



노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향

Frequency Effect on Modulus of the Subgrade and Subbase Soils

권기철*, 김동수**

1. 서 론

노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수를 평가하기 위하여 FWD(falling weight deflectometer), 포면파기법(spectral-analysis-of-surface-waves: SASW)과 같은 현장시험, 또는 반복재하식 MR 시험, 현장공진주시험(free-free resonant column: FF-RC), 그리고 공진주/비틀전단시험(resonant column/torsional shear: RC/TS)과 같은 실내시험이 적용되고 있다. AASHTO 포장 설계법에서는 포장재료의 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향을 별도로 규정하지 않고 있으나, 대부분의 경우, 각 시험이 수행되는 하중주파수가 다를 뿐 아니라 실내 및 현장시험에서 적용되는 하중주파수와 실제 교통하중의 하중주파수가 서로 다르다. 또한 교통하중은 다양한 하중주파수를 포함하고 있어서, 포장 구조체 해석을 위해서는 포장재료의 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향을 규명하는 것이 중요하다.

최근, 지반동역학 분야에서의 연구성과에 의하면, 정적, 동적 또는 반복재하시험 중 어떠한 시험방법으로 시험이 실시되는가에 관계없이 변형특성에 대한 영향요소(하중주파수, 평균주응력, 변형율 크기, 하중반복횟수 등)를 고려하면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있음이 확인되고 있다(Kim et al., 1997). 이러한 연구결과가 의미하는 바는 각각의 시험에서 얻은 결과들은 서로 독립적인 것이 아니라 변형특성을 고려하여 서로 결합할 수 있고, 포장재료의 역학적 특성을 체계적으로 평가할 수 있는 기법의 개발이 가능함을 의미한다. 따라서 실제 교통하중 조건에서의 탄성계수 규명 뿐 아니라 종합적인 시험결과의 평가를 위해서도 하중주파수의 영향을 포함한 탄성계수에 대한 영향요소의 규명이 매우 중요하다.

본 논문에서는 국내의 고속도로 건설 현장에서 사용되는 대표적인 노상토 및 보조기층 재료 각 7종을 선정·채취하여 시험을 수행하였다. 시험결과로부터 국내에 사용되는 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향을 결정하였다.

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

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



2. 시험장치

본 논문에는 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향을 평가하기 위하여 공진주/비틀전단시험을 수행하였다. 또한, 서로 다른 하중주파수에서 탄성계수를 결정하는 여러 시험의 결합 가능성을 검토하고자, 정적시험인 정적삼축압축시험, 반복재하시험인 회복탄성계수(MR)시험, 그리고 동적시험인 현장공진주시험(Free-Free Resonant Column Test: FF-RC)을 수행하였다.

비틀전단시험은 시편을 바닥에 고정시키고 시편 상부와 연결된 진동 시스템에 10Hz 미만의 고정된 주파수로 반복 비틀력을 가하여 시편에 가해진 비틀력-비틀각(torque-twist) 관계를 측정하여 응력-변형 이력곡선(hysteresis loop)을 구하는 반복재하시험이다. 탄성계수는 응력-변형 이력곡선의 두 끝점을 연결한 직선의 기울기로부터 결정할 수 있다. 동일한 가진전압 크기에서 하중주파수를 변화시키며 시험을 하여 하중주파수에 따른 탄성계수의 변화를 효과적으로 구할 수 있는 장점이 있다. 공진주시험에서는 원통형의 공시체에 하중주파수를 바꿔가면서 비틀자극을 가하여 1차 모드의 공진주파수와 진동의 크기를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파속도, 전단탄성계수 및 전단변형률을 구한다.

현장공진주시험(FF-RC)은 양단자유-추가질량(free-free with added mass) 조건에서의 탄성파전달 이론에 근거하여, 시편에 발생시킨 응력과(압축파 또는 전단파)에 대한 공진특성으로부터 미소변형률 영역의 Young계수와 전단탄성계수를 결정할 수 있고, 아울러 포아송비도 결정할 수 있는 동적인 시험 방법이다(Vaghela 등, 1995). 본 연구에서는 노상토 및 보조기층 재료에 대하여 적용하였으나, 아스팔트 혼합물 시편에 대한 시험도 가능하며, 시편의 단부조건을 변화시키며 시험을 수행하면, 공진주파수가 변화하게 되어, 하중주파수에 따른 탄성계수의 결정도 가능하리라 기대된다.

반복재하시험 MR 시험은 MTS사의 318 모델의 시험기를 사용하여 수행하였다. 하중계(load cell)는 삼축셀 내부, 시료의 위쪽에 설치되어 있고, 축방향 변형은 하중 프레임에 설치된 두 개의 LVDT를 사용하여 삼축셀 외부의 상단면을 기준으로하여 하중 프레임의 변위로부터 측정하는, 외부 변형측정법(external measurement)을 사용하였으며, 시료단부의 오차요인(bedding error)을 제거하기 위하여 시료 양단부를 석고로 처리하였다.

정적삼축압축시험은 변형률 조절 방식의 Geonor사 제품의 하중 프레임과 Wykeham사의 삼축셀을 조합하여 시험을 수행하였다. 구속응력은 공기압으로 재하하였으며, 삼축셀 외부의 LVDT와 Load Cell을 사용하여 하중과 변위를 측정하였다.

3. 하중주파수의 탄성계수에 대한 영향 모델

점성이 있는 재료는 변형률속도가 증가함에 따라 탄성계수가 증가하며, 변형률속도를 고려한 Maxwell 모델, Voigt 모델 등, 점탄성 구성모델을 사용하여 변형률속도의 영향을 평가한다. 그러나, 공진주파수를 측정하는 동적시험, 사인파형 또는 헤버사인 파형을 사용하는 반복재하시험에서의 변형률속도는 시험과정 중 계속적으로 변화하여 하나의 대표적인 변형률속도를 결정하는 것이 매우 어렵다. 따라서 이러한 시험의 경우에는 시편에 작용하는 하중주파수에 따른 탄성계수의 영향을 평가하게 된다.



동적시험에서의 하중주파수는 공진주파수로 정의 할 수 있고, 반복재하시험에서의 하중주파수는 시험에서 사용하는 하중파의 주파수로 정의된다. 재하-역재하를 포함한 일정한 변형률속도의 시험은 식 (1)과 같이 변형률 크기와 변형률속도로 하중주파수를 표현할 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 여러 시험의 하중주파수를 결정하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

표 1 각 시험에서 적용되는 하중주파수

시험법	하중주파수	비고
비틀전단시험 (TS)	0.05-10Hz	반복재하시험
반복재하식 M _R 시험 (Cyclic M _R)	5Hz	
공진주시험 (RC)	공진주파수 (20-170Hz)	동적시험
현장공진주시험 (FF-RC)	공진주파수 (수백 Hz)	
정적삼축압축시험 (Static TX)	$f = (\dot{\epsilon}) / (240 \times \epsilon_{SA})$ 0.1 Hz 이하	정적시험

$$f = \frac{\dot{\epsilon}}{240 \times \epsilon_{SA}} \quad (1)$$

여기서, f = 하중주파수 (Hz)

$\dot{\epsilon}$ = 변형률 속도 (%/min)

ϵ_{SA} = 변형률 크기 (%)

본 연구에서는 하중주파수의 대수적 증가에 따라 탄성계수의 선형으로 증가한다고 가정하여, 식 (2)와 같은 형태의 하중주파수 영향 모델을 적용하였다. 하중주파수의 영향이 결정되면, 특정한 하중주파수에서 시험이 수행되어 얻은 탄성계수로부터 모든 주파수에서의 탄성계수를 식 (2)을 적용하여 결정할 수 있다. 하중주파수의 탄성계수에 대한 영향은, 전단탄성계수와 Young 계수에 대해 동일하고, 하중파형의 차이는 무시하며, 구속응력에 따라 변화하지 않고, 모든 변형률 크기에서 하중주파수의 영향은 동일한 것으로 가정하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 여러 가정사항과 하중주파수 모델은 아직까지는 충분히 검증되지 못하고 있다. 따라서, 아스팔트 혼합물과 같이 하중주파수(또는 하중재하속도)의 영향이 매우 큰 재료에 대해서는 보다 엄밀한 연구가 필요하다.

$$E(f)/E(0.5Hz) = 1 + FE \cdot \log(f) \quad (2)$$

여기서, FE = 하중주파수 영향 계수 [%/log(f)]

4. 시험시료

전국 고속도로현장에서 실제 공사에 사용중인 노상토 재료의 CBR, #200체 통과량, 소성지수, 흙의 종류 등을 검토하여, 대표적인 노상토 및 보조기층 재료 각 7종을 선정·채취하여 시험을 수행하였다. 채취된 시료의 기초 물성치는 표 2에 나타내었다.



표 2 노상토 및 보조기층 시료의 기초 물성치

Sample	Subgrade Soils							Subbase Soils						
	SG-1	SG-2	SG-3	SG-4	SG-5	SG-6	SG-7	SB-1	SB-2	SB-3	SB-4	SB-5	SB-7	SB-7
Soil Type	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SM	SM	SW	SW-SM	GP	GP	GW	GW	GP	GW	GW
	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-2-4	A-1-b	A-1-a	A-1-a	A-1-a						
OMC (%)	10.0	7.9	10.3	13.2	8.6	6.2	6.2	6.2	6.1	6.8	4.2	2.6	6.0	7.3
$\gamma_{d,max}$ (t/m ³)	2.04	2.15	2.01	1.85	2.08	2.34	2.27	2.36	2.36	2.26	2.04	2.13	2.22	2.21
PI (%)	NP	NP	5	2.9	NP	2	NP	NP						
CBR (%)	24.3	26.6	23.2	21.7	14.0	32.0	13.8	88	55	61	39	86	67	77

5. 보조기층 재료의 탄성계수에 영향

보조기층 재료에 대하여 최대입경 13mm의 모델 시료를 사용하여 비틀전단시험을 실시한 결과, 그림 2에 나타난 바와 같이 탄성계수는 하중주파수의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 하중주파수의 영향 정도는 세립분이 증가함에 따라 증가하는 특성이 있으므로, 세립분이 적은 원래의 보조기층 재료의 탄성탄성계수 또한 하중주파수의 영향을 받지 않는 것이다.

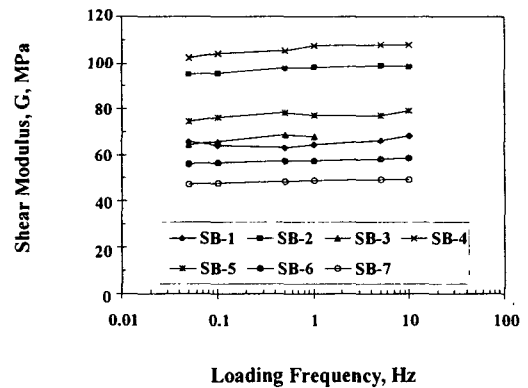


그림 2 보조기층 재료의 하중주파수 영향

6. 노상토 재료의 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향

하중주파수를 변화시키며 실시한 공진주/비틀전단시험 결과, 그림 3에 나타난 바와 같이 노상토 재료의 탄성계수는 하중주파수의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 노상토 재료의 탄성계수에 대한 하중주파수 영향 정도는, 하중주파수의 영향 정도와 소성지수의 상관관계에 대한 Kim과 Stokoe(1992)의 연구결과에 비교적 잘 부합되는 것으로 나타났다(그림 4). 그림 4에 나타난 결과를 이용하면 소성지수로부터 하중주파수의 영향을 간편하게 결정할 수 있으며, 국내 노상토에 대하여 적용 가능할 것으로 판단된다.

노상토의 탄성계수가 하중주파수의 영향을 받는 것으로 나타났으므로, 본 연구에서 적용한 서로 다



큰 하중주파수의 시험에서 결정된 탄성계수는 그림 5와 같이 나타날 것이다. 따라서, 각 시험에서 결정된 탄성계수를 비교하기 위하여 동일한 하중주파수에서의 값으로 보정한 후 비교하여야 한다. 여러 시험에서 결정된 탄성계수를 하중주파수 5Hz에서의 탄성계수로 보정한 후 변형률 크기에 따라서 그림 6에 일례로 나타내었다. 그림 6에서 보듯이, 시험방법이 동적이든 정적이든, 변형률의 크기, 하중주파수의 영향을 고려하는 경우 동일한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 각 시험조건을 합리적으로 고려한다면, 여러 시험의 효과적인 결합이 가능하고, 실제 공용상태 포장체에서의 탄성계수를 효과적으로 규명하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

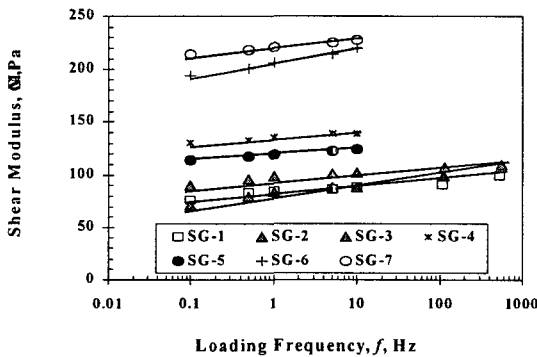


그림 3 노상토의 하중주파수에 따른 탄성계수의 변화

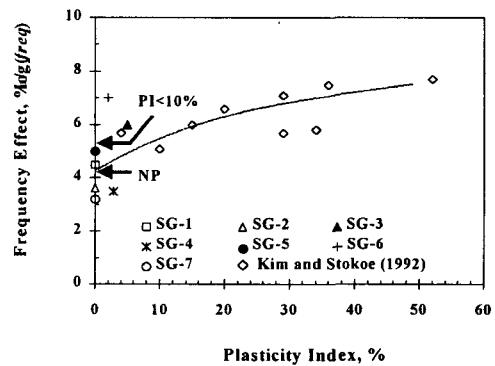


그림 4 소성지수에 따른 하중주파수의 영향

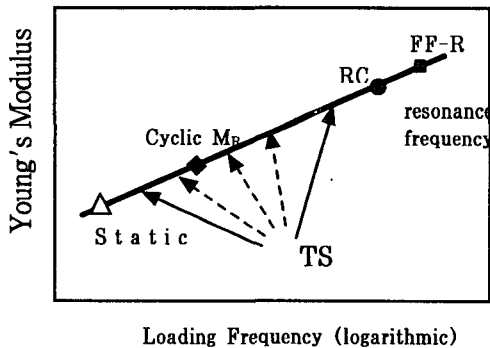


그림 5 각 시험에서 결정되는 탄성계수와 시험에 적용된 하중주파수 관계의 개념도

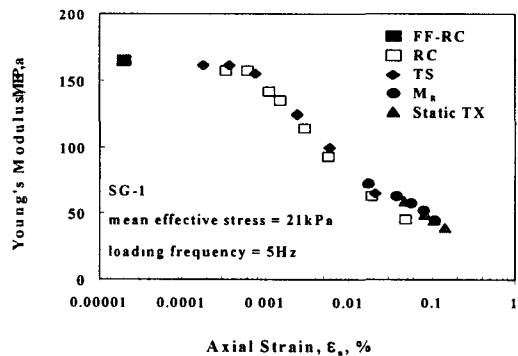


그림 6 하중주파수의 영향을 고려한 후 각 시험결과의 비교 일례

7. 결론

본 연구에서는 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 하중주파수 영향 검토를 통하여 다음의



결론을 얻었다. i) 노상토의 탄성계수는 하중주파수의 영향을 받으며, 그 정도는 소성지수와 상관성이 있는 것으로 나타났다. 이에 반하여 보조기층 재료의 탄성계수는 하중주파수와 무관하게 결정되었다. ii) 하중주파수의 영향을 고려한 후 각 시험에서 결정된 탄성계수를 변형률 크기에 따라 비교한 결과로부터 시험방법이 동적이든 정적이든 변형특성을 고려하면 동일한 물성치를 얻을 수 있었다. 따라서 각 시험조건을 합리적으로 고려한다면, 여러 시험의 효과적인 결합이 가능하고, 실제 공용상태 포장체에서의 탄성계수를 효과적으로 규명하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글 : 본 논문은 한국도로공사 도로연구소의 연구비 지원으로 수행된 연구과제(97-59-20) 수행 결과의 일부로, 감사를 포함합니다.

참고문헌

1. 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 1557, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.62-69.
2. Kweon, G. C. (1999), "Alternative Testing Methods for Subgrade and Subbase Materials Considering Deformational Characteristics of Soils," Ph.D. Dissertation, KAIST.
3. 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, Univ. of Texas at Austin.