

철도노반의 연약화에 따른 거동특성 연구

A Study on the Characteristics of Behavior of Railway Roadbed due to Softening

이진욱* 이성혁* 김대상* 권병성**
Lee, Jin-Wook Lee, Sung-Hyuck Kim, Dae-Sang Kwon, Byung-Sung

ABSTRACT

The analysis of mud pumping which causes track irregularities during softening of present roadbed is needed in order to prepare countermeasure that is efficient and reasonable against the softening of railway roadbed. In this study, model tests were performed in order to evaluate property of the railway softening under the train loading, considering the wheel load and the impact coefficient due to the train passing velocity. The existence of the mud pumping, settlements of roadbed and vertical earth pressure were measured under the train loading.

1. 서론

자갈도상 궤도구조는 반복되는 열차하중에 의해 점진적으로 파괴가 진행되는 구조이며, 지속적인 유지보수 노력을 필요로 한다. 과거 궤도는 경험적인 구조물로서 구성되어 왔으나 유지관리 비용의 최소화를 위하여 점진적인 궤도파괴의 원인분석 및 그 예방책의 마련을 위하여 보다 체계적인 연구가 진행되고 있는 추세이다.

특히 흙노반의 경우는 사용년수의 경과에 따라 도상자갈의 마모에 의한 세립분 발생, 노반면의 지지력 부족에 의한 도상자갈의 관입 등의 현상이 필연적으로 발생하게 되고 동절기 동결융해에 의한 노반 팽창현상 등의 노반 연약화 현상이 많이 발생하고 있다. 이러한 경우에 반복열차하중에 도상자갈이 관입되고 이에 따라 워터포켓이 생성되어 노반의 지지력이 감소하게 된다. 노반의 지지력 감소는 도상의 관입을 촉진시키는 악순환이 계속되어 도상자갈에 의한 펌핑작용으로 노반분리가 발생되고, 궤도파괴 등으로 이어져 열차주행에 지장을 초래할 뿐만 아니라 열차의 안전운행에 위협을 가하게 된다. 또한 열차통과에 의한 자갈입자의 마모/파쇄가 지속적으로 발생한다. 또한 마모/파쇄입자 혹은 외부로부터 유입된 불순물이 도상의 공극을 과다하게 채우게 되는 경우 도상배수를 방해하며, 침하 및 궤도틀림 진행속도의 촉진, 도상저항력의 저하가 발생하여 선형정정작업만으로는 보수를 할 수 없는 상황에 이르게 된다.

따라서 본 연구에서는 열차의 운중과 주행속도를 고려하여 모사 열차하중을 재하하는 모형토조실험을 통하여 반복하중에 따른 분리발생 유·무를 파악하고, 자갈도상의 관입과 침하량, 그리고 토압등의 거동을 계측 및 분석함으로써 노반의 연약화 발생인자인 하중과 물이 노반의 연약화에 미치는 영향을 파악하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

2. 실험 대상 시료의 토질조건

기존선의 철도 노반재가 가지고 있는 기본 물성 조건에 적합한지 판단하기 위하여 시료의 실내시험을 수행한 결과는 표 1과 같다. 실내시험결과 시험에 사용하는 재료는 철도설계기준(노반편, 2001)에서 규정하고 있는 노반재료로서의 조건을 만족하고 있으며, 노반재로서는 상당히 양호한 조건임을 알 수 있었다.

표 1. 실내시험 결과

자연 함수비 (%)	G_s	입 도 시 험				통일 분류	다짐시험		직접전단시험	
		#200 통과량 (%)	유효입경 (D_{10}) (mm)	C_u	C_c		v_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)	C (kg/cm ²)	ϕ (°)
11.3	2.74	1.5	0.3	6.67	0.66	SP	2.01	10.2	0.25	38

3. 모형토조시험

3.1 실험조건

본 실험은 무보강 노반과 3종류의 보강재(case1, case2, case3)를 사용한 노반에 대해 총 14개의 실험조건을 설정하였다. 물의 영향을 고려하여 시료를 체수시킨 상태와 체수를 시키지 않는 상태에 대하여 분니발생여부를 조사하였으며, 체수의 경우도 3일 체수와 7일 체수로 나누어 실시하였다. 또한 표 2는 반복재하시험의 설정조건을 나타내었는데, 하중조건을 고려하기 위하여, 실제 작용하는 압력에 모형토조의 단면적을 적용하여 하중을 2.2tonf와 2.8tonf으로 하여 수행하였다

표 2. 반복재하시험의 설정 조건과 그 이유

		설 정	이 유
공시제 조건	화강풍화토 함수비 다짐도 노반배수 도상	SP(통일분류법) 최적함수비 95%이상 체수, 무체수 강구(3/8인치) 4층	양질의 화강풍화토 실제노반과 가까운조건 설정 철도설계기준(노반편) 배수상태의 양호, 불량 재연 모델의 단순화
재하 조건	하중강도(P) 진동수(Hz) 반복횟수(N)	2.2tonf, 2.8tonf 10Hz 200만회	하중조건에 따른 침하특성분석 실제의 진동수를 설정 장기거동분석

3.2 실험장비

모형토조시험은 그림 1과 같이 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 종합 레도노반 시험장비를 이용하여 수행하였으며, 그림 2는 모형토조의 단면을 나타내는데 시료의 총 높이는 최하단의 토압계를 제외한 순수 노반으로 20cm로 하였고, 재료의 다짐관리를 위하여 5cm씩 총 4층의 다짐을 실시하였다. 하중재하는 반복재하시험 장비에 연결할 수 있는 지그를 자체적으로 제작하였고, 하중재하시 노반의 흠이 상부로 올라오는 것을 막기 위하여 재하판(직경 47cm, 두께 1.5cm)은 거의 내부직경에 맞도록 제작하였으며 재하판 둘레는 마찰을 최소한 억제하기 위하여 윤활제를 발라 마찰을 최소화하였다. 그리고 하중재하시 재하판의 진도 현상과 편심을 방지 않게 하기 위하여 재하판을 상부지거에 연결하여 하중이 최대한 균등하게 전달할 수 있도록 하였다.

또한, 유도상궤도를 모사하기 위하여 일반적으로 자갈을 사용하여 실험을 실시하여야 하나, 본 실험에서는 자갈로 인해 생기는 여러 가지 요인을 배제하기 위하여 자갈 대용으로 모의구슬을 사용하여

실험을 실시하였다. 모의구슬의 크기는 3/8인치(9.5mm)로 노반표면에 4층으로 모의구슬을 포설하였으며, 각 실험종료 후 모의도상의 관입정도와 구슬에 세립분이 부착된 정도를 육안으로 조사하였다.



그림 1. 종합레도노반 시험 장비 및 시험 전경

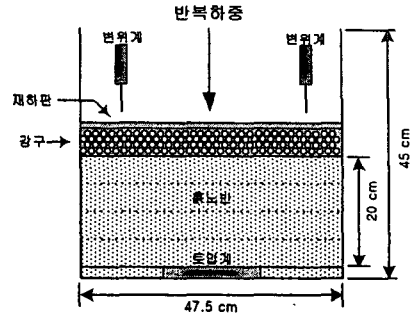


그림 2. 모형토조 단면

4. 반복재하시험 결과 및 분석

4.1 분니발생에 육안조사

체수를 하지 않은 시료의 경우는 하중을 2.8tonf으로 재하하였을 경우 보강여부에 관계없이 분니는 전혀 발생하지 않았으나 무보강 시험의 최구슬은 2층의 약 1/3정도까지 관입되어 있었으며 보강의 경우는 전혀 관입이 발생하지 않았다. 그림 3은 무체수 무보강의 경우 최구슬이 1층에 완전히 노반에 관입되었고 2층의 경우 약 1/3정도 관입되어 있는 형상이며, 무체수 보강 시험 후 보강재를 제거한 노반의 형상은 그림 4에 나타내었다. 보강재를 사용한 경우는 보강재의 기능중 하나인 분리기능에 의해 최하단의 최구슬이 거의 관입되지 않은 것으로 판단된다.

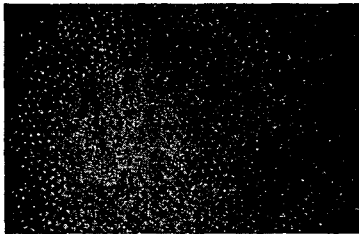


그림 3. 무체수 무보강시 노반 관입 형상

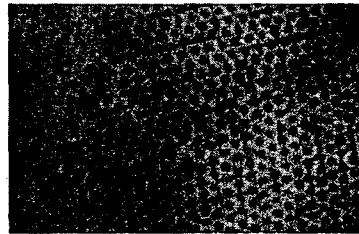
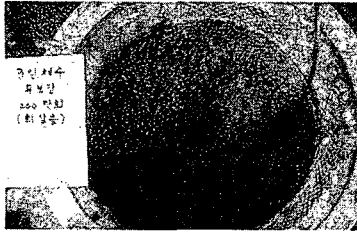


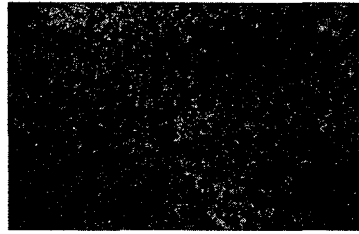
그림 4. 무체수 보강시 노반 관입 형상

3일 체수 무보강 시험을 하중 2.8tonf로 재하하였을 때 재하횟수 60만회부터 상부 일부에서 분니가 발생하기 시작했으며 200만회 시험결과 최구슬의 최상단인 4층까지 발생하였으며 아래 2층 정도가 시험함에 관입되어 있는 상태였다. 그림 5의 (a)는 최상단의 분니발생 형상이며 (b)는 2층 최구슬의 노반 관입 형상을 나타내고 있다. 7일 체수 무보강의 경우도 3일 체수와 유사한 형태를 나타내었지만 분니는 더욱 많이 발생하였다는 것을 확인할 수 있었다.

하중이 분니발생에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3일 체수 시험에 하중을 2.2tonf, 2.8tonf로 변화시켰을 때의 분니특성을 관찰하였다. 그림 6은 보강재를 사용하여 3일 체수 후, 2.2tonf과 2.8tonf을 의 시험결과를 나타낸 것이다. 재하하중을 2.2tonf로 한 경우, 120만회부터 최상부에서 일부 분니가 발생하기 시작하였으며 200만회 종료 후 최상부의 약 50%정도의 분니가 발생하였으며 도상관입은 나타나지 않았다. 2.8tonf으로 하중을 재하한 경우는 분니가 최상단에서 약 80%정도 발생하였으며 최상단으로부터 2번째 최구슬에서는 100% 분니가 발생하였다.

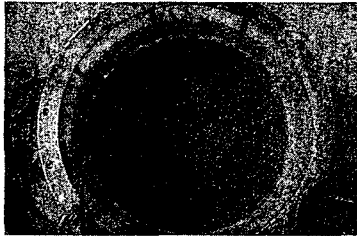


(a) 최상층 분니발생 형상



(b) 쇄구슬의 노반관입 형상

그림 5. 3일 체수 무보강 시험 분니 및 관입 형상



(a) 2.2tonf 재하시 분니 모습



(b) 2.8tonf 재하시 분니 모습

그림 6. 보강재 사용시 재하 하중 변화에 따른 최상층 분니 모습

4.2 동하중에 따른 침하량

노반의 침하량은 각 재하횟수에 따른 하중재하장치의 Stroke의 변화량으로 측정하였다. 침하량 분석을 통하여 노반에서 침하의 영향을 미치는 요인중 물의 조건과 하중조건 그리고 보강여부에 따른 특성을 파악하였다.

우선 물의 영향을 파악하기 위해서 무보강시 체수여부에 따른 침하량과 보강시의 체수여부에 따른 침하량을 측정하였다. 그림 7은 무보강시의 침하특성을 나타내고 있다. 이것으로 하중 2.8tonf 재하시 무체수의 경우는 200만회 재하시 8mm로서 7일 체수의 16mm의 약 50%정도 침하가 적게 발생하였으며 3일 체수에 비해 약 30%정도 침하가 적게 발생하였다. 또한 무체수의 경우 재하횟수 60만회 이후에는 침하가 더 이상 발생하지 않지만 체수의 경우는 계속해서 침하가 발생하는 경향을 보이고 있다. 이는 체수에 의한 노반의 연약화로 도상의 노반관입이 계속 진행된다고 판단할 수 있다.

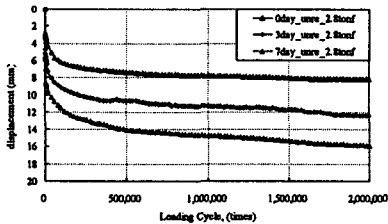


그림 7. 노반침하에 미치는 물의 영향 (무보강시)

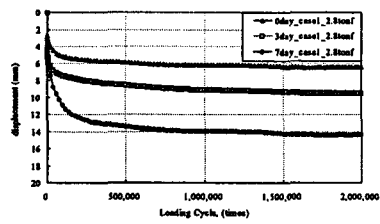


그림 8. 노반침하에 미치는 물의 영향 (보강재 보강시)

그림 8에서 보듯이 보강재 보강시에도 노반침하에 대한 물의 영향은 상당히 크다. 하중 2.8tonf일 때 체수를 하지 않은 노반, 즉 노반의 연약화가 이루어지지 않은 경우는 200만회 재하시 7mm의 침하

가 발생하였으며 7일간 체수한 경우는 200만회 재하시 약 14mm의 침하가 발생하여 물이 없는 경우에 비해 약 2배의 침하가 발생하였다.

3일 체수 또한 약 9.5mm로 무체수에 비해 30%이상 침하가 더 발생하였다. 특히 무보강의 침하특성과 마찬가지로 무체수의 경우 침하의 대부분이 50만회 이전에 발생하며 그 이후의 침하는 일정한 값을 유지하고 있지만 체수의 경우는 급격한 초기침하가 발생한 후인 약 50만회 이후에도 계속해서 침하가 발생하는 것을 보여주고 있으나 무보강에 비해 장기침하량의 기울기는 다소 완만하였다. 이는 보강재의 분리기능에 의해 도상의 노반관입이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

그림 9는 보강에 따른 영향을 파악하기 위하여 물의 체수가 전혀 되지 않은 양호한 지반에서의 보강재 보강시와 무보강시의 노반침하 결과를 나타내었다. 200만회 재하후의 최종침하는 보강이 약 6mm 정도로서 무보강의 약 8mm에 비해 약 25%정도 침하가 적게 발생했다. 이는 보강재의 분리기능에 의한 것으로 판단되며, 특히 초기 약 30만회 재하시에 발생하는 침하의 차이가 200만회까지 거의 유지되고 있다.

하중의 영향을 파악하기 위해 무보강시의 하중변화에 따른 침하특성과 보강재를 사용하였을 경우 하중변화의 영향을 파악하였다.

그림 10은 3일 체수 시험노반에 대해 무보강시 2.2tonf와 2.8tonf의 두가지 동하중을 재하하였을 경우의 노반 침하특성을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 하중 2.2tonf일때의 침하가 하중 2.8tonf일때의 침하보다 거의 20%정도 침하가 작게 발생하였다. 보강재를 사용하였을 경우도 침하량에서는 약간 차이가 나지만 무보강시와 유사한 결과를 나타내었다.

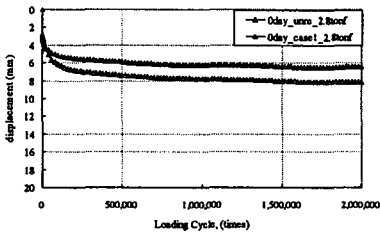


그림 9. 노반의 보강에 따른 침하특성 (무체수)

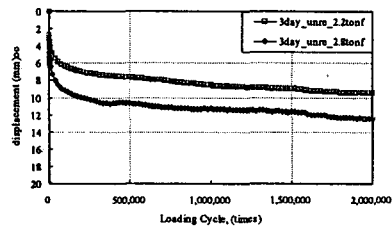


그림 10. 재하하중 변화에 따른 침하특성 (3일 체수, 무보강)

4.3 동하중에 따른 토압변화

보강재 사용에 따른 토압의 특성을 파악하기 위해 모형토조 제일하단에 그림 2에서와 같이 토압계를 설치하였다. 토압계의 용량은 2kgf/cm²와 3kgf/cm²를 사용하였으며 데이터로거를 사용하여 1초당 200개씩 5초간 1000개의 데이터를 저장하였다.

보강에 따른 토압 특성에 대한 결과를 그림 11, 그림 12에 나타내었다. 그림 11은 체수를 하지 않은

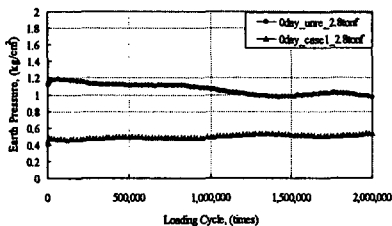


그림 11. 무체수시 보강여부에 따른 토압변화

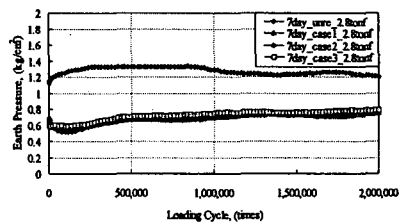


그림 12. 7일 체수시 보강여부에 따른 토압변화

경우로서 재하하중은 2.8tonf이며 보강재를 사용한 경우의 토압의 특성을 나타내고 있다. 이 경우, 보강재 사용에 의한 토압경감이 약 50%정도 되는 것으로 나타났다. 7일 체수의 경우도 무보강과 보강재 사용시 토압의 경우도 무체수와 마찬가지로 토압이 약 50%정도 경감되었다. 특히 7일 체수의 경우는 보강재의 종류에 상관없이 유사한 토압변화를 보여주고 있다(그림 12).

그림 13의 경우는 보강재를 사용한 경우의 토압변화를 나타내는데, 7일 체수의 경우가 3일 체수에 비해 토압이 크게 나타난 것은 7일 체수의 경우가 3일 체수보다 침하가 많이 발생하여 재하점과 토압계와의 거리가 짧아지는 것이 그 원인으로 사료된다.

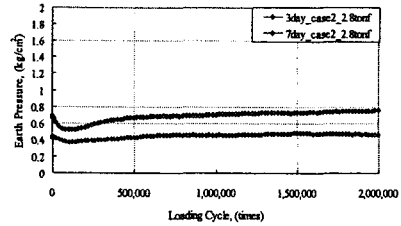


그림 13. 체수일수에 따른 토압변화

5. 결론

모형토조시험을 통한 물과 하중이 연약화에 미치는 영향과 보강재 사용에 따른 노반의 침하특성을 분석하였다. 이상의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 보강재를 사용한 경우는 무보강인 경우와 비교하여 체수여부에 관계없이 약 15%~25%의 침하저감효과가 나타났다.
- (2) 하중이 침하에 미치는 영향은 보강여부에 관계없이 2.2tonf과 2.8tonf과의 차이는 약 20%정도의 침하차이를 보이고 있었다.
- (3) 모형토조시험 육안조사 결과, 체수일수가 길고 무보강일 때, 분리가 가장 많이 발생하였으며, 하중이 클수록 분리가 더욱 많이 발생한다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 일반적인 노반의 경우 양호한 흙으로 철도설계기준에 준하여 시공이 이루어졌다 하더라도 도상의 노반관입→워터포켓 생성→지지력 약화→자갈도상의 노반관입 가속화→펄핑작용→분리발생이라는 현상이 나타난다. 따라서 향후 철도노반의 강성을 증대시키고 분리발생을 억제시킬 수 있는 대책방안 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 伊東孝之(1983), “鐵道路盤における道床のめりこみに關する研究”보고서.
2. 關根悅夫, 村本勝巳(1995), “營業線 路盤の支持力特性に關する研究”, RTRI REPORT, Vol. 9, No. 7, pp 19~24.
3. 伊能忠敏(1983), “鐵道路盤の噴泥現象の解明とその防止對策”, 鐵道技術研究報告, No. 1252(施設編 546号).
4. Ernest T. Selig, John M. Waters(1994), “Track Geotechnology and Substructure Management”, Thomas Telford, pp12.1~12.30.
5. 철도청(2001), “철도설계기준(노반편)”.
6. 황선근, 최찬용, 이성혁(2002), “동적하중 재하시 강화노반 재료별 침하 특성”, 한국철도학회논문집, 제5권 제2호.
7. Coenraad Esveld, 서사범 역(2003), “최신 철도선로”, 열과알.