중형 공진주 시험기를 이용한 국내 쇄석 강화노반재료의 동적특성 평가

Evaluation of Dynamic Properties of Crushed Stones Used as Reinforced Trackbed Foundation Materials Using Midsize Resonant Column Test apparatus

임유진* · 이성혁 · 이진욱 · 조호진

Yujin Lim · SeongHyeok Lee · Jinwoog Lee · Hojin Cho

Abstract In this study, a mid-size RC test apparatus equipped with analyzing program is developed that can test samples up to $D=10\text{cm}$ diameter and $H=20\text{cm}$ height which is larger than usual samples of $D=5\text{cm}$ and $H=10\text{cm}$ used mostly in practice. Thus, crushed stones with larger grains up to 38mm in diameter used mostly in Korea as reinforced trackbed materials in track construction could be considered effectively than conventionally used RC apparatus for evaluation of the dynamic properties of the materials by using the newly developed RC apparatus. The RC test apparatus was designed and assembled based on the concept of fixed-free fixity conditions and driving mechanism proposed by Stokoe. Using the developed RC test apparatus, three types of representative crushed reinforced trackbed materials were tested in order to get the dynamic properties of the materials such as $G/G_{\max}$ reduction curves and damping ratio D . For comparison purpose, a small RC test apparatus has been used to test the same materials.

Keywords : Mid-size resonant column test, Dynamic properties, Shear modulus, Reinforced trackbed materials, Damping ratio

초 록 본 연구에서는 국내에서 보편적으로 사용되는 최대입경이 38mm 에 이르는 쇄석 강화노반재료에 대한 동적 변형특성을 평가하기 위하여 직경 $D=10\text{cm}$, 길이 $L=20\text{cm}$ 의 시편을 시험할 수 있는 Stokoe방식의 고정단-자유단 중형 공진주 시험기 및 구동시스템과 해석프로그램을 제작하였다. 이렇게 완성된 중형 공진주 시험기를 이용하여 우리나라의 대표적인 석산 쇄석 강화노반재료에 대하여 공진주 시험을 수행하였다. 또한 소형($D=5\text{cm}$) 공진주 시험기를 이용하여 동일한 재료로 시험을 수행하여 전단탄성계수(G) 감소곡선과 정규화 전단탄성계수($G/G_{\max}$) 및 감쇠비(D) 곡선을 구하고 소형과 중형 공진주 시험결과에 대한 비교 분석을 실시하였다.

주요어 : 중형공진주시험기, 동적특성, 전단탄성계수, 강화노반, 감쇠비

1. 서 론

최근 철도차량하중 등 진동에 의한 궤도틀림 등의 구조물 피해사례가 증가하고 있다. 이러한 동적하중 작용시의 내진 설계 및 지반구조물의 정밀한 동적, 정적변형해석을 위해 저변형률($10^{-5}\% \sim 10^{-3}\%$) 및 중간변형률($10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$) 영역을 포함한 재료의 신뢰성 있는 비선형 전단탄성계수(G)와 감쇠비(D) 등 동적물성치의 평가가 매우 중요하다(Bui [1]).

재료의 동적특성을 파악하기 위하여 사용하는 공진주시험의 경우 통상 직경 $D=5\text{cm}$, 길이 $L=10\text{cm}$ 의 시편을 사용하는 것이 일반적이지만 강화노반으로 사용하는 쇄석 재료의 최대 입경($D=37.5\text{mm}$)을 고려할 때 공진주시험의 시편직경은 가급적 크게 하여 시험하는 것이 합리적이다. 따라서 본 연구에서는 재료의 최대입경 대비 시편의 크기를 효과적으

로 고려할 수 있도록 중형의 공진주시험기(시편 직경 최대 $D=10\text{cm}$, 최대 높이 $H=20\text{cm}$)를 제작하여 시험에 사용하였으며 이로부터 국내에서 사용중인 쇄석강화노반재료의 동적 물성치(전단탄성계수 G , 감쇠비 D)의 정량화를 시도하였다. 아울러 시편크기가 강화노반재료의 공진주시험 결과(G , D)에 미치는 영향을 조사, 분석하였다.

2. 지반재료의 동적특성

2.1 일반적인 지반재료의 동적특성 및 동적특성 모델

일반적으로 강화노반과 같은 지반재료의 거동특성은 Fig. 1과 같이 전단탄성계수(G)-대수 변형률(γ)의 관계로 나타내어, 선형영역과 비선형영역으로 구분한다. 선형영역과 비선형영역으로 구분 짓는 변형률 크기를 선형한계변형률(γ_e)이라 칭한다. 일반적으로 지반재료의 선형한계변형률은 $0.001\% \sim 0.01\%$ 범위에 존재하는 것으로 알려져 있다.

선형한계변형률 이하의 저변형률 영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 기본적으로 변형률의 크기에 무관하여 일정

*Corresponding author.

Tel.: +82-42-520-5402, E-mail : yujin@pcu.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2012

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.5.476>

Fig. 1 Shear modulus-log shear strain (G -log γ) relation of typical soils

한 값을 가지며, 이때의 전단탄성계수를 최대전단탄성계수 (G_{max})라 한다. 그러나 선형한계변형률을 넘어서게 되면 전단탄성계수는 점차 줄어들고 감쇠비는 오히려 증가한다. Fig. 1에 나타난 지반의 전단탄성계수(G)-변형률(γ)의 관계는 흙의 종류, 함수비, 구속응력(σ_3), 하중주파수(f_r) 등 다양한 조건에 따라서 매우 상이하게 나타난다. 그러나 전단탄성계수 (G)를 최대 전단탄성계수(G_{max})로 정규화한 정규화전단탄성계수(G/G_{max})와 전단변형률 크기(γ)의 관계로 나타내면 이들 영향요소(함수비, 구속응력, 하중주파수)에 비교적 무관하며, 흙 재료의 종류(모래, 점토, 자갈 등)에 따라서 일정한 범위 내에서 결정되는 것으로 알려져 있다(Seed 등[2])

반복재하를 받는 입상재료의 응력-변형률 관계를 예측하기 위하여 여러 가지 해석 모델들이 개발되었으며, 그 중 Hyperbolic Model, Ramberg-Osgood Model 등이 대표적으로 사용된다. Hyperbolic Model은 식 (1)과 같이 표현 된다.

$$\tau = \frac{G_{max}\gamma}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (1)$$

여기서, G_{max} : 미소변형률에서의 전단탄성계수, γ_r : 참조변형률(reference strain)이라 하며 식 (2)와 같이 정의 된다.

$$\gamma_r = \frac{\tau_f}{G_{max}} \quad (2)$$

위의 식을 정규화전단탄성계수(G/G_{max})를 사용하여 표현 하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (3)$$

Hyperbolic Model은 간편성에도 불구하고 입상재료의 동적특성을 표현하기에는 부족하여 모델 개선을 위한 시도가 있어왔다(Hardin과 Dreneovich [3], Hardin과 Dreneovich [4], Seed 등[5], Vucetic과 Dobry [6], Darendeli와 Stokoe [7]).

흙재료의 감쇠특성을 나타내는 감쇠계수(D) 모델식 또한 여러 연구자에 의해 제안된 바 있으나 최근 Ishihara [8]에

Fig. 2 Normalized shear modulus reduction curves of sand and gravel (Seed et al. [5])

Fig. 3 Damping ratio of sand and gravel (Seed et al. [5])

의해 개발된 식은 식 (4)와 같다.

$$D = \frac{4}{\pi} \left[1 + \frac{1}{\gamma/\gamma_r} \right] \left[1 - \frac{\ln(1 + \gamma/\gamma_r)}{\gamma/\gamma_r} \right] - \frac{2}{\pi} \quad (4)$$

위의 감쇠계수식은 전단 변형률이 매우 작거나 매우 클 때 감쇠특성을 제대로 표현 못하는 한계가 있다. 상대적으로 큰 변형률에서는 감쇠계수 $D=2/\pi=0.637$ 이 되며 저 변형률($\gamma=0$)에서는 $D=0$ 이 되지만 실제 흙과 같은 입상재료의 감쇠계수는 $\gamma=0$ 에서 일정한 값을 가지는 것으로 알려진 바 있으며, 이를 D_{min} 으로 정의한다.

강화노반과 같은 사질성 재료에 대한 최근의 동적특성 모델로는 Ishibash와 Zhang [9]이 제시한 모델을 들 수 있으며, 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})와 감쇠비(D)에 미치는 평균유효응력(σ_o)과 소성지수(PI) 및 변형률 크기의 영향을 고려할 수 있도록 식 (5) 및 식 (6)과 같이 제시되었다. 한편 국내에서도 쇄석재료인 도로 보조기층에 대한 자유단-자유단 공진주시험 연구결과가 보고(Kwon와 Kim [10])된 바 있으며 이들은 대체 회복탄성계수(Mr) 획득방법으로서 공진주시험의 유효성을 제시하였다.

$$\frac{G}{G_{max}} = K(\gamma, PI)\sigma_0^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (5)$$

$$D = \frac{0.333(1 + e^{-0.0145PI^{1.3}})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right) + 1 \right] \quad (6)$$

여기서,

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left[1 - \tanh \left\{ \ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right\} \right] e^{-0.0145PI^{1.3}}$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left[1 + \tanh \left\{ \ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.495} \right\} \right]$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 : PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} : 0 < PI \leq 15 \\ 7.00 \times 10^{-7} PI^{1.976} : 15 < PI \leq 70 \\ 2.70 \times 10^{-5} PI^{1.115} : PI > 70 \end{cases}$$

3. 쇄석강화노반재료의 동적물성 평가 시험

3.1 중형 공진주 시험장치의 구성

입경이 비교적 큰 쇄석재료의 동적특성(전단탄성계수 G 및 감쇠비 D)을 평가하기 위하여 직경 $D=10\text{cm}$, 길이 $L=20\text{cm}$ 의 시편을 시험할 수 있는 자유단-고정단 방식의 Stokoe형식 중형 공진주 시험기와 구동시스템 및 구동프로그램을 제작하였다. 공진주시험 시스템의 구성은 Fig. 4와 같다. 근래 미국 Texas 대학에서는 조립성 재료의 동적특성 평가를 위하여 지름 15cm, 높이 30cm 공시체 시험을 위한 양단 자유형 공진주시험기를 개발한 바(Menq [11]) 있으며 Wichtmann와 Triantafyllidis [13]는 독자적으로 개발한 양단 자유단 대형 공진시험기를 이용하여 직경 $D=10\text{cm}$, 높이 $H=20\text{cm}$ 조

립토 시편에 대한 공진주시험을 진행한 바 있다. 또한 국내에서는 철도노반재료의 동특성 파악을 위하여 Park [12]이 Menq [11]과 유사한 공진주 시험시스템의 개발을 시도한 바 있으며 최근 한국수자원공사를 중심으로 대입경 쇄석재료에 적합한 Stokoe 타입의 대형 공진주시험 시스템을 개발중에 있다.

본 연구에서 사용한 공진주시험 장비는 알루미늄 calibration rod와 추가질량체를 이용하여 캘리브레이션을 실시하였으며 시험값의 유효성은 우레탄 시편을 이용하여 검증하였다(Fig. 4).

3.2 쇄석 강화노반재료의 기본물성시험

시험시료는 국내의 대표적인 3개소의 석산에서 생산중인 강화노반용 쇄석재료를 선택하였으며 각각 Rock A, Rock B, Rock C로 구분 하였다. 석산에서 생산된 재료는 지방규정 (Korea Rail Network Authority [14])에 맞게 재입도 조정하였다. 재입도 조정시 최대입경 38mm인 원재료를 상사입도

Table 1 Sieve analysis results

		Rock A	Rock B	Rock C
Sieve Analysis	D ₁₀	0.2		
	D ₃₀	1.35		
	D ₆₀	10		
	C _c	0.91		
	C _u	50		
	#200% passing	4		
Soil Classification	#4% passing	47.5		
	USCS	GW

Fig. 4 Schematics of mid-size resonant column test unit

Table 2 Compaction test results

	Rock A	Rock B	Rock C
OMC(%)	4.3	5.9	6.4
γ_{d-max} (kN/m ³)	23.5	22.8	22.9

Table 3 Specific gravity and absorption ratio of the materials used for RC tests

	Rock A	Rock B	Rock C
Specific Gravity (G_s)	2.769	2.757	2.521
Absorption ratio (%)	0.87	0.341	0.416
Plasticity Index (PI , %)	NP	NP	NP

법칙을 사용하여 최대입경 20mm가 되도록 하였다. Table 1~Table 3은 각 쇄석 강화노반재료에 대한 기본 물성 시험 결과를 정리한 것이며 입도 조절에 의해 Table 1과 같이 세 재료 모두 동일한 입도분포를 보인다. 입도가 동일함에도 불구하고 Table 2, Table 3과 같이 세 재료는 다소 다른 최적 함수비, 최대건조단위중량, 비중 및 흡수율을 보였다.

3.3 시험절차

공진주시험은 Table 4와 같은 구속 응력단계를 따라 실시하였다. 축차응력이 가하여지지 않는 공진주시험에서는 시험시 시료에 가해지는 손상은 무시할 수 있을 정도이므로 하나의 시료로 모든 구속응력단계에서 시험을 실시하는 단계별시험법(Staged testing)을 채택하였다. 최대건조단위중량의 95%에 맞추어 다짐된 각 시편을 공진주시험기 가압셀(Pressure cell) 내에 설치하고 시험준비가 완료되면 각 단계

Table 4 Input voltages used for RC test

Confining pressure levels	Input voltages
21, 35, 69, 104, 138kPa	0.01V, 0.02V, 0.04V, 0.08V, 0.1V, 0.2V, 0.4V, 0.8V, 1V, 2V, 4V, 8V, 10V

별로 구속응력을 가한 후 Table 4와 같은 입력전압을 따라 순차적으로 전압을 높여가며 공진주시험을 수행하였다. 선정된 구속압 단계는 AASHTO T307-99 [15]에 제시된 도로 보조기층재료에 대한 구속압시험단계를 따른 것이며 현 시점에서 국내에서 사용되는 쇄석 강화노반재료의 동적물성을 획득하기 위한 고유한 시험절차가 제시된 바 없으므로 제시된 구속압 단계를 따랐다.

4. 공진주시험결과의 분석

4.1 소형과 중형시편 재료의 전단탄성계수(G) 감소곡선 비교

Rock A, Rock B, Rock C의 쇄석 강화노반재료를 최적함수비(OMC)에서 95%이상의 다짐도로 소형(시편직경 $D=5\text{cm}$, $H=10\text{cm}$)과 중형(시편직경 $D=10\text{cm}$, $H=20\text{cm}$)의 시편을 제작한 후 공진주 시험을 수행하여 각각의 전단탄성계수(G)를 획득하였다. 이 때 소형시편은 상사법칙에 따라 재입도 구성을 한 재료를 이용하여 시편을 제작하였으며 최대입경은 10mm이었다. Fig. 5~Fig. 7은 본 시험에서 실시한 중형 공진주($D=10\text{cm}$) 시험과 일반적으로 사용되는 소형 공진주($D=5\text{cm}$) 시험 결과 중 구속압 변화에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 나타낸 것이다.

쇄석 강화노반재료의 전단탄성계수(G)는 변형률(γ) 크기 및 구속응력(σ_3)의 영향을 매우 크게 받는 것을 확인 할 수 있다. 구속압(σ_3)이 증가 할수록 전단탄성계수가 동일 전단 변형률에서 더 크게 발현되는 것을 알 수 있으며, 전단변형률의 크기가 약 $10^{-3}\%$ 이상에서 전단탄성계수는 비선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한 중형 공진주 시험에 의해서 획득된 전단탄성계수(G)가 동일 전단변형률(γ)에서 소형 공진주 시험에 의해 획득된 전단탄성계수에 비해 더 큰 것을 알 수 있다. 실험시 측정된 최소전단변형률에서의 최대 전단탄성계수(G_{max})로만 비교하였을 때 중형시편의 경우 약 50~205MPa, 소형시편의 경우 32~160MPa정도의 분포를 보여 중형시편에서 더 큰 탄성계수가 측정됨을 알 수 있다.

Fig. 5 Shear modulus reduction curves of crushed metamorphic rock A: (a) medium size sample ($D=10\text{cm}$), (b) small size sample ($D=5\text{cm}$)

Fig. 6 Shear modulus reduction curves of crushed metamorphic rock B: (a) medium size sample ($D=10\text{cm}$), (b) small size sample ($D=5\text{cm}$)

Fig. 7 Shear modulus reduction curves of crushed granite gneiss rock C: (a) medium size sample ($D=10\text{cm}$), (b) small size sample ($D=5\text{cm}$)

4.2 소형과 중형시험 재료의 정규화 전단탄성계수($G/G_{\max}$) 감소곡선 비교

Fig. 8~Fig. 10은 소형 및 중형 공진주 시험에 의해 획득된 각 구속압별 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 Seed와 Idriss [16] 및 Seed 등[2,5]의 제시영역과 Ishibashi와 Zhang [9]의 제안 식에 의한 예측감소곡선 및 hyperbolic모델식에 의한 결과와 비교하여 도시한 것이다. 그림에서와 같이 3종의 시료가 모두 Seed-Idriss가 제시한 모래와 자갈 시료의 전단탄성계수 감소곡선 분포범위에 근접하여 위치하는 것을 알 수 있다. 그러나 이중 Rock B의 경우는 구속압이 크게 증가(138kPa)하면 모래에 근접한 정규화 탄성계수 분포 특성을 보인 반면 구속압이 감소(21kPa) 할 경우 자갈의 감소곡선 특성에 근접하는 경향을 보였다.

화강암재료인 Rock A의 경우 소형 시험의 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 0.0004%의 변형률에서부터 중형 시험에 비해 감소가 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. Rock B의 경우 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 패턴이 다른 시료에 비해 불규칙하지만 평균 0.0002%~0.0004%의 변형률에서 소형 시험이 중형 시험에 비해 감소폭이 더 커졌다. Rock C

재료는 중형과 소형의 정규화 전단탄성계수 감소 경향이 다른 재료와 달리 비슷한 것을 알 수 있었다. 전체적으로 본 시험에 사용된 3개소의 쇄석재료에 대한 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 소형 시험이 중형 시험보다 감소폭이 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 시험 제작에 사용된 재료가 같더라도 입경의 크기가 커지면 선형한계변형률이 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11~Fig. 13은 3개소의 쇄석 강화노반재료에 대한 중형 공진주 시험과 소형 공진주 시험의 감쇠비(Damping Ratio) 변화 곡선을 구속압의 차이에 따라 비교, 도시한 것이다. 모든 시험 결과에서 Seed 등[5]이 제시한 모래질 및 자갈질 재료의 대표감쇠비 곡선 분포 범위 내에 드는 것을 알 수 있었으나 Ishibashi와 Zhang [9]이 제안한 식 (6)을 사용하여 계산한 감쇠비 결과와는 중간변형률 영역에서 국내 쇄석강화노반 시험값이 다소 큰 결과를 보였다. 또한 쇄석재료의 일반적인 경향과 같이 구속응력이 클수록 감쇠비가 작아지는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 감쇠비의 경우, 구속압이 증가할수록 도달 가능한 최대전단변형률의 크기가 감소하며 이에 따라 감쇠비를 얻을 수 있는 한계가 제한된다. 전

Fig. 8 Normalized shear modulus reduction curves of crushed metamorphic rock A: (a) medium size sample ($D=10\text{cm}$), (b) small size sample ($D=5\text{cm}$)

Fig. 9 Normalized shear modulus reduction curves of crushed metamorphic rock B: (a) medium size sample ($D=10\text{cm}$), (b) small size sample ($D=5\text{cm}$)

Fig. 10 Normalized shear modulus reduction curves of crushed granite gneiss rock C: (a) medium size sample ($D=10\text{cm}$), (b) small size sample ($D=5\text{cm}$)

체적으로 구속압이 작으면서 전단변형률이 중간변형률 영역에 해당할 경우 시편의 크기에 상관없이 Ishibashi와 Zhang [9] 제안식에 비하여 감쇠비가 다소 크게 발현되는 특성을

보였다. 따라서 국내 쇄석재료에 대한 폭넓은 시험을 다양한 석산재료에 대하여 실시한다면 보다 더 정확한 예측식의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 11 Damping curves of crushed metamorphic rock A: (a) medium size sample ($D=10\text{cm}$), (b) small size sample ($D=5\text{cm}$)

Fig. 12 Damping curves of crushed metamorphic rock B: (a) medium size sample ($D=10\text{cm}$), (b) small size sample ($D=5\text{cm}$)

Fig. 13 Damping curves of crushed granite gneiss rock C: (a) medium size sample ($D=10\text{cm}$), (b) small size sample ($D=5\text{cm}$)

5. 결 론

중형공진주시험을 통하여 쇄석 강화노반재료의 전단탄성

계수 G 및 감쇠비 D 위주의 동적물성특성을 파악하였으며 시험을 통하여 아래와 같은 결론을 구할 수 있었다.

(1) 쇄석 강화노반재료의 전단탄성계수(G)는 변형률(γ) 크

기 및 구속응력(σ_3)의 영향을 매우 크게 받는 것을 확인하였으며 구속압(σ_3)이 증가 할수록 전단탄성계수(G)가 동일 전단변형률에서 더 크게 발현되었다. 아울러 전단변형률의 크기가 약 $10^{-3}\%$ 이상에서 전단탄성계수는 비선형적으로 감소하는 경향을 보였다.

(2) 쇄석 강화노반재료에 대해 중형시편과 소형시편에 대한 공진주 시험을 실시하였으며 시험시 측정된 최소전단변형률(γ_{min})에서의 최대전단탄성계수(G_{max})로만 비교하였을 때 중형시편의 경우 약 50~205MPa, 소형시편의 경우 32~160MPa 정도의 분포를 보여 중형시편에서 더 큰 탄성계수가 측정되었다. 상사입도법칙에 의해 입도를 조정했음에도 불구하고 발생하는 이와 같은 탄성계수 차이는, 입자크기의 영향 즉, 중형 시편의 최대입자($D_{max}=20mm$)와 소형 시편의 최대입자($D_{max}=10mm$)차이에 의한 일부 영향이 있었을 것으로 판단되며 아울러 시편크기 차이에 따른 관성저항 차이의 영향이 있었을 것으로 판단된다. 추가 분석이 필요하지만 두 시험장비를 구동하기 위한 코일에서의 back emf(electro-magnetic force) 차이의 영향 또한 있었을 것으로 보인다. 따라서 작은 시편을 사용할 경우 상대적으로 입자 크기가 큰 강화노반층 재료의 특성을 고려하여 시험을 실시하고 이를 캘리브레이션 할 수 있는 방법의 도입이 필요할 것이다.

(3) 쇄석강화노반 시험재료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 Seed와 Idriss [16] 및 Ishibashi와 Zhang [9]이 제안한 감소곡선 예측결과와 비교하여 본 결과 3종의 강화노반 쇄석재료가 모두 Seed-Idriss가 제시한 모래와 자갈 시료의 전단탄성계수 감소곡선 분포범위에 근접하여 위치하는 것을 확인하였으며 Ishibashi와 Zhang [9]예측모델에 비하여 hyperbolic모델에 더 근사하는 경향을 보였다. 또한 쇄석재료에 대한 정규화 전단탄성계수 감소곡선은, 소형 시험이 중형 시험보다 감소폭이 크다는 것을 알 수 있었다

(4) 쇄석 강화노반재료에 대한 중형 공진주 시험과 소형 공진주 시험의 감쇠비(Damping Ratio) 변화 곡선은 모든 시험 결과에서 Seed 등 [5]이 제시한 모래질 및 자갈질 재료의 대표감쇠비 곡선 분포 범위 내에 드는 것을 알 수 있었으나 전체적으로 구속압이 작으면서 전단변형률이 중간변형률 영역에 해당할 경우 시편의 크기에 상관없이 Ishibashi와 Zhang [9] 제안식에 비하여 감쇠비가 다소 크게 발현되는 특성을 보였다. 또한 구속응력이 클수록 감쇠비가 작아지는 경향이 확인되었다. 따라서 국내 쇄석재료에 대한 폭넓은 시험을 다양한 석산재료에 대하여 실시한다면 보다 더 정확한 예측식의 개발이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 한국철도기술연구원 “철도건설 및 운영비 절감을 위한 경제성 향상 기술개발”(-고속화에 대응한 철도 아스팔트 노반 및 궤도구조 개발-) 과제 및 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.: 2012R1A1A4A01009639)의 성과물로서 양 기관의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M.T. Bui (2009) *Influence of Some Particle Characteristics on the Small Strain Response of Granular Materials*, Ph.D Dissertation, The University of Southampton.
- [2] H.B. Seed, R.T. Wong, I.M. Idriss, K. Tokimatsu (1986) Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils, *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 112(11), pp. 1016-1032.
- [3] B.O. Hardin, V. Drenevlch (1972) Shear modulus and damping in soil: Design equation and curves, *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 98(7), pp. 667-692.
- [4] B.O. Hardin, V. Drenevlch (1972) Shear modulus and damping in soil: Measurement and parameter effects, *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 98(7), pp. 603-624.
- [5] H.B. Seed, R.T. Wong, I.M. Idriss, K. Tokimatsu (1984) *Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils*, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-84/14, University of California, Berkeley.
- [6] M. Vucetic, R. Dobry (1991) Effect of soil plasticity on cyclic response, *J. of Geotechnical Engineering*, 117(1), pp. 89-107.
- [7] M.B. Darendeli, K.H. II Stokoe (1997) *Dynamic properties of soils subjected to the 1994 Northridge earthquake*, Geotechnical Engineering Report GR97-5, Civil Engineering Dept., University of Texas, Austin, TX, USA.
- [8] K. Ishihara (1996) *Soil behavior in earthquake geotechnics*, Oxford University Press, Oxford.
- [9] K. Ishibashi, X. Zhang (1993) Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay, *Soils and Foundations*, 33(1), pp. 182-191.
- [10] K. Kwon, D. Kim (2000) Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Subbase Materials Using Free-Free Resonant Column Test, *Journal Korean Society of Road Engineers*, 2(2), pp. 149-161.
- [11] F.Y. Menq (2003) Dynamic properties of sandy and gravelly soils, *PhD Thesis*, The University of Texas at Austin.
- [12] C. S Park (2008) *Evaluation of Resilient Modulus and Quality Control Procedure for Railroad Trackbeds Based on Dynamic Properties*, PhD dissertation, KyungHee University.
- [13] T. Wichtmann, T. Triantafyllidis (2009) On the influence of the grain size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus G_{max} , *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 135(10), pp. 1404-1418.
- [14] Korea Rail Network Authority (2011) Rail design standard specification, Korea.
- [15] AASHTO T 307-99 (2007) *Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*, American Association of State and Highway Transportation Officials.

- [16] H.B. Seed, I.M. Idriss (1970) Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC-70-10, Univ. of California, Berkeley, California.

접수일(2012년 7월 17일), 수정일(2012년 9월 23일),
게재확정일(2012년 10월 5일)

Yujin Lim : yujin@pcu.ac.kr

Department of Civil, Environmental and Railroad Engineering,
PaiChai University, 155-40 Baejae-Ro, Seo-Gu, Daejeon 302-735,
Korea

SeoungHyeok Lee : Shlee@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-Dong, Uiwang-Si,
Gyeonggi-Do 437-757, Korea

Jin-Wook Lee : jinugi@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-Dong, Uiwang-Si,
Gyeonggi-Do 437-757, Korea

Jojin Cho : hojiny81@naver.com

Department of Civil, Environmental and Railroad Engineering,
PaiChai University, 155-40 Baejae-Ro, Seo-Gu, Daejeon 302-735,
Korea