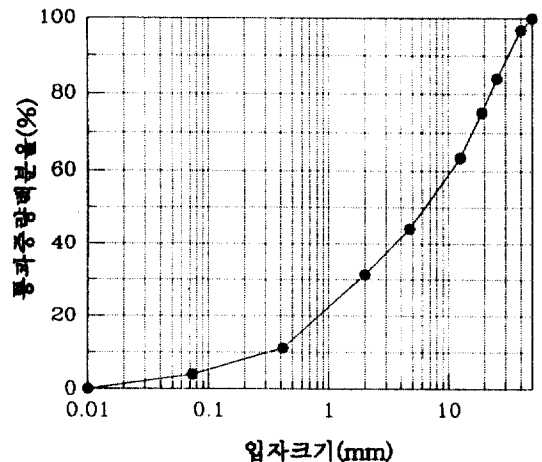


그림 2. 보조기층재료의 입도분포곡선

표 1. 보조기층재료의 물리적 성질

재료의 형태	쇄석골재와 모래의 혼합물
최대입자크기	50 mm
흙의 분류(USCS)	GW
평균입자크기	6.1 mm
곡률계수(Cc)	1.08
균등계수(Cu)	30.3
골재의 비중	쇄석 : 2.81 모래 : 2.66
쇄석의 마모율	25.8%
No. 40# 통과분의 소성지수	NP
다짐시료의 건조밀도	2.2 ton/m ³
KSF 2312에 의한	$\gamma_{dmax} = 2.27 \text{ ton/m}^3$
최대 및 최소 건조밀도	$\gamma_{dmin} = 1.73 \text{ ton/m}^3$
상대밀도(Dr)	89.8%
다짐시료의간극비(e)	0.272
입도분포	그림 2

시험은 25 mm 이하시료로 수행하였고 모델링방법과 함수량에 따른 M_R 특성을 파악하기 위한 시험은 원재료에서 과대입자를 제거한 25 mm 이하시료와

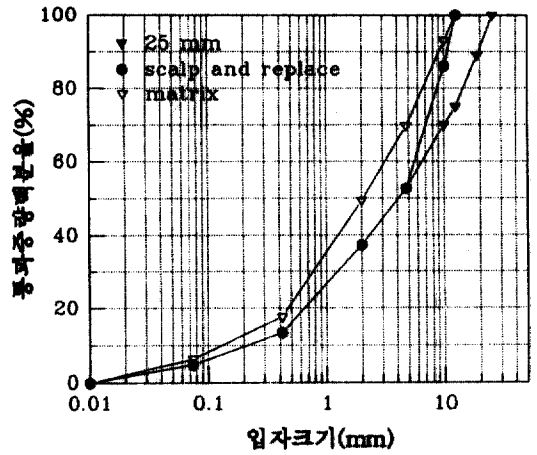


그림 3. M_R 시료의 입도분포 곡선

12.5 mm 이하시료로 수행하였다. 수정원재료 및 모델시료의 입도분포는 그림 3과 같고 기본적인 성질은 표 2와 같다.

모델링방법에 의해 원재료의 M_R 특성을 파악하기 위해 제조한 시편에 대해 알아보면 다음과 같다.

Scalp and replace method는 현재까지 입상의 다짐시료에 있어서 가장 많이 사용되는 방법인데 여기서 가장 중요한 것은 전체재료 속에 포함되어 있는 과대입자의 무게함량이다. 만일 전체 재료 내의

표 2. M_R 시료의 물리적 성질

구분	시료	12.5 mm 이하		
		25 mm 이하	matrix	scalp and replace
흙의 분류(USCS)		GW	GW	GW
평균입자크기		4.0 mm	2.1 mm	4.0 mm
곡률계수(Cc)		1.22	1.35	1.24
균등계수(Cu)		32.5	18.75	26.19
평균비중		2.731	2.707	2.707
No. 40# 통과분의 소성지수		NP	NP	NP
다짐시료의 건조밀도		2.24 ton/m ³	2.15 ton/m ³	2.21 ton/m ³
최대 및 최소 밀도		$\gamma_{dmax} = 2.31 \text{ ton/m}^3$ $\gamma_{dmin} = 1.74 \text{ ton/m}^3$	$\gamma_{dmax} = 2.22 \text{ ton/m}^3$ $\gamma_{dmin} = 1.69 \text{ ton/m}^3$	$\gamma_{dmax} = 2.26 \text{ ton/m}^3$ $\gamma_{dmin} = 1.70 \text{ ton/m}^3$
상대밀도(Dr)		90.4%	89.6%	90.1%
다짐시료의 간극비(e)		0.242	0.280	0.262
oversize 입자함량		17%	24%	24%
입도 분포		그림 3		

과대입자의 함량이 10% 이하이면 과대입자를 제거하고 나머지 시료로서 시편을 제작하여 시험을 실시하고 과대입자의 함량이 10%~30%이면 제거된 과대입자의 무게만큼을 시험 가능한 최대크기입자로 대치하여 시험을 수행하도록 하고 있으며, 과대입자가 30% 를 초과하면 사실상 모델시료에 의한 원재료의 공학적 특성 파악은 불가능하다고 규정되어 있다. 표 2에서 보듯이 25 mm 이하시료를 원재료로 할 경우, 입자의 크기가 12.5 mm보다는 크고 25 mm보다 작은 입자의 함량이 24%이기 때문에 제거된 과대입자 함량만큼을 10 mm~12.5 mm 입자로 대치하여 시편을 제작하였다.

Matrix method의 기본적인 이론은 모델시료의 현재상태에서 파괴에 이를 때까지의 간극비 또는 건조밀도의 변화과정을 원재료에 맞추어 모델링하게 되면 모델시료의 시험결과가 원재료의 공학적특성을 나타낼 수 있다는 것이다. 다시 말하여 원재료와 모델시료의 상대밀도를 같게 함으로써 원재료의 강도 및 압축성을 모델시료를 통해서 파악할 수 있다는 것이다. 그래서 25 mm 이하시료와 12.5 mm 이하시료의 최대 및 최소밀도시험을 수행한 후 각각의 상대밀도를 같게 하여 M_R 시험을 실시하고자 하였다. 그러나 동적다짐방법을 사용하였기 때문에 원재료의 상대밀도를 정확히 맞추기는 불가능했고, 실제 M_R 시험에 사용한 시료의 상대밀도는 표 2에서 볼 수 있듯이 90.4%와 89.6%로 거의 같았으므로 matrix method의 기본요건을 갖춘 것으로 볼 수 있다. 실제로 수정된 원재료(25 mm 이하)와 모델시료(12.5 mm 이하)의 시편제작에 사용한 다짐방법에 대해 살펴보면 다음과 같다. 먼저 수정된 원재료와 모델시료를 KSF 2312 흙의 다짐시험방법에 따라 6층 92회의 다짐에너지를 적용하여 직경 15 cm이고 높이 30 cm 인 시편을 제작하였다. 이때의 다짐밀도는 각각 2.24 ton/m³과 2.15 ton/m³이었다. 그런데 모델링의 목적상 시료를 구성하는 입자의 크기 뿐만 아니라 시편의 크기도 작게 해야하므로 모델시료의 시편크기를 직경 10 cm 높이 20 cm로 하여 시행착오방법에 의해 2.15 ton/m³의 건조밀도를 보이는 다짐방법을 결정하였고, 이때의 다짐층수 및 다짐횟수는 4층 55회였다. 직경 15 cm 높이 30 cm 인 시편과 직경 10 cm 높이가 20 cm인 시편의 단위체적당 다짐에너지에 있어서는 직경 10 cm 높

이가 20 cm인 시편이 크게 계산되는데 이는 다짐 모듈드의 크기에 따른 다짐효율의 차이 때문이라고 판단된다. 참고로 동적다짐방법을 사용함에 따른 다짐시 입자파쇄현상을 파악하기위해 다진 후의 시료에 대한 입도시험을 실시한 결과, 12.5 mm 이하시료는 입자의 파쇄가 거의 없었고 25 mm 이하시료는 12.5 mm 체에 잔류했던 입자의 10% 정도가 12.5 mm 체를 통과했다. 포화도에 따른 M_R 값의 변화를 파악하기 위한 시험은 25 mm 이하와 12.5 mm 이하시료 각각에 대해 다짐시편(포화도 40%)과 배압포화(back pressure) 절차에 의해 포화도를 증가시킨 시편(포화도 70%)의 M_R 시험을 실시하였다. 변형측정장치의 위치에 따른 영향을 파악하기 위한 시험에 있어서는 M_R 시험이 시료의 파괴용력보다 상당히 작은 응력상태에서 실시되기 때문에 같은 내부변형측정장치로 시험했던 25 mm 이하 시편을 외부변형측정장치를 사용하여 다시 실험하였다.

3.2 시험장치

본 연구에서 사용된 시험장치는 미국의 MTS(Material Testing System)사의 제품으로 시험종류에 따라 stress control mode 와 strain control mode 의 작동이 가능하며 전자유압시스템에 의한 작동방식을 가지고 있어 명령에 즉시 응답할 수 있는 장점을 가지고 있다. 재하장치는 삼축실(triaxial cell)과 일체로 구성된 하중프레임(그림 4)과 하중공급원인 유압장치(hydraulic system)로 구성되어 있다. 하중 및 변형측정장치는 전자로드셀과 LVDT로서 그림 5와 같이 설치되어 있다. 그림 5에서 보듯이 일반적으로 내부변형측정장치는 시편의 중앙 1/3 지점에 설치되며 외부변형측정장치는 가압판위에 설치한다.

3.3 시험방법

M_R 시험은 AASHTO에서 제안한 T-274 방법중 입상토의 시험법을 사용하였으며 단계적인 하중적용에 대한 자세한 내용은 표 3과 같다.⁽⁷⁾

4. 시험결과 및 검토

각각의 데이터는 입상재료에 있어서 현재 가장 많이 사용되고 있는 M_R 과 주응력의 합의 관계식인

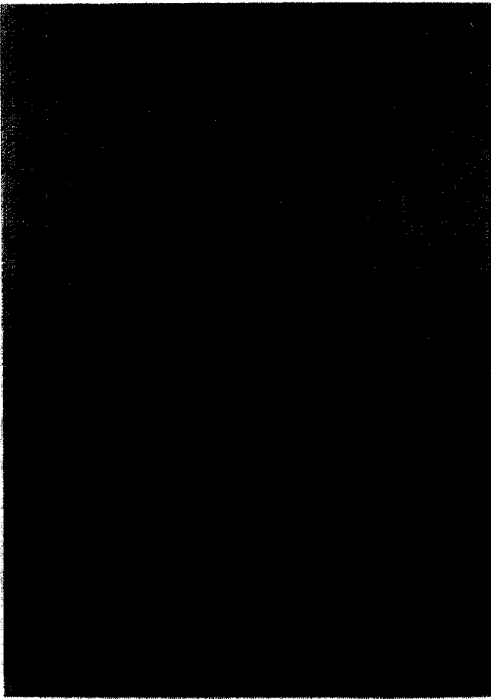


그림 4. 하중프레임과 삼축실

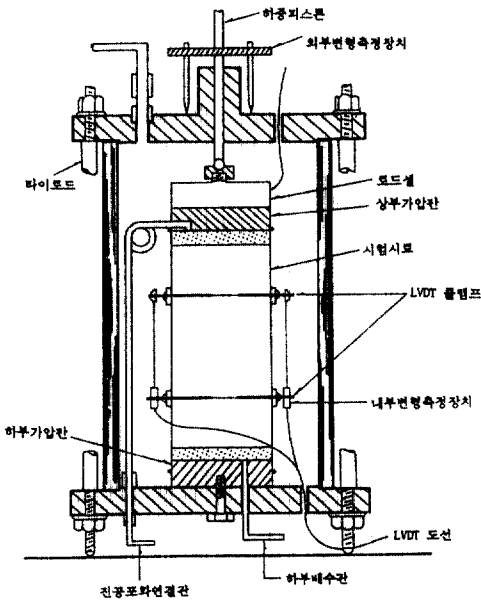


그림 5. 삼축실에 설치된 로드셀과 LVDT

$M_R = k_1 \theta^{k_2}$ 로 정리하였으며, 표 4는 각각의 M_R 시험결과로부터 k_1 과 k_2 그리고 주응력의 합이 140 kPa

표 3. M_R 시험법(AASHTO T-274)

단 계	축차응력 (kPa)	구속응력 (kPa)	재하횟수		비 고
			분할	누계	
시료안정화	35	35	200	200	축차응력 2단계
	69	35		400	
	69	69		600	
	104	69		800	
	104	104		1000	
	138	104		1200	
데이타획득 (M_R 측정)	6.9	138	200	1400	축차응력 6단계
	14			1600	
	35			1800	
	69			2000	
	104			2200	
	138			2400	
	6.9	103	200	2600	
	14			2800	
	35			3000	
	69			3200	
	104			3400	
	138			3600	
6.9	35	200	3800	축차응력 5단계	
14			4000		
35			4200		
69			4200		
104			4600		
6.9			6.9		200
14	5000				
35	5200				
69	5400				
104	5600				
6.9	6.9	200			
14			6000		
35			6200		
52			6400		
69			6600		

(20 psi)일 때의 M_R 값을 종합한 것이다. 표 4에서 r^2 은 결정계수(coefficient of determination)이고 지금까지 M_R 에 대한 연구결과 및 제안된 식들이

표 4. M_R 시험결과

시편 번호	시편크기 (mm)	입자크기 (mm)	포화도 (%)	건조밀도 (ton/m ³)	LVDT 위치	k_1	k_2	r^2	$\theta = 20$ psi일 때 M_R psi (kPa)
1	150×300	25 이하	40	2.241	내부	4108	0.632	0.970	24891(172000)
2	〃	〃	〃	2.243	〃	4436	0.615	0.967	25441(175800)
3	〃	〃	〃	2.238	〃	4227	0.629	0.966	24167(167000)
4	100×200	12.5 이하	〃	2.152	〃	4581	0.554	0.960	21594(149200)
5	〃	〃	〃	2.152	〃	3054	0.668	0.985	21570(149000)
6	〃	〃	〃	2.150	〃	3732	0.622	0.967	20674(142900)
7	〃	〃	〃	2.210	〃	4298	0.567	0.956	22717(157000)
8	〃	〃	〃	2.212	〃	3715	0.627	0.974	23010(159000)
9	150×300	25 이하	70	2.241	〃	4888	0.536	0.964	22753(157200)
10	〃	〃	〃	2.243	〃	3981	0.607	0.964	21970(151800)
11	100×200	12.5 이하	〃	2.152	〃	4365	0.553	0.944	19565(135200)
12	〃	〃	〃	2.150	〃	3714	0.610	0.956	18813(130000)
13	150×300	25 이하	40	2.239	외부	3058	0.586	0.977	15942(110200)
14	〃	〃	〃	2.242	〃	3706	0.545	0.966	15180(104900)
15	〃	12.5 이하	〃	2.152	내부	4638	0.551	0.963	21997(152000)

영국공학단위계를 사용하여 이루어져 왔기 때문에 M_R 값의 비교 및 관계식의 적용을 위해 영국공학단위계(psi unit)를 사용하였다.

상기의 M_R 시험결과로부터 보조기층재료의 변형 측정장치의 위치, 포화도 그리고 치수효과에 따른 M_R 특성을 순서대로 검토하면 다음과 같다.

4.1 변형측정장치의 위치에 따른 M_R 특성

그림 6은 변형측정장치의 위치에 따른 M_R 특성을 파악하기 위해 표 4의 1, 2, 3 그리고 13, 14번 시험결과를 종합한 것인데 내부변형측정장치를 사용한 경우의 응력과 M_R 관계식은 $M_R = 4256 \cdot \theta^{0.62}$ psi이고, 외부변형측정장치를 사용한 경우는 $M_R = 3382 \cdot \theta^{0.56}$ psi로 나타났다. 이는 내부변형장치를 사용한 경우에 있어서는 비교적 시료의 변형을 정확히 측정할 수 있었으나 외부변형장치를 사용한 경우에 있어서는 시료와 가압판의 강성이 다르므로 인해 발생하는 추가변형이 M_R 값을 과소평가했기 때문이라고 판단된다. M_R 값의 변화경향은 k_1 과 k_2 모두 M_R 시험결과에 영향을 미치는 형태로 나타났다.

4.2 포화도에 따른 M_R 특성

그림 7과 그림 8은 표 4에서 25 mm 이하와 12.5

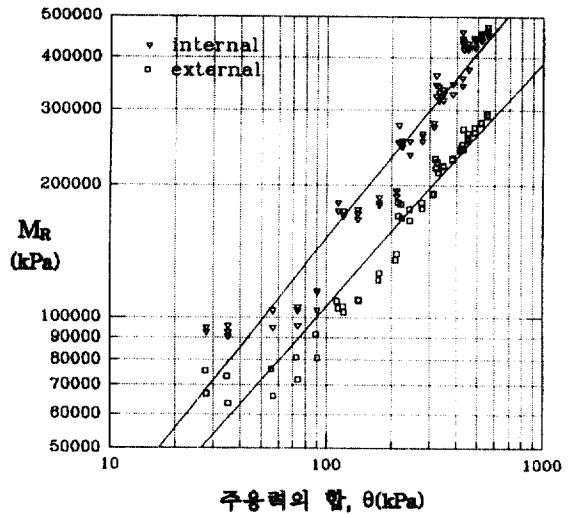


그림 6. 변형측정장치의 위치에 따른 M_R 값의 변화양상

mm 이하시료의 포화도 40%인 경우와 포화도 70% (9, 10, 11, 12번)인 경우에 대한 M_R 시험결과를 나누어 정리한 것이다. 25 mm 이하시료 뿐만 아니라 12.5 mm 이하시료에 있어서도 포화도 40%인 시편이 포화도 70%인 시편보다 k_1 은 약간 작으나 k_2 가 크기

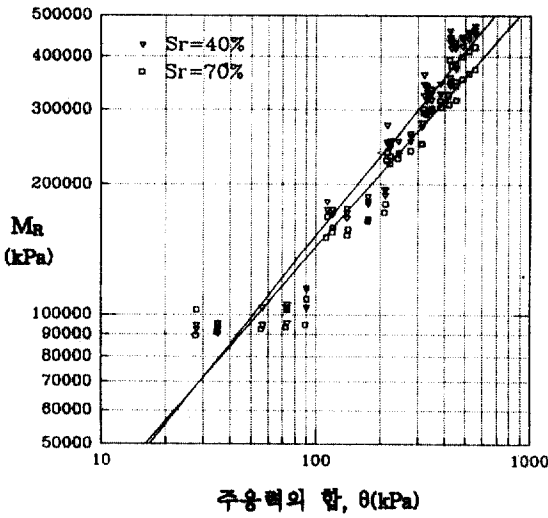


그림 7. 포화도에 따른 M_R 값의 변화(25 mm 이하)

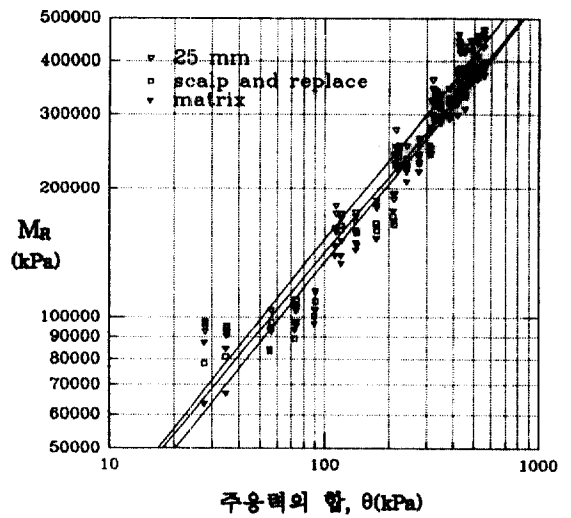


그림 9. 치수효과를 파악하기 위한 M_R 시험결과

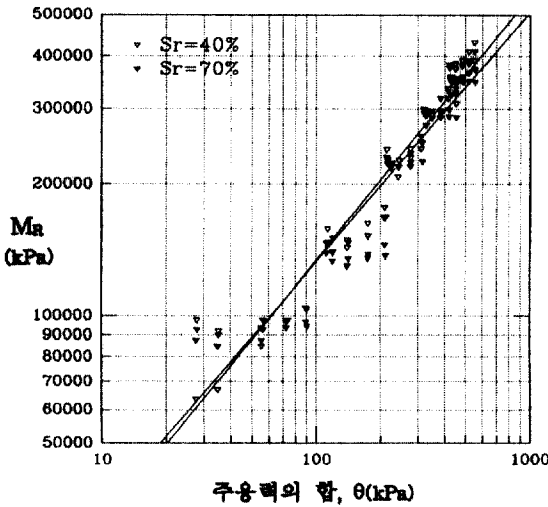


그림 8. 포화도에 따른 M_R 값의 변화(12.5 mm 이하)

때문에 전반적인 M_R 값이 10% 정도 큰 값을 보였다. 이와 같은 결과를 외국의 실험결과⁽¹⁰⁾와 비교하면 M_R 값의 변화폭이 상대적으로 작았는데 본 연구에서 실험한 시료의 포화도는 40%와 70%로 이때의 함수비는 25 mm 이하시료가 4.5%와 7.3%였으며 12.5 mm 이하시료는 5.1%와 8.1%였고 미국의 아스팔트협회 가 포화도에 따른 M_R 특성을 파악하기 위해 사용한 시료의 함수비는 2.4%와 8.2%였다. AASHTO 포장설계 매뉴얼에서는 보조기층재료의 함수상태를 dry, damp 그리고 wet 상태의 세단계로

구분하였는데 이와같은 구분에 따르면 본 논문에서는 wet와 damp 상태의 시료로써 M_R 시험을 수행하였고 미국의 아스팔트협회는 wet와 dry 상태의 시료로써 M_R 시험을 수행하였기 때문에 M_R 값의 감소폭이 상대적으로 작았다고 생각된다.

4.3 치수효과(size effect)

표 4에서 1~3번 시편은 25 mm 이하시료, 4~6번 시편은 matrix method로 제작한 시편, 7, 8번은 scalp and replace method로 제작한 시편이고, 그림 9는 이들의 M_R 시험결과를 함께 도시한 것이다. 또한 그림 9에 보이는 직선의 기울기는 k_2 를 나타내고 M_R 축의 절편은 k_1 을 나타낸다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 25 mm 이하의 수정된 원재료와 같은 M_R 시험결과를 보이는 모델링방법은 없었으며, 회귀분석에 의한 직선식은 25 mm 이하시료는 $M_R=4256 \cdot \theta^{0.62}$ psi이고 scalp and replace 시료와 matrix 시료는 $M_R=4006 \cdot \theta^{0.58}$ psi와 $M_R=3789 \cdot \theta^{0.61}$ psi로 계산되었다.

전반적인 M_R 값에 있어서는 25 mm 이하 시편이 가장 큰 값을, matrix method로 제작한 시편이 가장 작은 값을 나타냈다. 이러한 결과가 나타난 이유를 살펴보면 scalp and replace method로 제작한 시편은 모델시료에 의해 얻어진 시험 값으로 원재료의 공학적 특성을 파악할 경우, 대치되는 과대입자함량에 비례하여 입상재료의 공학적 성질에 큰 영향을

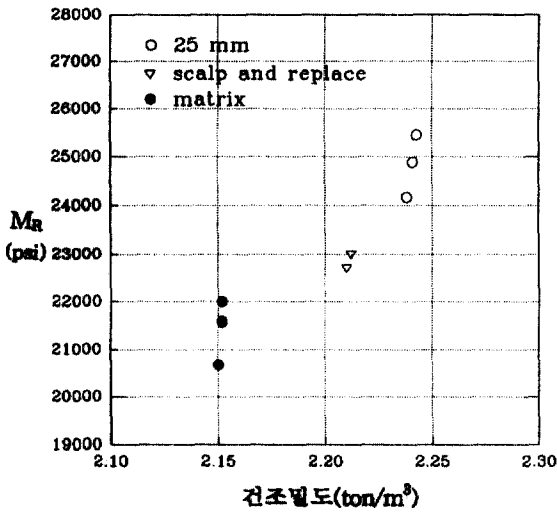


그림 10. 건조밀도에 따른 M_R 값의 변화($\theta=140$ kPa)

미치는 인자의 하나인 간극비의 변화폭이 커지기 때문이라고 판단된다. Matrix method로 제작한 시편에 있어서는 모델링방법 자체가 원재료의 현상에서 파괴에 이를 때까지 간극비의 변화과정을 같게 하여 응력-변형 관계나 파괴강도를 예측하고자 한 것이고, M_R 시험은 시료의 파괴강도에 비해 상당히 작은 응력상태에서 시험을 실시하기 때문에, 응력상태에 따라 일정한 값이 아닌 탄성계수값의 차이를 보였다고 판단된다.

상기의 결과로 미루어 원재료에서 과대입자의 제거로 인해 변화되는 입도분포나 간극비 등을 파악하여 보정을 실시함으로써 원재료의 M_R 특성을 예측하는 것이 적절하다고 생각된다. 그림 10은 상기의 시편의 건조밀도와 $M_R(\theta=140$ kPa)의 관계를 나타내는 그래프인데 건조밀도가 커짐에 따라 M_R 값이 증가함을 알 수 있다. 그런데 본 논문에서 사용된 보조기층재료가 서로 비중이 다른 쇄석과 모래의 혼합물이고 과대입자제거에 따라 쇄석과 모래의 함량이 달라지기 때문에 건조밀도와 간극비가 직접적인 함수관계에 있다고 볼 수 없다. 그러므로 그림 10을 그림 11과 같이 간극비와 M_R 의 관계를 나타내는 그래프로 다시 정리하였다. 역시 간극비가 작아짐에 따라 M_R 값이 커짐을 알 수 있다. 그러므로 원재료의 다짐시험결과 그리고 모델시료의 다짐시험 및 M_R 시험결과로부터 원재료의 M_R 특성을 예측할

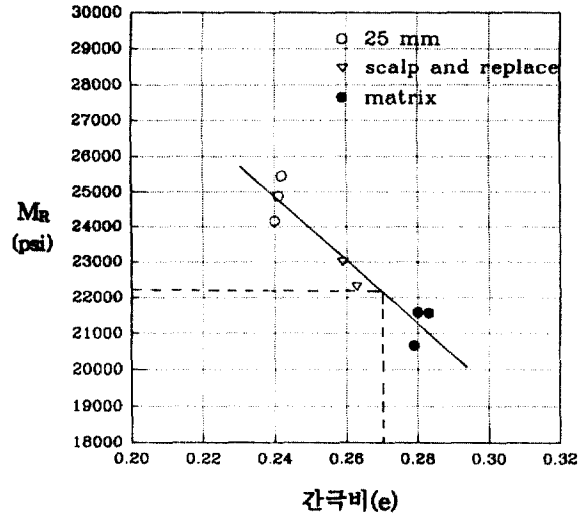


그림 11. 간극비에 따른 M_R 값의 변화($\theta=140$ kPa)

수 있으며, 본 연구에서 사용한 50 mm 이하의 입자로 구성된 보조기층재료의 M_R 값은 주응력의 합이 140 kPa(20 psi)일 때, 표 1과 그림 11에 의해 22100 psi 정도로 예측되었다.

종합해보면 원시료보다 작은시료를 사용하여 M_R 값을 예측하는 경우, M_R 값과 간극비(e) 사이에는 선형적인 관계가 있으므로, 관계식을 도출하고 이로부터 원시료의 간극비에 해당하는 M_R 값을 구할 수 있을 것으로 사료된다.

참고로 표 4의 15번은 시편크기에 따른 치수효과를 알아보기 위하여 12.5 mm 이하시료를 직경 15 cm 높이 30 cm로 제작한 것으로, M_R 시험결과는 직경 10 cm 높이 20 cm로 제작된 4~6번 시편의 M_R 시험결과와 거의 같았다.

4.4 국내보조기층의 M_R 특성

상기의 변형측정장치의 위치, 입자치수효과(grain size effect) 그리고 포화도에 따른 M_R 시험결과를 종합하여, 국내에서 사용되는 최대입자치수가 50 mm인 보조기층의 응력상태와 M_R 의 관계는 그림 12와 같이 나타났으며, 회귀분석식은 다음과 같다.

$$M_R = 3960 \cdot \theta^{0.60} \text{ psi} \quad (1)$$

그림 12는 내부변형측정장치를 사용한 포화도 40%(damp)의 25 mm 이하시료와 모델링시료의 M_R 시험결과로부터 4.3절에서 사용한 간극비와 M_R 의

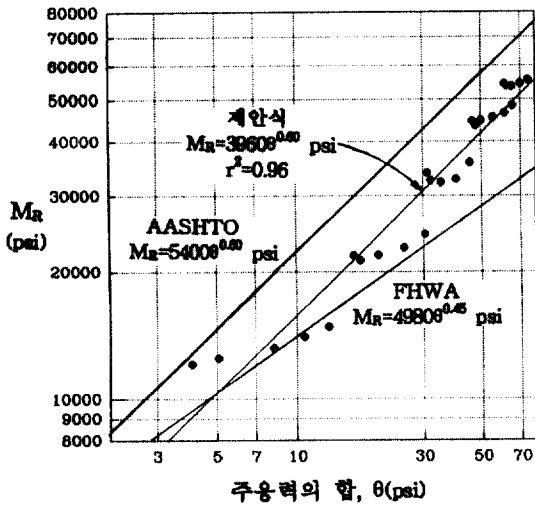


그림 12. 보조기층재료의 응력- M_R 관계(50 mm 이하)

선형적인 관계를 이용한 보조기층 M_R 값 계산과정을 각각의 응력상태에 대해서 적용하여 얻어진 그래프이다. 이와 같은 결과를 외국의 기관에서 추천한 관계식과 비교해 볼 때, AASHTO에서는 일반적인 보조기층의 M_R 관계식을 $M_R = 5400 \cdot \theta^{0.60}$ psi로 하고 있으며, FHWA에서는 본 논문에서 사용한 보조기층과 가장 비슷한 79%의 쇄석과 21%의 모래질 실트의 경우에 대한 M_R 관계식을 $M_R = 4980 \cdot \theta^{0.45}$ psi로 하고 있으므로, 본 논문에서 사용한 보조기층의 M_R 값의 범위는 AASHTO와 FHWA 두 기관에서 제시한 값의 중간형태를 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 실내시험을 통하여 국내에서 사용되고 있는 보조기층재료의 회복탄성특성을 파악하였으며, 이를 외국의 일반적인 M_R 특성과 비교검토하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 변형측정장치의 위치에 따른 영향을 파악하기 위한 M_R 시험결과는 내부변형측정장치를 사용한 경우의 응력과 M_R 관계식은 $M_R = 4256 \cdot \theta^{0.62}$ psi이고, 외부변형측정장치를 사용한 경우는 $M_R = 3382 \cdot \theta^{0.56}$ psi로 나타났다. 변화폭은 k_1 은 30%, k_2 는 10% 정도로 외부변형측정장치를 사용한 경우 보다 내부변형측정장치를 사용한 경우가 M_R 값이 상당히 크게

나타남을 알 수 있었다.

2) 25 mm 이하 시편과 12.5 mm 이하시편 모두 포화도가 증가할수록 M_R 값이 감소하였는데, 이는 k_1 보다는 주로 k_2 때문이었고 이로 인해 전반적인 M_R 값은 damp 상태(포화도 40%)에서 wet 상태(포화도 70%)로 변할 때 10% 정도 감소하였다.

3) 과대입자를 포함한 입상재료의 M_R 특성을 실험가능한 작은 시료로 파악하기 위하여 모델링시편의 M_R 시험결과를 25 mm 이하 시편의 M_R 시험결과와 비교할 때, scalp and replace method로 제작한 시편은 k_1 및 k_2 모두 5% 정도 작게 나타났고 matrix method로 제작한 시편은 k_2 는 비슷하고 k_1 은 12% 정도 작게 나타났다. 그러나 이러한 M_R 값의 주된 차이는 모델링방법의 차이에 의한 원인보다는 원시료와 모델시료의 간극비 차이에서 기인하며 M_R 과 간극비 사이에는 선형적인 관계가 있음을 알 수 있었다.

4) 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 보조기층의 M_R 값을 본 연구의 실험 결과로부터 제시할 수 있었다. 이 관계식은 $M_R = 3960 \cdot \theta^{0.60}$ psi로서 외국의 기관에서 제시한 관계식과 비교하면 AASHTO($M_R = 5400 \cdot \theta^{0.60}$ psi)와 FHWA($M_R = 4980 \cdot \theta^{0.45}$ psi)의 중간치 정도였으며, 상기식을 국내보조기층재료의 M_R 관계식으로 추천할 수 있다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, "동탄성계수(M_R)를 이용한 노상의 지지력 평가", 연구보고서 90-GE-114. 1990.
2. AASHTO, "Guide for Design of Pavement Structure", Joint Task Force on Pavement, Highway Subcommittee on Design, 1986.
3. Holtz, W.G. and Gibbs, H.S., "Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol. 82, No. SM1, 1956, pp. 1-22.
4. Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B., and Duncan, J.M., "Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials", Report No. TE 69-5, University of California, Berkeley, 1969.
5. Donaghe, R.T., and Townsend, F.C., "Compaction Characteristics of Earth Rock Mixture, Report 1, Vickburg Silty Clay and DeGray Dam Clayey Sandy Gravel", Miscellaneous Paper No. S-73-25, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Sta-

- tion, 1976.
6. Su, W., and Fragaszy, R.J., "Static Strength Evaluation of Cohesionless Soil with Oversize Particle", Ph.D. Dissertation, Washington State University, 1989.
 7. AASHTO, "Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing", 14th ed., Part II, T 180 and T 274-82, 1986.
 8. Pezo, M.S., "Development of A Reliable Resilient Modulus Test for Subgrade and Non-Granular Materials for Use in Routine Pavement Design", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1991.
 9. Robert, K.H. Ho, "Repeated Load Tests on Untreated Soils a Florida Experience", *Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, Oregon*, 1989, pp. 28-30.
 10. Coffman, B.S., Kraft, D.C., and Tamayo, J., "A Comparison of Calculated and Measured Deflections for the AASHTO Road Test", *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technicians*, Vol. 33, 1964, pp. 54-91.

(接受：1994. 1. 14)