



현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법

Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Subbase Materials Using Free-Free Resonant Column Test

권기철*, 김동수**

ABSTRACT

The stiffness of the subbase materials is represented by the resilient modulus, M_R , which are very important properties in the mechanistic design of flexible pavement system. However, the cyclic M_R testing method is too complex, expensive, and time consuming to be applicable on a production basis. In this study, the alternative M_R testing technique for subbase materials was developed using a free-free resonant column (FF-RC) test considering deformational characteristics of subbase materials. To estimate the deformational characteristics of subbase materials, effects of strain amplitude and mean effective stress on modulus of subbase materials were investigated. The M_R values determined by alternative testing procedures matched well with those determined by standard M_R test, showing the capability of the proposed methods being used in determining M_R values.

Keywords : resilient modulus(M_R), alternative M_R test, subbase materials, free-free resonant column test

요 지

회복탄성계수(M_R)로 표현되는 보조기층 재료의 탄성계수는 연성 포장체의 역학적 설계에 대단히 중요한 물성치이다. 그러나 반복재하식 M_R 시험을 일상적 시험으로 적용하기에는 너무 시험과정이 복잡하고, 고가이며, 많은 시험시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 보조기층 재료의 변형특성을 고려하여 현장공진주시험(FF-RC)을 이용한 대체 M_R 시험법을 개발하였다. 보조기층 재료의 변형특성 평가를 위하여 변형률 크기 및 평균주응력의 탄성계수에 대한 영향을 조사하였다. 제안한 대체 M_R 시험법으로 결정된 탄성계수와 반복재하식 M_R 시험에서 결정된 회복탄성계수는 서로 잘 일치하여 제안된 기법의 효용성을 확인하였다.

핵심용어 : 회복탄성계수, 대체 M_R 시험법, 보조기층 재료, 현장공진주시험

* 동의대학교 토목공학과 전임강사(051-890-1617, gckweon@hyomin.donggeui.ac.kr)

** 한국과학기술원 토목공학과 부교수(042-869-3619, dskim@kaist.ac.kr)



1. 서 론

오늘날 산업의 발달로 인한 물류량의 급격한 증가와 도로가 위치하는 지역의 기후, 환경, 지반조건의 다양성 등으로 인하여 기존의 경험적인 포장 설계법으로 건설된 도로들이 조기에 파손되는 문제점이 발생하기에 이르렀다. 이러한 문제점들의 해결을 위해서 보다 역학적인 포장 설계법이 요구되었고, 1986년 미국 도로교통협회(AASHTO)는 종래의 CBR 값을 기준으로 한 경험적 포장 설계법을 개정하여 회복탄성계수(Resilient Modulus : M_R) 값을 적용하는 보다 역학적인 포장 설계법을 제정하게 되었다.

AASHTO에 의한 회복탄성계수의 채택은 포장설계 분야의 많은 발전을 가져왔다. 그러나, 회복탄성계수 결정에 적용되는 반복재하식 M_R 시험은 매우 복잡하고 고가의 시험장치가 필요할 뿐 아니라, 까다로운 시험절차로 인하여 고도로 숙련된 전문적 기술을 요구하여 일상적 시험법(routine test)으로 쉽게 수행·적용하는 데는 많은 문제점을 안고 있다. 따라서, 보다 효과적으로 회복탄성계수를 결정하고자 하는 대체 M_R 시험법 개발에 관한 많은 연구가 수행되어 오고 있다(김수일 등, 1991; 우재윤 등, 1993; 권기철, 1999; Zaman 등, 1994; Drumm 등, 1996).

대체 M_R 시험법 개발에 관한 초기의 연구는 기존의 경험적 설계법에서 널리 사용되어오던 CBR (California bearing ratio) 등과 같은 지수물성치(index properties)로부터 회복탄성계수를 결정하는 방법이 대부분이었다(Heukelon 등, 1960; Green 등, 1975; Lister, 1987; Lotfi 등, 1988; 김수일 등, 1991). 이러한 경험적 상관관계들은 현장 실무자들에게 매우 친근한 지수물성치를 그대로 사용한다는 장점이 있으나, 제한된 시료에 대하여 개발된 것으로 매우 다양한 포장재료에 대한 일반적 관계로 적용하기 힘들고, 응력상태에 따른 회복탄성계수를 합리적으로

결정하기 곤란하였다. 따라서 이러한 경험적 상관관계들은 역학적 포장 설계법에서 회복탄성계수를 입력변수로 도입한 취지에 부합되지 못하는 단점이 있다.

대체 M_R 시험법 개발에 관한 최근의 연구는 역학적 시험으로부터 포장재료의 탄성계수에 대한 영향을 고려하여 응력상태에 따른 비선형 회복탄성계수를 결정하는데 초점을 두고 개발되고 있다(권기철, 1999). 이러한 연구의 바탕에는 “정적, 동적 또는 반복재하시험 중 어떠한 시험 방법으로 시험이 실시되는가에 관계없이 탄성계수에 대한 영향요소를 합리적으로 고려한다면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있다”(김동수 외, 1995(a); 김동수 외, 1995(b), Burland, 1989; Goto 등, 1991)는 인식에 기초하고 있다. 따라서 대체 M_R 시험법의 성공 여부는 첫째, 포장재료의 탄성계수에 대한 영향요소를 합리적으로 평가하여 이를 적절히 고려하는가 하는 것이고, 둘째는 대체 M_R 시험법에 적용되는 시험기법이 일상적 시험으로 수행 가능할 정도로 간편한가 하는 것이다.

김동수 등 (1999(a), 1999(b), 1997)은 노상토에 대해서는 삼축압축시험과 현장공진주시험을 이용한 대체 M_R 시험법을, 보조기층 재료에 대해서는 삼축압축시험을 이용한 대체 M_R 시험법을 제안한 바 있다. 본 논문에서는 현장공진주시험을 통해 결정된 최대 탄성계수로부터 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 영향요소를 합리적으로 고려하여 반복재하식 M_R 시험에서 얻게 되는 회복탄성계수를 결정하는 대체 M_R 시험법을 제안하고자 한다.

2. 시험장치 및 시험원리

2.1 반복재하식 M_R 시험

본 논문에서 사용한 반복재하식 M_R 시험 장치는 MTS사의 318 모델로 서보(servo) 유압장



치, 삼축실, 하중프레임, 폐합식(closed loop) 제어장치로 구성되어 있다. 축하중 측정을 위한 하중계(load cell)는 삼축실 내부, 시료의 위쪽에 설치되어 있고, 축방향 변형은 하중 프레임에 설치된 LVDT를 사용하여 삼축셀 외부의 상단면을 기준으로 하여 하중 프레임의 변위로부터 측정하는, 외부 변형측정 방법(external measurement)을 사용하였다.

2.2 현장공진주시험 (FF-RC)

현장공진주시험 (Free-Free Resonant Column Test: FF-RC)의 시험장치 개요는 그림 1과 같다. 현장공진주시험은 미소변형을 영역에서 탄성계수를 신뢰성 있고 간편하게 결정할 수 있을 뿐 아니라 직경 150mm(6in.) 이상의 공시체에 대하여도 간편한 시험이 가능하여 보조기층 재료의 시험에 합당하게 적용될 수 있다 (Veghela 등, 1995).

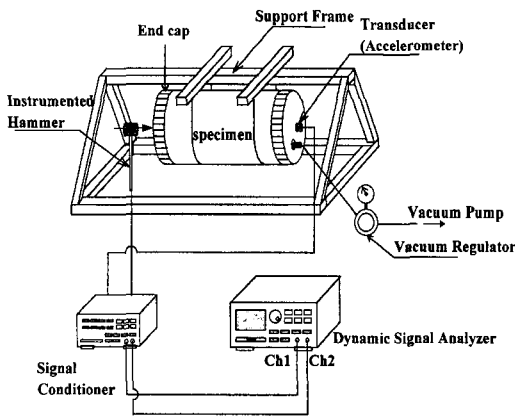


그림 1. 현장공진주시험 개요도

현장공진주시험은 양단자유-추가질량(free-free with added mass) 경계조건에서의 탄성파전달 이론에 근거하여, 시편에 유발되는 파(P파 또는 S파)의 공진주파수로부터 탄성계수를 결정할 수 있는 동적인 시험방법이다. 본 연구에서는 강철

구슬 또는 instrumented hammer로 시편의 한쪽을 타격하여 P파를 발생하였고, 이때 또 다른 방향의 중앙에 파의 진동방향으로 가속도계를 설치하여 시편의 진동을 감지한다. 시편이 가능한 억제를 작게 받아 양단자유조건을 충분히 만족시킬 수 있도록 하기 위하여 시료 양단에서 시편 길이의 1/3지점에 띠를 사용하여 공기중에 시편을 매달았다.

현장공진주시험 결과의 대표적 일례는 그림 2와 같이 나타나며, 그림에서 최고의 진폭에 해당하는 공진주파수로부터 재료의 탄성계수를 얻을 수 있다. 현장공진주시험에서는 공진주파수를 시험자의 숙련도에 무관하게 일정한 값을 얻을 수 있으며, 시험이 매우 간편한 장점이 있다. 측정된 공진주파수와 시편의 단부조건을 고려하여 시험체의 최대탄성계수를 얻는 기법은 참고 문헌(김동수 등, 1997; 권기철, 1999)에 상세히 설명되어 있다.

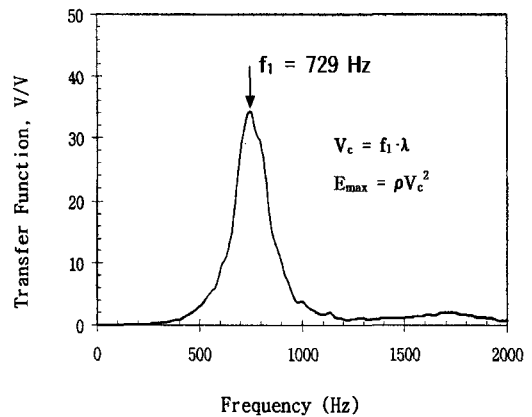


그림 2. 현장공진주시험 결과의 대표적 일례

3. 시험시료 및 시험절차

3.1 시험시료 및 시료성형

전국 고속도로현장에서 실제 공사에 사용중인



7종의 보조기층 재료를 선정·채취하였다. 채취된 시료의 기초 물성치는 표 1에 나타내었다.

표 1. 보조기층 시료의 기초 물성치

Sample	SB-1	SB-2	SB-3	SB-4	SB-5	SB-6	SB-7	
Soil Type	GP	GP	GW	GW	GP	GW	GW	
A-1-a								
Compaction	OMC (%)	6.2	6.1	6.8	4.2	2.6	6.0	7.3
	$\gamma_{d,max}$ (t/m ³)	2.36	2.36	2.26	2.04	2.13	2.22	2.21
Particle size	passing #4 (%)	54.3	48.2	51.0	30.6	46.2	26.2	48.9
	passing #200 (%)	5.3	2.0	1.8	0.2	0.2	0.3	0.3
	D ₉₅ (mm)	32.0	32.0	32.0	35.0	35.0	35.0	25.0
PI (%)	NP							
CBR (%)	88	55	61	39	86	67	77	

OMC = optimum moisture content
 NP = nonplastic
 CBR = california bearing ratio

시험에 사용된 7종의 보조기층 시료는 모두 AASHTO T294-92I 분류로 material type I에 해당하므로 진동다짐으로 시료를 성형하였다. 진동다짐(vibratory compaction)은 일정한 무게의 시료를 스플릿 몰드(split mold)에 넣고 진동으로 다짐하여 목표하는 건조단위중량까지 부피를 조절하는 방법으로, 본 연구에서 사용한 진동다짐장치를 그림 3에 나타내었다.

다짐 층수는 각 층의 다짐 높이가 균일한 5층을 적용하였고, 진동은 공기압 햄머(air hammer)를 사용하여 유발하였다. 굵은입자를 포함한 직경 150mm 시편은 스플릿 몰드에서 다짐하여 추출하면 공기 중에서 자립할 수 없어 스플릿 몰드 내에 멤브레인을 설치한 후 다짐을 수행하였다.

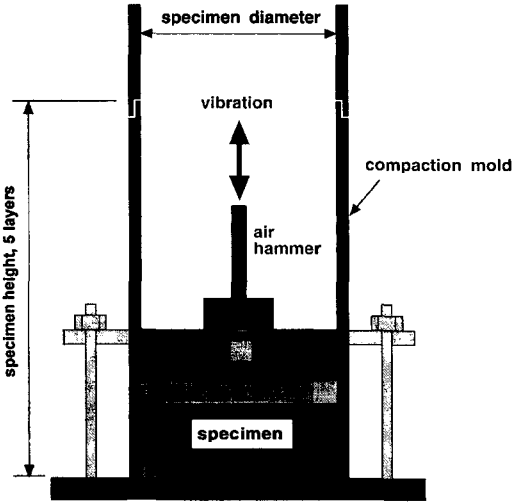


그림 3. 보조기층 재료의 시료성형에 사용된 진동다짐장치

5층의 진동다짐으로 성형된 시료의 건조단위중량과 함수비는 표 2에 정리하였다. 모든 시료는 다짐시험(E 다짐)에서 결정된 최대건조단위중량의 95%, 그리고 최적함수비(OMC)를 목표로 시료를 성형하였다.

표 2. 각 시험에 사용된 보조기층 시험시료

구분		SB-1	SB-2	SB-3	SB-4	SB-5	SB-6	SB-7
FF-RC	w/c	5.5	5.9	6.1	4.1	2.6	6.0	7.3
	γ_d	2.28	2.21	2.24	1.96	2.05	2.13	2.09
Cyclic Mr	w/c	6.2	6.1	6.7	4.4	2.5	6.0	7.2
	γ_d	2.26	2.25	2.15	1.93	2.05	2.11	2.12

w/c = water content (%)
 γ_d = dry density (t/m³)

3.2 시험절차

선정된 7종의 보조기층 재료에 대하여 회복탄성계수(M_R) 결정을 위한 반복재하식 M_R시험과 대체 M_R 시험으로 현장공진주시험을 수행하였다. 두 시험 모두 성형·추출된 시편의 양면을



석고로 얇게 단부처리하여 시험기에 거치하고 멤브레인을 씌운 후 2시간 이상 석고를 양생하여 단부오차 요인을 최소로 한 후 시험을 수행하였다.

반복재하식 M_R 시험은 AASHTO T294-92I 규정을 따라 시험을 수행하였다. 직경 150mm 시편의 경우에는 시편의 무게가 무거워(약 12kg 정도), 시편을 시험기 바닥에 올려놓을 때 시료 파손에 특히 주의하여야 한다. 구속응력을 6.9kPa 재하하여 시료 내에서 공기방울이 계속하여 새어나오는지 여부를 점진하는 방법으로 시료의 완전 밀봉을 확인한다. 시료의 밀봉이 확인되면 하중램과 상부플레이트 등의 완전한 접촉을 위하여 13.8kPa 크기의 안정응력(seating pressure)을 재하한다. AASHTO T294-92I에서 규정한 하중조합순서에 따라 시험을 실시하고, 회복탄성계수는 각 하중단계 중 마지막 5회 반복하중 단계에서 결정된 값의 평균으로 결정하였다.

현장공진주시험에서는 성형된 시편에 약간의 진공압(10kPa 이내)을 가한 후 띠를 사용하여 시험기 몸체에 조심스럽게 거치 한다. 목표로 하는 구속응력을 진공압으로 재하 한 후, 시료 내에 구속응력이 일정하게됨을 확인하고, 공진 주파수를 측정하였다. 구속응력을 진공압으로 재하하는 경우에는 AASHTO T294-92I에서 규정에서 제시하는 구속응력 단계 중 104kPa, 138kPa 크기의 구속응력을 재하할 수 없다. 따라서 AASHTO T294-92I에서 규정한 구속응력 단계 중 현장공진주시험에서 적용 가능한 구속응력은 21kPa, 35kPa, 69kPa 크기의 3단계이다. 그러나, 보조기층 재료는 체적응력의 영향을 주요하게 받는 재료이기 때문에 체적응력의 영향 정도를 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 보다 많은 구속응력 단계의 적용이 필요하다. 따라서 AASHTO T294-92I에서 규정한 구속응력 단계 중 진공압으로 재하 가능한 21kPa, 35kPa, 69kPa

외에 10kPa, 41kPa 단계에서도 시험을 수행하였다. 구속응력 재하 순서는 작은 구속응력에서 큰 구속응력 단계로 적용하였다.

4. 체적응력과 변형률 크기의 탄성계수에 대한 영향

반복재하식 M_R 시험에서 얻은 체적응력-회복탄성계수 일례를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 나타낸 일례에서 보듯이 보조기층 재료의 탄성계수는 체적응력의 영향을 크게 받고, 체적응력과 회복탄성계수는 대수-대수 그래프에서 직선관계로 나타나 식 (1)과 같은 체적응력모델을 합리적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \quad (1)$$

여기서, M_R = 최대탄성계수

θ = 체적응력

k_1, k_2 = 실험으로 결정되는 재료 상수

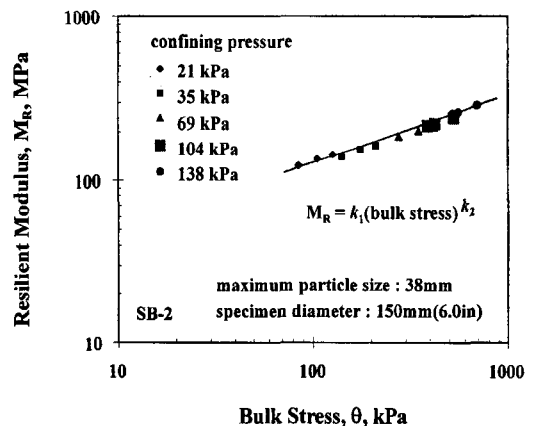


그림 4. 체적응력에 따른 회복탄성계수 일례

그림 5는 각 구속응력에서 변형률 크기에 따른 회복탄성계수 일례를 나타낸 것이다. 그림 5



에 나타난 결과를 검토하면 동일한 구속응력에서 변형률 크기(또는 축차응력)가 증가하면서 탄성계수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 변형률 크기가 증가함에 따라 탄성계수가 감소한다는 일반적인 사실과 상반된다. 그러나, 반복재하식 M_R 시험에서는 동일한 구속응력에서도 축차응력(또는 변형률) 크기가 증가함에 따라 체적응력이 함께 증가하게 되므로, 축차응력(변형률)의 증가에 의해 탄성계수가 감소되는 정도보다는 평균주응력(또는 체적응력)의 증가에 의해 회복탄성계수가 증가하는 정도가 커서 동일한 구속응력에서 축차응력이 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 것으로 설명할 수 있다.

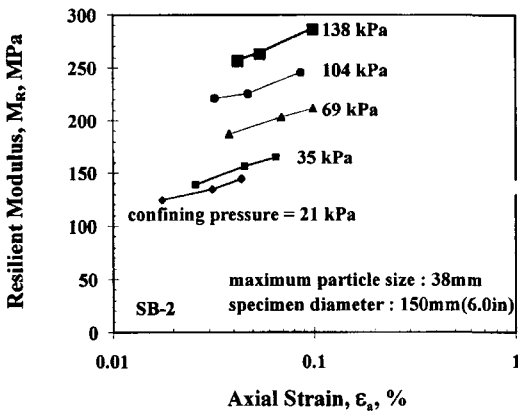


그림 5. 구속응력 및 변형률 크기에 따른 회복탄성계수 변화 일례

이석근(1991)의 연구에 의하면 체적응력에 따른 회복탄성계수의 변화를 그림 6과 같이 나타내고 있다. 그림 6에서 굵은 실선은 동일한 구속응력에서 결정되는 체적응력에 따른 탄성계수이다. 동일한 구속응력에서 반복재하식 M_R 시험이 수행되면 축차응력이 증가함에 따라 회복탄성계수가 초기에는 감소하다가 일정부분에서

증가하고 축차응력이 상당히 크면 다시 감소하게 됨을 나타내고 있다. 이러한 현상은 앞에서도 설명한 바와 같이 탄성계수에 영향을 주는 체적응력과 변형률 크기의 영향이 복합적으로 결합되어 나타나는 것이다. 즉, 체적응력과 변형률 크기가 동시에 증가하면 탄성계수는 이 둘의 영향 정도에 따라서 증가하거나 감소하게 된다.

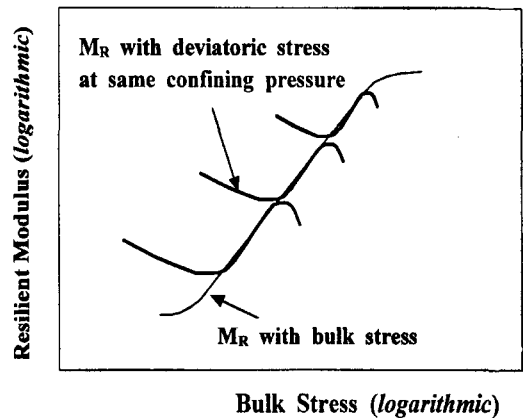


그림 6. 전체 축차응력범위에서 체적응력에 따른 회복탄성계수의 변화(이석근, 1991)

보조기층 재료에 대한 AASHTO T294-92 I 시험법에서 규정하는 material type I에 대한 하중조합은 그림 6에 나타난 중간부분, 즉 동일한 구속응력에서도 축차응력이 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 부분에 시험이 수행되도록 규정하고 있고, 이 하중조합이 실제 공용상태 포장이 경험하는 응력 범위를 포함하고 있는 것이다. 따라서, 반복재하식 M_R 시험법에 적용하는 하중조합이 달라진다면 체적응력-회복탄성계수의 상관관계는 변화하게 될 것이다.

그림 7은 반복재하식 M_R 시험에서 결정된 회복탄성계수를 현장공진주시험에서 결정된 각 체적응력 단계에서의 최대탄성계수로 정규화하여 나타낸 것이다. 그림 7에서 보듯이 회복탄성계



수가 결정되는 정규화탄성계수 범위가 폭넓게 나타나고, Seed와 Idriss (1980)가 제안하였던 자갈질 흙에 대한 정규화 탄성계수 감소곡선과도 차이가 있다. 이러한 현상의 원인으로는 첫째, 서로 다른 두 시험 결과에서 얻은 탄성계수를 결합하여 정규화탄성계수를 결정한 것, 둘째, 보조기층 재료의 정규화탄성계수가 구속응력의 영향을 받을 가능성, 셋째, 두 시험 사이의 응력경로의 차이 등을 생각해 볼 수 있다. 보조기층 재료의 정규화탄성계수 감소곡선을 엄밀히 규명하기 위해서는 직경 150mm 이상의 시편에 대하여 시험이 가능한 공진주/비틀전단시험 또는 미소변형 측정장치를 포함한 삼축압축시험이 필요하다. 그러나 현재까지는 시편직경 150mm 이상에 대한 이러한 시험장치를 개발하는 것이 기술적으로 매우 어려워, 하나의 시험에서 전체 변형률 크기에 따른 탄성계수를 결정하여 보조기층 재료의 정규화탄성계수 감소곡선을 규명하는 것이 현실적으로 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 M_R 시험이 수행되는 변형률 크기 범위에서의 정규화탄성계수 값을 변형률 크기에 따라 회귀분석하여 변형률 크기의 영향을 고려하고자 한다. 그러므로, 본 연구에서 평가된 정

규화탄성계수감소곡선은 변형률 크기의 영향만을 포함하고 있다기보다는 체적응력을 제외한 두 시험의 시험조건의 차이를 동시에 포함하여 평가된 것이며, 전체 변형률 영역으로 확대 적용하는 것은 곤란하다.

5. 현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법 제안

5.1 현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법의 개념

보조기층 재료의 탄성계수에 대한 영향요소는 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 재료적 조건에 관계된 것으로서 흙의 종류, 건조단위중량, 함수비 등이며 두 번째는 시험적 조건으로서 변형률 크기, 구속응력 또는 체적응력, 하중주파수, 하중반복회수 등이다. 지반동역학 분야의 연구성과에 의하면 “정적, 동적 또는 반복재하시험 중 어떠한 시험방법으로 시험이 실시되는가에 관계없이 탄성계수에 대한 영향요소를 합리적으로 고려한다면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있다”고 인식되고 있다(김동수 외, 1995(a) ; 김동수 외, 1995(b), Burland, 1989 ; Goto 외, 1991). 따라서 동일한 재료에 대하여 서로 다른 시험을 수행하여도 각 시험에서 얻어지는 탄성계수를 시험조건의 차이를 합리적으로 고려하면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있다. 즉 현장공진주시험에서 결정되는 최대탄성계수로부터 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 영향요소를 고려하면 반복재하시험 M_R 시험에서 결정되는 회복탄성계수의 결정이 가능하다. 현장공진주시험과 반복재하시험 M_R 시험의 시험조건 차이를 정리하면 표 3과 같다.

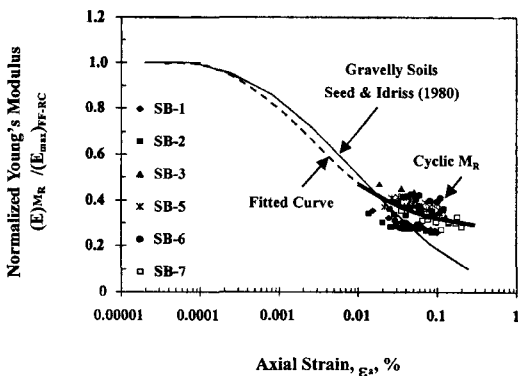


그림 7. 현장공진주시험과 반복재하시험 M_R 시험을 결합한 변형률 크기에 따른 정규화탄성계수



표 3. 반복재하식 M_R 시험과 현장공진주시험의 시험조건 차이

구 분	반복재하식 M_R 시험	현장공진주시험
평균주응력	일정한 구속응력에서도 시험과정 중 축차응력 변화에 따라 평균주응력 변화	시험과정중 평균주응력 일정
변형률 크기	중간변형률 크기 범위	선형탄계변형률 이하
하중주파수	5Hz	공진주파수 (시료조건, 단부조건에 따라 변화)
하중반복회수	100회 이상	반복탄계변형률 크기 이하에서 시험이 수행되므로 하중반복회수는 없는 것으로 보는 것이 합당

표 3에 나타난 여러 영향요소들 중, 보조기층 재료의 탄성계수는 하중주파수와 하중반복회수의 영향을 무시할 수 있는 것으로 밝혀지고 있다(권기철, 1999; 김동수 등, 1999(b)). 따라서 현장공진주시험으로부터 체적응력에 따른 회복탄성계수는 체적응력과 변형률 크기의 영향을 고려하여 결정할 수 있다.

보조기층 재료의 체적응력-변형률-탄성계수의 관계를 개념적으로 나타내면 그림 8과 같다. 변형률-회복탄성계수 평면에서 보면 현장공진주시험은 시험과정 중 평균주응력의 변화가 없고, 반복재하식 M_R 시험에서는 동일한 구속응력 상태에서 시험이 수행되어도 축차응력의 증가에 따라 체적응력이 증가한다.

그림 8에 나타난 바와 같이, 현장공진주시험으로부터 반복재하식 M_R 시험이 수행되는 각 체적응력 단계에서의 최대탄성계수를 결정하고 (체적응력의 탄성계수에 대한 영향 평가), 반복재하식 M_R 시험과 현장공진주시험이 수행되는 변형률 크기 차이를 고려하면 체적응력에 따른 회복탄성계수 결정이 가능함을 알 수 있다. 즉,

본 연구에서는 탄성계수에 대한 체적응력의 영향과 변형률 크기의 영향을 분리하여 고려하고자 한다.

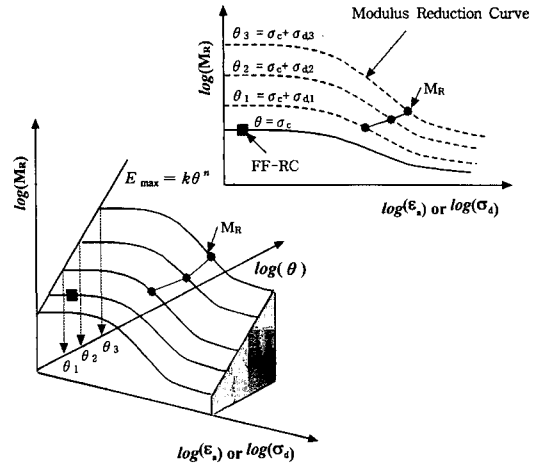


그림 8. 변형률 크기-체적응력-회복탄성계수 관계 개념도

그림 8에 나타내었던 체적응력-회복탄성계수 평면에서의 이석근(1991)의 연구결과에 현장공진주시험에서 결정되는 최대 탄성계수를 함께 나타내면 그림 9와 같이 표현할 수 있다. 현장공진주시험은 축차응력이 매우 작은 상태, 즉,

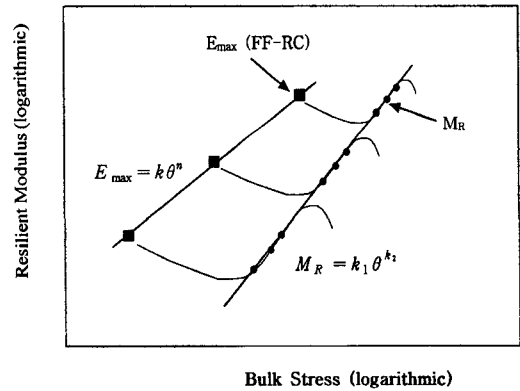


그림 9 체적응력에 따른 반복재하식 M_R 시험과 현장공진주시험 결과의 개념적 비교



미소변형을 영역에서 시험이 수행되어 최대탄성계수를 결정한다. 만약, 축차응력이 매우 작은 크기에서의 반복재하식 M_R 시험이 신뢰성 있게 수행될 수 있다면, 이때의 회복탄성계수는 현장공진주시험에서 결정되는 최대탄성계수와 일치하게 될 것으로 예상된다.

체적응력-최대탄성계수 관계는 여러 구속응력 단계에서 수행된 현장공진주시험 결과로부터 식 (2)와 같은 형태로 회귀분석을 통하여 결정할 수 있다.

$$E_{max} = k \theta^n \quad (2)$$

여기서, E_{max} = 최대탄성계수

θ = 체적응력

k, n = 실험으로 결정되는 재료 상수

식 (2)와 같이 표현되는 현장공진주시험에서 결정된 체적응력-최대탄성계수 관계로부터 반복재하식 M_R 시험에 적용되는 모든 체적응력 단계에서의 최대탄성계수를 결정할 수 있다. 각 체적응력 단계에서의 최대탄성계수가 결정되면 변형률 크기 차이에 대한 보정을 실시하여야 한다. 현장공진주시험에서 결정된 최대탄성계수와 정규화탄성계수 감소곡선을 결합하면 그림 10 또는 식 (3)과 같은 변형률 크기에 따른 탄성계수를 결정할 수 있다.

$$E(\epsilon) = (E/E_{max}(\epsilon))_{FF-RC, M_R} \times (E_{max})_{FF-RC} \quad (3)$$

여기서, $E(\epsilon)$ = 변형률 크기에 따른 탄성계수

$(E_{max})_{FF-RC}$ = 현장공진주시험에서 결정된 최대탄성계수

$(E/E_{max}(\epsilon))_{FF-RC, M_R}$ = 정규화탄성계수 감소곡선 (그림 7 참조)

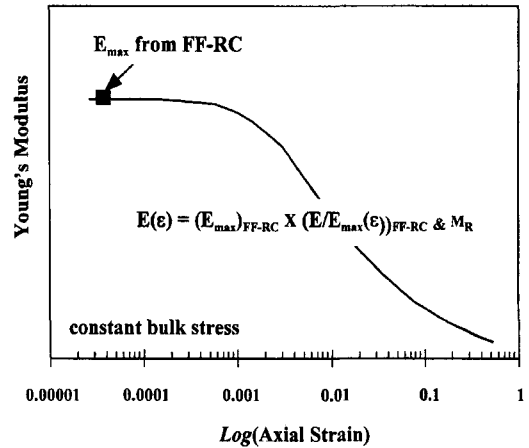


그림 10. 각 체적응력단계에서 현장공진주시험으로부터 변형률 크기에 따른 탄성계수 결정 개념도

변형률 크기에 따른 탄성계수가 결정되면, 반복재하식 M_R 시험이 수행되는 각 축차응력 단계에서의 회복탄성계수를 다음과 같이 결정할 수 있다.

- i) 반복재하식 M_R 시험이 수행되는 축차응력 단계에서 변형률 크기를 가정한다.
- ii) 그림 10에 나타난 변형률 크기에 따른 탄성계수 관계를 이용하여 가정된 변형률 크기에서의 탄성계수를 계산한다.
- iii) 계산된 탄성계수와 축차응력으로부터 변형률 크기를 계산한다.
- iv) 가정된 변형률 크기와 계산된 변형률 크기가 허용범위 이내에 들어올 때까지 i)~iii)의 과정을 반복한다.

5.2 현장공진주시험을 이용한 보조기층

재료의 대체 M_R 시험법 절차

보조기층 재료에 대하여 현장공진주시험으로부터 반복재하식 M_R 시험에서 결정되는 회복탄성계수를 결정하는 대체 M_R 시험절차를 정리하면 다음과 같다.



- 1) AASHTO T294-92I 기준에 따라서 5층 진동다짐방법으로 시료를 성형한다. 건조단위중량은 다짐시험에서 결정된 최대 건조단위중량의 95%, 함수비는 최적함수비로 시료를 성형한다.
- 2) 현장공진주시험을 수행하여 압축과 유발시의 공진주파수를 측정하여 최대탄성계수 (E_{max})를 결정한다. 구속응력은 10kPa, 21kPa, 35kPa, 41kPa, 69kPa 5단계를 적용한다.
- 3) 여러 구속응력 단계에서의 현장공진주 시험결과를 회귀분석하여 체적응력-최대탄성계수 관계를 식 (4)와 같이 결정한다.

$$E_{max} = k \theta^n \quad (4)$$

- 4) AASHTO T294-92I 시험법의 각 체적응력 단계에서의 최대탄성계수를 결정한다.
- 5) 각 체적응력 단계에서, 최대탄성계수와 정규화탄성계수 감소곡선을 결합하여 변형률 크기에 따른 탄성계수를 결정한다.

$$E(\epsilon) = (E/E_{max}(\epsilon))_{FF-RC, M_R} \times (E_{max})_{FF-RC} \quad (5)$$

- 6) 변형률 크기에 따른 탄성계수로부터, 반복재하식 M_R 시험이 수행되는 변형률 크기에서의 탄성계수, 즉 회복탄성계수를 결정한다.
- 7) 각 체적응력 단계에서 결정된 탄성계수를 회귀분석을 통하여 체적응력모델의 모델변수 k_1, k_2 를 결정한다.

6. 제안된 방법의 검증

대체 M_R 시험법으로 적용하고자 하는 현장공진주시험 결과로부터 반복재하식 M_R 시험이 수행되는 각 체적응력 단계에서의 회복탄성계수를

제안된 방법으로 결정하고, 체적응력 모델을 적용하여 모델변수를 결정하여 표 4에 정리하였다.

표 4. 반복재하식 M_R 시험 및 대체 M_R 시험법으로부터 결정된 체적응력모델 변수

구분		SB-1	SB-2	SB-3	SB-4	SB-5	SB-6	SB-7
k_1 (MPa)	Cyclic M_R	266.9	320.0	262.2	317.7	347.1	306.4	188.1
	FF-RC	431.0	405.1	225.4	191.3	300.2	192.4	152.2
k_2	Cyclic M_R	0.38	0.40	0.38	0.51	0.52	0.53	0.58
	FF-RC	0.45	0.50	0.47	0.42	0.46	0.37	0.45

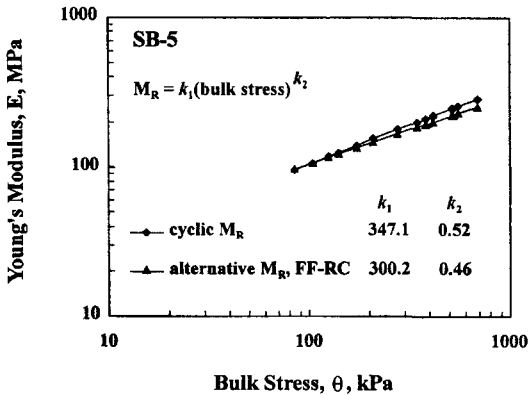
표 4에 나타난 결과에 의하면, 제안된 대체 M_R 시험법에서 결정되는 모델변수는 반복재하식 M_R 시험에서 결정된 값과 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 회복탄성계수는 모델변수 k_1, k_2 의 영향이 복합적으로 고려되어 결정되므로, k_1, k_2 각각을 독립적으로 비교하여 대체 M_R 시험법의 신뢰성을 검토하기는 힘들다.

회복탄성계수를 포장 구조해석 및 설계에 합리적으로 이용하기 위해서는, 사용재료에 합당한 구성모델을 결정하여, 실제 공용상태 포장이 경험하게 될 응력범위에서의 탄성계수를 신뢰성 있게 결정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 반복재하식 M_R 시험법과 대체 M_R 시험법에서 결정된 모델변수를 사용하여 결정되는 실제 공용상태 포장이 경험하는 응력범위에서의 탄성계수를 비교하는 방법을 적용하였다.

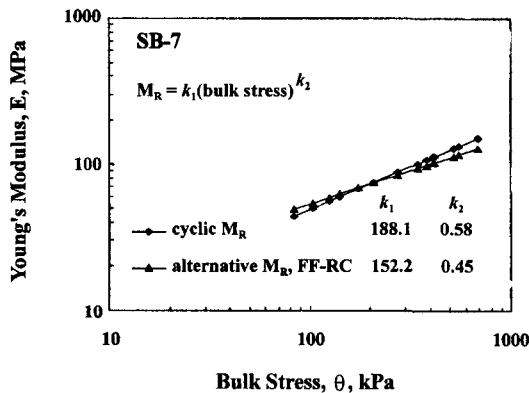
실제 공용상태 포장이 경험하게 되는 응력상태를 반영한 반복재하식 M_R 시험의 응력조합 범위에서의 회복탄성계수와 대체 M_R 시험법에서 결정되는 탄성계수를 비교하여 그림 11에 일례로 나타내었다. 그림 11에 나타난 바와 같이 두 시험에서 결정된 탄성계수가 비교적 잘 일치하고 있어, 본 연구에서 제안한 변형특성을 고려한 대체 M_R 시험법으로부터 공용상태 포장이



경험하게 되는 응력범위에서 신뢰성 있는 회복 탄성계수 결정이 가능함을 알 수 있다.



(a) SB-5 보조기층 시료



(b) SB-7 보조기층 시료

그림 11. 공용상태 응력범위에서 대체 M_R 시험법과 반복재하식 M_R 시험법으로 결정된 체적응력에 따른 탄성계수 비교 일례

본 연구에서 제안된 대체 M_R 시험법의 신뢰 수준을 검토하기 위하여 모든 시료에서 대체 M_R 시험법 결과와 반복재하식 M_R 시험에서 결정된 탄성계수를 비교하면 그림 12와 같다. 그

림 12 나타난 바와 같이 현장공진주시험을 이용한 대체 M_R 시험법으로부터 결정된 보조기층 재료의 회복탄성계수는 반복재하식 M_R 시험법에 결정된 값과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

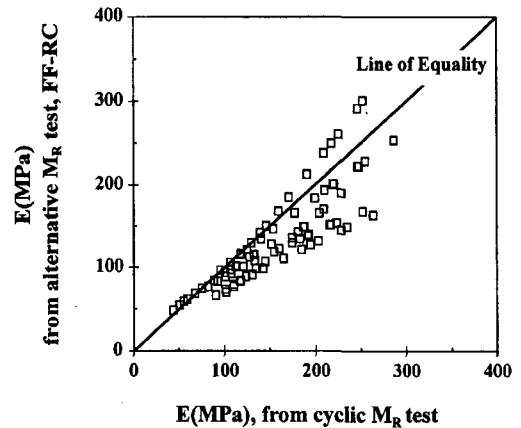


그림 12. 대체 M_R 시험법과 반복재하식 M_R 시험법으로 결정된 탄성계수 비교

그림 12에 나타난 대체 M_R 시험법에서 결정된 탄성계수와 반복재하식 M_R 시험법에서 결정되는 회복탄성계수의 차이는 대체 M_R 시험법의 오차량으로 고려할 수 있다. 대체 M_R 시험법의 오차량을 정규분포로 가정하고 통계분석을 수행하여 다음의 결과를 얻을 수 있었다. 현장공진주시험을 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법으로 적용하는 경우에는, 반복재하식 M_R 시험에서 결정되는 회복탄성계수에 비하여 0.63~1.11의 범위에서 결정되며, 평균적으로는 0.84배의 값으로 추정하고, 95% 신뢰도수준에서 오차한계는 $\pm 3.40\%$ 로 나타났다.

7. 결론

본 연구에서는 탄성계수 대한 영향요소를 합



리적으로 고려하여 현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 M_R 시험 절차를 제시하고 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 현장공진주시험(FF-RC)으로부터 보조기층 재료의 최대탄성계수(E_{max})를 간편하고도 효과적으로 결정할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 제안된 대체 M_R 시험법을 적용하면, 평균적으로, 반복재하식 M_R 시험법에서 결정되는 회복탄성계수의 0.84배 값이 결정되고, 95% 신뢰도수준에서 오차한계는 $\pm 3.40\%$ 로 나타났다.
- 3) 현장공진주시험으로부터 보조기층 재료의 회복탄성계수를 추정하는데 있어서 가장 중요한 것은 신뢰성 있는 현장공진주시험을 통한 체적응력-최대탄성계수의 결정과 보조기층 재료의 변형률 크기에 따른 신뢰성 있는 정규화탄성계수 감소곡선의 확보로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국도로공사 도로연구소의 연구비 지원으로 수행된 “노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법 개발(97-59-20)” 연구과제 수행결과의 일부로, 감사를 포함합니다.

참고문헌

1. 권기철, (1999), “변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법”, 박사학위논문, 한국과학기술원.
2. 김동수 (1995(a)), “공진주/비틀전단(RC/TS)시험을 이용한 건조사질토의 변형특성”, 한국지반공학회 논문집 제11권 제1호, pp. 101-112.
3. 김동수 (1995(b)), “공진주/비틀전단(RC/TS)시험을 이용한 점성토의 변형특성”, 한국지반공학회 논문집 제11권 제1호, pp. 113-124.
4. 김동수, 권기철, 이광호 (1997), “현장공진주시험을 이용한 노상토의 대체 M_R 시험법” 대한토목학회 논문집, 제17권, 제 III-4호, pp. 393-402.
5. 김동수, 권기철, 이광호, 이석근, (1999(a)) “정적삼축압축시험을 이용한 노상토의 대체 M_R 시험법” 대한토목학회논문집 제19권 제III-1호, pp. 153-166.
6. 김동수, 권기철, 이광호, 이석근, (1999(b)) “정적삼축압축시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법” 대한토목학회논문집, 제19권 제III-1호, pp. 167-175.
7. 김수일, 이광호, 권우성 (1991), “CBR과 압밀 비배수 시험에 의한 탄성계수와 상관계수에 대한 실험적 연구”, 한국지반공학회지, Vol. 7, No. 4, pp. 25-34.
8. 우제윤, 조천환, 문홍득, 김동수 (1993), “표준 삼축압축시험기를 이용한 노상토의 회복탄성계수 시험법”, 대한토목학회 논문집, 제13권, 제4호, PP. 239-250.
9. AASHTO (1992), “Resilient Modulus of Unbounded Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P-46 AASHTO, T-294-92I.” AASHTO, Washington D.C.
10. Buland, J. B. (1989), “Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture : Small is Beautiful-The Stiffness of Soils at Small Strains,” Canadian Geotechnical Journal, 26, pp. 52-65.
11. Drumm, E. C., Li, Z., Reeves, J. S., and Madgett, M. R. (1996), “Alternative Test Method for Resilient Modulus of Fine Grained Subgrades,” Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 19, No. 2, pp. 141-154.
12. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. S., and Sato, T. (1991), “A Simple Gague for Local Small Strain Measurement in the Laboratory,” Soil and Foundations, Vol. 31, No. 1, pp. 169-180.
13. Green, J. L. and Hall, J. W. (1975), “Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements: Experimental test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure,” Report No FAA-RD-73-205, Vol. 1, Federal Aviation Admin., Washington D. C.
14. Heukelom, W. and Foster, C. R. (1960), “Dynamic Testing of Pavements,” Proceedings, ASCE, 86.



-
15. Kim, D. S., Kweon, G. C. and Lee, K. H. (1997), "Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Using Free-Free Resonant Column Test," Transportation Research Record No. 1557, Washington, D.C., pp. 62-69.
 16. Lister, N. W., and Powell, D. (1987), "Design Practices for Pavements in the United Kingdom," Proc. 6th Int. Cong. on the Struct. Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Mich.
 17. Lotifi, H. A., Schwartz, C. W., and Witczak, M. W. (1988), "Compaction Specification for the Control of Subgrade Rutting," Transportation Research Board No. 1196, Washington, D.C.
 18. Rhee, S. K. (1991), "A Study of Resilient Behavior and Constitutive Modeling of Thick Granular Layers for Heavily Loaded Asphalt Pavement," Ph.D Dissertation, Texas A&M University.
 19. Seed, H. B., Robert, T. W., Idriss, I. H., and Tokimatsu, K. (1984), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils," Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, UCB/EERC -84/14.
 20. Vaghela, J. G. and Stokoe II, K. H. (1995), "Small-Strain Dynamic Properties of Dry Sand from the Free-Free Resonant Column," Geotechnical Engineering Report GT95-1, Geotechnical Engineering Center, University of Texas at Austin.
 21. Zaman, Z., Chen, D. H. and Laguros, J. (1994), "Resilient Moduli of Granular Materials," Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 967-986.