



국내 보조기층 재료의 변형특성을 고려한 전체 변형률 영역의 구성모델 개발

Development of Whole Strain Range Constitutive Model Considering Deformational Characteristics of Subbase Materials in Korea

권 기 철*

Kweon, Gi Chul

Abstract

Deformational characteristics of subbase materials are important parameters in the mechanistic design of pavement. The subbase materials are mostly unbound granular materials in Korea, and seven representative subbase materials were collected for testing from the pavement construction sites. To evaluate the deformational characteristics of subbase materials, RC/TS, TX and FF-RC tests were performed. The effects of various variables on modulus were studied. The variation in the modulus with number of loading cycles and loading frequency are very small and can be ignored in a practical sense. The modulus of subbase materials were significantly affected by confining pressure and strain level. The representative modulus reduction curve and constitutive models for Korean subbase materials were suggested.

Keywords : subbase materials, pavement, deformational characteristics, confining pressure, strain level

요 지

보조기층 재료의 변형특성은 역학적 포장설계에 있어서 대단히 중요한 입력변수이다. 국내에서 사용되는 보조기층 재료는 대부분 입상의 자갈질 흙으로서, 실제 시공현장에서 7종의 시료를 채취하였다. 보조기층 재료의 변형특성 평가를 위하여 공진주/비틀전단시험, 삼축압축시험, 자유단공진주시험을 수행하여 탄성계수에 대한 여러 영향요소를 검토하였다. 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 하중주파수 및 하중반복횟수의 영향은 매우 작은 것으로 평가되었으며 공학적 관점에서 무시가능 할 것으로 생각된다. 보조기층 재료의 탄성계수는 구속응력과 변형률 크기에 대단히 큰 영향을 받는 것으로 나타났고, 대표적인 정규화탄성계수 감소곡선과 구성모델을 제안하였다.

핵심용어 : 보조기층 재료, 포장, 변형특성, 구속응력, 변형률 크기

* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 조교수



1. 서론

회복탄성계수(M_R : Resilient Modulus)로 대표되는 포장 하부구조 재료(노상토 및 보조기층 재료)의 탄성계수는 포장 하부구조의 대표적인 역학적 물성치로 인정받고 있다. 이에 따라 보조기층 재료의 탄성계수는 포장 설계법에서 기본 입력물성치로 채택되고 있고(건설교통부, 2002; AASHTO, 1986), 다짐 시공의 품질관리 및 포장 유지관리 등에도 탄성계수를 활용하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다(박태순 등, 2001; 최준성 등, 2002).

최근에는, 보조기층 재료의 탄성계수 평가에 매우 다양한 시험기법이 적용되고 있다. 실내시험으로는 반복재하식 M_R 시험, 정적삼축압축시험(TX), 공진주/비틀전단시험(RC/TS) 등이, 시공단계 또는 공용상태 현장시험으로는 평판재하시험, FWD, 표면파기법(SASW) 등이 적용되고 있다(권기철 등, 2002; 김동수 등, 2002; 서원석 등, 2003; AASHTO, 1993). 한편, 각 시험의 수행되는 변형률 크기, 구속응력, 하중주파수, 하중반복횟수 등의 차이로 인하여 각각의 시험에서 결정되는 탄성계수는 서로 다른 값으로 결정된다. 과거에는 이러한 시험조건의 차이를 고려하지 않고 각각의 시험에서 결정되는 탄성계수를 서로 다른 물성치로 인식하였다. 그러나 다양한 연구를 통하여 “정적, 동적 또는 반복재하시험 중 어떠한 시험방법으로 시험이 실시되는가에 관계없이 탄성계수에 대한 영향요소를 합리적으로 고려한다면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있다”(권기철 등, 2000; 한국지진공학회, 2004; Burland, 1989; Goto 등, 1991)는 인식을 공유하게 되었다.

이러한 변형특성에 대한 기본적인 인식에 기초하여 i) 각각의 시험에서 얻은 결과들을 서로 독립적으로 평가하는 것이 아니라 변형특성을 고려하여 서로 결합함으로써 변형특성을 다양한 시험으로부터 종합적으로 평가하는 기법(권기철 등, 2002), ii) 대체 M_R 시험기법 또는 시공단계의 현장시험과 같이 특정한 시험조건에서 결정되는 탄성계수를 설계 또

는 해석조건에 합당한 탄성계수로 전환하는 기법(Kim 등, 2001), iii) 변형특성에 민감한 영향인자를 반영한 설계입력변수 결정 시험조건의 수립 및 구성모델의 개발(건설교통부, 2002) 등과 같은 연구가 진행되고 있다. 이러한 다양한 연구에서 가장 중요한 핵심 요소기술은 대상 재료의 변형특성을 얼마나 신뢰성 있게 평가하는 것이냐 하는 것이다.

변형특성은 사용하는 재료의 특성, 대상구조물의 특성(포장단면, 교통조건, 환경조건 등)에 따라서 영향을 받는다. 따라서 국내에서 사용되는 보조기층 재료의 변형특성을 합리적으로 평가하는 것은 한국형 포장설계법 개발을 위한 입력변수 결정 시험기법 개발의 기본적인 핵심적인 선결 연구 항목이다. 그러나 아쉽게도, 우리나라에서는 국내에서 사용되는 보조기층 재료의 변형특성에 대한 부분적인 연구가 진행되어 왔을 뿐 전체적인 영향요소 규명이 미흡한 상태이다(건설교통부, 2002).

본 연구에서는 국내 보조기층 재료의 변형특성에 대한 검토를 위하여 실제 시공현장에서 채취된 7종의 시료에 대한 공진주/비틀전단시험(RC/TS), 삼축압축시험(TX), 자유단공진주시험(FFRC)을 수행하였다. 시험결과를 바탕으로 국내 보조기층의 변형특성에 대한 변형률 크기, 구속응력(또는 체적응력), 하중주파수, 하중반복횟수 등의 영향을 검토하고, 국내 보조기층 재료의 변형특성에 대한 영향요소를 고려하여 구성모델을 제시하였다.

2. 시험장치

본 연구에서는 공진주/비틀전단시험(RC/TS), 정적삼축압축시험(TX), 자유단공진주시험(FFRC)을 수행하였다. 공진주/비틀전단시험에서는 변형률 크기와 하중주파수의 영향, 삼축압축시험은 반복하중 횟수와 하중파형의 영향, 자유단공진주시험에서는 최대탄성계수의 구속응력의 영향을 중점적으로 평가하였다.

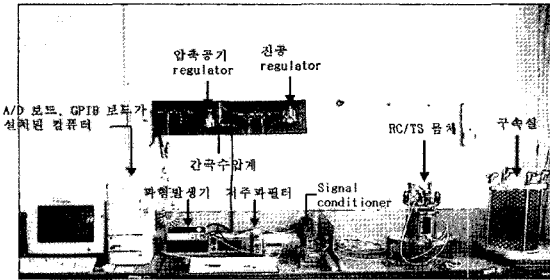


사진 1. 공진주/비틀전단시험 장치

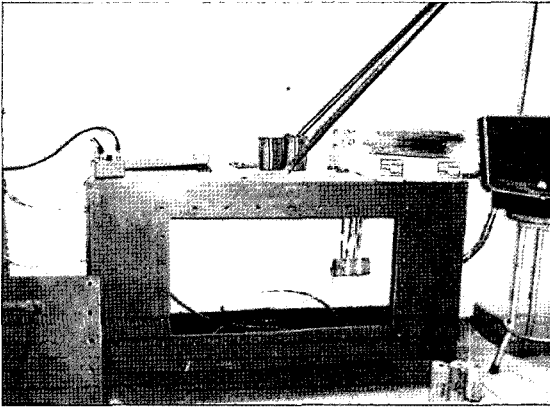


사진 2. 자유단공진주시험 장치

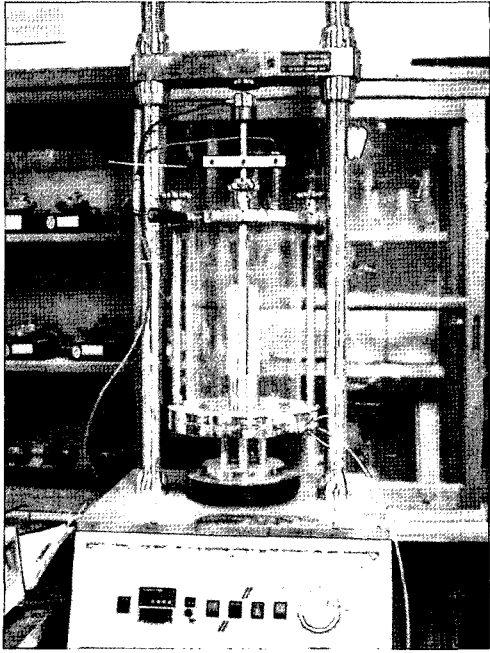


사진 3. 삼축압축시험 장치

사진 1은 본 연구에서 사용한 Stokoe식 공진주/비틀전단시험 장치다. 공진주시험은 원통형의 시편에 주파수를 바꿔가면서 비틀자극 (torsional excitation)을 가하여 1차 모드의 공진주파수와 진동의 크기를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단탄성계수 및 전단변형률을 구하는 동적인 시험방법이다. 비틀전단시험은 반복 비틀력을 시편에 가하고 이때 시편의 비틀각을 측정하여 탄성계수를 결정하는 반복재하 시험 방법이다(한국지진공학회, 2004).

자유단공진주시험(FFRC)은 양단자유-추가질량 (free-free with added mass) 조건에서의 탄성파전달이론에 근거하여, 시편에 발생시킨 응력파(압축파 또는 전단파)에 대한 공진특성으로부터 미소변형률 영역의 Young계수와 전단탄성계수를 결정하는 시험 기법이다(Vaghela 등, 1995). 본 시험은 미소변형률 영역에서 최대탄성계수를 신뢰성 있고, 간편하게 결정할 수 있을 뿐 아니라 직경 150mm 이상의 시편에 대하여도 간편한 시험이 가능하여 보조기층 재료와 같이 입상의 지반재료에 대한 적용성이 뛰어나다(Sun, 1993). 본 연구에서는 공기압으로 구속응력을 재하할 수 있는 자유단공진주시험장치를 이용하였다(사진 2).

삼축압축시험은 변형률 조절방식이고 구속응력을 공기압으로 재하하는 장치를 사용하였다. 10~2% 변형률 범위까지 신뢰성 있는 시험이 가능하도록 전기식 LVDT와 Load Cell을 사용하여 하중과 변위를 측정하였다(사진 3).

3. 시험시료 및 시험절차

3.1 시험시료

본 연구에서는 실제 도로포장 현장에서 사용되는 보조기층 재료 7종을 채취하여 시험에 사용하였다. 시험에 사용한 시료의 기초물성 특성은 표 1에 정리



표 1. 보조기층 시료의 기초물성 특성

구 분	재 료 적 특 성								다 짐 특 성		
	D ₉₅ (mm)	#4 통과량 (%)	#200 통과량 (%)	균등 계수 (C _u)	극물 계수 (C _c)	소성 지수 (PI)	통일분류 법에 의한 분류	AASHTO 분류법에 의한 분류	비중	최대건조 단위중량 (t/m ³)	최적 함수비 (%)
HSB-1	24.0	45.69	0.90	28.0	3.0	N.P	GW	A-1-a	2.71	2.314	6.5
HSB-2	34.0	51.90	0.20	24.3	0.4	N.P	SP	A-1-a	2.58	2.248	6.6
HSB-3	27.0	37.71	0.70	35.3	2.4	N.P	GW	A-1-a	2.51	2.450	6.0
HSB-4-1	36.5	37.37	0.30	63.7	0.9	N.P	GP	A-1-a	2.61	2.325	6.3
HSB-4-2	31.0	48.89	0.10	21.8	1.4	N.P	GW	A-1-a	2.66	2.340	6.5
NSB-1	30.0	43.20	3.20	12.0	1.1	N.P	GW	A-1-a	2.73	2.210	8.7
NSB-2	31.0	43.40	1.70	9.8	1.5	N.P	GW	A-1-a	2.71	2.290	8.0

하였다.

시험에 사용한 보조기층 재료는 입상의 재료인데 이것은 국내에 사용되는 일반적인 보조기층 재료에 해당한다. 국내에서는 하부구조 재료의 품질에 대한 요구조건을 시방서에서 규정하고 있기 때문에 대체적으로 매우 우수한 재료가 적용되고 있다. 국내에서는 보조기층 재료는 쇄석과 모래를 혼합하여 인공적으로 만들어 쓰는 것이 일반적이며 입상의 재료로서 구속응력의 영향을 대단히 크게 받는 재료적 특성이 있다. 건설교통부(2002)의 보고에 의하면 국내에 사용되는 입상 보조기층 재료는 대부분 통일분류법으로 GP 또는 GW로 분류되는 흙으로, #200체 통과량은 거의 대부분이 5% 미만이며, 일반적으로 비소성(NP) 재료이다.

3.2 시험절차

모든 시편은 최대 건조단위중량의 95%, 최적함수비(OMC)를 목표로 성형하였다. 시편의 성형은 5층과소다짐법을 적용하였다. 공진주시험에서는 직경 50mm, 높이 100mm, 자유단공진주시험에서는 직경 71mm, 높이 150mm, 삼축압축시험에서는 직경 100mm 높이 200mm의 시편을 성형하였다. 시료의

최대입자는 시편 직경의 1/5 이하가 되도록 굵은 입자를 제거한 모델시료(matrix model 적용)를 사용하였다(Kim 등, 2001; Su, 1989). 따라서 각 시험에 사용된 모델시료의 입도분포는 서로 상이하여 각 시험에서 결정된 탄성계수의 절대 값을 직접적으로 비교하는 것은 곤란하였다.

다짐 성형된 시편의 양면을 석고로 얇게 단부처리를 하여 공진주/비틀전단시험 장치에 거치하고, 멤브레인을 씌운 후 2시간 이상 석고를 경화시킨 후 시험을 수행하였다. 구속응력은 높은 구속응력부터 낮은 구속응력 순으로 시험을 수행하였고, 각 구속응력 단계에서 구속압을 재하하고 1시간 이상 기다려 시료 내 구속응력이 균일하게 재하되도록 하였다. 각 구속응력 단계에서 저변형률에서 고변형률로 변형률 크기를 증가시키며 비틀전단시험과 공진주시험을 수행하였다.

자유단공진주시험에서는 양단부 썸과 시편을 석고로 얇게 단부처리하고 멤브레인을 씌운 후 공기 중에서 2시간 이상 석고를 양생시킨 다음 시험장치에 시편을 설치하였다. 자유단공진주시험장치에 시편을 거칠 때 시편의 손상을 줄이기 위하여 성형된 시료에 약간의 진공압(10kPa 이내)을 재하한 상태에서 구속셀에 조심스럽게 설치하였다. 시료가 시험기에



표 2. 보조기층 재료의 삼축압축시험 하중조합

confining pressure (kPa)	No. of cycling	devatoric stress (kPa)	
		loading	unloading
104	2	0 → 104	104 → 0
21	10	0 → 69	69 → 0
35	2	0 → 104	104 → 0
69	2	0 → 207	207 → 0
104	2	0 → 207	207 → 0
138	2	0 → 276	276 → 0

* seating pressure : 13.8 kPa, strain rate : 0.04%/min

거치되면 압축공기로 구속응력을 재하하고 진공압을 제거하였다. 공진주시험에서와 마찬가지로 각 구속응력단계에서 1시간 이상의 방치시간을 두어 균일한 구속응력 상태를 확보한 후 쇄구슬을 이용하여 압축파의 자유단공진주시험을 수행하였다.

삼축압축시험은 공진주시험과 동일하게 다짐 성형된 시편의 양면을 석고로 얇게 단부처리하여 시험장치에 거치하고, 멤브레인을 씌운 후 2시간 이상의 석고 양생시간을 둔 후 시험을 수행하였다. 구속응력은 높은 구속응력부터 낮은 구속응력 순으로 시험을 수행하였고, 각 구속응력단계에서 구속압을 재하하고 1시간 이상 기다려 시료 내 구속응력이 균일하게 재하 되도록 하였다. 삼축압축시험의 하중조합은 표 2와 같다.

4. 보조기층 재료의 변형특성

4.1 보조기층 재료의 변형특성에 대한 영향요소

변형특성은 매우 다양한 요소에 영향을 받는다. 대표적인 영향요소로는 간극비, 건조단위중량, 함수비, 과압밀비 등과 같은 재료적인 요인과 변형률 크기, 구속응력, 하중주파수, 하중반복횟수, 응력경로 등과 같이 시료가 경험하는 시험조건으로 나누어진다

(Rhee, 1991). 시험을 통하여 탄성계수를 평가하는 경우에는 간극비, 건조단위중량, 함수비 등을 현장조건과 동일하게 또는 유사하게 제작된 시편을 사용하게 되므로 변형특성에 대한 재료적 요인은 시편 성형 과정에서 반영된다. 따라서 본 연구에서는 시험조건의 요인을 중심으로 변형특성에 대한 영향요소를 평가하였으며, 변형률 크기, 구속응력(체적응력), 하중주파수, 하중반복횟수의 영향을 검토하였다.

그림 1은 비틀전단시험에서 결정된 하중주파수에 따른 탄성계수 변화의 일례이다. 보조기층 재료와 같은 입상재료에서 하중주파수의 영향이 없다는 것은 매우 일반적으로 알려진 사실이며(권기철 등, 1999; Alarcon 등, 1986; Iwasaki 등, 1978), 그림 1에서 확인할 수 있듯이 국내 보조기층 재료에 있어서도 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향은 없음을 알 수 있다.

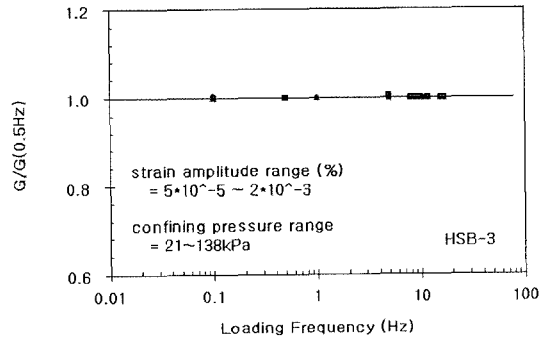


그림 1. 비틀전단시험에서 결정된 하중주파수에 따른 탄성계수의 변화 일례

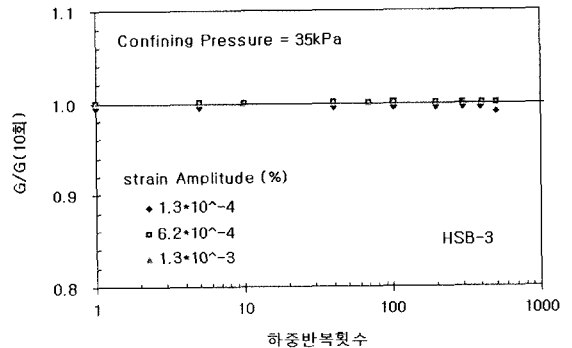
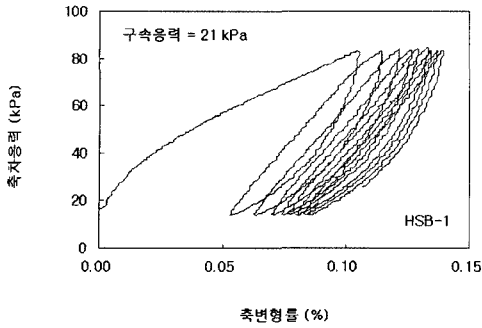
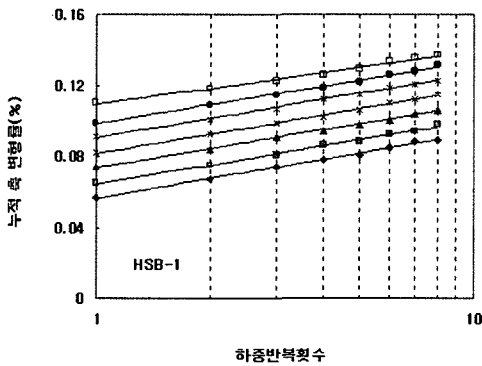


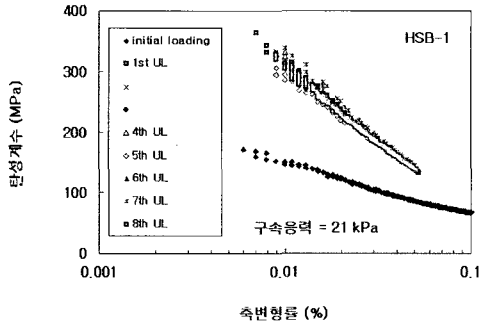
그림 2. 비틀전단시험에서 결정된 하중반복횟수에 따른 탄성계수의 변화 일례



(a) 응력-변형률 관계



(b) 축차응력 단계별 하중반복횟수에 따른 누적 소성 변형



(c) 하중반복횟수-탄성계수

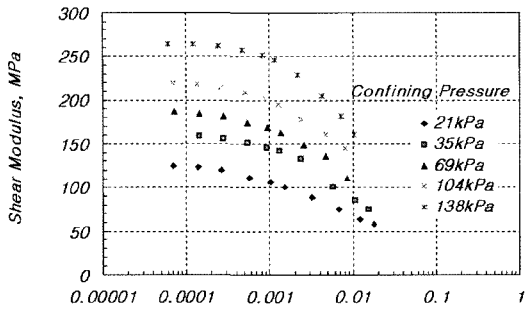
그림 3. 삼축압축시험에서 결정된 하중반복횟수의 영향 일례

하중반복횟수의 탄성계수에 대한 영향은 저변형률 영역에서의 비틀전단시험과 중간변형률 영역에서의 정적 반복삼축압축시험을 통하여 검토하였다. 본 연구에서 적용한 시험에서는 석고로 시편의 양단부를 처리하여 시험시스템의 순응성 문제에서 발생하는

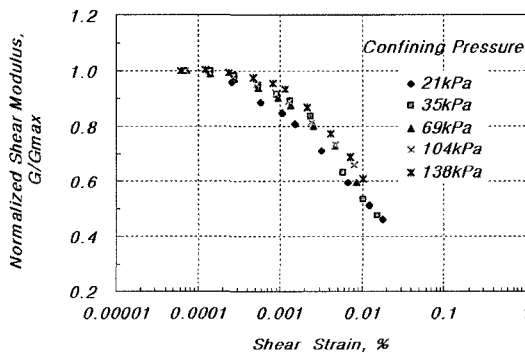
하중반복횟수의 영향을 최소화 하고자 하였다(Pezo 등, 1991). 그림 2는 비틀전단시험에서 결정된 하중 반복횟수 500회 동안의 탄성계수 변화 일례를 나타낸 것이다. 비틀전단시험은 미소 변형률 영역($10^{-4} \sim 10^{-3}\%$)에서 시험이 수행되었으며 이러한 변형률 범위에서 하중반복횟수에 따른 탄성계수의 변화는 없는 것으로 나타났다.

그림 3은 삼축압축시험에서 하중반복횟수 10회 동안의 결과를 나타낸 것이다. 삼축압축시험에서 반복 축차응력에 의해 유발되는 변형률의 크기는 중간 변형률 범위($10^{-2} \sim 10^{-1}\%$)로 실제 포장 공용상태에서 보조기층 재료가 경험하는 변형률 범위이다(Kim 등, 2001). 그림 3에 나타낸 일례에서 보듯이, 중간 변형률 범위에서는 첫 번째 하중재하단계에서 대단히 큰 소성변형이 발생하여 탄성계수가 매우 작게 평가되고, 소성변형이 하중재하 횟수에 따라서 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 그림 3(a)에 나타낸 하중반복횟수에 따른 응력-변형률 결과에서 각 축차응력 단계에서 반복횟수에 따른 누적 소성 변형률의 증가정도(그림 3(b)에서 기울기)는 축차응력 크기에 거의 무관하게 일정하게 결정됨을 발견할 수 있다. 만일 누적 소성 변형률의 증가정도가 축차응력 크기에 완벽히 무관하게 결정된다면, 이것은 하중반복횟수에 따라서 소성변형은 계속적으로 누적되지만 응력-변형률 곡선의 형태는 동일한 형태를 유지하여 탄성계수는 하중반복횟수에 무관하게 일정한 값을 갖게 됨을 의미한다. 그림 3(c)는 그림 3(a)의 결과에서 하중반복횟수에 따른 탄성계수의 변화를 나타낸 것으로 대단히 큰 소성변형을 유발하는 첫 번째 하중재하단계를 제외하고는 하중반복횟수의 탄성계수에 대한 영향은 매우 작음을 확인할 수 있다.

그림 2 및 그림 3에 나타내었던 미소변형률 영역의 비틀전단시험결과와 중간변형률 영역의 삼축압축 시험 결과를 종합하면, 국내 보조기층 재료의 탄성계수는 전체 변형률 영역에서 하중반복횟수의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다. 다만, 포장체의 소



(a) 탄성계수



(b) 정규화 탄성계수

그림 4. 공진주시험에서 결정된 구속응력 및 변형률 크기에 따른 탄성계수 일례(HSB-1)

성변형(rutting)을 예측하는 경우에는, 입상의 보조기층 재료에 있어서도 반복하중에 따른 소성변형 누적을 고려해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 공진주시험을 통하여 변형률 크기에 따른 탄성계수 변화를 검토하였으며, 그림 4는 공진주시험에서 얻은 전형적인 결과 일례이다. 그림 4(a)에서 보듯이 보조기층 재료의 탄성계수는 변형률 크기 및 구속응력의 영향을 매우 크게 받음을 확인할 수 있다. 포장체의 시공이 완료된 후 보조기층이 경험하는 변형률의 크기는 $10^{-2} \sim 10^{-1} \%$ 로 중간변형률 범위에 국한되지만, 시공단계에서 경험하는 변형률 크기와 변형특성을 평가하는 다양한 시험방법이 수행되는 변형률 크기의 범위는 매우 폭넓기 때문에 전체변형률 영역의 탄성계수 평가가 중요하다.

그림 4(b)는 그림 4(a)에 나타난 탄성계수를 최대 탄성계수(G_{max})로 정규화하여, 정규화탄성계수(G/G_{max})와 변형률 크기의 관계('정규화탄성계수 감소곡선'이라 칭한다)로 나타낸 것이다. '정규화탄성계수 감소곡선'은 변형률 크기가 증가함에 따라 탄성계수의 상대적인 감소 정도를 나타내는 것으로 시편의 교란정도, 함수비 변화, 간극비 변화 등의 영향을 거의 받지 않는 것으로 알려져 있어 실내시험 조건과 실제 현장조건을 결합하는 연결고리로 활용되고 있다(권기철 등, 2000; 한국지진공학회, 2004). 그림 4(b)의 결과를 보면 보조기층 재료의 정규화 탄성계수는 구속응력이 증가하면서 약간 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 실제 포장체에서 보조기층 재료가 경험하는 구속응력 범위가 크지 않으므로 정규화 탄성계수에 대한 구속응력의 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

국내 보조기층 재료의 정규화탄성계수 감소곡선을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에 나타난 정규화탄성계수 감소곡선은 본 연구에서 시험 수행된 결과와 국내 보조기층 재료에 대하여 권기철(1999)의 연구에서 발표된 결과를 함께 나타낸 것이다. 정규화탄성계수 감소곡선은 흙의 종류에 따라서 일정한 범위에서 결정되는 것으로 알려져 있어(Seed 등, 1970), 정규화탄성계수 감소곡선을 흙의 종류에 따라서 결정해 두면 변형률 크기에 따른 탄성계수의 영향을 손쉽게 고려할 수 있어 흙의 종류에 따른 다양한 곡선이 제

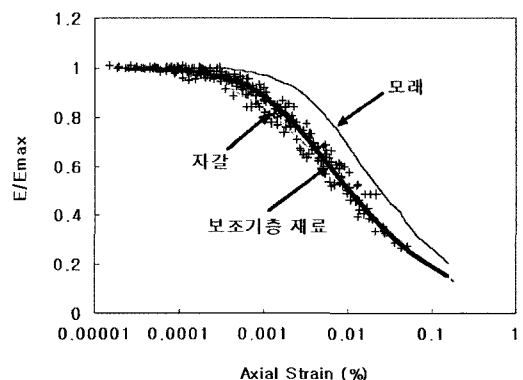


그림 5. 보조기층 재료의 정규화탄성계수 감소곡선



안되고 있다(Vucetic, 1994; Seed 등, 1984; 권기철 등, 2000). 그림 5에서 확인할 수 있듯이 국내 보조기층 재료의 정규화 탄성계수 감소곡선 또한 비교적 좁은 범위에서 분포하고 있음을 알 수 있다. 정규화탄성계수 감소곡선에 대한 가장 일반적인 회귀분석 모형인 Ramberg-Osgood 모델(식 (1))을 적용하여 회귀분석한 결과 $C=438.43$, $R=2.16$ 으로 평가되었으며, 그림 5에 국내 보조기층의 대표곡선과 다양한 흙에 대하여 제안된 정규화탄성계수 감소곡선을 함께 나타내었다. 제안된 국내 보조기층 재료의 대표 정규화탄성계수 감소곡선은 Seed 등(1984)이 자갈질 흙에 대해 제안한 곡선과 매우 유사함을 알 수 있다.

$$\varepsilon = (E/E_{\max}) \cdot \varepsilon + C(E/E_{\max})^R \quad (1)$$

여기서, ε = 전단변형률

(E/E_{\max}) = 정규화탄성계수

C, R = 모델계수

그림 6은 자유단공진주시험에서 결정된 구속응력에 따른 미소변형률 영역의 최대탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이, 그림 6의 결과에서도 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 구속응력의 영향은 매우 큼을 다시 한번 확인할 수 있다. 일반적으로 탄성계수에 대한 구속응력의 영향은 식 (2) 및 그림 6(a)와 같이 대수 구속응력의 증가에 따라 대수 탄성계수가 직선적으로 증가하는 것으로 모델하고 있다. 한편, 그림 6(b)는 그림 6(a)의 결과를 선형영역에서 표현한 것인데, 주목할 만한 것은, 시험이 수행된 구속응력 범위(실제 공용중 보조기층이 경험하는 응력 범위)에서는 선형영역에서도 좋은 직선의 상관관계를 나타내고 있다는 것이다. 그림 6(a)에 나타낸 선형영역의 결과를 직선의 관계로 표현하면 식 (3)과 같은 구속응력에 대한 모델이 성립한다.

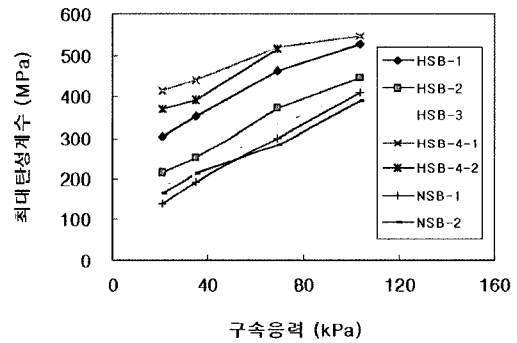
$$E = k_1(P)^{k_2} \quad (2)$$

여기서, E =탄성계수, P =구속응력, k_1, k_2 =모델계수

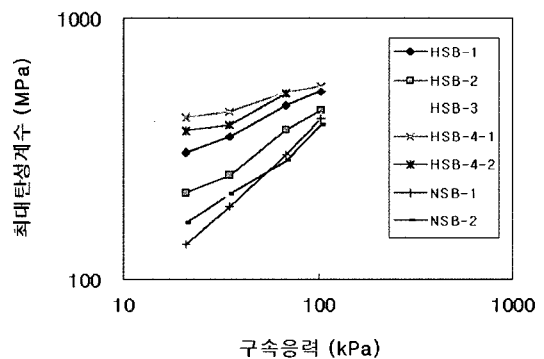
$$E = k_1 + k_2(P) \quad (3)$$

여기서, E =탄성계수, P =구속응력, k_1, k_2 =모델계수

그림 6에 나타난 결과에 대하여 대수모델 및 선형모델을 적용하여 회귀분석하면, 두 모델 모두 상관계수(R^2)의 평균이 0.98 이상으로 좋은 상관성을 유지하고 있다. 그러나 구속응력의 탄성계수에 대한 영향 정도를 나타내는 k_2 모델계수(그림 6의 기울기)의 변화폭이 선형모델의 경우 매우 좁은 범위(2694 - 3275)에서 결정되는 반면 대수모델에서의 변화의 폭(0.29-0.69)은 매우 넓어, 선형영역의 모델이 기존의 모델에 비하여 구속응력의 영향정도를 좀더 안

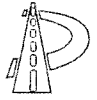


(a) 선형영역



(b) 대수영역

그림 6. 구속응력에 따른 최대탄성계수의 변화



정적으로 표현하는 것으로 판단된다. 또한 보조기층의 시공단계에서 현장시험을 수행하여 탄성계수를 평가한다면, 매우 작은 구속응력 단계의 탄성계수를 결정하게 되어, 공용상태 또는 실내시험의 구속응력 단계의 탄성계수로 전환하는 과정에서 기존의 모델을 적용하면 많은 오차를 내포할 가능성이 클 것으로 예상된다. 따라서 구속응력의 탄성계수에 대한 영향은 식 (2)와 같이 선형모델을 적용하는 것이 보다 합당할 것으로 생각된다.

그림 7은 변형률 크기에 따른 구속응력 모델계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7에서 세로축의 정규화 모델계수는 각 변형률 단계에서의 모델계수를 미소변형률 영역에서의 모델계수로 나눈 값이다. 그림 7의 결과는 그림 4(a)의 결과를 해석한 것으로서, 동일한 변형률 크기에서 구속응력의 크기에 따른 탄성계수의 변화를 대수모델(식 (2))과 선형모델(식 (3))을 적용하여 회귀분석한 결과이다. 두 모델 모두 미소변형률 영역의 최대탄성계수에서와 같이 중간변형률 영역에서도 회귀분석의 적합성(상관계수, R^2)은 상당히 우수하게 평가되었다.

그림 7을 통해서 확인할 수 있는 특이한 발견은, 변형률 크기에 따라서 모델계수(특히, 구속응력의 영향정도를 나타내는 k)는 변화하는 것으로 나타나고 있고, 어떠한 모델을 적용하느냐에 따라서 변형률 크기에 따른 모델계수의 변화의 양상이 상이하다는 것과, 선형모델의 경우 정규화된 모델계수의 변화형

태가 정규화탄성계수 감소곡선의 형태와 매우 유사하게 결정되고 있다는 것이다. 이러한 경향은 시험에 수행된 모든 시료에서 동일하게 나타났다.

동일한 시험자료에 대하여 회귀분석하였음에도 불구하고, 대수모델에서는 변형률 크기가 증가할수록 구속응력의 영향(k)이 증가하는 것으로, 선형모델을 적용하는 경우에는 변형률 크기가 증가할수록 구속응력(k)의 영향이 감소하는 것으로, 서로 상반되는 결과로 나타나고 있다. 이것은 탄성계수의 증가정도를 절대적인 값으로 평가하느냐(선형모델) 또는 증가의 비율로 평가(대수모델)하느냐의 차이에 기인한 것으로, 변형률 크기가 증가에 따라 구속응력의 변화에 따른 탄성계수 절대값의 증가 정도는 감소하지만 탄성계수의 증가비율은 증가하고 있기 때문이다. 모델계수(k_1, k_2)의 변형률 크기에 따른 변화특성에 대해서는 4.2절에서 보다 상세하게 검토하였다.

4.2 국내 보조기층 재료의 전체변형률 영역에서 탄성계수 구성모델

보조기층 재료의 탄성계수에 대한 구성모델은 매우 다양하게 제안되어 왔다(Rhee, 1991). 이러한 구성모델은 시험에 적용된 재료와 시험조건의 특성이 반영된 것으로 국내 보조기층 재료에 대하여 적용하기 위해서는 검증과정이 필요하다. 지금까지 알려진 대표적인 모델은 체적응력의 영향만을 고려한 체적응력 모델로 AASHTO에서도 이를 받아들이고 있으며 국내 보조기층 재료에 대해서도 적용성이 확인된 바 있다(건설교통부, 2002).

회복탄성계수는 구속응력의 영향과 변형률 크기의 영향을 동시에 받아서 결정된 것으로, 회복탄성계수 시험에서 체적응력은 특정한 범위에서의 구속응력과 변형률 크기(축차응력)를 동시에 고려하여 하나의 응력상태로 표현된 것이다. 이에 반하여 다양한 시험기법과 시공과정 중에 보조기층이 경험하는 응력조건은 회복탄성계수 시험조건(공용상태 보조기층 응력조건)과는 매우 상이하다. 그러므로 회복탄성계수

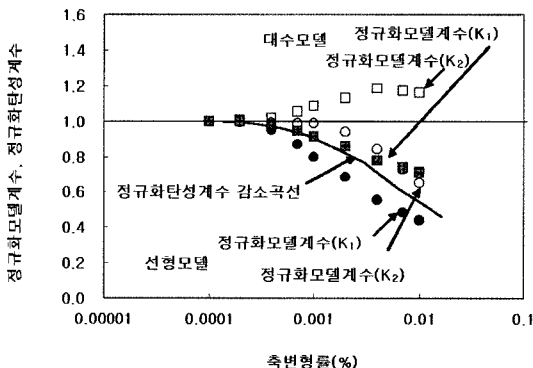


그림 7. 변형률 크기에 따른 구속응력 모델계수의 변화 일례(HSB-1)



에 대한 체적응력 모델을 다양한 시험조건에서 결정된 모든 탄성계수에 대하여 직접적으로 적용하기는 곤란하다. 따라서 다양한 응력조건, 다양한 시험기법에서 결정된 탄성계수에 대하여 일관적으로 적용할 수 있는 구성모델을 개발하기 위해서는 전체 변형률 영역에서 탄성계수에 대한 영향요소를 독립적으로 평가하여야 한다.

4.1절에서 검토한 바와 같이 국내 보조기층 재료의 탄성계수는 구속응력, 변형률 크기의 영향을 크게 받으며, 하중주파수, 하중반복횟수의 영향은 공학적 관점에서 무시 가능할 것으로 나타났다. 또한 정규화 탄성계수는 변형률 크기만의 함수이고 구속응력의 영향은 무시 가능한 것으로 나타났다. 따라서 전체 변형률 영역의 탄성계수는 최대탄성계수와 정규화탄성계수 감소곡선을 결합하여 표현할 수 있으며, 식 (4)와 같이 표현된다. 식 (4)에서 최대탄성계수에 대한 구속응력의 영향은 선형모델 또는 대수모델 모두가 적용 가능하며 정규화탄성계수 감소곡선은 변형률 크기만의 함수로 나타낼 수 있다.

$$E = E_{\max} \cdot f(\epsilon) \quad (4)$$

여기서, E = 탄성계수

E_{\max} = 최대탄성계수

$f(\epsilon)$ = 변형률 크기 영향의 함수(식 (1)의 Ramberg-Osgood 모델)

만일 식 (4)의 구성모델에서 최대 탄성계수에 대한 구속응력의 영향을 대수모델을 적용하면, 변형률 크기에 따른 정규화된 모델계수 k_1 은 $f(\epsilon)$ 과 일치하여야 하고, 모델계수 k_2 는 변형률 크기에 무관하게 일정한 값으로 나타나야 한다. 앞의 그림 7의 결과에서 나타내었듯이 정규화된 모델계수 k_1 의 변화는 $f(\epsilon)$ 과 상당히 일치하였으나 모델계수 k_2 는 변형률 크기에 따라서 일정하지 않고 증가하는 것으로 나타나고 있다. 식 (4)의 모델에서는 정규화탄성계수 감소곡선($f(\epsilon)$)에 대한 구속응력의 영향을 무시하고 변형률 크기의 함수만으로 가정하여 표현하고 있으나,

실제의 결과(그림 4)에서는 구속응력이 커지면서 정규화탄성계수가 미소하게 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 정규화탄성계수에 대한 구속응력의 영향을 고려하게 된다면 k_1 은 감소하고 k_2 는 증가하게 되어 실제 실험 자료와의 오차가 더욱 커지게 된다.

한편, 식 (2)의 구성모델에서 최대 탄성계수에 대한 구속응력의 영향을 선형모델을 적용하면 일정한 변형률 크기에서 정규화된 모델계수 k_1 및 k_2 모두 $f(\epsilon)$ 과 일치하여야 한다. 그러나, 그림 7에 나타내었듯이 정규화된 모델계수는 $f(\epsilon)$ 과 유사한 형태로 나타나고 있으나 k_1 은 정규화탄성계수보다 크게, k_2 는 정규화탄성계수보다 작게 평가하고 있다. 이러한 결과는, 앞서 언급한 바와 같이, 정규화탄성계수 감소곡선에 대한 구속응력의 영향을 무시하고 모델된 결과로 판단된다. 만일 구속응력의 증가에 따라서 정규화탄성계수가 증가하는 것을 고려한다면, 정규화된 모델계수 k_1 은 증가하고, k_2 는 감소하게 되어 $f(\epsilon)$ 과의 차이는 줄어들게 된다.

이상에서 검토한 바와 같이, 정규화탄성계수 감소곡선에 대한 구속응력의 영향을 고려하게 되는 경우 최대탄성계수에 대하여 선형모델을 사용하는 경우에는 오차의 정도가 줄어들게 되나 대수모델의 경우에는 오차가 더욱 증가하게 됨을 알 수 있다. 4.1절에서 서술한 선형모델의 장점과 함께, 이러한 관점에서도 최대탄성계수에 대한 구속응력의 영향을 선형모델을 적용하여 모델하는 것이 보다 합리적인 것으로 생각된다. 따라서 국내 보조기층 재료의 전체변형률 영역의 구성모델을 식 (5)와 같이 제안한다.

$$E = (k_1 + k_2(P)) \times f(\epsilon) \quad (5)$$

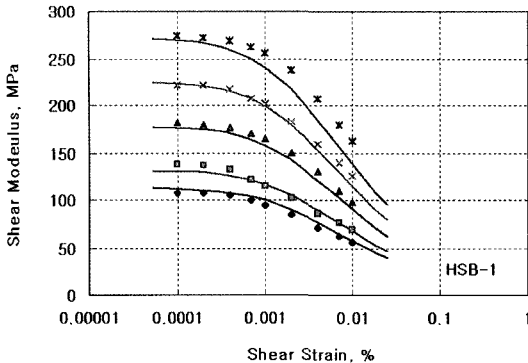
여기서, E = 탄성계수

P = 구속응력

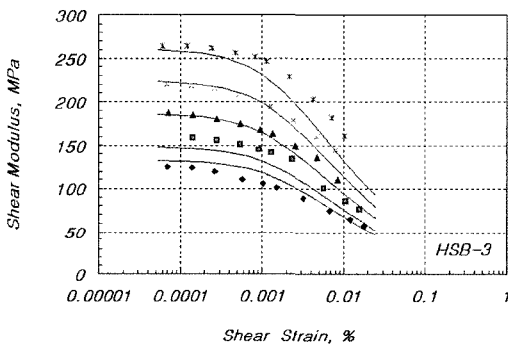
k_1, k_2 = 모델계수

$f(\epsilon)$ = 변형률 크기 영향의 함수(식 (1)의 Ramberg-Osgood 모델)

그림 8은 식 (5)의 모델을 적용하는 경우 예측된 탄성계수와 실험값의 비교를 나타낸 것이다. 미소변



(a) HSB-1



(b) HSB-3

그림 8. 제안된 구성모델을 적용한 탄성계수 예측 일례

형률 영역의 최대탄성계수는 비교적 잘 예측하고 있지만 변형률 크기가 커질수록 오차가 증가하고 있는데, 이는 제안된 구성모델이 변형률 크기의 영향과 구속응력의 영향을 독립적으로 고려하고 있고, 변형률 크기의 영향을 그림 5에 나타낸 국내 보조기층 재료의 대표곡선을 이용하였기 때문으로 판단된다.

식 (5)와 같이 제안된 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 구성모델은 변형률 크기의 함수를 포함하고 있어서 전체 변형률 영역의 탄성계수에 대하여 적용 가능한 장점이 있다. 따라서 서로 다른 변형률 범위에서 시험이 수행되는 다양한 시험기법(공진주시험, 반복재하식 MR 시험, FWD, SASW, 평판재하시험 등)의 통합적인 평가에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 변형률 크기에 대한 영향을 그림 5에 나타낸 대표곡선을 이용하여 반영한다면 최대탄성계수

를 평가하는 간편한 자유단공진주시험만으로 전체 변형률 영역의 탄성계수 평가가 가능하다.

5. 결 론

본 연구는 국내 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 구속응력, 변형률 크기, 하중주파수, 하중반복횟수의 영향을 자유단공진주시험, 공진주/비틀전단시험, 삼축압축시험을 통하여 검토하였다. 또한 변형특성 결과를 바탕으로 전체 변형률 영역의 탄성계수에 대한 구성모델을 제안하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 국내 보조기층 재료의 탄성계수는 구속응력, 변형률 크기의 영향을 크게 받으며, 하중주파수의 영향은 없는 것으로 나타났다.
2. 하중반복횟수의 영향은 미소변형률 영역에서는 없는 것으로 확인되었고, 중간변형률 영역에서는 하중반복횟수의 증가에 따라 탄성계수가 미소하게 증가하는 경향을 보였으나 공학적 관점에서 무시 가능한 수준으로 판단된다. 그러나 반복하중횟수에 따라서 소성 변형은 계속적으로 누적되는 것으로 나타났다.
3. 정규화탄성계수는 구속응력이 증가함에 따라서 미소하게 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 보조기층 재료가 경험하는 응력 범위에서는 구속응력에 따른 변화 정도가 작아, 정규화탄성계수 감소곡선을 변형률 크기만의 함수로 표현 할 수 있을 것으로 판단된다.
4. Ramberg-Osgood 모델을 적용하여 국내 보조기층 재료의 대표적인 정규화탄성계수 감소곡선을 제안하였다. 제안된 정규화탄성감소곡선은 Seed & Idriss(1980)이 제안한 자갈질 흙에서의 정규화탄성계수 감소곡선과 유사하게 결정되었다.
5. 보조기층 재료의 탄성계수는 구속응력의 영향을 대단히 크게 받는 것으로 나타났고, 회귀분석의 적합성은 선형모델과 대수모델 모두 우수한 것



로 나타났다. 그러나 선형모델을 적용하는 경우 모델계수 변화폭이 작아 구속응력의 영향정도를 좀더 안정적으로 표현하는 것으로 판단된다.

6. 정규화탄성계수 감소곡선 모델과 최대탄성계수 모델을 결합한 전체 변형률 범위의 구성모델을 제안하였다. 제안된 모델은 전체 변형률 영역을 포함하여 모델하고 있으므로 서로 다른 변형률 범위에서 시험이 수행되는 다양한 시험기법의 통합적인 평가에 활용성이 클 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 Korea Pavement Research Program(KPRP) 연구결과 의 일부로, 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2002), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구:포장 하부구조
2. 권기철 (1999), "변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법", 박사학위논문, 한국과학기술원.
3. 권기철, 김동수 (1999), "노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향", 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 29-34
4. 권기철, 김동수 (2000), "다양한 실내시험을 이용한 지반의 탄성계수 평가", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 345-352.
5. 권기철, 이광호, 박만도, 권순민 (2002), "현장시험을 통한 노상토의 비선형 탄성계수 평가", 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 255-262.
6. 김동수, 서원석, 권기철, 김형배 (2002), "크로스홀 및 공진주시험을 이용한 노상토의 현장 탄성계수 평가", 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 247-254.

7. 박태순, 최준성, 박재균 (2001), "회복탄성계수 측정을 위한 Portable FWD의 활용" 대한토목학회 학술발표회 논문집 pp. 1-4.
8. 서원석, 김동수, 권기철, 노한성 (2003), "반복식 평판재하시험을 통한 노상토의 비선형 탄성계수 평가" 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 333-340.
9. 최준성, 강규진, 김종민, 노한성, 김태수 (2002), "역학적 특성을 이용한 노상다짐도 평가를 위한 기초연구" 한국도로포장공학회 논문집, Vol. 4, No.1, pp. 271-276
10. 한국지진공학회 (2004), "지반구조물 내진설계" 제13회 기술강습회자료
11. AASHTO (1986), "AASHTO Guide for Design of Pavement Structure," AASHTO, Washington, D.C.
12. AASHTO (1993), "AASHTO Guide for Design of Pavement Structure," AASHTO, Washington, D.C.
13. Alarcon, A., Chameau, J. L., and Leonards, G. A. (1986), "A New Apparatus for Investigating the Stress-Strain Characteristics of Sands," *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 9, No. 4*, pp. 204-212.
14. 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.
15. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. S., and Sato, T. (1991), "A Simple Gage for Local Small Strain Measurement in the Laboratory," *Soil and Foundations, Vol. 31, No. 1*, pp. 169-180.
16. Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. (1978), "Shear Moduli of Sands Under



- Cyclic Torsional Shear Loading," *Soil and Foundation*, Vol. 18, No. 1, March, pp. 39-56.
17. Kim D. S., Kweon G. C. and Rhee S. (2001), "Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Subbase Soils Using Static Triaxial Test", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 38, No. 1, pp. 117-124.
18. Pezo, R. F., Kim, D. S., Stokoe II, K. H., and Hudson, W. R. (1991), "Developing a Reliable Resilient Modulus Testing System," Transportation Research Record 1307, Washington D. C., pp. 90-98.
19. 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.
20. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamics Response Analysis," Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.
21. 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.
22. Su, W. (1989), "Static Strength Evaluation of Cohesionless Soil with Oversize Particles", Ph.D Dissertation, Washington State University.
23. Sun, C. W. (1993), "Stiffness and Damping from the Frequency Response of a Free-Free Specimen," Master's Thesis GT93-8, The University of Texas at Austin.
24. 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.
25. Vucetic, M. (1994), "Cyclic Threshold Shear Strains in Soils," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 12, pp. 2208-2228.

〈접수 : 2004. 5. 25〉