



노상토의 변형특성에 대한 함수비 및 건조단위중량의 영향

Effects of Water Content and Dry Unit Weight on Deformational Characteristics of Subgrade Soils

권 기 철* 오 명 주**
Kweon, Gi Chul Oh, Myeng Joo

Abstract

To evaluate the deformational characteristics of subgrade soils, four subgrade samples in Korea were tested using the RC and TS tests with various dry unit weight and water content. Both the maximum modulus and normalized modulus reduction curves of subgrade soils were affected by the dry unit weight. The normalized modulus was decreased about 20% with increasing of relative compaction of 5%. It was founded that the variations of modulus of subgrade soils in Korea were over 40% with water content variation of $\pm 2\%$, and those effects can be estimated by exponential model. However, the normalized modulus reduction curves were almost identical and independent of water content. It was also founded that confining pressure, loading frequency, dry unit weight, and water content have an affect on modulus of subgrade soils independently. Therefore, it can be considered that those effects are independent variables.

Keywords: subgrade soils, deformational characteristics, water content, dry unit weight

요 지

국내 노상토의 변형특성에 대한 건조단위중량과 함수비의 영향을 평가하고자 4종의 노상토에 대해 다양한 함수비 및 건조단위중량 조건에서 공진주/비틀림단시험을 수행하였다. 건조단위중량은 탄성계수는 물론 정규화탄성계수 감소곡선 모두에 영향을 주는 것으로 나타났다. 정규화 탄성계수는 다짐도가 5% 증가함에 따라 약 20% 감소하였다. 국내 노상토의 탄성계수는 함수비가 $\pm 2\%$ 변화 범위에서 40% 이상 변화하였으며, 지수모델을 적용하여 평가 할 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 정규화탄성계수 감소곡선은 함수비의 영향을 받지 않았다. 또한, 탄성계수에 대한 하중주파수 및 구속응력의 영향 특성은 시편의 건조단위중량과 함수비 변화에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타나 서로 독립적인 요소로 고려할 수 있음을 알았다.

핵심용어 : 노상토, 변형특성, 함수비, 건조단위중량

* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 부교수

** 정회원 · 동의대학교 토목공학과 박사과정



1. 서론

노상토의 탄성계수는 아스팔트 포장 및 시멘트 콘크리트 포장 모두에 있어서 역학적 포장 거동을 지배하는 대표적인 역학적 물성치로서 인정받고 있다. 현재 개발되고 있는 한국형 포장 설계법은 물론, AASHTO 포장 설계법에서도 회복탄성계수를 노상토의 기본 설계입력변수로 채택하고 있다(건설교통부, 2002; AASHTO, 1986).

노상토 재료의 탄성계수에 대한 영향요소는 재료적인 요인과 시험조건으로 대별된다. 재료적 요인으로는 건조단위중량(간극비), 함수비, 다짐방법 등이 있으며, 시험조건 영향인자에는 구속응력, 축차응력(변형률 크기), 하중재하속도, 하중반복횟수, 배수조건 등이 있다.

포장 설계입력변수인 노상토의 탄성계수를 평가하는 방법은 역학적 시험으로부터 직접 결정하는 경우와 지수물성치로부터 경험적 상관 모형을 이용하여 추정하는 방법으로 대별된다. 역학적 시험으로 탄성계수를 결정하는 경우에는 시편의 건조단위중량, 함수비 등을 현장조건과 동일하게 또는 유사하게 제작·사용하게 되므로 변형특성에 대한 재료적 요인은 시편 성형과정에서 반영된다. 이에 반하여, 경험적 상관모형을 사용하는 경우에는 재료적 요인에 의한 영향정도를 미리 파악 해 두어야 한다. 노상토의 탄성계수를 역학적 시험을 통하여 직접 결정하는 경우나 경험적 상관모형을 사용하는 경우 모두에 있어서 탄성계수에 대한 구성모델을 결정해 두어야 한다. 사용 재료에 합당한 구성모델은 해당 재료의 탄성계수에 대한 재료적 요인을 포함한 다양한 영향요소를 효과적으로 고려하고 있어야 한다.

포장 하부구조 재료의 기본 입력변수를 탄성계수로 사용함에 따라, 시공과정의 품질관리는 물론 기존 포장의 유지관리에서도 탄성계수를 기준 물성치로서 적용하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다(김동수 등, 2005; 최준성 등, 2003). 설계단계, 시공단계 그리고 유지관리 단계에서 탄성계수를 평가하는

시험방법이 서로 상이하고, 재료적 요인 또한 서로 상이한 경우가 발생한다. 따라서 모든 단계에서 결정되는 탄성계수를 통합적으로 평가하기 위해서는 탄성계수에 대한 재료적 요인과 시험조건 영향인자 모두에 대한 변형특성을 평가해 두는 것이 중요하다.

국내 노상토 재료에 대한 주요 영향인자로는 건조단위중량, 함수비, 구속응력, 축차응력(변형률 크기)인 것으로 밝혀진 바 있다(건설교통부, 2002; Kweon 등, 2000). 본 연구에서는 시편의 건조단위중량과 함수비를 변화시켜 시편을 성형하여 구속응력, 변형률 크기, 하중주파수에 따른 공진주/비틀진 단시험을 수행하였다. 시험결과로부터 국내 노상토의 탄성계수에 대한 건조단위중량과 함수비의 탄성계수에 대한 영향을 평가하고, 시험조건 영향인자와의 상호 관련성을 검토하였다.

2. 실내시험

2.1 시험시료

본 연구에서는 현장에서 실제 시공하고 있는 4종의 노상토를 채취하여 시험을 수행하였다. 채취한 시료는 입도시험, 다짐시험, 액·소성한계시험, 비중시험 등 기초 물성시험과 함께 다짐시험을 수행하였다. 시험에 사용한 노상토 시료의 기초 물성치를 정리하면 표 1과 같다. 국내의 노상토는 대부분 모래 또는

표 1. 노상토 시료의 기초 특성

구분	입도특성				PI (%)	Soil Type		다짐특성 (D 다짐)		
	#4 통과 (%)	#200 통과 (%)	균등 계수 (C _u)	곡률 계수 (C _c)		USCS	AASHTO	비중	γ _{dmax} (t/m ³)	OMC (%)
HSG-2	77.28	2.95	12.0	0.7	6.13	SP	A-2-4	2.63	2.100	9.2
HSG-5	69.60	1.60	15.6	0.5	7.85	SP	A-2-4	2.60	2.008	11.2
HSG-6	95.90	3.90	10.0	0.8	N.P	SP	A-1-b	2.61	1.842	13.5
NSG-1	50.90	3.10	8.8	2.0	7.6	SW	A-2-4	2.49	1.650	19.0



실트질 모래로 보고되고 있다(건설교통부, 2002). 본 연구에서 사용된 노상토 시료 또한 모래질 흙으로서 국내에 사용되는 일반적인 노상토에 해당한다.

2.2 공진주/비틀전단시험 장치 및 시험절차

본 연구에서는 Stokoe식 공진주/비틀전단시험기를 사용하였다. 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 전단 변형률을 구하는 시험방법이다(한국지반학회, 2006).

시편의 크기는 직경은 50mm, 높이는 100mm를 사용하였으며, 5층의 과소다짐법으로 성형 하였다. 다짐함수비와 시편의 건조단위중량은 그림 1과 같이 조절하였다. 다짐함수비는 95%의 다짐도 조건에서 최적함수비와 최적함수비-2%, 최적함수비 +2% 3종으로 조절하였다. 다짐함수비의 변화 범위를 $\pm 2\%$ 로 한 것은 국내 노상토의 함수비 변화 범위를 반영한 것이다(한국도로공사, 1994). 한편, 건조단위중량은 최적함수비 조건에서 다짐도 100%, 95%, 90% 3단계로 조절하였다. 정리하면, 시험에 사용된 변수는 시편의 성형조건으로 건조단위중량 및 다짐함수비, 그리고 시험조건으로 구속응력, 변형률 크기, 하중주파수를 적용하였다.

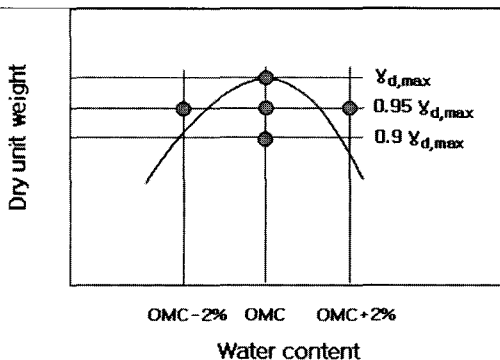


그림 1. 시험에 사용된 시편의 건조단위중량 및 함수비 조건

다짐 성형된 시편의 양면을 석고로 얇게 단부처리를 하여 공진주시험장치에 거치하고, 멤브레인을 씌운 후 2시간 이상 석고를 경화시킨 후 시험을 수행하였다. 구속응력은 80, 41, 21, 10, 0kPa 다섯 단계를 적용하였으며, 높은 구속응력부터 낮은 구속응력 순으로 시험을 수행하였다. 이러한 구속응력의 크기는 실제 포장 시스템에서 노상토가 경험하는 응력 범위를 반영한 것이다(건설교통부, 2002). 각 구속응력단계에서 구속압을 재하하고 1시간 이상 기다려 시료 내 구속응력이 균일하게 재하 되도록 하였다. 각 구속응력 단계에서 하중주파수에 따른 비틀전단 시험을 수행한 저변형률에서 고변형률로 변형률 크기를 증가시키며 후 공진주시험을 수행하였다.

3. 변형특성에 대한 건조단위중량 및 함수비의 영향

특정한 건조단위중량 및 다짐함수비로 성형된 시편에 대한 공진주/비틀전단시험에서는 구속응력, 변형률 크기, 하중주파수에 따른 전단탄성계수를 얻는다. 본 연구에서는 탄성계수의 크기 변화를 의미하는 미소변형률 영역에서의 최대 탄성계수에 대한 영향과, 변형률 크기에 따른 비선형 특성을 나타내는 정규화탄성계수 감소곡선에 대한 영향을 분리하여 평가하였다.

그림 2는 건조단위중량 및 구속응력에 따른 최대

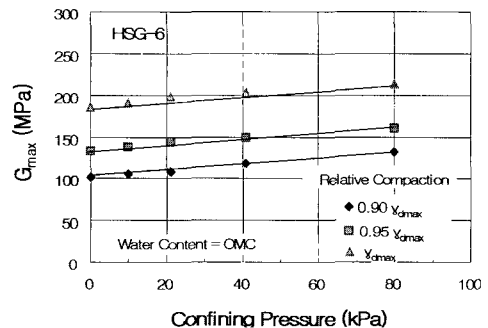


그림 2. 건조단위 중량 및 구속응력 변화에 따른 최대탄성계수 변화 일례



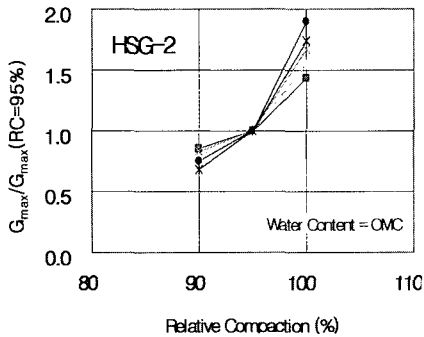
탄성계수 변화 일례를 나타낸 것이다. 그림으로부터 건조단위중량과 구속응력이 증가할수록 탄성계수가 증가함을 확인 할 수 있다. 흥미롭게도 탄성계수에 대한 구속응력의 영향정도(그림에서 기울기)는 건조단위중량의 변화에 약간의 차이는 있으나 그 변화의 정도가 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 동일한 재료에서는 시편의 건조단위중량변화와 무관하게 일정한 구속응력 영향계수를 사용하여도 무방한 것으로 판단된다.

그림 3은 다짐도의 변화에 따른 최대탄성계수의 상대적인 변화를 나타낸 것이다. 각각의 구속응력 단계에서 95% 다짐도 시편의 탄성계수로 건조단위중량 변화에 따른 탄성계수를 정규화하여 표시하였다. 그림 3(a)에서 보듯이 건조단위중량이 증가함에 따라 탄성계수가 증가하고 있음을 알 수 있는데, 다짐

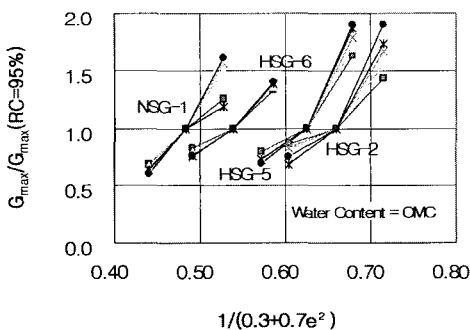
도 95%에서의 탄성계수 값에 비하여, 다짐도가 90%일 때는 평균 26% 감소하였으며, 다짐도가 100%로 증가하면 평균 56% 증가하는 것으로 나타났다. 다짐도가 증가 할수록 탄성계수는 매우 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

탄성계수에 대한 건조단위중량(간극비)의 영향을 포함하는 대표적인 구성모델로 Hardin(1978) 모델이 있다. Hardin 모델에서는 탄성계수에 대한 간극비의 영향을 $1/(0.3+0.7e^2)$ 함수에 대하여 직선적인 관계로 모델하고 있다. 그림 3(b)는 Hardin 모델의 적용성을 검토하기 위하여 건조단위중량의 변화를 $1/(0.3+0.7e^2)$ 로 변환하여 나타낸 것이다. 만일 건조단위중량의 영향에 대한 Hardin 모델이 합당하다면 그림 3(b)의 결과는 직선으로 나타나야 한다. 그러나 그림에서 확인 할 수 있듯이 $1/(0.3+0.7e^2)$ 에 따른 탄성계수의 변화가 직선의 관계로 나타나지 않고 있다. 따라서 국내 노상토에 대해서는 건조단위중량의 영향을 Hardin 모델을 사용하여 평가하기는 어려울 것으로 판단된다.

함수비 변화에 따른 최대탄성계수의 상대적인 변화를 그림 4에 나타내었다. 최적함수비 조건에서의 최대탄성계수를 기준으로 다짐 함수비 변화에 따른 최대탄성계수를 정규화하여 표시하였다. 그림 4를 통하여, 다짐 함수비가 증가할 수 록 탄성계수가 감소함을 확인 할 수 있으며, 시료에 따라서 함수비의 영향정도가 차이 났으나, 시료의 수가 작아 시료의 기초물성 특성과 의미 있는 상관성은 발견하지 못하였다. 본 연구에서 사용한 모든 노상토 재료에서는,



(a) 다짐도에 따른 최대탄성계수의 상대적인 변화



(b) $1/(0.3+0.7e^2)$ 에 따른 탄성계수 변화

그림 3. 건조단위중량에 따른 최대탄성계수 변화

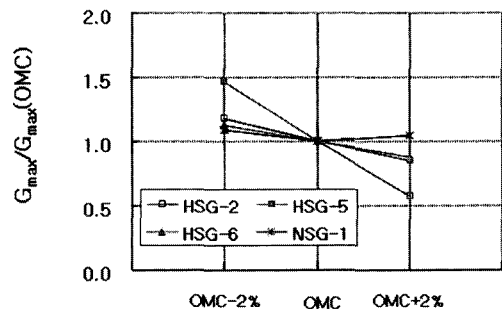


그림 4. 함수비에 따른 최대탄성계수 변화



최적함수비 조건에서의 탄성계수 값에 비하여, 함수비가 2% 증가하면 평균 23% 감소하였으며, 함수비가 2% 감소하면 평균 21% 증가하는 것으로 나타났다.

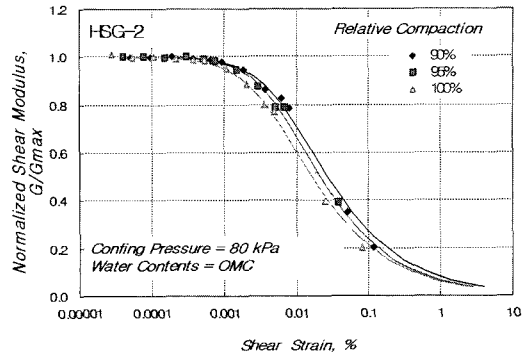
탄성계수에 대한 함수비 영향 모델은, 표 2에 정리한 바와 같이, 크게 선형모델, 포물선 모델, 지수모델이 있다(Witczak 등, 2000). 모든 모델이 최적함수비 상태와 특정 함수비 상태에서의 탄성계수와의 비율을 모델하고 있다. 이것은 구속응력과 축차응력의 영향을 지수형태의 함수로 고려하는 일반적인 구성모델과 결합성을 고려하여 개발되었기 때문이다.

표 2. 함수비 영향에 대한 구성모델 형태

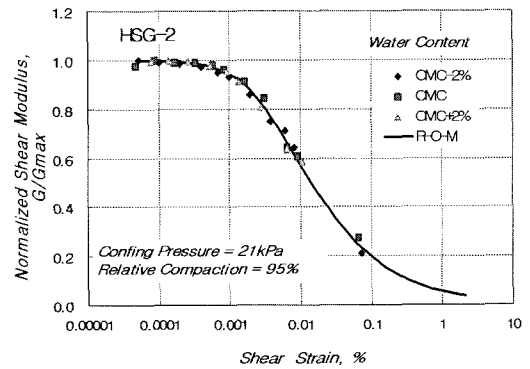
구분	모델형태
선형모델	$\frac{E}{E_{opt}} = 1 + k_1(w - w_{opt})$
포물선모델	$\frac{E}{E_{opt}} = 1 + k_1(w - w_{opt}) + k_2(w - w_{opt})^2$
지수모델	$\frac{E}{E_{opt}} = 10^{k_w(w - w_{opt})}$

선형모델과 지수모델은 하나의 모델계수를, 포물선 모델은 두 개의 모델계수를 사용하고 있다. 그림 4를 통하여 알 수 있듯이 함수비에 따른 탄성계수 변화가 선형적으로 변화하지 않으므로 선형모델을 적용하여 함수비 영향을 평가하기는 힘들 것으로 생각된다. 시험에 사용한 함수비 변화의 수와 시료의 수가 작아서 포물선 모델 및 지수모델의 적용성을 엄밀하게 평가하는 것은 불가능하였다. 그러나 지수모델의 경우에는 2002 AASHTO 설계법에서 채택하고 있고, 포물선 모델에 비하여 모델계수가 작은 장점이 있어 국내 노상토에 대해서 잠정적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 5는 건조단위중량 및 함수비 변화에 따른 정규화탄성계수 변화 일례를 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 보듯이 건조단위중량이 증가할수록 동일한 변형률 크기에서 정규화탄성계수가 감소하는 경향을



(a) 건조단위중량 변화에 따른 정규화탄성계수 감소곡선 일례



(b) 함수비 변화에 따른 정규화탄성계수 감소곡선 일례

그림 5. 건조단위중량 및 함수비 변화에 따른 정규화탄성계수 감소곡선 일례

나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 건조단위중량이 증가할수록 정규화탄성계수 감소곡선이 왼쪽으로 이동하는 경향을 나타내고 있다. 정규화탄성계수 감소곡선이 시편의 건조단위중량(다짐도)의 영향을 받으므로 재성형 시편을 이용하여 정규화탄성계수 감소곡선을 결정하는 경우에는 시편의 건조단위중량을 현장조건과 일치시키는 것이 필요한 것으로 판단된다.

한편, 그림 5(b)에서 보듯이, 함수비에 따른 정규화탄성계수 감소곡선은 함수비 변화에 무관하게 일정하게 결정됨을 확인할 수 있다. 따라서 정규화탄성계수 감소곡선을 시험적으로 결정하는 경우, 시편 성형과정의 다짐 함수비를 현장조건과 일치시킬 필요는 없다. 또한 년중 노상토의 함수비 변화에 무관하게 하나의 정규화탄성계수 감소곡선을 적용할 수 있



을 것으로 판단된다.

그림 5(a)에 일례로 나타내었던 다짐도 변화에 따른 정규화탄성계수 감소곡선의 변화를 정량적으로 평가하고자, 0.02%의 변형률에서의 정규화탄성계수(G/G_{max}) 값을 건조단위중량에 따라서 그림 6에 나타내었다. 95% 다짐도를 기준으로 할 때 다짐도가 100%로 증가하면 정규화탄성계수는 최대 20% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 흥미로운 것은 시편의 종류에 무관하게 다짐도의 변화에 따른 정규화탄성계수의 감소정도(그림 6에서 기울기)는 유사하게 나타나고 있다는 것이다. 따라서 보다 많은 시험자료를 확보한다면, 건조단위중량(다짐도)에 따른 정규화탄성계수 감소곡선의 영향정도를 신뢰성 있게 예측할 수 있는 경험모형 개발이 가능할 것으로 생각된다.

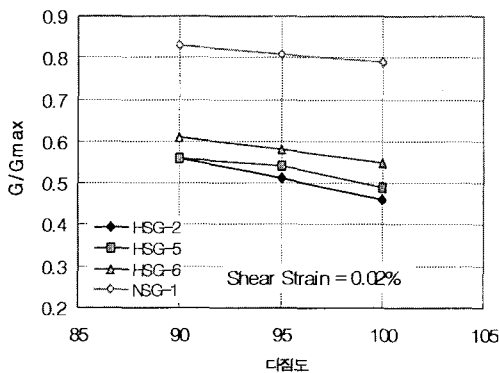
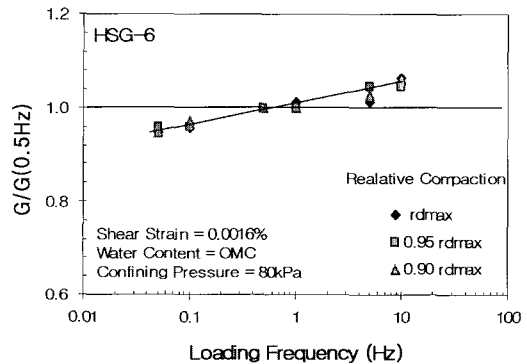


그림 6. 0.02% 변형률 크기에서 다짐도에 따른 정규화탄성계수 변화

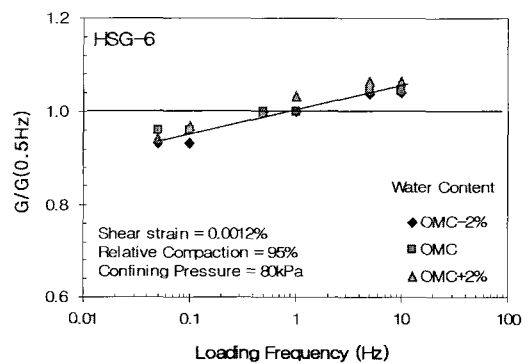
건조단위중량 및 다짐함수비 변화에 따른 하중주파수의 영향 일례는 그림 8에 나타내었다. 기존의 여러 연구보고(건설교통부, 2002; Kweon 등, 2000)에서와 같이 국내 노상토의 경우 하중주파수가 증가하면 탄성계수가 증가함을 확인 할 수 있다. 한편 탄성계수에 대한 하중주파수 영향정도(그림 8의 기울기)는 건조단위중량 변화와 무관하게 일정하게 나타났으며, 함수비가 증가하면서 하중주파수 영향이 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 시험이 수행된 함수비 변화 범위에서, 하중주파수 영향정도에

대한 함수비의 영향은 매우 작아서 무시할 수 있는 수준으로 판단된다.

하중주파수의 영향정도는 흙의 점성(viscosity)과 관련이 있기 때문에 건조단위중량 변화와 무관하게 결정되는 것으로 판단된다. 또한, 본 연구의 시험시료를 포함한 국내 노상토가 대부분 사질 성분을 다량 함유하고 있기 때문에 함수비 변화에 따른 하중주파수 영향정도 변화가 거의 없는 결과를 얻게 된 것으로 판단된다. 따라서 하중주파수의 탄성계수에 영향정도는 노상토의 다짐 정도 및 계절별 함수비 변화와 무관하게 하나의 값으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 건조단위중량 변화에 따른 하중주파수 영향 일례



(b) 함수비 변화에 따른 하중주파수 영향 일례

그림 8. 함수비 및 건조단위중량 변화에 따른 하중주파수 영향



4. 결론

본 연구에서는 국내에서 사용되는 노상토에 대하여 건조단위중량과 다짐함수비를 변화시키며 공진주/비틀진단시험을 수행하였다. 시험결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 건조단위중량이 증가할수록, 함수비가 감소할수록 탄성계수는 증가하였다. 다짐도 95%에서의 탄성계수 값에 비하여, 다짐도가 90%일 때는 평균 26% 감소하였으며, 다짐도가 100%로 증가하면 평균 56% 증가하는 것으로 나타났다. 최적함수비 조건에서의 탄성계수 값에 비하여, 함수비가 2% 증가하면 평균 23% 감소하였으며, 함수비가 2% 감소하면 평균 21% 증가하는 것으로 나타났다.
2. 국내 노상토 재료의 탄성계수에 대한 다짐 함수비의 영향은 지수모델을 사용하여 평가할 수 있는 것으로 판단된다. 한편 건조단위중량의 영향은 Hardin(1978) 모델을 적용하기 힘든 것으로 나타나 새로운 모델의 개발이 필요한 것으로 생각된다.
3. 정규화탄성계수 감소곡선은 다짐 함수비 변화에 무관하게 일정하게 결정된 반면 건조단위 중량이 증가함에 따라 정규화탄성계수가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 년중 노상토의 함수비 변화에 무관하게 하나의 정규화탄성계수 감소곡선을 적용할 수 있으나, 재성형 시편을 사용하여 정규화탄성계수 감소곡선을 결정하는 경우에는 현장 조건에 합당한 건조단위중량으로 시편을 성형하는 것이 중요하다.
4. 탄성계수에 대한 하중주파수 및 구속응력의 영향 정도는 시편의 건조단위중량과 다짐 함수비의 변화에 거의 영향 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 각각의 영향요소를 서로 독립적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 동의대학교 연구비(2005AA142) 및

Korea Pavement Research Program(KPRP) 연구결과
의 일부로, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(2002), “한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구:아스팔트 포장 설계법 개발(하부 구조 물성 정량화)” KPRP-G-02
2. 김동수, 서원석, 권기철 (2005), 반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가, 한국지반공학회논문집, 제21권, 제6호, pp. 67-79.
3. 최준성, 서주원 (2003) 아스팔트 포장하부구조 층모델 결정에 관한 연구, 한국도로포장공학회논문집, 제5권 4호, pp. 13-22.
4. 한국도로공사, (1994), 고속도로 아스팔트 포장 설계법 개선에 관한 연구, 도로연 94-15-6.
5. 한국지반공학회, (2006) “지반구조물의 내진설계, 지반공학 시리즈 8” 구미서관, ISBN 89-8225-535-4.
6. AASHTO (1986), *AASHTO Guide for Design of Pavement Structure*, AASHTO, Washington, D.C.
7. Hardin, B. O. (1978), The Nature of Stress-Strain Behavior of Soil, Proceedings, Geotech. Eng. Div. Specialty conference on Earthquake Eng. and Soil Dynamics, Vol. 1 ASCE, Pasadena, June, pp. 3-90.
8. 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.
9. Witczak M.W., Houston W.N., and Andrei D. (2000), *Resilient Modulus as Function of Soil Moisture A Study of the Expected Changes in Resilient Modulus of the Unbound Layers with Changes in Moisture for 10 LTPP Sites, Development of the 2002 Guide for the Development of New and Rehabilitated Pavement Structures*, NCHRP 1-37 A, Inter Team Technical Report.

〈접수 : 2006. 4. 4〉