

철도노반재로서 수경성입도조정고로슬래그의 동적 물성특성

Dynamic Properties of Hydraulic Mechanically Stabilized Slag as Railroad Material

황선근¹⁾, Seon Keun Hwang, 이일화²⁾, Il Wha Lee, 이성혁³⁾, Seong Hyeog Lee, 최찬용⁴⁾, Chan Yong Choi

- 1) 한국철도기술연구원 궤도·토목연구팀 책임연구원, Chief Researcher, Civil Eng. & Env. Div.,
Korea Railroad Research Institute
- 2) 한국철도기술연구원 궤도·토목연구팀 주임연구원, Researcher, Civil Eng. & Env. Div.,
- 3) 한국철도기술연구원 궤도·토목연구팀 선임연구원, Senior Researcher, Civil Eng. & Env. Div.,
- 4) 한국철도기술연구원 궤도·토목연구팀 연구원, Researcher, Civil Eng. & Env. Div.,

SYNOPSIS : Dynamic properties of hydraulic mechanically stabilized slag(HMS25) was studied for utilizing it as a roadbed material. HMS25 is a by product material during pig iron production process. It has a very good potential application as a roadbed material. Therefore, the resonant column and torsional shear tests were carried out to evaluate the dynamic properties of HMS25 which are necessary for designing roadbed of railroad track. As a result, it was found that HMS25 has excellent dynamic properties required for roadbed material used in railroad track.

Keywords : Railroad, roadbed, Combined resonant column and torsional shear testing equipment, Hydraulic mechanically stabilized slag, shear modulus, material damping ratio, excitation frequency, shearing strain

1. 서론

철도노반재료로 쓰이는 재료의 동역학적 특성은 철도노반이 이동중인 열차하중 하에서 동적 거동을 규명하는데 필수적으로 필요하다. 일반적으로 노반재료의 동역학적 특성에 영향을 미치는 중요한 인자들로 는 구속압력, 변형율의 크기, 가진 주파수, 적용 진동하중회수 등이 있다.

기존철도 및 고속철도에서 노반의 역할은 열차의 주행안전성 확보 및 궤도상부로부터 전달된 하중을 하부지반으로 적절히 분산하는 기능을 수행하게 된다. 현재 노반재료로서는 양질의 흙을 사용하여 노반을 건설하고 있으며 고속철도의 경우 노반의 지지력 증가를 위하여 강화노반의 개념을 도입하여 설계에 반영하고 있다. 강화노반의 재료로서는 쇄석을 사용하고 있으며 그 두께는 20~80cm로서 도상하부에 시공하게 된다. 그러나 쇄석의 경우 골재수급의 어려움과 부족현상이 심화되어 대체 재료의 필요성이 높아지고 있다. 수경성입도조정고로슬래그(HMS25)는 제철소에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 부산물로서 한해 발생량은 900만톤을 초과하고 있다. HMS25는 장기간 물과 반응하면 Cao와 SiO₂의 수화작용에 의하여 경화되는 성질을 가지고 있는데 이는 노반재료로서 매우 큰 장점이라 할 수 있다.

본 연구에서는 철도노반재로서 HMS25의 활용성을 검토하기 위하여 HMS25의 동적 특성을 조사하였으며 이를 위하여 현장조건에 알맞은 상태로 성형하여 공진주 실험(Resonant Column Test)와 비틀실험(Torsional Shear Test)을 수행하였다.

2. 수경성입도조정고로슬래그(HMS25)의 기본 특성

HMS25는 독특한 수경성을 가지고 있기 때문에 도로의 기층제나 콘크리트용 골재, 토양개량재 등 그 활용범위를 넓힐 수 있다. 대부분의 HMS25는 도로건설과 같은 콘크리트가 사용되는 모든 형태의 작업

에 이용될 수 있고 철도노반재로서의 활용도 가능하며 일부 외국에서는 도상자갈에 섞어서 사용하기도 한다. HMS25의 수경성은 양생기간이 길수록 높은 강도를 가지며 유해성분인 유황은 Aging 과정을 통하여 대부분이 탈황되는 것으로 조사되었다. HMS25의 기본물성은 비중이 2.7, 단위용적중량 1.7tonf/m^3 , 수침팽창율은 0.02%이며 LA마모시험 결과는 35.5%의 마모율을 가지고 있는 것으로 조사되었다. 사용된 시료의 입도분포곡선은 그림 1과 같다.

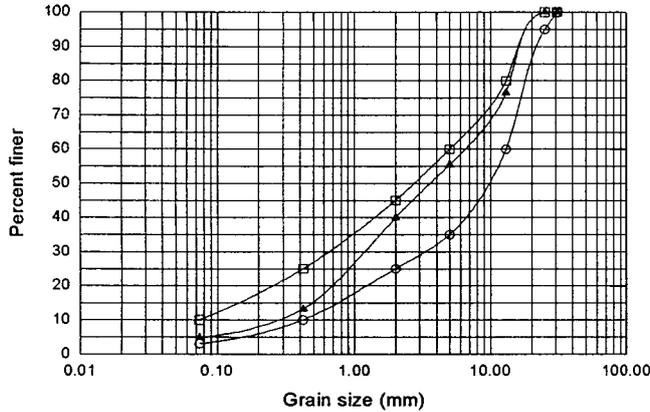


그림 1. HMS25의 입도분포곡선

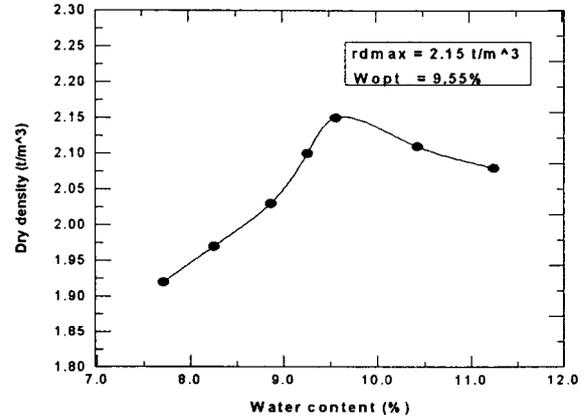


그림 2. HMS25의 다짐시험 결과

2.1 다짐시험

다짐시험은 KS F2312의 A다짐 방법에 의하여 자연 건조된 시료를 50mm체를 통과한 시료 중에서 규정에 맞도록 입도를 조정하여 다짐시험을 실시하였다. 2.5kgf 램머로 3층 25회 다짐한 HMS25의 다짐시험결과는 그림 2에서 보는 바와 같이 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 2.15tonf/m^3 , 최적 함수비(w_{opt})는 9.55%로 각각 나타났다.

2.2 일축압축강도시험

일축압축강도 시험방법(KS F2535)에 따라 시험에 필요한 HMS25를 최적함수비(9.55%) 상태로 공시체를 제작하여 일축압축강도시험을 실시하였다.

표 1. 양생별 일축압축강도 및 흡수율

양생일수(days)	14일	28일	42일	70일
일축압축강도(kgf/cm ²)	12.02	12.74	13.48	15.71
강도 증가량(%)	-	5.65	10.83	23.49
흡수율(%)	7.7%	7.3%	7.3%	7.1%

표 1은 양생일수가 증가하면서 점진적으로 강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. HMS25의 장기적 일축압축강도에서 가장 중요한 14일 강도는 KS 규격치인 12kgf/cm^2 를 만족하고 있으며, 시간이 경과되면서 점차적으로 강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 양생후 42일 경과후 초기 일축압축강도보다 약 10.83%증가하였다. 이는 시간이 경과되면서 고로슬래그의 수경성 반응이 발생되어 강도가 증진되는 것으로 판단된다.

3. 공진주/비틀실험장비의 개요 및 실험방법

본 시험에서는 Stokoe식 공진주/비틀전단시험기 사용하였으며, 공진주/비틀 시험용 자유단-고정단 시

편의 이상적인 구성도는 그림 3과 같다. 공진주 시험은 공시체의 바닥을 고정시키고 그림 4에서 보여주는 코일-자석 시스템을 이용한 가진 시스템(drive system)을 공시체의 상부와 연결하여 진동시 진동판에 부착된 가속도계(accelerometer)로 가속도를 측정한다

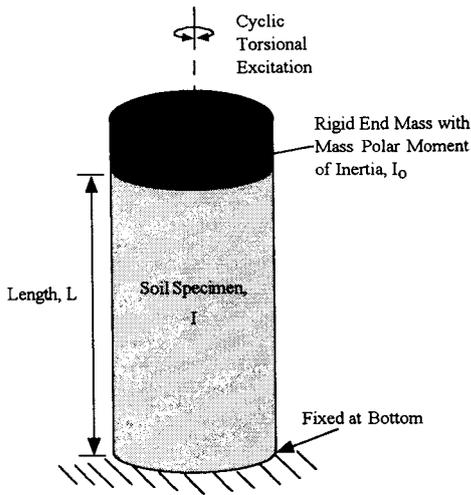


그림 3. 자유단-고정단 시험편의 구성도

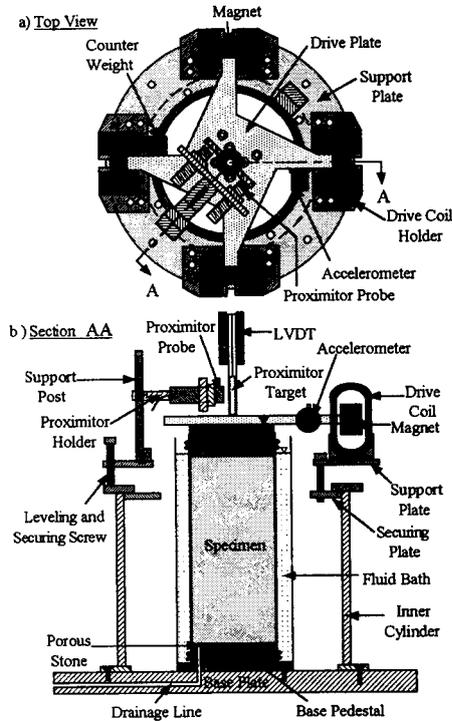


그림 4. 공진주/비틀 시험장치의 평면/단면도

4. 시험시료 및 시험절차

4.1 시험시료

본 연구에서는 경시변화에 따른 HMS25에 대해 공진주/비틀전단 시험을 수행하였다. 시료는 직경 5cm로 제작하였고, 혼합된 HMS25의 최대입경이 시료직경(5cm)의 1/6이상이므로 9.8mm체로 쳐서, 최대 입경을 조절한(matrix model 적용) 모델 시료에 대하여 시험을 수행하였다. 시료의 함수비는 9%, 시료의 건조단위중량은 1.8~1.9tonf/m³로 하였다.

공진주시험을 위한 시료성형은 5층의 과소다짐법(Under-Compaction)을 적용하였다. 과소다짐법은 각 층 동일한 시료 무게를 서로 다른 다짐높이로 성형하여 시료 전체에 균일한 건조단위중량 확보하는 시료 성형 방법이다(Ni, 1987). 3개의 시료를 성형하여 한 개를 공진주/비틀전단 시험기에 거치 3일 후와 7일 후에 공진주/비틀전단 시험을 수행하였다. 나머지는 밀봉된 통에 보관되었다가 시료 성형 후 29일 후, 76일 후에 시험을 각각 수행하였다.

4.2 시험절차

시료를 공진주/비틀전단 시험기에 설치하고 시험준비가 완료되면 구속응력을 가하고 시험을 수행하였다. 구속응력은 시료가 현장조건에서 받게 될 응력조건에서 실험을 하기 위하여 현장지반에서 시료가 경험하는 유효평균주응력을 식(1)과 같이 계산하였다.

$$\sigma'_m = \frac{1}{3} \sigma'_v (1 + 2K_o) \quad (1)$$

여기서, σ_m = 유효평균주응력 σ_v = 유효수직응력 K_0 = 정지토압계수

식 (1)에서 정지토압계수는 0.5로 가정하였고, 단위중량은 채취된 시료의 깊이까지의 평균적인 값을 적용하였다. HMS25시료는 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 kgf/cm²의 구속압을 순서대로 압축공기를 이용하여 가하고 시간에 따른 구속압의 영향을 평가하는 미소전단변형을 공진주시험(LA-RC), 전단변형을 공진주시험(HA-RC)시험을 먼저 수행한 후, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 kgf/cm²의 구속압을 진공압을 이용하여 가하고 전단변형을 비틀전단 시험을 수행하였다. 비틀전단 시험에서 하중주파수의 영향을 검토하기 위해 구속압 0.4, 0.8 kgf/cm²에서 미소전단변형율이 일정한 상태에서 하중주파수를 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10 Hz로 증가시키며 시험을 실시하였다.

5. 시험결과 및 분석

5.1 저전단변형율에서의 동적거동 특성

지반공학에서 주로 다루고 있는 건설재료의 대부분인 흙이나 골재 등의 정,동적 거동 특성을 보면 일반 다른 재료들과 달리 균질하지도 않을 뿐만 아니라 등방성을 가지지 않은 재료로써 매우 복잡한 양상을 보이고 있다. 현재까지의 연구 결과를 보면 이 것에 중요한 영향을 미치는 인자들이 매우 많이 있는 것으로 알려져 있으며 그 중에 하나인 전단변형율은 매우 중요한 역할을 하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 토질을 건설재료로 사용할 때는 이들의 전단변형율에 따른 거동특성을 정확히 파악하는 것은 매우 중요한 의미를 가진다. 일반적으로 열차하중으로 인한 철도노반에서의 전단변형율은 대부분 1×10^{-3} %이하로 알려져 있다.

5.1.1 최대전단탄성계수

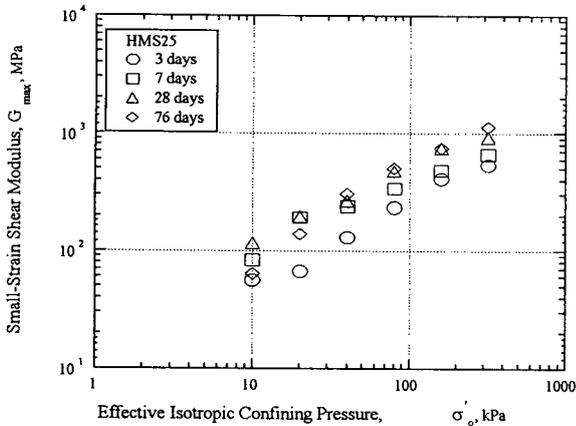


그림 5 HMS25의 구속응력과 재령에 따른 미소 변형율에서의 전단탄성계수의 변화

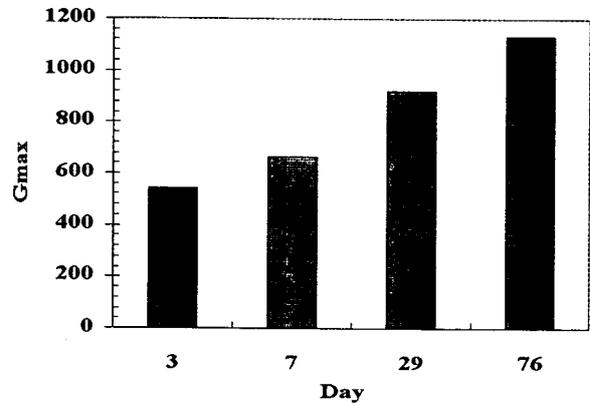


그림 6. HMS25의 시간에 따른 최대전단탄성계수

정확한 동적물성을 구하기 위하여 앞에서 언급된 절차대로 시료가 현장지반에서 경험하게 될 유효평균주응력과 각각의 구속응력에서 공진주시험(Resonant Column Test)을 수행한 결과 미소전단변형율에서 얻어진 최대 전단탄성계수는 그림 5에 보여주고 있다. 이미 널리 알려진 것과 같이 HMS25는 재령이 경과함에 따라 전단탄성계수가 증가함을 알 수 있다. 또한 그림 5에 보여진 각각의 재령에서의 경향을 보면 전반적으로 구속응력이 10kPa에서 320kPa까지 증가함에 따라 전단탄성계수는 구속응력의 0.5승으로 증가하는 것으로 추정된다. HMS25의 경시에 따른 최대전단탄성계수(G_{max})의 증가정도를 구속응력 320kPa에서 수행된 공진주시험 결과를 바탕으로 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보듯이 HMS25의 탄성계수는 시간의 흐름에 따라 증가하는 것으로 나타나고 있다.

5.1.2 최소감쇠비

HMS25시료에 대한 공진주시험결과를 그림 7에 나타내었다. 수재슬래그(HMS25)의 감쇠비는 구속응력이 증가함에 따라 대체적으로 감소하는 것으로 나타났으나 각각의 재령의 경향을 보면은 구속압력이 커짐에 따라 그 경향은 다소 감소함을 알 수 있다. 또한 재령이 증가함에 따라서도 전반적으로 감소하는 추세를 보이고 있다.

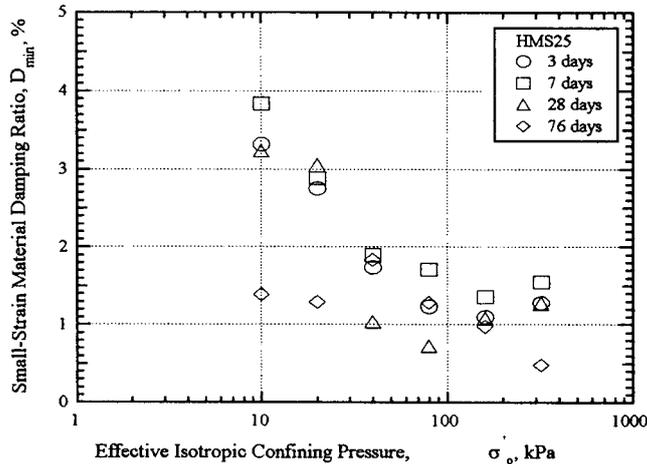


그림 7. HMS25의 구속응력과 재령에 따른 미소전단변형률에서의 재료감쇠비의 변화

5.1.3 재하주파수의 영향

재령 3일, 7일, 28일과 76일의 시료가 미소전단변형률에서의 재하주파수의 변화에 따른 전단탄성계수의 증가는 무시할 수 있는 정도로 작게 나타났다.

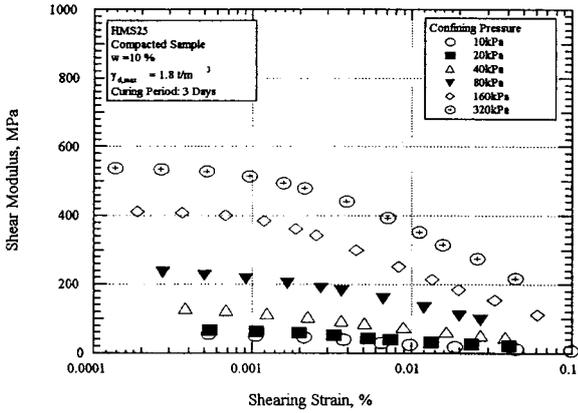
5.2 고전단변형률에서의 동적거동 특성

미소전단변형률에서의 전단탄성계수 및 감쇠비와 함께 고변형률에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 재료의 동적거동 특성을 파악하는데 상당히 중요한 역할을 가지고 있다.

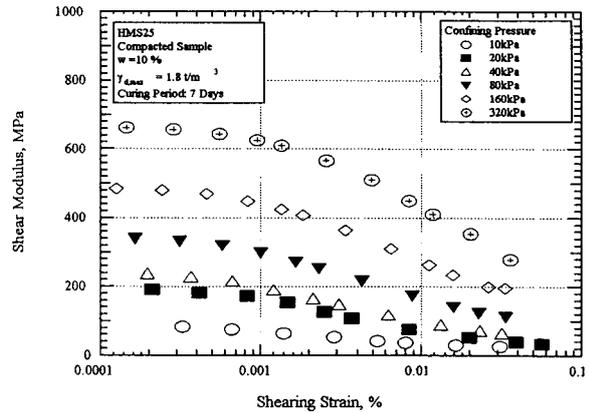
5.2.1 전단탄성계수

그림 8은 각각 재령 3일, 7일, 28일, 76일의 HMS25의 구속응력과 전단변형률크기의 변화에 따른 전단탄성계수의 거동을 보여주고 있다. 그림에서 전반적으로 전단탄성계수는 구속응력이 10 kPa에서 320 kPa로 증가함에 따라 증가하며 그 정도는 위에서 거론된 바와 같이 구속응력의 0.5승 정도로 증가하는 것으로 추정된다. 또한 전단탄성계수는 전단변형률이 증가함에 따라 점차 감소하는데 대체적으로 전단변형률이 1×10^{-3} %이하에서는 거의 변화가 없으며 이는 수재슬래그가 1×10^{-3} %이하의 전단변형률에서는 탄성적인 거동을 보임을 의미하고 있다. 전단탄성계수는 구속응력이 증가함에 따라 전단탄성계수 감쇠곡선은 전반적으로 오른쪽으로 평행 이동함을 알 수 있다. 현재 우리 나라에서 일반적으로 노반설계나 거동해석시 필수적으로 요구되는 노반재료의 물성을 측정하는 방법은 거의 정적인 실험방법에 의존하고 있는데 이러한 실험방법 들에서는 실제 현장에서 열차하중으로 노반에 발생하는 전단변형률(1×10^{-3} %이하)에서 물성을 측정하는 것은 거의 불가능한 것으로 알려져 있다. 즉 이러한 실험에서 측정되는 물성은 상당히 큰 변형률(1% 이상)에서 구하게 되는데 이는 재료의 전단탄성계수를 10배이상 과소 평가하게 된다. 따라서 이렇게 측정된 물성치를 사용할 경우 필요 이상으로 과다설계 또는 부정확한 노

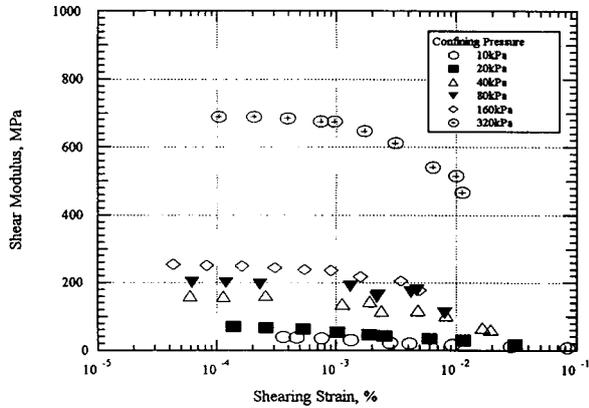
반의 거동해석을 초래하게 된다.



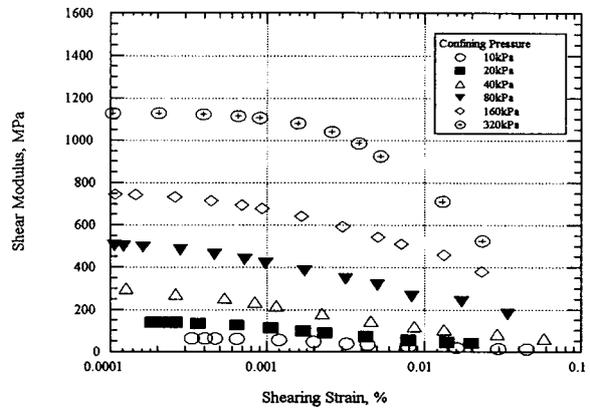
(a) 재령 3일



(b) 재령 7일



(c) 재령 28일

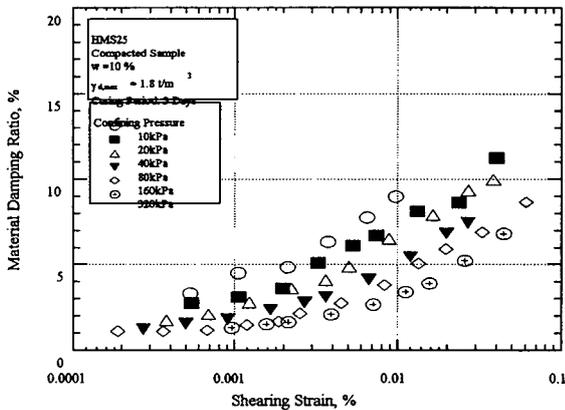


(d) 재령 76일

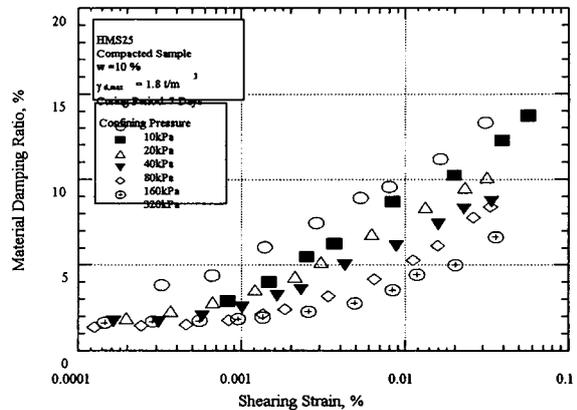
그림 8. 재령에 따른 HMS25의 구속응력과 전단변형률 크기에 따른 전단탄성계수의 변화

5.2.2 감쇠비

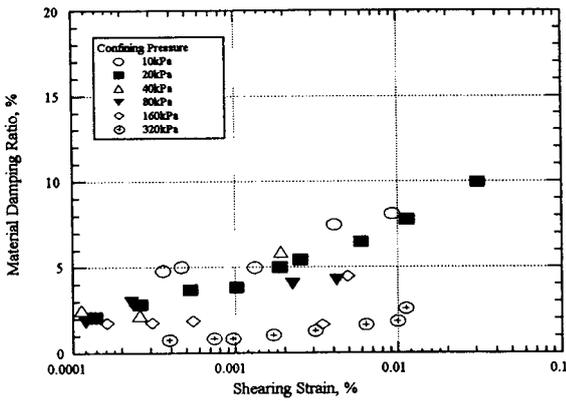
그림 9는 각각 재령 3일, 7일, 28일, 76일의 수재슬래그시료의 구속응력과 전단변형률 크기의 변화에 따른 재료감쇠비의 거동을 보여주고 있다. 그림에서는 전반적으로 재료감쇠비는 구속응력이 10 kPa에서 320 kPa로 증가함에 따라 감소된다. 또한 재료감쇠비는 전단변형률이 증가함에 따라 점차 증가하는데



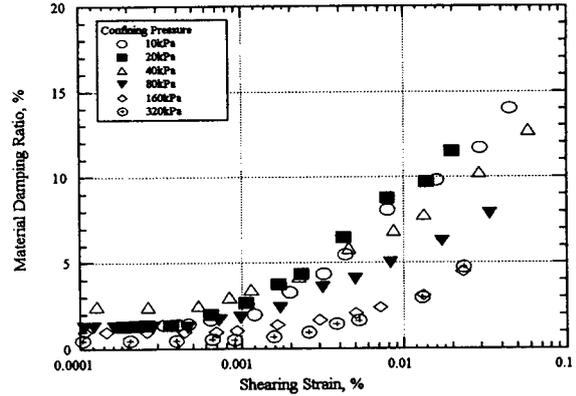
(a) 재령 3일



(b) 재령 7일



(c) 재령 28일



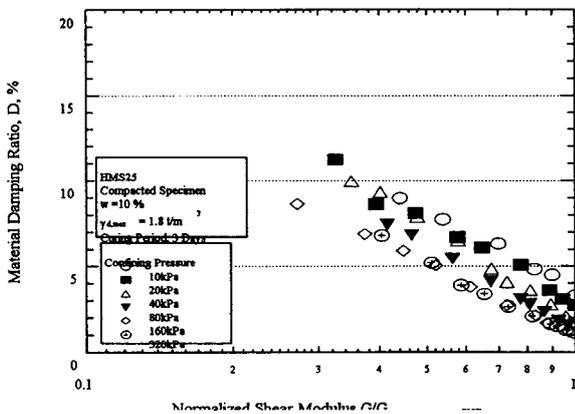
(d) 재령 76일

그림 9. 재령에 따른 HMS25의 구속응력과 변형률 크기에 따른 재료감쇠비의 변화

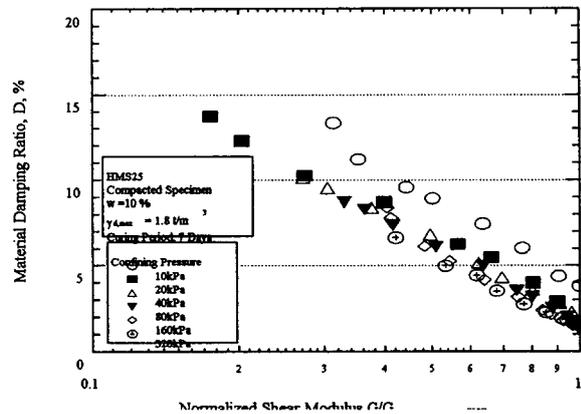
대체적으로 전단변형률이 1×10^{-3} %이하에서는 거의 변화가 없이 최소값을 보이며 이는 수재슬래그가 1×10^{-3} %이하의 전단변형률에서는 탄성적인 거동을 보임을 의미하고 있다. 구속응력이 증가함에 따라 전단변형률에 따른 재료감쇠비곡선은 전반적으로 밑으로 평행 이동함을 알 수 있다. 재령의 증가에 따라 재료감쇠비는 다소 감소하는 것으로 나타나지만 감소의 정도는 작은 것으로 보여진다. 현재 우리나라에서 일반적으로 노반진동해석시 필수적으로 요구되는 노반재료의 감쇠비를 측정하는 방법은 거의 전무한 상태로 실제 현장에서 열차하중으로 노반에 발생하는 진동을 측정된 결과와 해석프로그램에 의한 예측치의 차이는 이러한 값을 가정함으로 인한 오차가 클 것으로 판단된다.

5.3 정규화전단탄성계수와 감쇠비의 상관관계

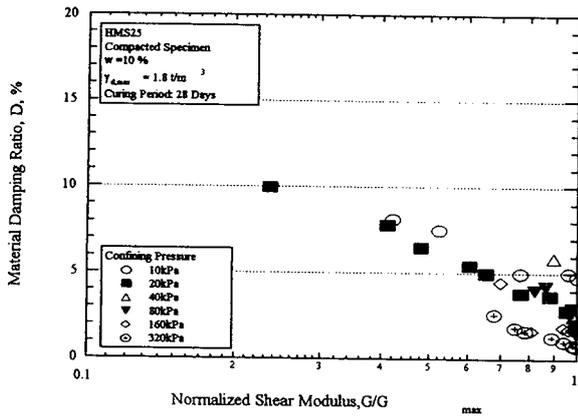
노반재료의 동적물성인 전단탄성계수와 재료감쇠비는 서로 독립적인 것처럼 보이지만 실제로는 상당히 밀접한 것으로 나타나는데 그림 10이 이것을 입증하고 있다. 그림 10은 각각 서로 다른 재령의 HMS25 시료에 대한 정규화 전단탄성계수와 재료감쇠비의 상관관계를 보여주고 있다. 각각의 구속응력에서의 전단탄성계수는 직선으로 대표될 수 있다. 이는 재료감쇠비 또는 정규화전단탄성계수 중 하나의 값만 알게 되면 나머지의 값은 이 직선관계식으로부터 추정할 수 있는 것으로 재료감쇠비의 측정이 전단탄성계수의 측정보다 상대적으로 어려운 점을 감안할 때 매우 획기적인 발견이라고 할 수 있다. 따라서 황선근(1997)이 제안한 정규화전단탄성계수의 실험적인 추정식을 이용할 경우 이 들 노반재료의 동적물성은 복잡하고 상당한 시간이 요구되는 실험이 없이 비교적 정확하게 추정하여 사용할 수 있다. 이러한 결과는 화강풍화토의 실험결과에서도 입증되는 것으로 나타나고 있다.



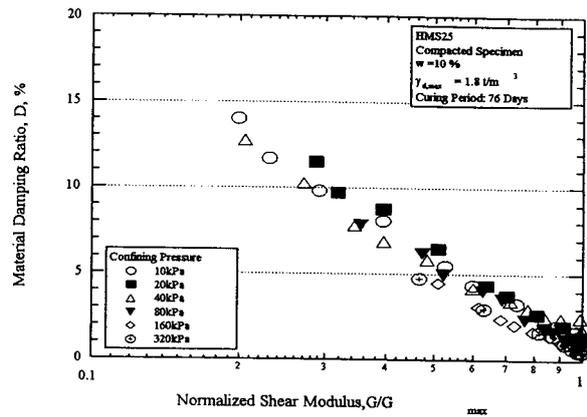
(a) 재령 3일



(b) 재령 7일



(c) 재령 28일



(d) 재령 76일

그림 10. 재령에 따른 HMS25의 구속응력에 따른 정규화단단성계수와 재료감쇠비의 상관관계

6. 결론

HMS25의 노반재료로서의 적합성을 검증하기 위한 동적 물성을 조사하였다. 열차 동하중을 고려하여 노반의 설계와 지반진동의 해석에 필수적으로 요구되는 동적 물성치를 현장조건에 적합한 상태로 성형하여 공진주 실험(Resonant Column Test)과 비틀실험(Torsional Shear Test)을 통하여 HMS25의 동역학적 특성을 구하였다. 본 연구에서는 소수의 시료를 실험, 측정하여 통계적이고 확률적으로 정확한 실험식을 제시하지는 못하였지만 앞으로 보다 더 많은 실험을 통하여 우리나라의 노반재료에 대한 동적 물성을 대표할 수 있는 모델을 제시할 수 있을 것으로 판단되며 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) HMS25의 전단탄성계수는 대부분 구속응력의 0.5승으로 증가하며 탄성계수는 시간의 흐름에 따라 증가한다.
- 2) HMS25의 하중주파수에 따른 전단탄성계수의 증가는 무시할 수 있는 정도로 작다.
- 3) 정규화 전단탄성계수와 재료감쇠비는 직선적인 상관관계가 있다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부와 산업자원부 및 과학기술부에서 시행한 선도기술개발사업중 “고속전철 토공 및 지반진동 저감기술개발”과제의 연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Isenhower, W.M., Stoke, K.H., II and Allen, J.C. (1987), "Instrumentation for Torsional Shear/Resonant Column Measurements Under Anisotropic Stress," Geotechnical Testing Journal, ASTM, Dec., pp.183-191
2. Kim, D.S., (1991), "Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Tests," Ph.D. Dissertation, Univ. of Texas
3. Ni, S. H. (1987), "Dynamic Properties of Sand Under True Triaxial Stress States from Resonant Column/Torsional Shear Tests," Ph.D. Dissertation, Univ. of Texas
4. Hwang, S.K.,(1997), "Dynamic Properties of Natural Soils", Ph.D, Dissertation, Univ. of Texas