

중형 공진주 시험기를 이용한 쇄석재료의 동적특성 정량화

Evaluation of Dynamic Properties of Subbase Materials Used in Korea Using Midsize Resonant Column Test Apparatus

조호진* · 박경수** · 박재학*** · 황정규**** · 임유진*****

Jo, Ho Jin · Park, Kyung Su · Park, Jae Hak · Hwang, Jung Kyu · Lim, Yu Jin

1. 서 론

최근 차량하중 등 진동에 의한 구조물의 피해사례가 증가하고 있다. 이러한 동적하중 작용시의 내진설계 및 지반구조물의 정밀한 동적, 정적변형해석을 위해 저변형률($10^{-5}\% \sim 10^{-3}\%$) 및 중간변형률($10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$) 영역을 포함한 흙의 신뢰성 있는 비선형 전단탄성계수(G)와 감쇠비(D) 등 동적물성치의 평가가 매우 중요하다(Burland 1989). 재료의 동적특성을 파악하기 위하여 사용하는 공진주시험의 경우 통상 직경 $D=5\text{cm}$, 길이 $L=10\text{cm}$ 의 시편을 사용하는 것이 일반적이지만 보조기층으로 사용하는 쇄석의 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 효과적으로 고려할 수 있도록 중형의 공진주시험기(시편 직경 $D=10\text{cm}$, 높이 $H=20\text{cm}$)를 제작하여 시험에 사용하였으며 이로부터 시편크기에 따라 공진주시험 결과가 어떻게 변하는지를 평가하는데 연구의 목적을 두었다.

2. 중형 공진주 시험기

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 Stokoe형식인 중형 공진주 시험기와 구동시스템 및 구동프로그램을 제작하였다. 시험기의 구성은 그림 1과 같다.

* 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 석사과정 · 042-520-5855(E-mail : hojiny81@naver.com)
** 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 석사과정 · 042-520-5855(E-mail : kyungsoo0514@hanmail.net)
*** 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 석사과정 · 042-520-5855(E-mail : trans999@naver.com)
**** 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 석사과정 · 042-520-5855(E-mail : zzon202@naver.com)
***** 정회원 · 배재대학교 건설환경공학과 교수 · 042-520-5402(E-mail : yujin@pcu.ac.kr)



그림 1(a). 중형 공진주 시험

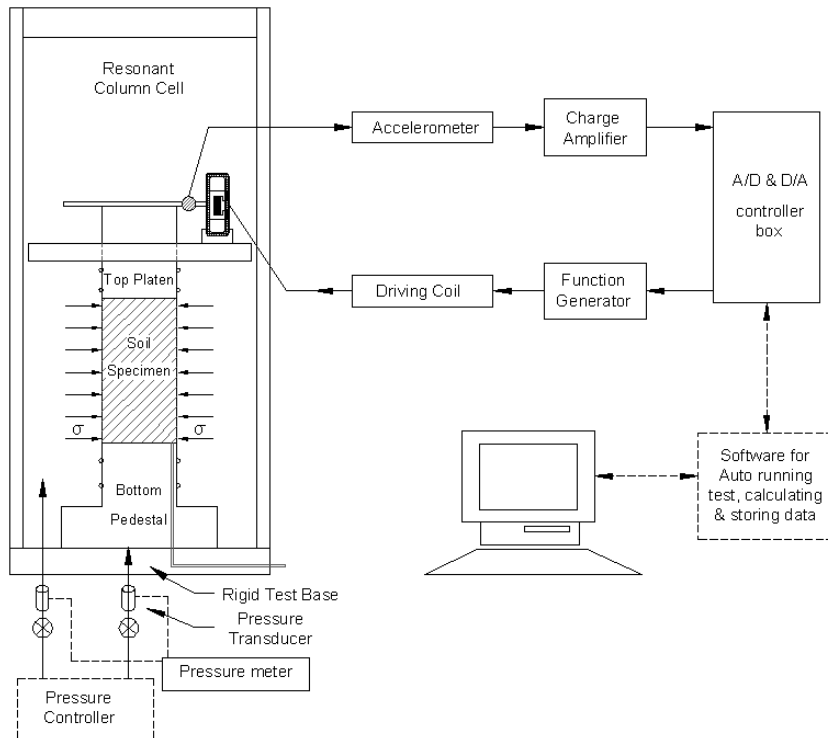


그림 1(b). 공진주시험 시스템의 구성 개요도

3. 기본물성시험

시험시료는 국내의 대표적인 석산에서 생산중인 쇄석재료 세 종류를 선택하였으며 각각 경상도지역의 화강암, 강원도지역의 변성암, 충청도지역의 변성암으로 구분된다. 표 1~표 3은 각 재료에 대한 기본 물성 시험 결과이다.

표 1. 시료의 입도분석시험 결과

구 분		경상도 화강암	강원도 변성암	충청도 변성암
입도 시험 결과	D ₁₀	0.2	0.2	0.2
	D ₃₀	1.35	1.35	1.35
	D ₆₀	10	10	10
	곡률계수(C _c) (D ₃₀) ² /(D ₆₀)(D ₁₀)	0.91	0.91	0.91
	균등계수(C _u) D ₆₀ /D ₁₀	50	50	50
	#200 통과율	4	4	4
	#4 통과율	47.5	47.5	47.5
흙 분류	통일분류	GW	GW	GW

표 2. 각 시료별 다짐시험 결과

구 분		경상도 화강암	강원도 변성암	충청도 변성암
다짐시험결과	최적함수량(%)	4.3	5.9	6.4
	최대건조단위중량(t/m ³)	2.402	2.331	2.335

표 3. 각 시료별 비중 및 흡수율 결과

구 분	경상도 화강암	강원도 변성암	충청도 변성암
비 중(Gs)	2.769	2.757	2.521
흡 수 율(%)	0.87	0.341	0.416
소성지수(PI, %)	NP	NP	NP

4. 구속응력 단계

공진주시험은 표 4와 같이 한국형포장설계법(KPRP)에서 확정된 하부구조의 탄성계수 결정을 위한 구속응력단계를 따라 실시하였다. 축차응력이 가하여지지 않는 공진주시험에서는 시험시 시료에 가해지는 손상은 무시할 수 있는 정도이므로 하나의 시료로 모든 구속응력단계에서 시험을 실시하는 단계별시험법(staged testing)을 채택하였다. 시료를 공진주시험기 가압셀 내에 설치하고 시험준비가 완료되면 구속응력을 재하하고 표 4와 같은 입력전압을 따라 순차적으로 전압을 높여가며 시험을 수행하였다.

표 4. 공진주시험 시의 입력전압

구속응력	입력전압
21kPa	0.01V, 0.02V, 0.04V, 0.08V, 0.1V, 0.2V, 0.4V, 0.8V, 1V, 2V, 4V, 8V, 10V
35kPa	21kPa과 동일
69kPa	21kPa과 동일
104kPa	21kPa과 동일
138kPa	21kPa과 동일

5. 시험결과

5.1 소형과 중형시편의 전단탄성계(9G) 감소곡선 비교

경상도 화강암, 강원도 변성암, 충청도 변성암의 쇄석 재료를 최적함수비(OMC)에서 95% 이상의 다짐도로 소형(D=5cm)과 중형(D=10cm)의 시편을 제작한 후 공진주 시험을 수행하여 각각의 전단탄성계수(G)를 획득하였다. 이 때 소형시편은 상사법칙에 따라 재입도구성을 한 재료를 이용하여 시편을 제작하였다. 그림 2~그림 7은 본 시험에서 실시한 중형 공진주(D=10cm) 시험과 소형 공진주(D=5cm) 시험 결과 중 구속압 변화에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 나타낸 것이다. 쇄석 보조기층재료의 전단탄성계수는 변형률 크기 및 구속응력의 영향을 매우 크게 받는 것을 확인 할 수 있다. 구속압이 증가 할수록 전단탄성계수가 동일 전단변형률에서 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.

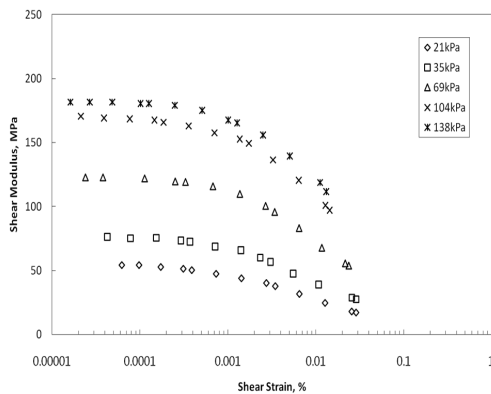


그림 2. 강원도 변성암의 전단탄성계수 감소곡선(중형, D=10cm)

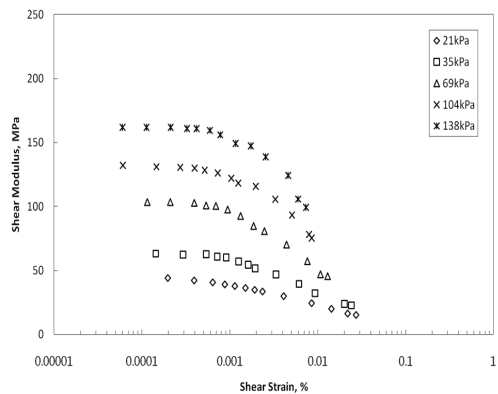


그림 3. 강원도 변성암의 전단탄성계수 감소곡선(소형, D=5cm)

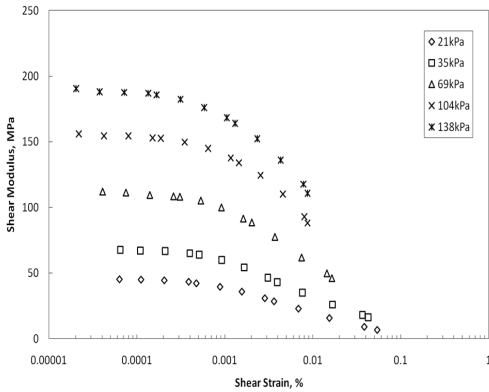


그림 4. 충청도 변성암의 전단탄성계수 감소곡선(중형, D=10cm)

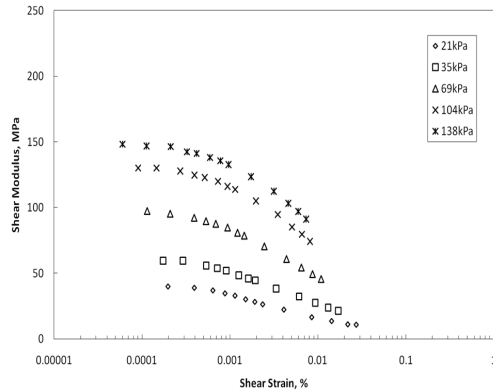


그림 5. 충청도 변성암의 전단탄성계수 감소곡선(소형, D=5cm)

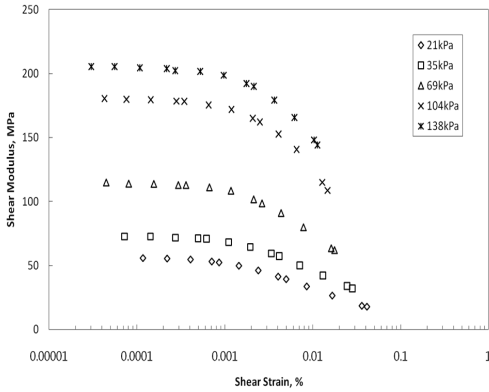


그림 6. 경상도 화강암의 전단탄성계수 감소곡선(중형, D=10cm)

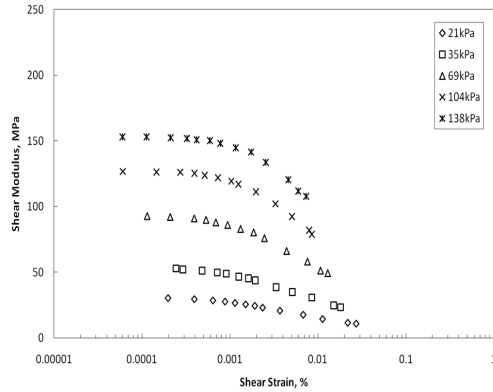


그림 7. 경상도 화강암의 전단탄성계수 감소곡선(소형, D=5cm)

5.2 소형과 중형의 정규화 전단탄성계수(G/G_{max}) 감소곡선 비교

그림 8~그림 13은 3개소의 쇄석재료에 대한 소형 공진주 시험과 중형 공진주 시험 결과 중 각 구속압에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 비교하여 도시한 것이다. 경상도 화강암의 경우 소형 시험의 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 0.0004%의 변형률에서부터 중형 시험에 비해 감소가 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 강원도 변성암의 경우 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 패턴이 다른 시료에 비해 불규칙하지만 평균 0.0002%~0.0004%의 변형률에서 소형 시험이 중형 시험에 비해 감소폭이 더 컸다. 충청도 변성암은 중형과 소형의 정규화 전단탄성계수 감소 경향이 다른 재료와 달리 비슷한 것을 알 수 있었다. 이는 충청도 변성암 쇄석재료의 경우 비중이 상대적으로 작고 최적함수비가 상대적으로 다소 큰 것에 기인하는 것으로 판단되며 기타 입형과 세장비의 영향도 있을 것으로 판단된다. 전체적으로 본 시험에 사용된 3개소의 쇄석재료에 대한 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 소형 시험이 중형 시험보다 감소폭이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 시편 제작에 사용된 재료가 같더라도 입경의 크기가 커지면 선형한계변형률이 증가하는 것을 알 수 있었다.

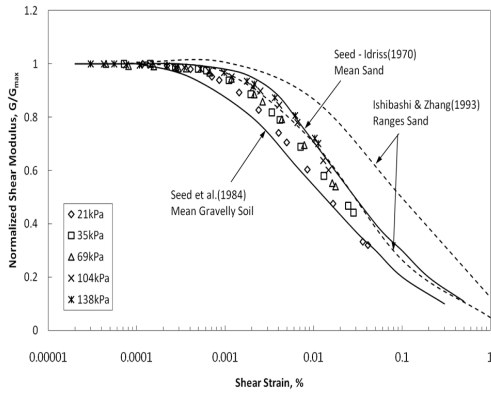


그림 8. 경상도 화강암의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 (중형, D=10cm)

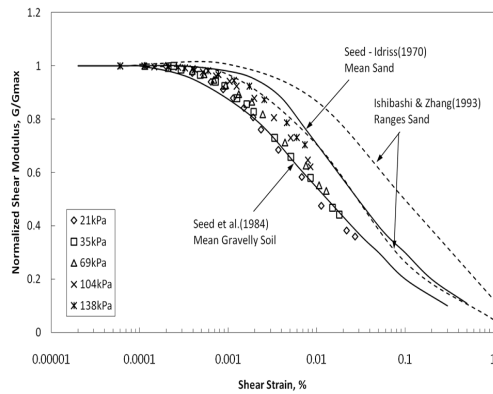


그림 9. 경상도 화강암의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 (소형, D=5cm)

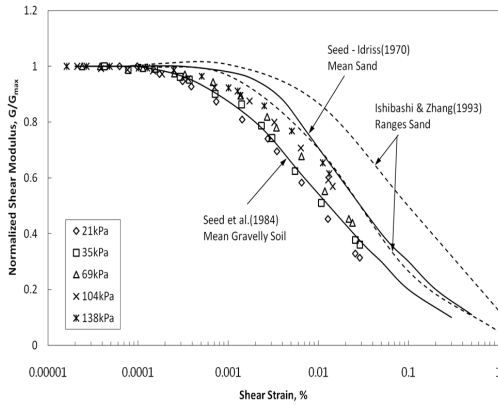


그림 10. 강원도 변성암의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 (중형, D=10cm)

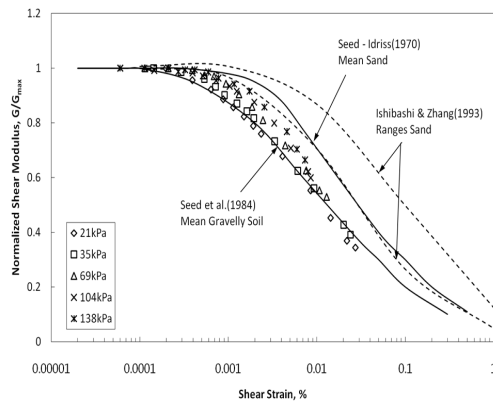


그림 11. 강원도 변성암의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 (소형, D=5cm)

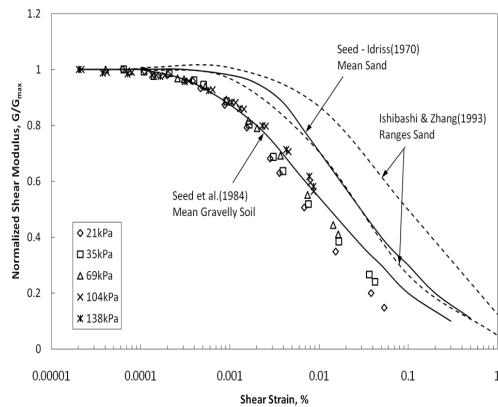


그림 12. 충청도 변성암의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 (중형, D=10cm)

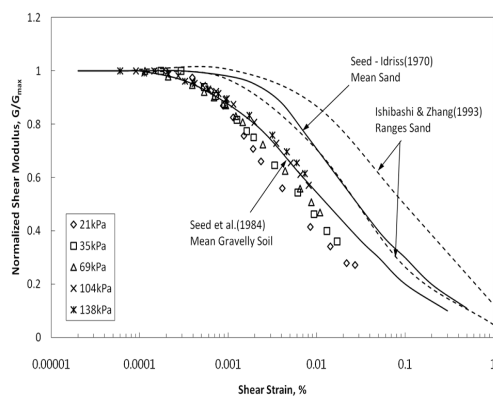


그림 13. 충청도 변성암의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 (소형, D=5cm)

5.3 G_{max} 예측 모델식 제안

식 1은 본 연구에 사용된 3개소의 쇄석 보조기층 재료에 대한 G_{max} 제안식이다. 또한 그림 14는 식 1에 의해 예측된 G_{max}과 실측된 모든 쇄석재료의 G_{max}값을 비교한 것으로서 각각의 제안식에 비하여 신뢰수준은 다소 떨어지지만 비교적 높은 신뢰수준을 보여주었다. 따라서 식 1을 이용하면 국내에서 사용되는 보조기층용 입상 쇄석재료의 최대전단탄성계수를 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

$$G_{\max} = 1733 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_0)^{0.72} \quad (1)$$

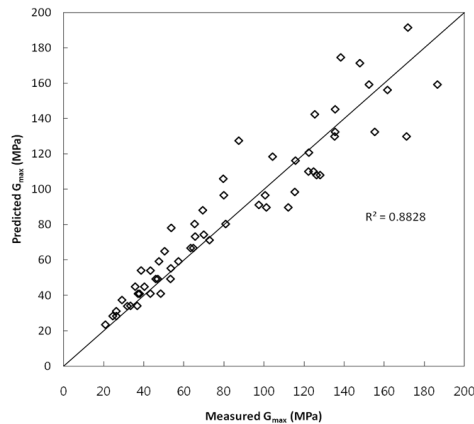


그림 14. G_{max} 예측모델에 의한 예측값과 실측값 비교

6. 결 론

- (1) 국내 3개소 쇄석 보조기층 재료를 이용하여 제작된 중형시편과 소형시편에 대한 공진주 시험결과, 구속응력 증가에 따라 최대전단탄성계수(G_{max})는 평균 약 20.4%정도 중형시편이 큰 것을 확인하였다. 이는 입자크기의 영향 즉, 중형 시편의 최대입자(Maximum Particle Size : 2cm)가 소형 시편의 최대입자(Maximum Particle Size : 1cm)보다 크기 때문이거나 시료자체의 크기 차이에 따른 관성저항 차이 때문인 것으로 사료된다. 따라서 작은 시편을 사용할 경우 상대적으로 입자 크기가 큰 보조기층 재료의 특성을 고려하여 시험을 실시하고 이를 캘리브레이션 할 수있는 방법이 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 중형시편에 대한 공진주시험 결과 국내에서 보편적으로 사용하는 쇄석 보조기층 재료에 대한 G_{max} 예측식을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구의 일부로 본 연구를 지원하여준 국토해양부 및 한국건설기술연구원, 한국도로공사 관계자에게 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 김동수, 정순용, 권기철, 박재영 (1997), “실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형특성 평가”, 한국지반공학회 논문집 제13권 제5호, pp. 89-100.
- [2] 김동수 (1995(a)), “공진주/비틀전단(RC/TS)시험을 이용한 건조사질토의 변형특성”, 한국지반공학회 논문집 제11권 제1호, pp. 101-112.
- [3] 김동수 (1995(b)), “공진주/비틀전단(RC/TS)시험을 이용한 점성토의 변형특성”, 한국지반공학회 논문집 제11권 제1호, pp. 113-124.
- [4] 김진만, 박요환, 임석동 (2009), “공진주/비틀전단시험을 이용한 낙동강모래의 동적전단변형특성”, 한국지반공학회 논문집 제25권 제11호, pp. 5-15
- [5] 권기철 (1998), “변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 MR 시험법”, 한국과학기술원, 박사학위논문.
- [6] 추연욱 (1998), “공진주/비틀전단시험을 이용한 사질토의 정규화 전단탄성계수 감소곡선에 관한 연구”, 한국과학기술원, 석사학위논문.
- [7] 건설교통부 (2010), “한국형포장설계법 개발과 포장성능개선 연구” 최종보고서
- [8] 한국지반공학회 (1997), “진동 및 내진설계”, 구미서관