

낮은 구속응력 단계에서 지반의 탄성계수에 대한 구속응력의 영향

The Effect of Confining Pressure on Modulus of Soils at Low Confining Pressures

권 기 철 Kweon, Gi-Chul

Abstract

The range of stresses experienced in subgrade soils and subbase materials in pavement under working stress conditions is below about 150kPa. Therefore, the deformational characteristics of soils at low confining pressures are important properties in the analysis and design of pavement system. Subgrade soils and subbase materials were collected from the actual pavement projects for testing. To evaluate the effect of confining pressure on modulus of those materials at low confining pressures, RC and FFRC tests were performed. Interestingly, the relationship between modulus of soils and confining pressure is more appropriate in linear space than in logarithm space at low confining pressure. Based on those results, new model for evaluating the effects of confining pressure on modulus at low confining pressures was proposed.

요 지

공용상태 포장에서 노상토 및 보조기층 재료가 경험하는 구속응력 범위는 150kPa 이내이다. 따라서 포장 시스템 설계 및 해석에서 낮은 구속응력 단계의 변형특성은 매우 중요한 물성치이다. 실제 포장시공 현장에서 노상토 및 보조기층 재료를 채취하였으며, 낮은 구속응력 단계에서 탄성계수에 대한 구속응력 영향 평가를 위하여 공진주시험(RC) 및 자유단공진주시험(FFRC)을 수행하였다. 흥미롭게, 낮은 구속응력 단계에서는 구속응력과 탄성계수의 관계가 대수공간보다는 선형공간에서 더욱 적합한 관계를 나타내었다. 이러한 결과를 근거로 낮은 구속응력단계에서 구속응력의 탄성계수에 대한 영향을 평가하는 새로운 모델을 제안하였다.

Keywords : Modulus of soils, FFRC, Low confining pressure, Pavement, RC, Subbase materials, Subgrade soils

1. 서 론

지반의 탄성계수는 지반의 변형해석 및 지반구조물의 동적거동 해석에 있어서 기본이 되는 입력물성치이다. 특히 포장 구조물에서는 포장체가 공용상태에서 경험하는 구속응력의 크기가 150kPa 이하의 낮은 구속응력으로 이 범위에서 엄밀한 탄성계수 결정이 중요하다(건설교통부, 2002; 한국도로공사, 1994; AASHTO, 1993).

탄성계수는 변형률 크기, 구속응력, 간극비, 함수비,

하중재하속도 등 매우 다양한 요소에 영향 받기 때문에 해석대상 지반이 경험하는 조건에 합당한 탄성계수를 결정하여야 한다(권기철 등, 2000). 탄성계수 결정에는 매우 다양한 시험기법이 적용되고 있는데, 각각의 시험조건이 서로 상이할 뿐 아니라 각 시험조건은 실제 지반거동 또는 해석조건과도 상이하다. 따라서 이러한 조건의 차이를 합리적으로 고려하여 해석의 입력 물성치를 결정해야 한다(권기철, 2000; 한국지진공학회, 2004). 시험조건과 해석조건의 차이를 보정하기

위해서는 영향요소에 대한 구성모델을 사용하고, 합리적인 보정을 위하여 사용재료의 특성에 합당한 구성모델을 적용하여야 한다.

탄성계수에 대한 구속응력의 영향은, 일반적으로, 구속응력의 대수적 증가에 따라 대수 탄성계수의 직선적 증가로 모델하는 것이 일반적이다(Rhee, 1991). 그러나 이러한 대수적 모델은 구속응력이 작은 단계에서는 구속응력의 영향을 매우 민감하게 반영하는 단점이 있다. 예를 들어 시험의 구속응력이 매우 작은 상태에서의 시험(평판재하시험 또는 얇은 깊이에서 수행된 크로스시험, 다운홀 시험 등)에서는 시험조건 구속응력 크기의 결정에서 약간의 오차가 발생하여도 해석에 적용되는 구속응력과의 차이(비율)가 크기 때문에 대단히 민감한 구속응력에 대한 보정이 이루어지게 된다(권기철 등, 2002). 따라서 낮은 구속응력 상태에서는 보다 엄밀한 구속응력의 영향 평가가 필요하다.

본 연구에서는 구속응력 150kPa 이하의 낮은 구속응력 범위에서 탄성계수에 대한 구속응력의 영향을 평가하였다. 시험시료는 낮은 구속응력을 경험하는 도로 노상토와 보조기층 재료로 하였고, 탄성계수 평가를 위하여 공진주 시험(RC)과 자유단공진주시험(FFRC)을 수행하였다. 아울러 보조기층 재료의 회복탄성계수 시험결과에 대하여 본 연구에서 제안된 모델의 적용성을 검토하였다.

2. 시험장치

2.1 공진주시험

본 연구에서는 Stokoe식 공진주시험기를 사용하였다(사진 1). 공진주시험의 기본원리는 원통형의 공시체에

진동수를 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 시험 방법이다(한국지진공학회, 2004).

2.2 자유단공진주시험

자유단공진주시험(FFRC)은 양단자유-추가질량(free-free with added mass) 조건에서 탄성파전달이론에 근거하여, 시편에 발생시킨 응력파(압축파 또는 전단파)에 대한 공진특성으로부터 미소변형률 영역의 Young계수와 전단탄성계수를 결정하는 시험기법이다. 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 ; Vaghela 등, 1995).

기존의 자유단공진주시험장치는 시편의 한쪽 면에 충격하중을 가하기 위하여 시편을 공기 중에 거치해야 하므로 구속응력을 진공압으로 재하하는 방식을 취하였다. 구속응력을 진공으로 재하함에 따라 100kPa 이상의 구속응력 단계에서의 시험이 불가능하였을 뿐 아니라 시편 내부에 균일한 구속응력을 확보하기 어려운 단점이 있었다. 본 연구에서는 그림 1과 같은 공기압으로 구속응력을 재하할 수 있는 자유단공진주시험장치를 개발하여, 구속응력의 적용범위에 대한 제약을 해결하였다. 개발된 시험장치는, 시편을 구속셀 내부에 설치하고 시편에 충격하중을 재하하는 방식을 적용하였다. 충격하중 재하시 구속셀 내부의 구속응력 변화를 억제하기 위

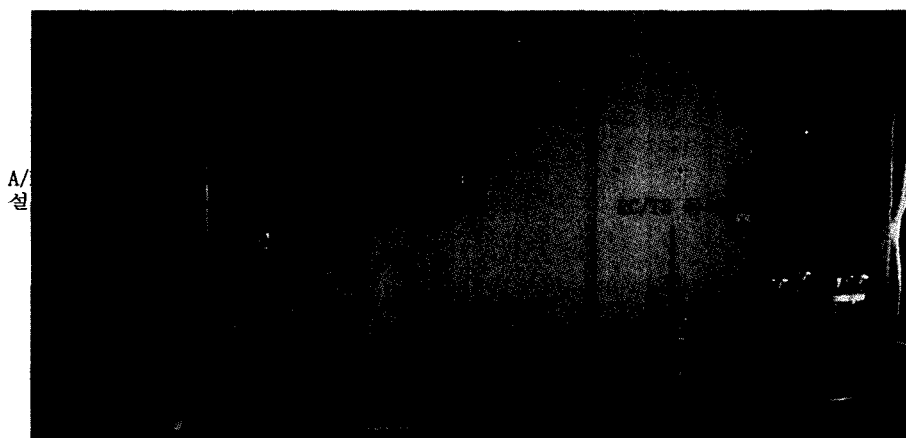


사진 1. 공진주시험장치 시스템 전경

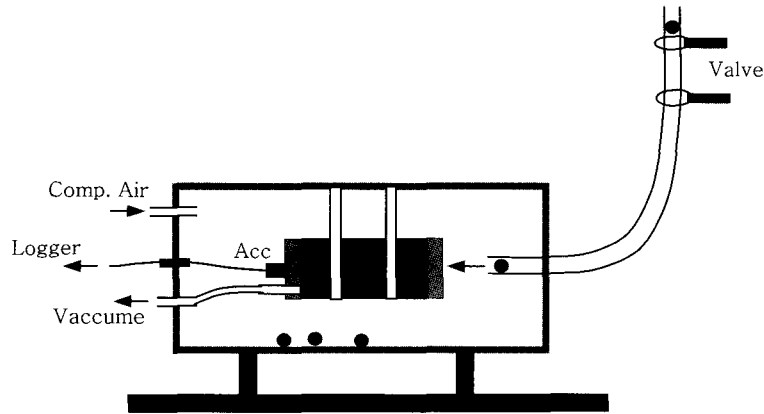


그림 1. 자유단공진주시험 장치 개요도

하여, 충격 하중원(본 연구에서는 쇱구슬 사용)을 구속셀과 연결된 관을 통하여 자유낙하 하도록 하였다. 우선 연결관의 안쪽 밸브를 닫고, 바깥쪽 밸브를 열어 쇱구슬을 연결관 내부에 두고, 바깥쪽 밸브를 닫는다. 이 상태에서, 밸브의 안쪽 밸브를 공기가 통할 정도로 약간 열면 쇱구슬이 보관된 작은 공간이 구속셀과 같은 압력 상태로 되며, 약간의 시간을 두어 구속응력의 변화를 안정시키고, 안쪽 밸브를 완전히 열면 쇱구슬이 연결관을 통하여 자유낙하 하여 시편의 한쪽 면을 타격하게 된다.

3. 시험시료 및 시험절차

3.1 시험시료

본 연구에서는 실제 도로포장 현장에서 사용되는 노상토 8종, 보조기층 재료 5종을 채취하여 시험에 사용하였다. 시험에 사용한 시료의 기초물성 특성은 표 1 및

표 2에 정리하였다. 시험에 사용한 노상토 시료는 모두 모래질 흙이고, 보조기층 재료는 입상의 재료인데, 이것은 국내에 사용되는 일반적인 노상토와 보조기층 재료에 해당한다.

노상토의 품질은 지방서에서 엄격하게 규정하고 있기 때문에 일반적인 자연토사에 비하여 양질의 토사가 사용되고 있다(Kweon 등, 2000; 건설교통부, 2002). 따라서 국내에서 사용되고 있는 노상토는 대부분 모래질 흙으로서 구속응력의 영향을 무시할 수 없는 특징을 가지고 있다(권기철, 2000). 그러나 이러한 엄격한 품질기준에도 불구하고 주변에서 노상토 재료의 확보에 큰 문제점이 없는 것은 국내의 지반이 대부분 확장풍화토로서 역학적으로 대단히 우수한 특성을 보이기 때문이다. 거꾸로 말하면 노상토 재료는 국내의 가장 일반적인 자연토사에 해당한다. 보조기층 재료의 경우에는 쇱석과 모래를 혼합하여 인공적으로 만들어 쓰는 것이 일반적이며 입상의 재료로서 구속응력의 영향을 대단히 크게

표 1. 노상토 시료의 기초물성 특성

Sample	HSG-1	HSG-2	HSG-3	HSG-4	HSG-5	HSG-6	HSG-7	NSG-1
Soil Type	SW	SP	SP	SP	SP	SP	SW	SW
	A-2-4		A-1-b		A-2-4	A-1-b		A-2-4
OMC (%)	8.7	9.2	10.2	18.2	11.2	13.5	8.5	19.0
#200 통과량 (%)	2.9	3.0	1.3	3.9	1.6	3.9	3.2	3.1
PI (%)	NP	6.1	NP	NP	7.9	NP	NP	7.6

표 2. 보조기층 시료의 기초물성 특성

Sample	HSB-2	HSB-3	HSB-4	NSB-1	NSB-2
Soil Type	SP	GW	GP	GW	GW
	A-1-a				
OMC (%)	6.7	6.8	6.5	8.7	8.0
PI (%)	NP				

받는 재료적 특성이 있다(건설교통부, 2002; 권기철 등, 1999; 이경하 등, 1997).

3.2 시험절차

HSG-2 시편에 대해서는 건조단위중량과 함수비를 변화시키며 시편을 성형하였고, 나머지 시료에 대해서는 최대 건조단위중량의 95%, 최적함수비(OMC)에서 시편을 성형하였다. 시편의 성형은 5층 과소다짐법을 적용하였다. 공진주시험에서는 직경 50mm, 높이 100mm의 시편을, 자유단공진주시험에서는 직경 71mm, 높이 150mm의 시편을 성형하였다. 시료의 최대입자는 시편 직경의 1/5 이하가 되도록 굵은 입자를 제거한 모델시료(matrix model 적용)를 사용하였다(Kim 등, 2001; Su, 1989).

다짐 성형된 시편의 양면을 석고로 얇게 단부처리를 하여 공진주시험장치에 거치하고, 멤브레인을 씌운 후 2시간 이상 석고를 경화시킨 후 시험을 수행하였다(Kim 등, 2000). 구속응력은 높은 구속응력부터 낮은 구속응력 순으로 적용하였고, 각 구속응력단계에서 구속압을 재하하고 1시간 이상 기다려 시료 내 구속응력이 균일하게 재하 되도록 하였다. 각 구속응력 단계에서 저변형률에서 고변형률로 변형률 크기를 증가시키며 공진주시험을 수행하였다.

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

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

4. 시험결과

그림 2는 자유단공진주시험에서 결정된 노상토의 구속응력에 따른 최대탄성계수의 변화를 나타낸 것이며, 동일한 시험결과를 선형영역(그림 2(a))과 대수영역(그림 2(b))에서 표현한 것이다. 현재까지 탄성계수의 영향 요소에 대한 다양한 구성모델이 제안되어 있으며, 구속응력(또는 평균주응력, 또는 체적응력)에 대한 영향은 식 (1)과 같은 형태를 기본으로 하고 있다(이경하 등, 1997; 한국지진공학회, 2004; AASHTO, 1993; Rhee, 1991; Uzan, 1985). 즉 대수영역(그림 2(b))에서 대수 구속응력과 대수 탄성계수를 직선으로 모델화 한 형태이다.

$$E = k_1 \left(\frac{P}{P_a} \right)^{k_2} \quad (1)$$

여기서, E = 탄성계수

P = 구속응력

P_a = 대기압

k_1, k_2 = 모델계수

그림 2(b)에 나타낸 것처럼 식 (1)과 같은 모델을 적용하는 경우 상관계수(R^2)의 평균이 0.961로 기존 모델의 충분한 적용성을 확인할 수 있다. 그림 2(a)는 선형영역에서 나타낸 것으로 직선의 관계로 모델한다면 식 (2)와 같은 형태를 갖게 된다.

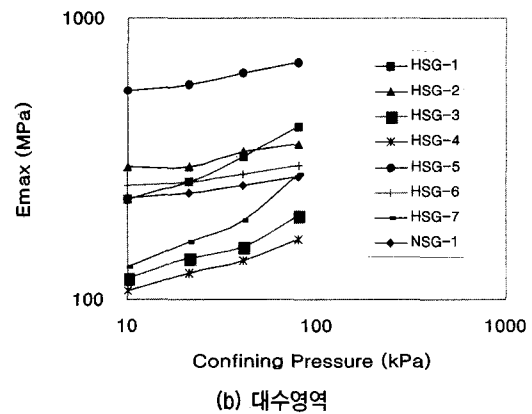
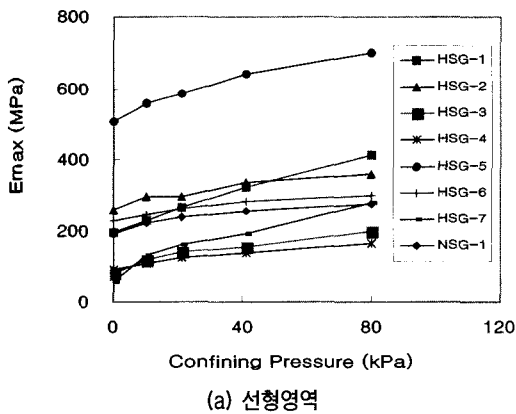


그림 2. 노상토의 구속응력에 따른 최대탄성계수의 변화

$$E = k_1 + k_2(P) \quad (2)$$

여기서, E = 탄성계수

P = 구속응력

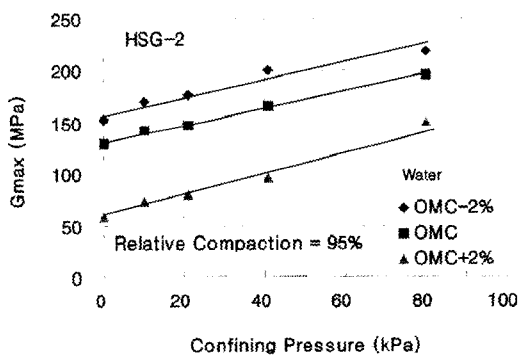
k_1, k_2 = 모델계수

식 (2)와 같은 모델을 적용하는 경우에 상관계수(R^2)의 평균은 0.974로 기존의 대수모델(식 (1))을 적용하는 경우와 유사한 예측의 신뢰도를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 대수모델(식 (1))의 경우에는 구속응력이 0인 상태에서의 값을 포함하여 회귀분석하는 것이 불가능할 뿐 아니라 구속응력 10kPa 이하의 범위에서 탄성계수 추정시 큰 오차를 내포하게 된다. 만일 다짐 노상토에서와 같이 구속응력이 매우 작은 시공단계에서 현장시험을 수행하여 탄성계수를 평가한다면, 공용상태 구속응력 단계의 탄성계수로 전환하는 과정에서 대수모델을 적용하는 경우 구속응력의 영향을 지나치게 민감하게 평가하는 오류를 범할 가능성이 높다(권기철 등, 2002). 이에 반하여 식 (2)와 같은 모델은 두 조건의 구속응력의 절대적인 차이 크기를 영향요소로 고려하므로 기존

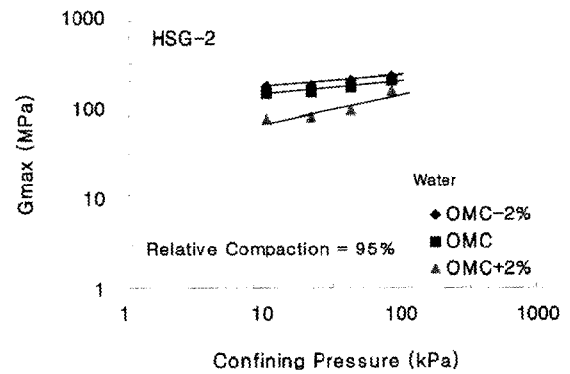
모델(대수모델, 두 조건에서 구속응력의 비율을 차이 고려)을 보다는 훨씬 적은 오차를 갖게 될 것이다.

그림 3 및 그림 4는 공진주시험에서 다짐시험의 함수비와 건조단위중량을 변화시키며 시험한 결과이다. 그림 2와 마찬가지로 동일한 시험결과를 선형영역과 대수영역에 표시한 결과이다. 그림 3에서 보듯이 구속응력이 탄성계수에 미치는 영향(그림 3의 기울기, 식 (1) 및 식 (2)의 k_2 모델계수)은 대수영역에서 함수비가 변화함에 따라 변화하는 것으로 나타나는 반면 선형영역에서는 일정한 기울기의 값으로 나타난다. 그림 4의 건조단위중량 변화에 따른 결과에서도 유사한 경향을 보이고 있다. 따라서 식 (2)와 같이 구속응력의 탄성계수에 대한 영향을 모델하는 경우에는 구속응력의 영향정도를 함수비와 건조단위중량의 변화에 무관하게 결정할 수 있는 장점이 있다. 이것은 식 (2)와 같은 제안된 모델을 적용할 경우 구속응력의 영향을 함수비와 건조단위중량에 무관하게 독립적인 영향요소로 고려할 수 있음을 의미한다.

그림 5는 자유단공진주시험에서 결정된 보조기층 재

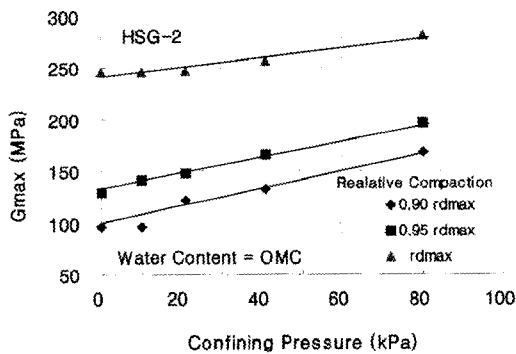


(a) 선형영역

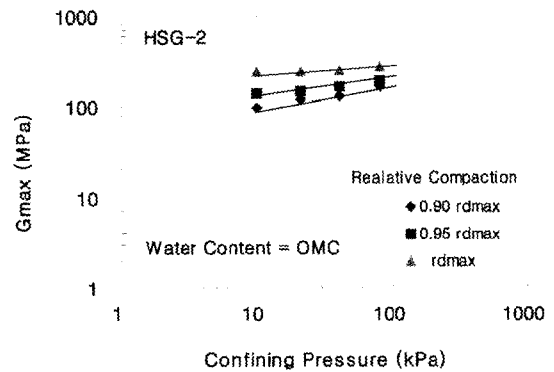


(b) 대수영역

그림 3. 함수비 및 구속응력 변화에 따른 탄성계수의 변화 일례



(a) 선형영역



(b) 대수영역

그림 4. 건조단위중량 및 구속응력 변화에 따른 탄성계수의 변화 일례

료의 구속응력에 따른 최대탄성계수의 변화이며, 동일한 시험결과에 대하여 선형영역(그림 5(a))과 대수영역(그림 5(b))에서 표현한 것이다. 대수모델과 제안된 모델에 적용할 경우 상관계수(R^2)의 평균은 각각 0.988과 0.986으로 유사하게 나타났다. 이러한 결과로부터 입상의 재료에 있어서도 낮은 구속응력 단계에서는 식 (2)와 같은 제안된 모델의 적용이 가능함을 확인하였다. 한편 구속응력의 탄성계수에 대한 영향정도를 나타내는 k_2 모델계수(그림 5의 기울기)의 변화폭이 제안된 모델의 경우가 기존의 모델에 비하여 작아 구속응력의 영향정도를 좀더 안정적으로 표현하는 것으로 판단된다.

그림 6은 권기철(1999)의 연구에서 발표된 반복재하식 회복탄성계수시험에서 결정된 보조기층 재료의 체적응력에 따른 회복탄성계수를 선형영역과 대수영역에서 나타낸 것이다. 회복탄성계수는 반복재하 하중이 작용할 때 중간변형률 영역에서 결정되는 탄성계수로서, 역

학적 포장 설계에 적용되는 기본 입력변수이다(AASHTO, 1993). 현재 가장 널리 사용되는 보조기층 재료의 구성 모델은 Biarez(1962)가 제안한 체적응력모델(그림 6(a))을 직선으로 모델이며 AASHTO 포장 설계법에서도 이를 적용하고 있다(AASHTO, 1993). 그림 6의 결과 값을 제안된 모델에 적용한 경우 기존의 대수모델을 적용한 것에 비하여 상관계수(R^2)의 평균이 약간 크게(체적응력모델, 0.967; 제안된 모델, 0.971) 나타났다. 따라서 식 (2)와 같이 제안한 형태의 선형모델을 중간변형률 영역의 탄성계수인 보조기층 재료의 회복탄성계수의 경우에도 적용 가능한 것으로 판단된다. 아울러 본 회복탄성계수 시험자료는 구속응력 138kPa, 체적응력 690kPa(평균주응력 230kPa) 범위에서 수행된 결과로 포장체에서 노상토 또는 보조기층 재료가 경험하는 구속응력 범위(150kPa 이내)를 포함하고 있다.

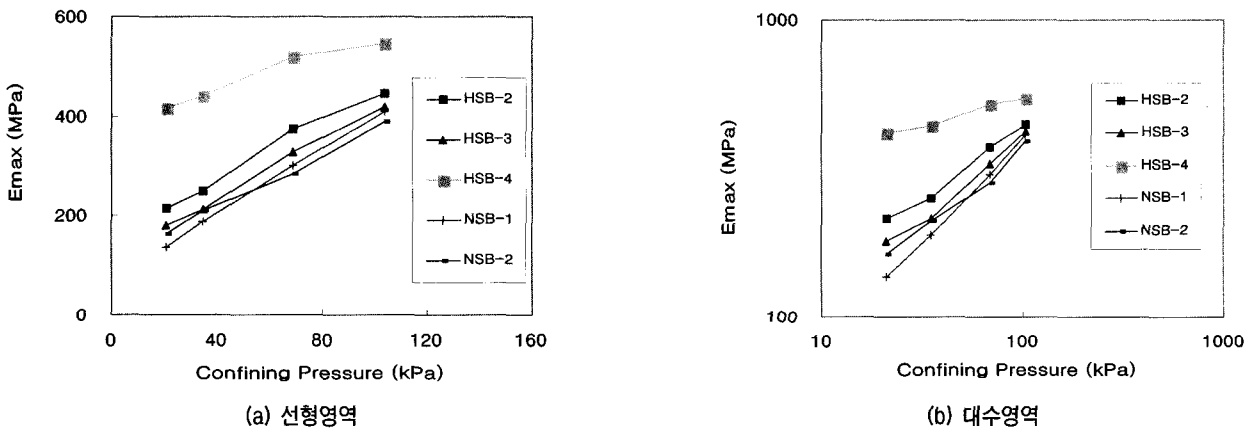


그림 5. 보조기층 재료의 구속응력에 따른 최대탄성계수의 변화

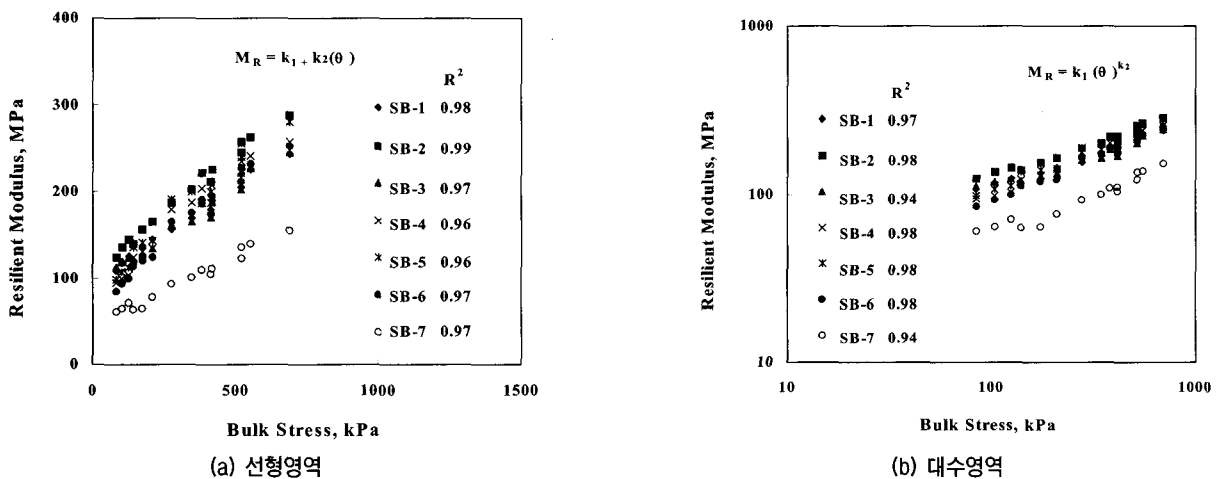


그림 6. 보조기층 재료의 체적응력에 따른 회복탄성계수의 변화 (권기철, 1999)

5. 결론

본 연구에서는 구속응력 150kPa 이하의 낮은 구속응력 범위에서 탄성계수에 대한 구속응력의 영향을 노상토와 보조기층 재료에 대하여 실험적으로 평가하였다. 시험결과로부터 구속응력의 탄성계수에 대한 새로운 모델을 제안하였고, 제안된 모델의 회복탄성계수에 대한 적용성을 검토하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 낮은 구속응력 범위에서 구속응력과 탄성계수는 선형영역에서 직선의 상관성이 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 구속응력의 탄성계수 영향에 대한 새로운 모델(식 (2))을 제안하였다.
- (2) 제안된 모델을 적용하는 경우 구속응력의 영향정도를 함수비와 건조단위중량의 변화에 무관하게 결정할 수 있는 장점이 있어, 탄성계수에 대한 구속응력의 영향을 함수비와 건조단위중량에 무관한 독립적 영향요소로 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 제안된 모델은 구속응력이 0인 상태를 포함하여 모델할 수 있어, 구속응력이 작은 범위(150kPa 이내)에서는 제안된 모델의 적용성이 기존의 대수모델에 비하여 우수한 것으로 판단된다.
- (3) 보조기층 재료와 같이 입상재료에 대해서도 제안된 모델의 적용성을 확인하였다. 또한 반복재하 하중이 작용할 때 중간변형률 영역에서 결정되는 입상재료의 회복탄성계수에 대해서도 제안된 모델의 적용성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 Korea Pavement Research Program(KPRP)의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2002), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선 방안 연구.아스팔트 포장 설계법 개발(하부구조 물성정량화)", KPRP-G-02.
2. 권기철 (1999), "변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법", 박사학위논문, 한국과학기술원.
3. 권기철 (2000), "국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델" 대한토목학회논문집, 제30권, 제 3-D호, pp.301-310.
4. 권기철, 김동수, 송무호 (1999), "국내 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수 특성", 대한토목학회 학술발표회 논문집(IV), pp.133-136.
5. 권기철, 김동수 (2000), "다양한 실내시험을 이용한 지반의 탄성계수 평가", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.345-352.
6. 권기철, 이광호, 박만도, 권순민 (2002), "현장시험을 통한 노상토의 비선형 탄성계수 평가", 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp.255-262.
7. 이경하, 이광호, 유충식 (1997), "보조기층 재료의 회복탄성계수 특성 분석", 대한토목공학회지 논문집, 제 17권, 제III-3호, pp.217-227.
8. 한국도로공사 (1994), "고속도로 아스팔트 포장 설계법 개선에 관한 연구", 도로연구소, 도로연 94-15-6.
9. 한국지반공학회 (2004), "지반구조물 내진설계", 제13회 기술강습회자료.
10. AASHTO (1993), "AASHTO Guide for Design of Pavement Structure", AASHTO, Washington, D.C.
11. Biarez, J. (1962), "Contribution a l'Etude des Propriétés Mecaniques des Sols et des maeriau Pulverulents", D.Sc. Thesis, University of Grenoble.
12. Kim, D. S and Kweon, G. C. (2000), "Calibration of Testing Equipments for Reliable Small-Strain Deformation Measurements Using Synthetic Specimens", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.23, No.4, pp.454-463.
13. 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.
14. Kweon G.C. and Kim D.S. (2000), "Deformational Characteristics of Subgrade Soils in Korea", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 83-90.
15. 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.
16. Su, W. (1989), "Static Strength Evaluation of Cohesionless Soil with Oversize Particles", Ph.D Dissertation, Washington State University.
17. 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.
18. Uzan, J. (1985), "Characterization of Granular Material, Analysis and Testing of Granular Base and Subbases", Transportation Research Record, No.1022, pp.1-9.
19. 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.

(접수일자 2004. 2. 11, 심사완료일 2004. 5. 20)