

# 공진주 시험을 이용한 국내 노상토의 강성도 특성 평가

## Evaluation of Stiffness Characteristics of Subgrade Soils in KOREA

김성수\* · 권기철\*\*

Kim, Sung-Soo · Kweon, Gi-Chul

### 1. 서 론

현재 국내에 적용되고 있는 포장 설계법에서는 하부구조(노상, 보조기층)의 설계입력 물성치를 CBR 등과 같은 강도특성 또는 경험적인 물성치를 초점으로 평가하고 있다. 그러나 CBR과 같은 경험적 특성치는 실제 포장체의 거동특성을 합리적으로 평가하지 못하고, 설계법이 개발되었던 조건과 상이한 조건에서 신뢰성 있게 적용하기 힘든 문제점이 있다.

'86 AASHTO 설계법이 발표된 이후 변형특성 개념의 회복탄성계수를 포장 구조체의 설계와 해석에 적용하고자 하는 많은 노력들이 있었다. 그러나 회복탄성계수에 대한 여러 장점들에도 불구하고 일관성 있고 대표성 높은 시험성과의 획득이 어려워 실제 포장 설계에 널리 이용되고 있지 못한 것이 현실이다. 과거의 CBR과 같은 경험적 특성의 한계를 극복하기 위해서는 변형특성 개념의 설계입력 물성치를 정량화 하는 것이 매우 중요하다. 특히, 한국형 포장 설계법 개발과 적용을 위해서는 국내 포장 하부구조의 변형특성에 대한 규명이 대단히 중요하고 필수적이다.

하부구조 재료의 변형특성에 대한 영향요소는 크게 재료적 요인(간극비, 함수비, 입도분포등)과 하중재하 조건(응력상태, 하중주파수, 변형률 크기 등)으로 구분할 수 있다(이석근, 1991). 이러한 다양한 영향요소에 대하여 외국의 시험결과를 직접적으로 적용하면 많은 오차를 내포할 가능성이 크므로 국내 재료의 역학적 특성이 고려된 설계입력변수 결정이 필요하다. 하지만 국내 하부구조 재료의 변형특성에 대한 시험자료가 거의 없는 상태로, 고유의 포장 설계법에 개발에 대단히 큰 장애 요인이 되고 있다.

본 연구에서는 현재 국내 고속도로 현장의 노상토에 대하여 다양한 영향요소를 고려한 변형특성을 규명하기 위하여 공진주/비틀전단 시험기를 통하여 실험을 실시하였다.

### 2. 시험 방법 및 시험 시료

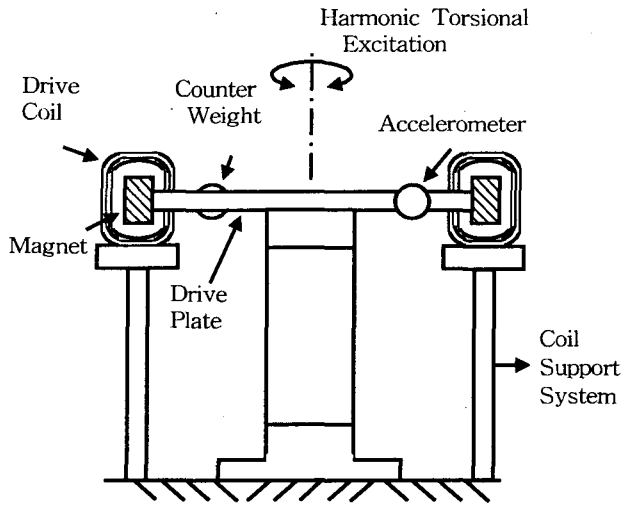
본 연구에서는 고속도로 현장에서 채취한 시료에 대하여 기초물성 시험과 변형특성 평가를 위한 공진주/비틀전단 시험을 실시하였다.

#### 2.1 공진주/비틀 전단 시험기의 장치 개요도

본 실험에서는 Stokoe식 공진주/비틀전단시험기를 사용하였으며, 공진주시험은 공시체의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 가진시스템(drive system)을 시험시편의 상부와 연결하여 지반재료에 비틀력을 재하한다. 비틀력에 의한 공시체의 거동은 가진판에 부착된 가속도계(accelerometer)를 이용하여 측정한다(<그림 2.1>).

\* 정희원 · 동의대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail: kims1209@lycso.co.kr - 발표자

\*\* 정희원 · 동의대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail: gogweon@dongeui.ac.kr

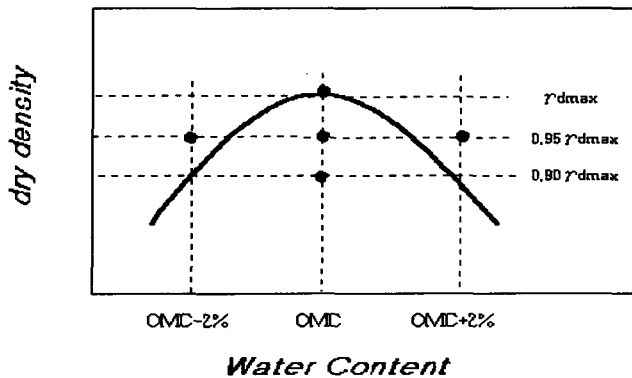


<그림 2.1> 공진주 시험기 개요도

공진주시험의 기본원리는 원통형의 시편에 진동수를 바꿔가면서 비틀(torsional excitation)을 가하여 1차 모드의 공진주파수( $f_r$ )와 진동의 크기( $A_r$ )를 구한 후, 시험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파 속도( $V_s$ ), 전단탄성계수( $G$ ) 및 전단변형율( $\nu$ )을 구하는 동적인 시험방법이다 (김동수, 1995).

### 2.2 시험조건

본 연구에서는 동일한 재료에 대하여 함수비와 건조단위 중량의 영향을 평가하고자 <그림 2.2>와 같은 조건에서 시험을 수행하였다. 동일한 건조단위중량에서 함수비를 변화시킨 경우와, 동일한 함수비에서 건조단위중량을 변화시킨 경우에 대하여 시험을 수행 하였다. 이러한 결과로부터 변형특성에 대한 응력조건과 재료조건 영향의 상호 관련성을 중점적으로 평가 하였다.



<그림 2.2> 시험에 적용한 시편의 시험 조건



### 2.3 시험 시료의 기초특성

시험시료의 기초특성은 <표 2.1>과 같다.

<표 2.1> 시험시료의 기초특성

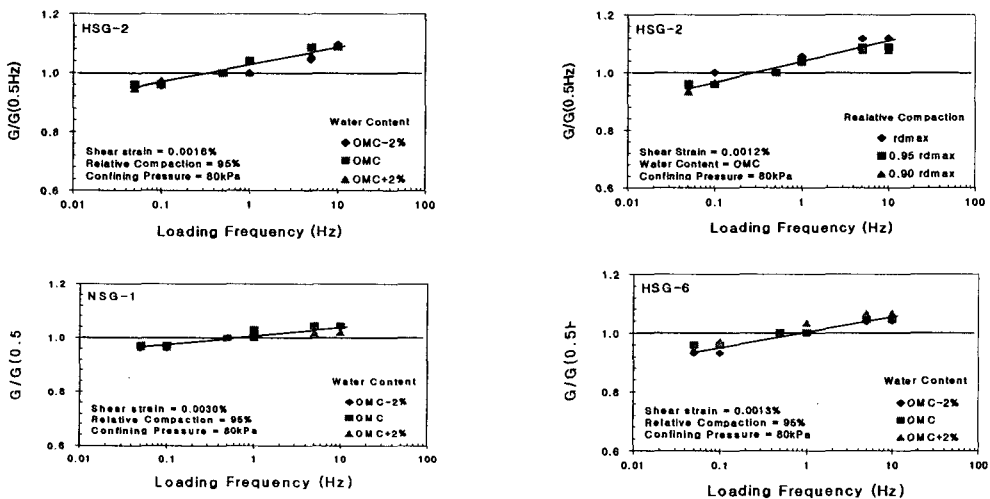
노상	재료적 특성											다짐 특성	
	최대 입경 (mm)	#4 통과량 (%)	#200 통과량 (%)	0.02 mm 통과량 (%)	균등 계수 (C <sub>u</sub> )	곡률 계수 (C <sub>c</sub> )	액성 한계 (LL, %)	소성 지수 (PI)	통일 분류	AASHTO 분류	비중	최대 건조 단위 중량 (t/m <sup>3</sup> )	최적 함수비 (%)
HSG-2	25.4	77.28	2.95	2.09	12.0	0.7	27.4	6.1	SP	A-2-4	2.62	2.182	8.3
HSG-6	18.0	95.90	3.90	-	10.0	0.8	-	N.P	SP	A-1-b	2.61	1.842	13.5
NSG-1	53.2	50.90	3.10	-	8.8	2.0	40.6	7.6	SW	A-2-4	2.49	1.650	19.0

### 3. 시험 결과

#### 3.1 하중 주파수에 대한 영향

비틀전단 시험에서 결정된 하중주파수의 변화에 따른 탄성계수의 변화를 살펴보면 <그림 3.1>과 같다. <그림 3.1>에 나타난 바와 같이 노상토의 탄성계수는 하중주파수의 영향을 다소 받고 있는 것으로 나타났다. 특히, 노상토의 경우에는, 변형률 크기에 따라서 하중주파수의 영향정도가 증가하는 것으로 나타나, 엄밀하게는 하중주파수의 영향과 변형률 크기의 영향을 독립변수로 분리 할 수 없는 것으로 나타나고 있다. 이에 반하여 건조단위중량의 변화나 함수비 변화에 따른 하중주파수 영향정도는 일정한 것으로 평가되고 있다.

한편, 권기철(1999)은 국내 노상토는 NP 이거나 소성지수 10%미만으로, 소성지수의 변화 폭이 크지 않고 하중주파수의 영향정도의 변화폭도 크지 않으므로, 하중주파수의 영향정도는 NP 노상토에 대하여는 4.2%, 소성지수가 10% 미만의 노상토에 대하여는 5.3%를 적용하는 것을 추천한 바 있다. 이와 같이 국내 노상토의 대부분이 사질성분을 다량 함유하고 있는 기초물성 분석결과를 감안하면, 노상토의 하중주파수의 영향은 소성지수로부터 판단하는 경험적 상관모델을 개발하여 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

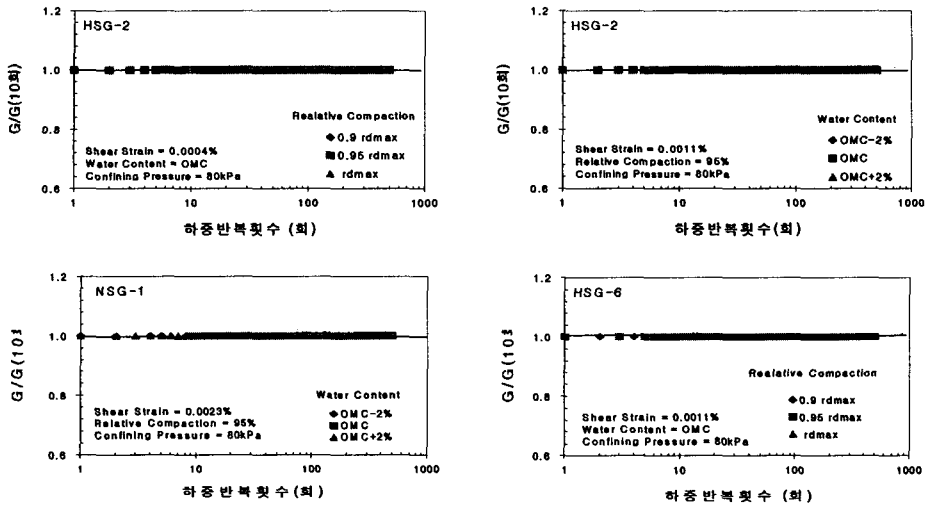


<그림 3.1> 하중주파수에 따른 변화



### 3.2 하중반복횟수에 따른 영향

그림<3.2>는 비틀전단시험에서 하중반복횟수 500회 동안의 탄성계수 변화 일례를 나타낸 것이다. 시편의 함수비가 변화하는 경우, 건조단위중량이 변화하는 경우, 시험의 변형률 크기가 다른 경우등 모든 경우에 있어서 하중반복횟수의 영향이 거의 없는 것으로 나타나고 있다. <그림 3.2>에 나타난 결과는, 시험이 수행된 변형률의 크기가 실제 포장하부구조가 경험하는 변형률 범위보다 작은 범위에 있으며, 중간 변형률 영역의 삼축압축 시험에서도 유사한 결론을 획득 하였다. 따라서 설계입력 변수결정을 위한 관점에서는 탄성계수에 대한 반복하중 횟수에 대한 고려는 필요 없을 것으로 판단된다. 다만, 초기하중 재하 단계에서는 탄성변형과 함께 상당한 정도의 소성변형이 유발되므로, 탄성계수의 결정은 재재하단계 또는 역재하 단계의 응력-변형 곡선을 이용하는 것이 필요하다.

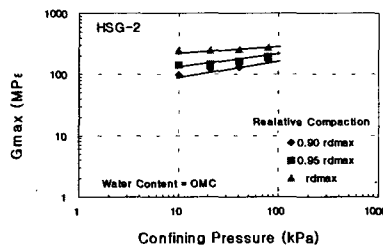


<그림 3.2> 하중반복횟수의 영향

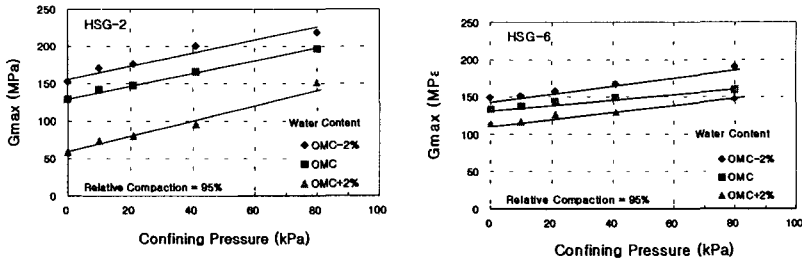
### 3.3 구속응력에 대한 영향

동일한 건조단위중량에서 함수비 및 구속응력에 따른 최대탄성계수의 변화는 <그림 3.3>, 동일한 함수비에서 건조단위 중량 및 구속응력에 따른 최대탄성계수의 변화는 <그림 3.4>에 나타내었다. 함수비의 변화와 건조단위 중량의 변화는 동일한 구속응력 상태에서 탄성계수에 매우 큰 영향을 주고 있음을 확인 할 수 있다. 함수비의 증가는 탄성계수를 감소시키고, 건조단위 중량의 증가는 탄성계수를 증가시키는 일반적으로 알려진 결과에 잘 부합되는 결과를 얻고 있다.

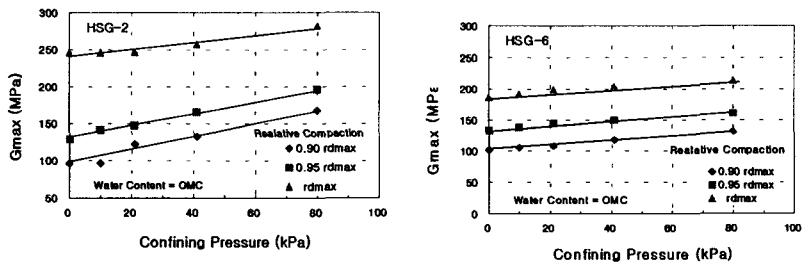
노상토의 경우에는 구속응력의 영향이 작은 것으로 알려져 있어, AASHTO T-294-92I에서는 노상토의 경우에 구속응력의 영향을 무시하고 축차응력의 영향만을 고려하는 구성모델을 적용하고 있다. 그러나 국내의 사질성분을 다량 함유한 노상토의 경우에는 구속응력의 증가에 따라 탄성계수의 증가정도가 상당히 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서, 노상토의 설계입력변수 결정과정에서 구속응력의 영향을 매우 중요하게 결정 할 필요가 있다.



<그림 3.3> 함수비 변화 및 구속응력에 대한 탄성계수의 변화



<그림 3.4> 함수비 변화 및 구속응력에 대한 탄성계수의 변화



<그림 3.5> 건조단위 중량 및 구속응력에 대한 탄성계수의 변화

일반적으로 탄성계수에 대한 구속응력의 영향은, <그림 3.3>과 같이 구속응력의 대수적 증가에 따른 최대탄성계수의 대수적 증가의 관계를 선형의 관계로 표현하고 있다. 그러나, 노상토가 경험하는 구속응력 범위에 국한하여 살펴본다면, <그림 3.4>와 <그림 3.5>에 나타난 바와 같이, 굳이 대수축으로 전환하지 않아도 좋은 선형의 관계를 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 노상토의 탄성계수에 대한 구속응력의 영향을 식 (3.2)와 같이 적용하는 것이 가능하다.

$$E = k_1 \left( \frac{P}{P_a} \right)^{k_2} \tag{3.1}$$

여기서,  $E$  = 탄성계수  
 $P$  = 평균주응력  
 $P_a$  = 대기압  
 $k_1, k_2$  = 모델계수

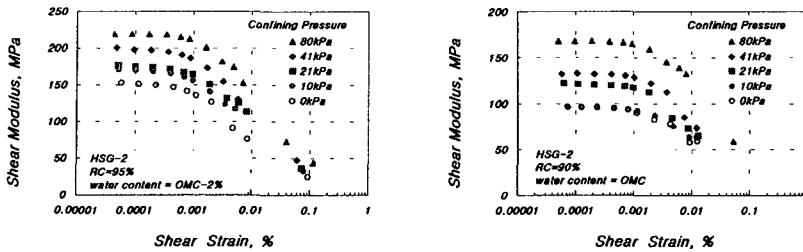
$$E = k_1 + k_2(P) \tag{3.2}$$

여기서,  $E$  = 탄성계수  
 $P$  = 평균주응력  
 $k_1, k_2$  = 모델계수

시공단계에서 현장시험을 수행하여 탄성계수를 평가한다면, 매우 작은 구속응력단계의 탄성계수를 결정하게 되어 공용상태 또는 실내시험의 구속응력 계의 탄성계수로 전환하는 과정에서 대수모델을 적용하는 경우 구속응력의 영향을 지나치게 민감하게 평가하는 오류를 범할 가능성이 크다. 이에 반하여 식 (3.2)와 같은 모델은 두 조건의 구속응력의 절대적인 차이 크기를 영향요소로 고려하므로 기존의 모델(대수모델, 두 조건에서 구속응력의 비율을 차이로 고려) 보다는 훨씬 적은 오차를 갖게 될 것이다.



3.4 변형률 크기에 따른 영향

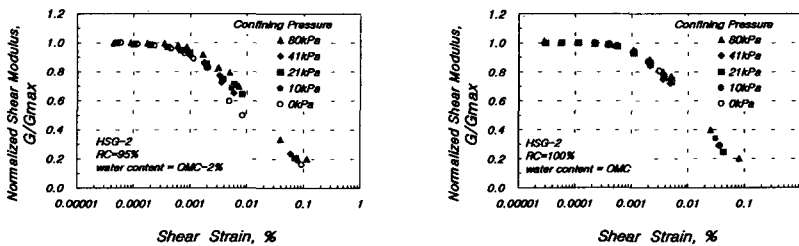


<그림 3.6> 공진주 시험에서 결정된 변형률 크기에 따른 탄성계수변화

<그림 3.6>는 공진주시험에서 결정된 변형률 크기 및 구속응력에 따른 탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 탄성계수는 일정 변형률 크기(선형한계변형률)까지는 일정한 값을 갖는 선형거동 특성을 보이고 있으며, 그 이후에는 변형률 크기가 증가함에 따라 탄성계수가 급격하게 감소하는 비선형 거동을 함을 확인할 수 있다. 따라서, 잘 알려진 바와 같이, 서로 다른 시험에서 결정된 탄성계수를 비교하기 위해서는 각 시험에서의 변형률 크기 차이를 고려하여야 한다.

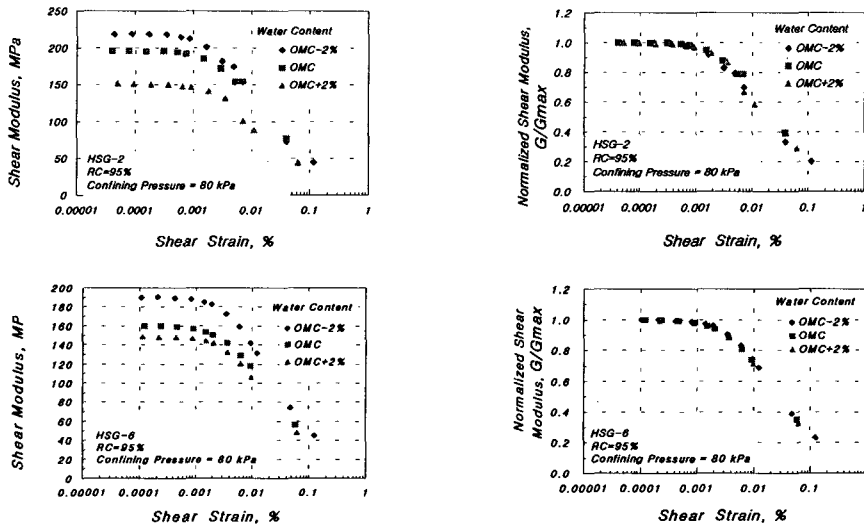
<그림 3.6>에 나타낸 바와 같은 변형률 크기에 따른 탄성계수 변화는 시료의 종류, 건조단위중량, 함수비, 구속응력, 하중 주파수, 등 매우 다양한 요소에 영향을 받는다. 그러나 탄성계수를 최대탄성계수로 정규화 하여 나타내면, 즉 변형률 크기에 따른 비선형 특성만을 검토하면, 시료의 교란, 하중 주파수, 함수비 등에 무관하게 일정한 범위에서 결정되는 것으로 알려져 있다.

서로 다른 구속응력에서 결정된 정규화탄성계수 감소곡선<그림 3.7>은 구속응력의 영향을 받아, 동일한 변형률 크기에서 구속응력이 증가할수록 정규화 된 탄성계수 값이 미소하게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 포장 하부구조가 공용 중에 경험하는 구속응력 범위에서는 변화 정도는 크지 않은 것으로 나타났다.

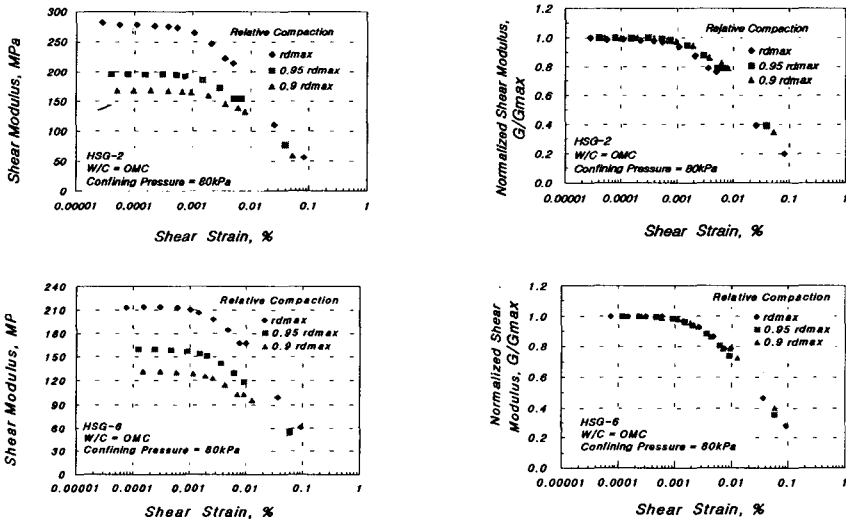


<그림 3.7> 구속응력에 따른 정규화탄성계수 감소곡선의 변화

이와 함께 동일한 구속응력 및 동일한 건조단위중량에서 함수비를 변화시키며 시험한 경우(<그림3.8>)와 동일한 구속응력 및 동일한 함수비에서 건조단위 중량을 변화 시키며 시험한 경우(<그림 3.9>)>의 정규화 탄성계수 감소곡선은 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 노상토의 비선형 특성(변형률 크기의 영향)은 구속응력, 함수비, 건조단위 중량의 변화와 무관하게 독립적인 영향요소로 결정할 수 있을 것으로 판단된다.



<그림 3.8> 함수비 변화에 따른 정규화탄성계수 감소곡선의 변화



<그림 3.9> 건조단위 중량에 따른 정규화탄성계수 감소곡선의 변화

4. 결론

- 1) 노상토의 탄성계수는 변형률 크기, 함수비, 건조단위중량, 구속응력의 영향을 받고 있으나 하중반복횟수에 대한 영향은 무시할 수 있는 수준으로 나타났다.
- 2) 노상토의 탄성계수는 변형률 크기가 증가함에 따라서 급격하게 감소하는 비선형 특성을 보이고 있음을 확인하였다. 한편, 변형률 크기에 따른 탄성계수로 정규화 하여 나타내면, 즉 정규화탄성계수감소곡선은 구속응력, 함수비, 건조단위중량의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타나 변형률 크기의 영향을 독립적인 영향



요소로 고려할 수 있음을 확인하였다.

- 3) 노상토의 탄성계수는 하중주파수가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으나, 증가의 정도는 미소하여 공학적인 관점에서는 무시할 수 있을 정도로 판단된다.
- 4) 구속응력의 증가에 따른 노상토의 탄성계수 증가 정도는 무시할 수준을 넘지 않은 것으로 판단된다. 따라서 일반적으로 노상토에 적용되는 축차응력 모델을 국내의 노상토에 대하여 적용하는 경우 상당한 오차가 있을 것으로 예상되며, 구성모델에 구속응력 또는 체적응력의 고려가 필수적인 것으로 판단된다. 또한 노상토가 경험하는 응력범위에서는 기존의 대수모델보다 본 연구에서 제안된 선형모델의 적요성이 뛰어난 것으로 확인 되었다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구:아스팔트 포장 설계법 개발(하부구조 물성 정량화)”의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 건설교통부(2002), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구:아스팔트 포장 설계법 개발(하부구조 물성 정량화)” 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. 김동수(1995), “공진주/비틀전단(RC/TS)시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성”, 한국지반공학회지, 제 11권, 제1호, pp 101-112
5. 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.
6. 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.
7. Seed, H. B., Robert, T. W., Idriss, I. M., and Tokimatsu, K.(1984) “Moduli and Damping Factors for Dynamics Analysis of Cohesionless Soils,” Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, UCB/EERC-84/14.