포화도 변화에 따른 슬래브궤도 혼합성토 노반의 침하 특성

Settlement characteristics of rock/soil mixture subgrade of slab track with variation of degree of saturation

박성용* 김대상†

Seong-Yong Park Dae-Sang Kim

ABSTRACT

In this study, model tests were performed to investigate the settlement characteristics of the rock/soil mixture subgrade with the many portion of mudstone due to the cyclic train loading in high-speed railway. Specially, from the tests varying initial degree of saturation, effects of increment of the degree of saturation in the subgrade due to rainfall or elevation of ground water table under cyclic train loading on the deformation characteristics were analyzed. From the results, in the low degree of saturation, settlement converged to some value. However, in the condition of degree of saturation larger than some value, settlement rapidly increased. Therefore, it was found that it is important to maintain the degree of saturation of subgrade below the specific level to prevent the settlement of subgrade.

국문요약

산악지형이 많은 지역에서의 고속철도 건설에는 노선의 선형상의 이유로 터널구간이 많이 존재하며, 터널 건설로 발생하는 암버럭을 유용하기 위하여 노반 건설은 주로 암과 흙의 혼합성토로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 이암을 주암으로 하는 혼합토로 이루어진 고속철도 노반의 열차반복하중에 의한 침하특성을 분석하기 위하여 모형토조 실험을 수행하였다. 특히 강우 또는 지하수위 상승에 의한 노반의 포화도 증가가 열차 반복하중 작용 시 노반의 침하특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 초기 포화도 조건을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 실험결과, 낮은 포화도 조건에서는 열차반복횟수가 증가할수록 침하가 어느 일정 값에 수렴하는 결과를 나타냈으나, 일정 수준 이상의 포화도 조건에서는 침하가 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 노반의 포화도를 일정수준 이하로 관리하는 것이 침하 예방에 중요한 요소임을 확인 할 수 있었다.

1. 서 론

현재 한국에서 건설되고 있는 경부고속철도 2단계 구간과 향후 건설 될 호남고속철도의 궤도구조 형식은 슬래브궤도로 자갈도상궤도와 비교했을 때, 구조적인 안정성뿐만 아니라 유지관리비 측면에서 많은 장점을 갖는 구조이다. 하지만 슬래브궤도는 일반 자갈도상궤도와 비교하여 침하 발생 시 원상 복구가 어려우며, 따라서 짧은 차단시간 밖에 확보할 수 없는 영업선에서는 유지보수에 많은 어려움이 따른다.

슬래브궤도 구축 후 침하의 원인으로는 열차 반복하중에 의한 침하, 강우 또는 지하수위 상승으로 인한 침하, 쌓기 재료의 크립침하가 원인인 것으로 알려져 있다. 우리나라의 경우 산악지형이 많기 때문에 선로 연장에서 터널이 차지하는 비중이 상대적으로 높으며, 따라서 터널 건설로 발생하는 암버럭을 사용한 혼합성토

* 비회원, 한화건설, 기술연구소, 선임연구원

† 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 책임연구원

E-mail : kdsang@krri.re.kr

TEL : (032)460-5305 FAX : (032)460-5814

구간이 순수 흙성토 구간에 비해 많은 부분을 점유하고 있는 실정이다. 혼합성토의 장기적인 관점에서의 잔류침하는 열차 개통 후 슬래브궤도의 승패를 좌우 할 만큼 중요한 요소이나, 혼합성토의 개통 후 열차하중에 의한 거동이나, 재료의 크립 특성에 대해서는 현재까지 연구가 미흡한 실정이다. 그 이유는 혼합성토에 대한 실험이 어렵고, 반복하중에 대한 거동을 파악하기 위해서는 장기간의 소요시간이 필요하기 때문이다.

본 연구에서는 암흙 혼합토의 궤도 구축 후 포화도 변화에 따른 잔류 침하 특성을 분석하기 위하여 경부고속철도 2단계 구간의 현장 시료를 채취하여 모형토조 실험을 수행하였다.

2. 모형토조 실험

2.1 실험장비

본 실험에 사용된 모형토조는 크기 1000 mm × 1000 mm × 1000 mm이고, 좌우 측면에서 공기압으로 측압을 줄 수 있으며, 전면에 아크릴판을 설치하여 시료의 상태를 눈으로 확인할 수 있도록 설계하였다. 그림 1은 실험에 사용된 토조 모습이다. 실험에 사용한 하중 재하 장치의 기본사양과 특징은 표 1과 같다. 토압계와 변위계(LVDT)에 의한 응력과 변위 샘플링 주파수는 1 Hz였다.

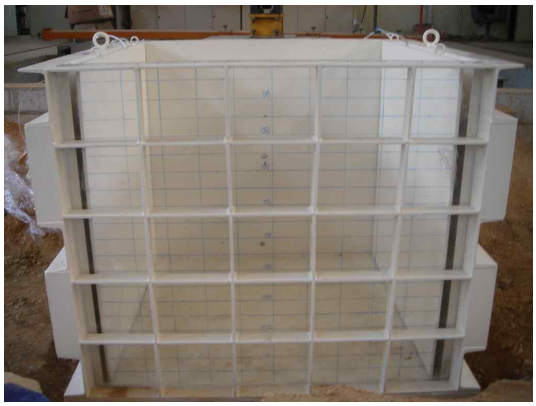

그림 1. 모형토조 사진

표 1. 하중재하장치 사양

항 목	내 용
성능 및 특성	· 최대 동적 하중 : 250 kN/Acuator · 가진 진동수 : 0 ~ 100Hz · 동적 변위 : ± 125 mm

2.2 실험재료 및 시료제작

실험을 위하여 경부고속철도 2단계 공사구간 중 OO공구의 흙쌓기 구간에서 현장시료를 채취하였다. 동 구간은 주변의 터널공사 구간에서 나온 암버럭을 이용한 혼합성토가 이루어지는 현장으로 중생대 백악기 쇄설성 퇴적암층이 발달한 지역이다. 모암은 붉은색을 띄는 이암이었다. 이암, 세일 등의 이질암은 점토를 주성분으로 한 퇴적암의 일종으로 풍화작용을 받은 후에는 흙과 유사한 성질을 보이는 특징이 있기 때문에 성토재료로 사용할 경우 주의가 요구되는 재료이다. 표 2는 이암에 대한 실내실험 결과를 정리한 것이며, 그림 2는 이암시료에 대한 일축압축실험 전후의 모습이다. 대상 시료의 비중은 2.67로 기존의 대구·경상 지역에서 조사된 이암의 비중과 유사한 값을 나타내었다. 일축압축강도는 30 MPa로 연암의 강도를 나타냈다. 이암은 건습 반복에 의한 슬레이킹에 취약하기 때문에 슬레이킹실험을 수행하였으며, 그림 3은 슬레이킹 실험 후의 모습이다. 슬레이킹 내구성지수(I_{d2})는 96%로 슬레이킹에 대한 내구성은 양호한 편이었다.

표 2. 이암의 실내실험결과

특성 \ 암 종류		이암
비중		2.67
간극률(%)		2.66
탄성파속도 (m/sec)	P파	2020
	S파	1430
일축압축강도 (MPa)		30
탄성계수 (GPa)		54.6
포아송비		0.22
흡수율 (%)		1.00
Slake durability test (I_{d2}) (%)		96.0

(a) 실험 전 (b) 실험 후

그림 2. 일축압축 실험 전후의 시료 모습

그림 3. 슬레이킹 실험 후의 시료 모습

모형토조 실험을 위한 모델시료를 제작하였으며 입도분포곡선을 고속철도 설계기준의 상부노반 입도분포기준 상하한 곡선 및 Grading coefficient(n)가 0.3, 0.4, 0.5, 0.6일 때의 입도곡선과 함께 그림 4에

도시하였다. n은 시료 입자의 최대입경에 대한 시료의 입경비로 n이 작을수록 함수비의 영향을 크게 받는다(Ekblad, 2004). 일반적으로 암성토 시료에 대한 실내실험은 실험기의 성능을 고려하여 상사입도를 적용하여 시료의 최대입경을 작게해서 실험을 한다. 상사입도를 적용한 시료에 대한 실험결과는 강도 측면에서는 실제 현상과 유사하나, 변형특성에서는 실험시 입자 사이의 맞물림, 파쇄 등을 정확히 대변할 수 없어서 거동이 실제와는 다르게 얻어진다고 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 모형토조의 규격과 상부노반의 입도기준을 고려하여 혼합토의 최대입경을 150 mm로 정하였다. 또한 63.5 mm 이하의 입도분포는 터널 발파로 발생한 암버럭을 이용한 혼합성토 구간이 증가하고 있는 국내여건을 고려하여 큰 입경 부분이 높은 상부노반 입도분포기준 하한 곡선과 일치하게 입도를 조정하였다. 실험에 사용된 시료는 30 mm 이하의 입경에서는 n=0.6 곡선과 유사한 경향을 보였다.

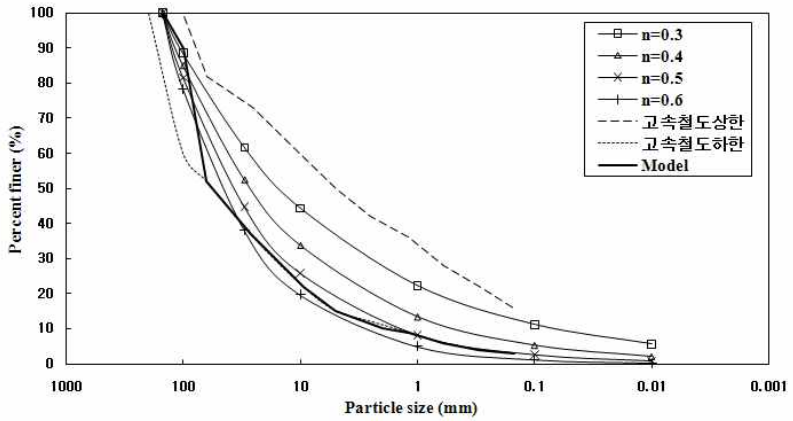

그림 4. 모형토조 시료의 입도분포

2.3 실험방법

모형실험은 열차 주행시 궤도로부터 전달되는 하중을 지지하는 상부노반이 받는 응력조건 및 강우 또는 지하수위 상승 등, 제체 내 포화도 증가에 의한 변형특성을 평가하기 위하여 2~6단계의 실험과정으로 나누어서 수행하였으며, 이 과정을 그림 5에 나타내었다. 우선 궤도 자중에 의해 노반이 받는 상재하중까지 수직응력(10 kPa)을 매우 느린 속도로 시료에 무리가 가지 않도록 재하한 후, 침하가 충분히 수렴하면, 각 실험에서 정해진 축차응력을 고속철도의 속도 300 km/hr와 열차의 축간 거리를 고려하여 5 Hz로 200,000회 반복재하하였다. 200,000회의 반복재하가 끝난 후, 제체의 포화도 증가에 의한 영향을 살펴보기 위하여 물관을 통하여 각 실험에서 정해진 물을 시료에 침투시킨다. 초기 주입하는 물의 양은 초기 포화도를 달리 하기 위하여 T1은 20 ℓ, T2는 40 ℓ, T3는 80 ℓ로 하였다. 수침은 수압을 이용하였으며, 시료에 물이 균등하게 침투 될 수 있도록 충분한 시간을 두어 침투를 시켰다. 침투가 완료되면 동일한 응력으로 100,000회 반복하중을 재하한다. 100 ℓ의 물을 침투시킬 때까지 위의 과정을 반복한다. 표 3은 전체 실험 프로그램을 정리한 것이다. 전 실험은 수직응력, 하중비(=반복수직응력증가분/초기수직응력($\Delta\sigma_1/\sigma_1$)), 포화도 변화에 따라 총 3개의 실험으로 구성하였으며, 각 실험군마다 물의 양을 증가시키면서 반복하중을 재하하도록 구성하였다.

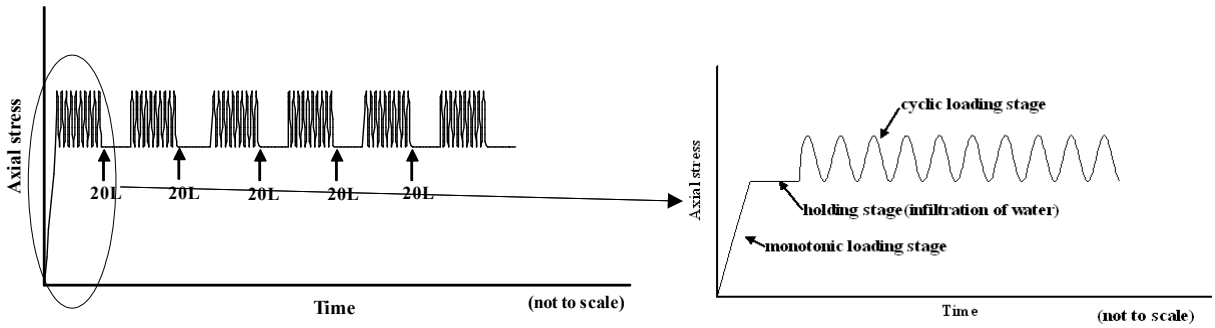

그림 5. 시간-하중 및 수침 개략도

표 3. 실험조건

실험	실험조건					
	초기 수직응력(σ_1) (kPa)	수평응력(σ_3) (kPa)	반복수직응력 증가분($\Delta\sigma_1$) (kPa)	축차응력(σ_d) (kPa)	반복재하 횟수	초기 포화도 (%)
실험1(T1)	10	5	50	55	700,000	19.8
실험2(T2)	10	5	50	55	700,000	35.0
실험3(T3)	10	5	50	55	700,000	54.4

3 실험결과

3.1 열차반복하중에 의한 변형특성

그림 6은 실험 T1의 반복재하횟수 증가에 따른 축방향변형률의 변화를 나타낸 것이다. 축방향변형률은 초기 100회 반복재하횟수에서 200,000회의 반복재하횟수에서의 침하량의 80% 이상이 발생하는 것을 알 수 있으며 1000회 이후 빠른 속도로 축방향변형률이 수렴하는 것을 알 수 있다. 영구축방향변형률의 크기는 0.143%로 3 m의 상부노반을 고려할 경우 약 4 mm의 침하가 발생하여 콘크리트궤도의 침하기준 이내인 것을 알 수 있다.

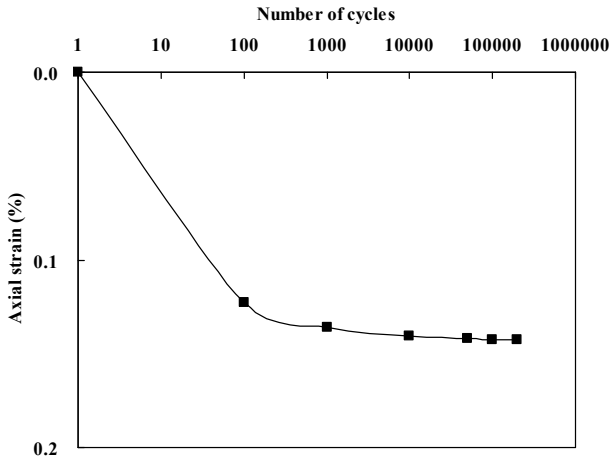

그림 6. 반복재하횟수-축변형률 관계(T1)

3.2 포화도 변화에 따른 변형특성

그림 7은 구속 및 반복하중은 동일한 조건에서 초기포화도를 변화시킨 실험 T1, T2, T3의 반복재하 횟수 증가에 따른 축변형률의 변화를 나타낸 것이다. 초기포화도가 19.8%인 T1의 축변형률은 반복재하 횟수 증가시 수렴하는 경향을 보였으나, 초기포화도가 35.0%, 54.4%인 T2, T3 실험의 경우 지속적으로 축변형률이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 반복재하횟수 200,000회에서의 축변형률은 포화도가 19.8%(T1)에서 35.0%(T2)로 증가할 때, 축변형률은 0.14%에서 0.72%로 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 35.0%에서 54.4%(T3)로 증가할 경우는 0.72%에서 0.79%로 그 증가량이 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 8은 T1, T2, T3 실험에서 200,000회 반복하중 재하 후에 수침에 의해 시료의 포화도를 증가시키면서 반복하중을 재하했을 때의 실험결과를 나타낸 것이다. 시료의 포화도가 증가하고 반복하중이 지속적으로 가해지면서 축변형률은 초기포화도가 유지된 상태에서는 수렴했던 것과는 달리, 모든 실험에서 축변형률이 수렴하지 않고 지속적으로 증가하는 경향을 보여준다. 그림 9는 그림 8의 결과를 포화도 변화에 따른 축변형률 관계로 바꿔 나타낸 것이다. 수침에 의하여 포화도 증가에 따라 축방향변형률이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 강우 또는 지하수위 상승에 의해 노반의 포화도가 증가할 경우, 지속적인 열차반복하중에 의해 침하의 진전이 쉽게 이뤄질 수 있음을 나타낸다.

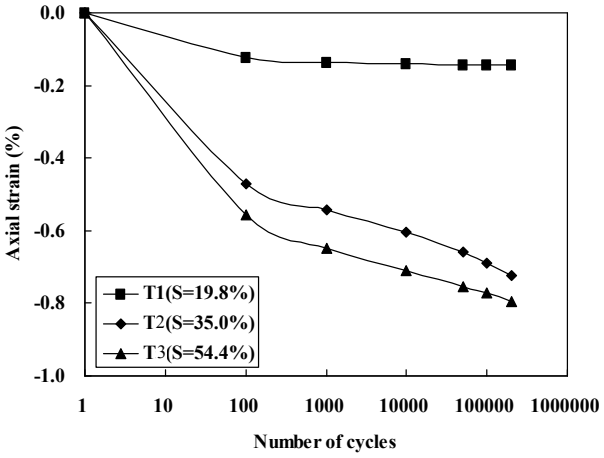

그림 7. 초기 포화도 변화에 따른 반복재하횟수-축변형률 관계

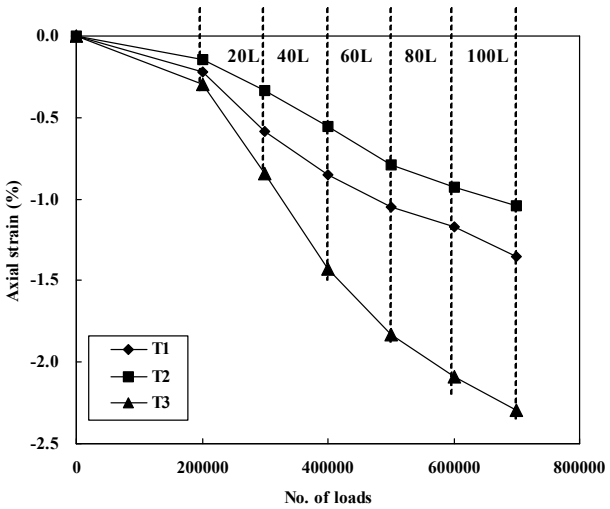

그림 8. 포화도 증가에 따른 반복재하횟수와 축변형률 변화

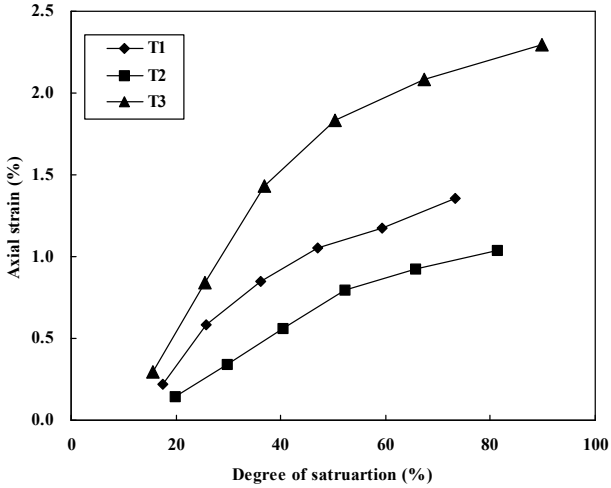

그림 9. 포화도에 따른 축변형률 변화

4. 결 론

1. 실대형 모형토조 실험을 통하여 반복하중에 의한 혼합 성토의 변형특성을 분석한 결과, 고속열차 주행시의 응력수준에서 200,000회 반복재하시의 전체 침하의 85% 이상이 10,000회 반복재하 이전에 발생하였으며, 재하횟수가 증가할수록 침하가 수렴하는 경향을 나타내었다.

2. 초기 포화도 변화가 침하특성에 미치는 영향을 분석한 결과, 초기 포화도가 19.8, 35.0, 54.4%일 때, 200,000회 반복하중 재하시 축변형률은 0.14, 0.72, 0.79%가 발생하여 초기포화도가 증가할수록 침하량이 증가하는 특성을 나타냈으며, 포화도가 19.8%에서 35.0% 증가할 때의 침하량 증가가 매우 크게 나타나는 것으로 보아, 일정 수준의 포화도 이상 되는 순간 급격한 침하량 증가가 발행하는 것을 알 수 있었다. 따라서 노반의 포화도를 일정수준 이하로 관리하는 것이 침하 예방에 중요한 요소임을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

1. Alva-Hurtado, J. E. (1980). A methodology to predict the elastic and inelastic behaviour of railroad ballast. Ph.D. Thesis, Amherst, Massachusetts, University of Massachusetts.
2. Barksdale, R. D. (1972). Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. 3rd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, London, UK.
3. Das, B. M. (1998). Principles of Geotechnical Engineering. Boston, PWS Publishing Company.
4. Ekblad, J. (2004). Infuence of Water on Resilient Properties of Coarse Granular Materials. TRITA-VT FR 04:03, Licentiate Thesis Kungliga Tekniska Hogskolan (KTH), Stockholm.
5. Haynes, J. G. and E. J. Yoder (1963). "Effect of Repeated Loading on Gravel and Crushed Stone Base Course Materials Used in the AASHO Road Test.", Highway Research Record, Vol. 39.
6. Holubec, I. (1969). Cyclic Creep of Granular Materials. Ontario, Canada, Department of Highways.
7. Hveem, F. N. & Carmany, R. M. (1948). The factors underlying the rational design of pavements. Proc. Highway Research Board 28, Washington, DC, pp. 101-136.
8. Hveem, F. N. (1955). Pavement deflections and fatigue failures. Highway Research Board Bulletin, No. 114, Washington, DC, pp. 43-87.
9. Hyde, A. F. L. (1974). Repeated Load Triaxial Testing of Soils. Ph.D thesis, Department of Civil Engineering. Nottingham, UK, University of Nottingham.
10. Lashine, A. K., S. F. Brown, et al. (1971). Dynamic Properties of Soils. Report No.2 Submitted to Koninklijke/Shell Laboratorium, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK.
11. Lekarp, F., Isacsson, U., and Dawson, A. (2000). "State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates." Journal of Transportation Engineering, ASCE 126(1): 66-75.
12. Lekarp, F., Isacsson, U., and Dawson, A. (2000). "State of the art. II: Permanent strain response of unbound aggregates." Journal of Transportation Engineering, ASCE 126(1): 76-83.
13. Maree, J. H. (1982). Aspects of the Design and the Behaviour of Road Pavements with Granular Material Base Layers. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering. Pretoria, South Africa, University of Pretoria.