KSR 0005 / PP 34~41, 2000.

철도 강화노반재료의 정·동적 특성 분석

Analysis of Static and Dynamic Characteristics of Reinforced Roadbed Materials

황선근[1] · 신민호[2] · 이성혁[3] · 이시한[4] · 최찬용[4]

Hwang, Sun-Keun · Shin Min-Ho · Lee, Seong-Hyeok · Lee, Si-Han · Choi, Chan-Yong

ABSTRACT

The analysis of static and dynamic characteristics of reinforced roadbed materials was performed through model and laboratory tests. The strength characteristic of reinforced roadbed materials such as HMS-25 and soil were investigated through the unconfined axial compression test, the model soil box test and the combined resonant column and torsional shear test. The unconfined axial compression strength of HMS-25 shows a steady increasement in strength due to the chemical hardening reaction between HMS-25 and water. The result of model soil box test reveals that railroad roadbed of HMS-25 is better than that of soil in several aspects, such as, bearing capacity and settlement. The combined resonant column and torsional shear test result indicates that shear modulus of HMS-25 and soil increase with the power of 0.5 to the confining pressure and linear relationship to normalized shear modulus and damping ratio.

Keywords : Roadbed(노반), Combined resonant and torsional shear test(공진주/비틂 전단 시험), Shear modulus(전단탄성계수), Material damping ratio(재료 감쇠비)

1. 서 론

일반적으로 철도 노반은 열차의 주행안정을 확보하기 위해 궤도를 견고하게 지지하고 궤도에 대해서 적당한 탄성을 부여함과 동시에 노상의 연약화 방지, 노상으로의 하중의 전달 통과시의 열차 하중 및 진동은 일반적인 경우 레일로부터 침목, 도상을 거쳐 최종적으로는 노반에 전달된다. 따라서 노반은 궤도의 기초라 할 수 있으나 일반 구조물의 기초는 정적 하중을 받는 것에 비해 철도 노반은 열차 통과에 의한 동적 하중을 받는다는 특징을 가지고 있다.

1) 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀장
2) 한국철도기술연구원 시설전기연구본부장
3) 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀, 선임연구원
4) 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀, 연 구 원

즉 노반의 역할은 열차 통과에 의한 동적 하중 및 진동에 대해서 궤도를 안전하게 지지하는 것이라 할 수 있다

노반이 불안정하면 지지력이 저하됨으로써 궤도 틀림이 발생되기 쉬워 보수에 많은 어려움이 생기며 빈번한 재료 갱환이 필요할 뿐만 아니라 열차가 소정의 속도로 운행할 수 없게 되는 경우도 있다. 따라서 노반이 불량한 선구에서는 일반 구간에 비해 상당한 보수 노력이 필요하다. 기존의 철도노반은 절토 또는 토취장에서 채취한 흙을 가지고 성토를 하여 장기간 동안 자중에 의해 자연 침하되도록 하여 궤도를 부설하여 왔으므로 사용년수 경과에 따른 도상자갈 관입의 증대, 분니, 침하 등에 의해 궤도 보수량이 급증하고 있는 실정이다.

이와 같은 노반에서 발생되는 문제점들을 해

결하고 막대한 유지보수비용의 절감을 위해 국외 특히 일본의 경우에는 재래선과 신간선에는 강화노반을 채택하여 시공하고 있는데 그림 1에는 노반의 종류를 나타냈고 그림 2에는 일본 철도의 강화노반 구조를 나타냈다.

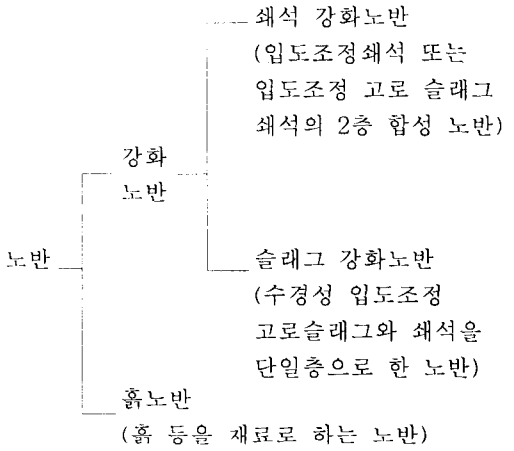

Fig 1. 노반의 종류

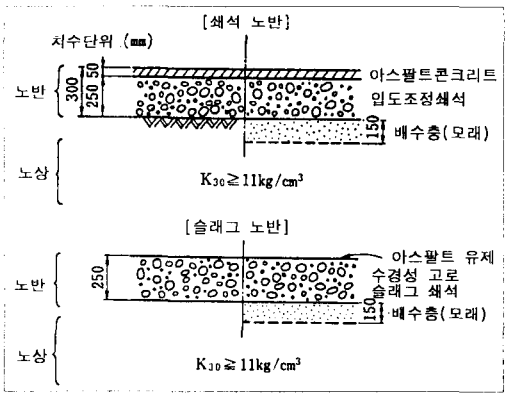

Fig 2. 일본의 강화노반 구조 (재래선 1급선)

본 연구에서는 이와 같은 강화노반재료의 국내 철도에의 시공 및 적용성 평가를 위해 앞서 언급한 강화노반 재료 중 수경성 입도조정 고로슬래그(Hydraulic and Mechanically Stabilized Slag, 이하 HMS-25라 함)와 흙(화강풍화토)등의 노반재료에 대해 기본 물성시험과 일축압축강도시험, 모형토조시험 및 공진주/비틂 전단시험을 실시하여 강화노반재료의 정·동적 특성분석을 실시하였다.

2. 기본 물성 시험

본 연구에서 강화노반재료로서 시험에 사용된 HMS-25는 제철소에서 선철을 제조하는 과정에서 발생되는 산업부산물로서 현재에는 도로의 기층이나 보조기층 재료로 광범위하게 사용되고 있으며, 특히 수화반응에 의해 경화되는 성질(수경성)을 가지고 있어 노반재료로서 매우 큰 장점을 가지고 있다고 할 수 있다.

본 연구에서 사용한 HMS-25는 입자의 최대입경이 25mm로서 경북 포항의 (주) 동서개발에서 생산되고 있는 것을 사용하였고, HMS-25와 함께 정·동적 특성분석 시험에 사용된 흙(화강풍화토)은 신갈-안산간 고속도로 확포장공사 구간에서 성토재료로 사용되고 있는 시료를 채취하여 사용하였다.

Table 1과 Fig 3에는 HMS-25와 흙의 기본 물성시험 결과 및 입도분포곡선을 각각 나타냈다.

Table 1. 기본 물성 시험 결과

항목 \ 재료		HMS-25	화강 풍화토
비 중		2.73	2.54
입도 시험	C_u(균등계수)	12.5	12.0
	C_g(곡률계수)	1.13	1.0
다짐 시험	최대건조밀도	2.15 gf/cm³	1.98 gf/cm³
	최적함수비	9.55 %	11.4 %

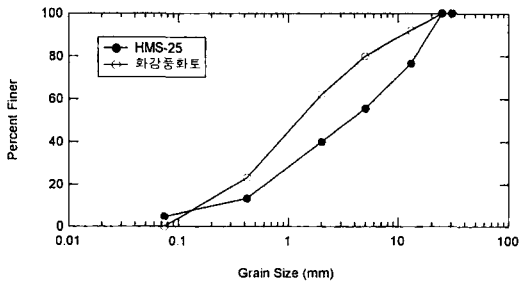

Fig 3. 입도 분포 곡선

3. 일축 압축 강도 시험

두 강화노반재료의 기본물성시험 결과를 토대로 하여 앞서 언급한 HMS-25의 수경성에 의한 슬래그 자체의 강도증진효과를 알아보기 위해 HMS-25를 사용하여 공시체를 제작한 후 일축압축강도 시험을 실시하였다.

3.1 실험방법

일축압축시험용 공시체 제작은 먼저 Table 1에 나타낸 HMS-25의 다짐시험 결과를 토대로 하여 시료를 최적함수비(9.55%) 상태로 만든 다음 직경 10cm, 높이 20cm인 다짐용 몰드내에 시료를 넣은 다음 KS F 2535(도로용 철강슬래그)의 다짐시험 방법에 따라 3층 42회로 나누어 다짐을 하여 공시체를 제작하였다.

현재까지 국내에는 철도 노반용 슬래그에 대한 KS 시험기준이 마련되어 있지 않아 도로용 철강 슬래그 기준(KS F 2535)을 본 연구에 적용하였다.

시료의 다짐 후에 Fig 4에 나타낸 바와 같이 공시체 상부 표면에 약 3mm 두께로 석고를 물과 약 3:1의 비율로 섞어 캐핑(Capping)을 하였다.

캐핑의 주목적은 래머로 다짐을 하면 HMS-25의 최대입경이 25mm이므로 이들 굵은 입자들로 인하여 공시체 상부표면이 평탄하지 않아 일축압축시험시 시험기의 상부 하중판과 완전히 밀착되지 않기 때문에 캐핑을 하여 공시체 표면을 평탄하게 함으로써 하중이 공시체에 균등하게 분포되도록 하기 위함이다.

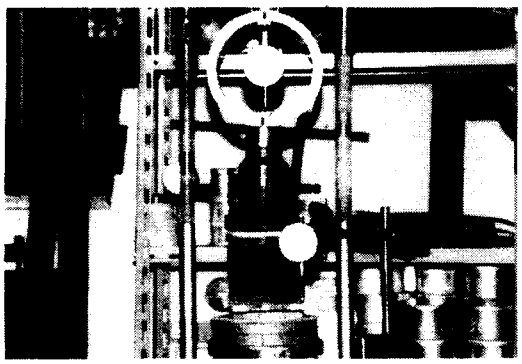

Fig 4. HMS-25 일축압축시험 장면

공시체는 KS F 2535 기준에 의하여 13일 동안 공기 중에서 양생시키고 1일간 수침시키는 방법으로 공시체를 양생시킨 후 양생기간에 따른 일축압축강도특성을 분석하였다.

양생기간은 14일, 28일, 42일, 70일로 나누어 각 조건별 2개씩 총 8개의 공시체를 제작하였다.

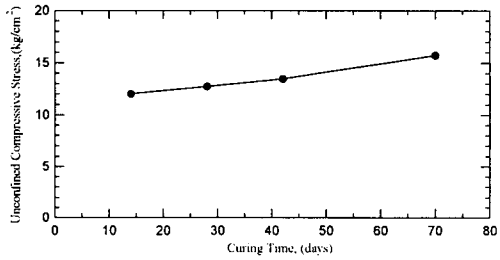

Fig 5. 양생기간별 HMS-25 일축압축시험 강도

본 연구에서 실시한 양생기간별 일축압축강도 변화는 Fig 5에 나타냈다. 그림에 나타낸 값들은 각 조건별 2개의 공시체에 대해 실험을 실시하여 평균한 값을 보였다.

KS 기준에 나타나 있는 슬래그의 일축압축강도 기준을 보면 재령 14일 때의 일축압축강도가 12kgf/cm^2 이상으로 되어 있는데 Fig 5에 나타낸 실험 결과를 보면 이 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

그림에서 보면 양생기간이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 경향을 보였으며, 양생기간 70일 때의 강도는 약 16kgf/cm^2 정도로 나타나 초기강도(14일)에 비해 약 33% 정도 강도가 증가하였으며, 흡수율은 약 7% 정도 증가하였다.

HMS-25의 장기강도 특성 분석을 위해 일축압축강도시험을 실시한 기타 실험결과를 보면 양생기간 180일 때의 강도가 30kgf/cm^2 까지 증가하는 것으로 나타났다.

이와 같은 강도 증가 현상은 HMS-25의 가장 큰 특성이라고 할 수 있는 수경성의 영향으로 판단되는데 HMS-25의 수경성은 Table 2에 보인 바와 같이 시멘트의 화학성분과 유사하여 시간이 경과함에 따라 수화반응에 의해 비소성(N.P)의 약강도 콘크리판을 형성하여 수경성을 발휘하는 것으로 알려져 있다.

Table 2. HMS-25 및 시멘트의 화학 성분

구 분 / 화학성분(%)	HMS-25	포틀랜트 시멘트
SiO_2	33.7	22.0
CaO	41.5	55.0
Al_2O_3	13.9	9.0
T-Fe	0.4	2.0
MgO	6.5	4.0
MnO	0.5	-
TiO_2	1.3	-
S	0.99	2.0

4. 강화노반재료의 정적 특성 분석 시험

본 연구에서는 앞서 언급한 실내시험 결과를 토대로 하여 모형토조시험을 통해 강화노반재료의 정적하중에 대한 지지력 및 침하특성을 규명하였다.

모형토조시험은 모형토조 내에 현장 조건을 고려하여 화강풍화토와 HMS-25를 사용하여 모형노반을 두께별로 조성한 후 정적하중을 재하하여 노반의 침하특성을 분석하였다.

4.1 모형토조시험장치

시험에 사용된 모형토조의 제원 및 전경을 그 Fig 6과 Fig 7에 보였다.

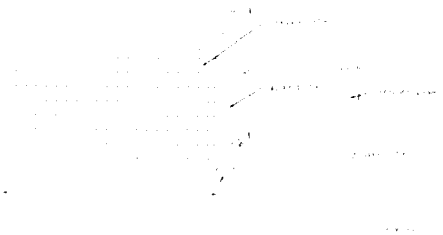

Fig 6. 모형토조시험장치 개략도

모형토조의 내부는 폭 300mm, 길이 900mm, 높이가 800mm이며, 토조의 3면과 밑바닥은 앵글로 보강하여 하중재하시 토조자체에 휨변형이 발생하지 않도록 제작하였다.

시험장치의 전면부는 하중재하시 지반의 파괴형상 관찰을 위해 투명한 아크릴로 제작하였다. 또한 하중재하시에 기초지반과 토조 안쪽면과의 마찰을 최소화 하기 위해 토조 벽면에 그리스를 도포하였다.

각 재료를 사용하여 조성한 지반의 상부에는 유압실린더로부터 재하되는 하중을 지반에 전달될 수 있도록 하기 위해 모형기초를 설치하였는데 기초는 강성이 큰 아크릴을 폭 90mm, 길이 300mm, 두께 30mm로 제작하여 사용하였다.

모형기초의 저부는 표면이 거친 샌드페이퍼를 부착하여 모형지반과 기초사이가 완전히 밀착되게 하여 하중재하시 모형기초가 전도되지 않도록 하였다. 이와 같은 모형기초 중심부에 직경 3cm 정도의 홈이 있는 하중받침대를 설치하여 하중재하봉의 단부가 하중받침대의 홈과 맞물려 하중을 지반에 전달될 수 있도록 하였다.

이는 하중받침대가 힌지와 같은 역할을 하여 하중이 전달되는 과정에서 잠재적인 모멘트나 파괴형상이 자유롭게 발생하도록 하기 위함이다.

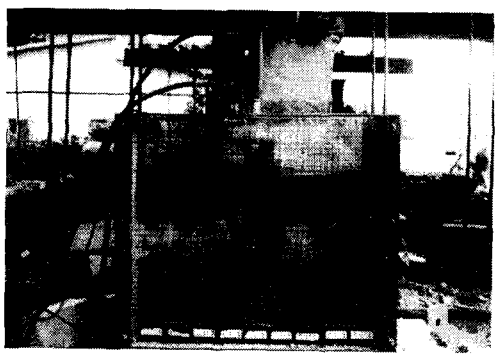

Fig 7. 모형토조시험장치 전경

4.2 실험조건

Fig 7에 나타낸 시험장치를 이용하여 모형노반을 조성하였는데 크게 화강풍화토를 사용한 흙노반 20cm, 30cm와 HMS-25 노반 20cm, 30cm로 노반두께를 달리한 4개의 Case에 대해 시험을 실시하였다.

모형노반의 조성은 두 시료를 Table 1에 나타낸 결과치를 이용하여 최대건조밀도의 90% 이상이 되도록 3층으로 나누어 다짐을 실시하였다. 다짐 완료 후 모형기초의 양단부에 다이얼게이지를 설치하여 모형노반의 침하량을 측정하

였다. 침하는 각 하중단계별로 15분간의 침하를 단계침하로 산정하고 그동안 침하가 정지되었을 경우의 침하를 침하량으로 산정하였다.

Table 3. 모형 토조 시험 조건

실험조건	노반조성	노반 두께
Case 1	흙 노반	20cm
Case 2		30cm
Case 3	HMS-25 노반	20cm
Case 4		30cm

4.3 실험결과 및 고찰

4.3.1 실험조건별 극한지지력의 변화

Table 4에 각 실험조건별 극한지지력의 변화를 나타냈다. 극한지지력의 산정방법은 그림 9에 나타낸 바와 같이 도해적인 방법으로 각 조건별 항복하중(Q)을 구한 다음 (식 1)을 이용하여 극한지지력을 구하였다.

극한하중(Q_u) = 1.5 · Q
극한지지력(q_u) = Q_u/(모형기초 저면적) (식 1)

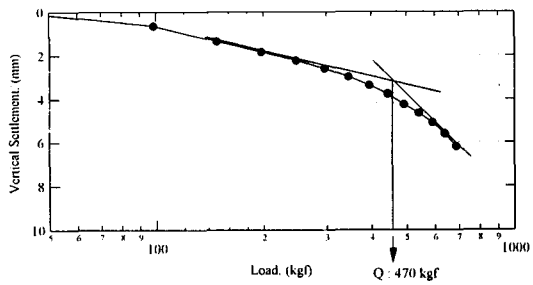

Fig 8. 항복하중 구하는 방법 (Case 1 예)

Table 4. 실험조건별 극한지지력

실험조건	극한하중 (kgf)	극한지지력 (kgf/cm^2)	비 고
Case 1	705	2.61	모형기초 저면적 = $270cm^2$
Case 2	622.5	2.31	
Case 3	802.5	2.97	
Case 4	1,125	4.17	

Table 4에서 보면 흙노반 20cm (Case 1)의 극한지지력이 $2.61kgf/cm^2$로서 HMS-25노반 20cm (Case 3)의 $2.97kgf/cm^2$보다 작게 나타났으며 30cm 노반의 경우도 동일한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

실험조건별 Case 1의 극한지지력을 기준으로 하여 각 조건별 상대적인 극한지지력의 증가정도를 측정하기 위하여 BCR_u(Bearing Capacity Ratio at Ultimate)값을 계산하였는데 BCR_u 값은 (식 2)를 이용하여 계산하였다.

$$BCR_u = \frac{BCR_{\text{각 Case 별 극한지지력}}}{BCR_{\text{Case 1 극한지지력}}} \qquad \text{(식 2)}$$

(식 2)를 이용하여 계산된 BCR_u 값을 Fig 9에 나타냈다. Fig 9에서 보면 BCR_u 값은 Case 3과 Case 4는 각각 1.14와 1.6으로 BCR_u 값이 증가됨을 보였다.

이러한 HMS-25 노반의 지지력의 증가는 다짐에 의한 슬래그 입자간의 맞물림 효과와 수경성으로 인한 강도 증가의 영향으로 사료된다.

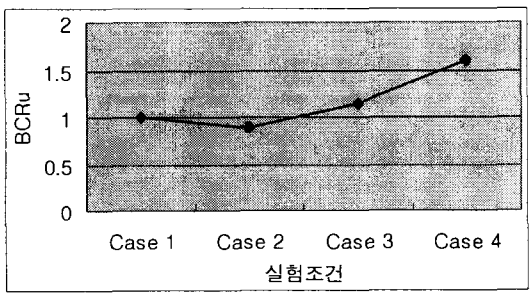

Fig 9. 실험조건별 BCR_u 값

4.3.2 하중-침하량 관계

흙노반과 HMS-25노반의 정적 하중 재하에 따른 단계별 침하량의 관계를 Fig 10, Fig 11에 나타냈다.

Fig 10을 보면 Case 1(흙노반 20cm)과 Case 3 (HMS-25노반 20cm)의 두 조건 모두 하중이 증가할수록 침하량이 증가하지만 하중단계별 침하량은 큰 차이를 보이지 않았다.

노반두께 20cm의 경우와는 달리 노반두께 30cm의 경우(Fig 11)는 두 재료별 침하량의 차

이가 확연함을 알 수 있다.

3kgf/cm^{2}에서의 침하량의 경우 Case 4(HMS-25 노반 30cm)의 침하량은 약 3.2mm, Case 2(흙 노반 30cm)의 침하량은 약 8.2mm를 나타내어 흙노반이 HMS-25노반에 비해 2.6배 정도 침하량이 큰 것으로 나타나 침하량 측면에서는 슬래그 노반이 유리하게 나타났다.

이와 같이 실험 결과는 HMS-25 노반 자체의 강성도 증가와 슬래그 골재의 맞물림 효과로 인하여 생긴 결과라고 판단된다.

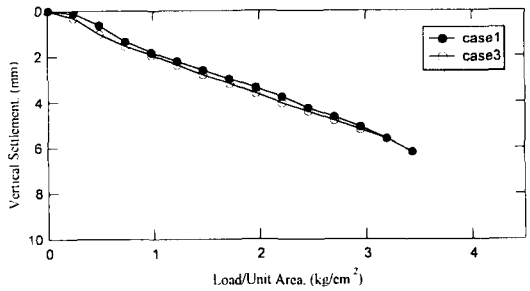

Fig 10. 하중단계별 침하량 (노반두께 20cm)

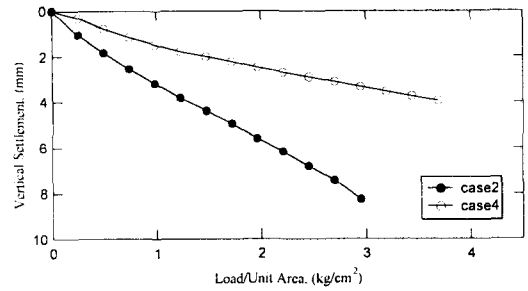

Fig 11. 하중단계별 침하량 (노반두께 30cm)

5. 강화노반재료의 동역학적 특성 분석

일반적으로 철도노반은 열차운행에 따른 동적 하중하에서 거동을 하므로 이러한 노반의 동역학적 특성을 규명하는 것은 노반에 대한 연구에 있어서 필수적이라고 할 수 있다. 특히 현재 우리나라에서 일반적으로 노반설계나 거동해석시 필수적으로 요구되는 노반재료의 물성을 측정하는 방법은 거의 대부분이 정적인 실험에 의해 물성치를 구하고 있다. 그러나 이러한 방법은 열차 하중으로 인해 실제 노반에 발생하는 저변형율(1×10^{-3} % 이하)에서 노반재료의 물성을 측정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 공진주/비틂 전단시험을 통해 이러한 저변형율에서의 노반재료의 동적 설계 정수를 구하고자 하였다.

5.1 실험개요 및 방법

본 시험에서는 Fig 12에 보인 시험장치를 이용하였다. 공진주 시험기의 원리는 공시체의 바닥을 고정시키고 그림에 나타낸 코일-자석 시스템을 이용한 가진시스템(Drive system)을 공시체의 상부와 연결하여 진동시에 진동판에 부착된 가속도계에 의해 구한 가속도를 측정하여 전단파 속도(Vs), 전단탄성계수(G)등을 구하는 시험이다.

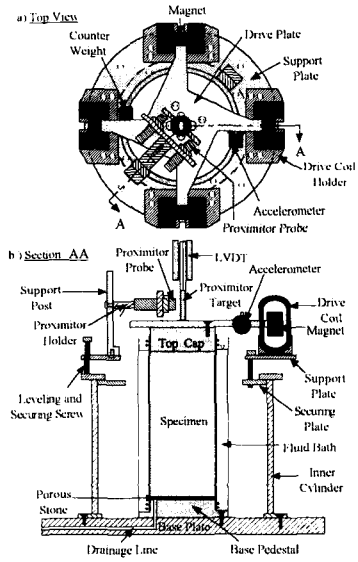

Fig 12. 공진주/비틂 전단 시험 장치

비틂 전단 시험은 공진주 시험기와 동일한 시험기를 사용하여 공시체 상부에 연결된 진동시스템에 10Hz 미만의 고정된 주파수로 반복 비틂력을 가하여 비틂력-비틂각의 관계로부터 전단탄성계수와 재료의 감쇠비(Damping ratio, D)를 구하는 방법이다.

공진주/비틂 전단 시험은 모형토조시험에 사용된 HMS-25과 화강풍화토를 사용하였으며, 공시체는 직경 5cm로 제작하였다. 공시체 제작시 두 시료의 최대입경(HMS-25 : 2.5cm)이 시

료직경(5cm)의 1/6 이상이므로 9.8mm 체로 쳐서 최대입경을 조절하여 실험에 사용하였다. 일반적으로 공진주/비틂 전단 실험시 시료의 최대입경이 공시체 직경의 1/6 이상이 되면 실험에서 구하는 전단탄성계수와 감쇠비의 신뢰성이 떨어지므로 보다 정확한 실험결과 도출을 위해 공시체 직경의 1/6 이하로 시료의 최대입경을 조절하였다. 공시체 제작시 시료의 함수비는 9%, 최대건조밀도는 1.8~1.9tonf/m^3으로 하였다. 공진주 시험에 필요한 시료의 성형은 5층의 과소다짐법(Under-Compaction)을 적용하였다.

이 방법은 각 층 동일한 시료무게를 서로 다른 다짐높이로 성형하여 시료 전체에 균일한 건조밀도를 확보하는 방법이다.

5.2 실험결과 및 고찰

일반적으로 공진주 시험에서 구한 전단파 속도(Vs)로부터 전단탄성계수(G)는 (식 2)에 의해 구할 수 있다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (\rho : \text{공시체의 밀도}) \qquad (식\ 2)$$

화강풍화토와 HMS-25의 구속응력에 따른 저변형율에서의 최대전단탄성계수(G_{max})의 변화를 Fig 13, Fig 14에 나타냈다. Fig 13에 보인 화강풍화토의 실험 결과 구속응력이 20kPa에서 160kPa까지 증가할수록 최대전단탄성계수값은 증가하며, 증가량은 구속응력의 0.5제곱으로 증가하였다.

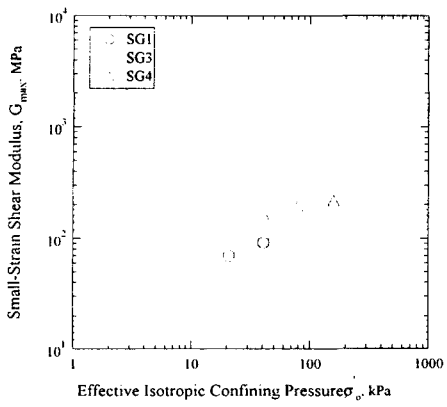

Fig 13. 구속응력에 따른 최대전단탄성계수의 변화(화강풍화토)

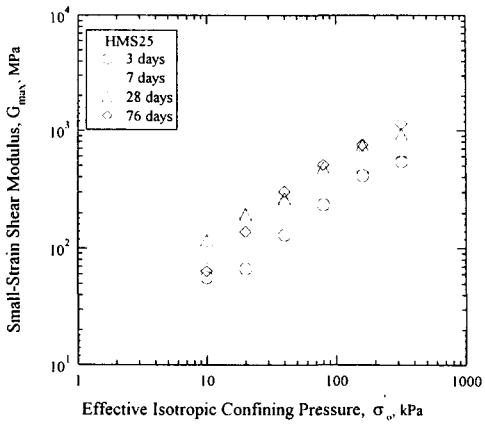

Fig 14. 구속응력 및 재령에 따른 최대전단탄성계수의 변화(HMS-25)

Fig 14에는 HMS-25의 실험결과를 나타냈는데 HMS-25는 그 자체의 고유특성인 수경성의 영향을 고려하기 위하여 재령(3일, 7일, 28일, 76일)에 따른 실험도 추가적으로 실시하였다.

그림에서 보면 화강풍화토의 실험 결과와 마찬가지로 최대전단탄성계수는 구속응력의 0.5제곱으로 증가하였으며, 동일한 구속응력에서 재령이 증가할수록 최대전단탄성계수도 증가하였다.

화강풍화토와 HMS-25의 정규화 탄성계수와 재료감쇠비의 상관관계를 Fig 15와 Fig 16에 각각 보였다.

Fig 15에서 보는 것처럼 각 구속응력에서의 정규화 탄성계수와 감쇠비는 직선적인 상관관계를 나타냈다.

재령 3일의 HMS-25 공시체의 실험결과를 보인 Fig 16에서도 화강풍화토와 마찬가지로 직선적인 상관관계를 보였다. 이와 같은 실험결과는 7일, 28일, 76일 재령의 HMS-25 실험결과에서도 동일한 결과를 보였다.

Fig 15, Fig 16의 실험결과에서 보면 재료감쇠비 또는 정규화 전단탄성계수값 중 하나의 값만 알게 되면 나머지 하나의 값은 이 직선관계식으로부터 추정할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 공진주/비틂 전단 실험을 통한 재료의 동적물성 측정에 복잡하고 상당한 시간이 소요되는 점을 감안하면 매우 효과적인 방법이라고 판단된다.

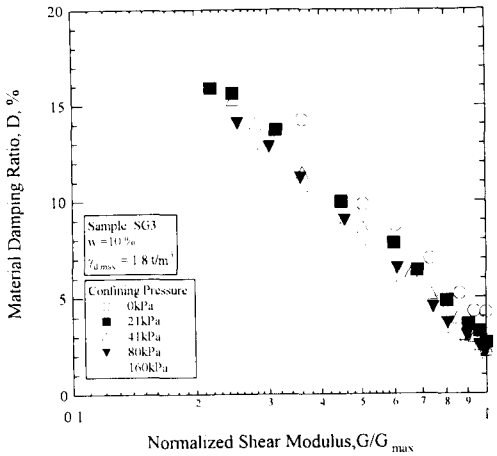

Fig 15. 정규화전단탄성계수와 재료감쇠비의 상관관계(화강풍화토)

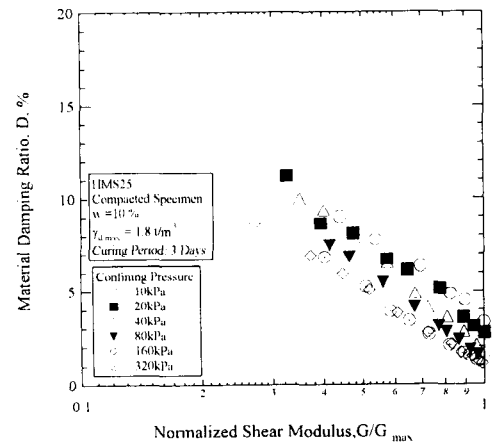

Fig 16. 정규화전단탄성계수와 재료감쇠비의 상관관계(HMS-25, 재령 3일)

5. 결 론

본 연구는 철도노반재료로서 화강풍화토(흙)와 산업부산물인 HMS-25를 재활용하는 차원에서 이들 재료에 대한 정·동적 특성 분석 시험을 실시하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

1) HMS-25의 일축압축강도시험 결과 양생 14일 후의 강도가 KS 기준인 12kgf/cm^2 이상으로 나타났으며, 70일 때의 강도는 14일 강도에 비해 약 33%의 강도증가를 나타내어 수경성에 따른 장기거동 특성을 확인할 수 있었다.
2) 모형토조시험 결과 HMS-25를 사용한 노반이 흙노반에 비해 극한지지력은 최대 1.6배 크게 나타났으며, 침하량은 흙노반이 슬래그 노반에 비해 약 2.6배 정도 침하량이 크게 나타났다.
3) 공진주/비틂 전단 시험 결과 화강풍화토 및 HMS-25의 최대전단탄성계수는 구속응력의 0.5 제곱으로 증가하였다.
4) 정규화 탄성계수와 재료감쇠비는 화강풍화토, HMS-25 모두 직선적인 상관관계를 보였다.

참 고 문 헌

1. 대한토목학회, "고로 슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공 지침", 1986.
2. 철도청, "철도공사전문시방서(토목편), 1999.
3. 日本 鐵道總合技術研究所, "鐵道構造物等設計標準·同解說 上構造物", 運輸省 鐵道局, 1992.
4. 日本 (財)鐵道總合技術研究所, "鐵道强化路盤の合理的設計法に關する研究", 鐵道總合技術研究所編, 1996.
5. S. K. HWANG, "Dynamic Properties of Natural Soils", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1997.