

반복재하 하중을 받는 철도노반재료의 강우에 따른 침하 특성

The Characteristics of Settlement on the Roadbed Reinforcement Materials of Cyclic Loading with a Falling Water

황선근*
Hwang, Seon-Keun

최찬용**
Choi, Chan-Yong

이진욱***
Lee, Jin-Wook

오상덕****
Oh, Sang-Duk

ABSTRACT

In this study, performance of reinforced railroad roadbeds with the slag(HMS-25) and soil were investigated through the real scale railroad roadbed tests. Several real scale reinforced railroad roadbeds were constructed in the laboratory with different subgrade conditions and were tested with the estimated actual train loads including the impact loading of train. The affecting factors such as plastic & elastic settlement roadbed layers as well as surface of rails were measured. The settlement at rail surface and roadbed surface of case of soil and slag roadbed comparative with good roadbed site were 2.3, 5.7 times and 1.9, 1.6 times, respectively.

1. 서론

최근 들어 새로운 기간 교통수단으로써 철도의 역할이 증시되어 철도선로의 확충, 고속철도 건설, 차세대 열차개발 등에 박차를 가하고 있다. 이러한 철도의 건설과 함께 열차의 고속화, 고밀화에 대응하여 상당한 사용년수로 노후화되어 있는 기존 선로의 개량, 노반의 지지력 및 내구성 강화의 필요성도 증대되고 있다. 현재 국철의 경우 노반재료로 사용되고 있는 흙은 열차의 반복 충격하중, 우수에 의한 침입 등에 의해 내구성과 지지력이 저하됨으로써 도상자갈의 노반으로의 관입에 따른 침하 등에 의해 궤도 틀림을 유발하여 안전사고가 발생할 수 있다. 철도 선진국의 경우 이러한 문제점을 해결하기 위해 흙, 쇄석, 슬래그를 활용한 강화노반공법 및 노상 및 노반의 개량공법으로 배수공법, 고결공법 노반기능 보강법 등 다양한 공법을 개발하여 활용하고 있다.

본 연구에서는 한국철도기술연구원이 국내에서 유일하게 보유하고 있는 종합궤도노반시험장치를 활용하여 실제 현장의 조건과 유사하도록 실험궤도를 제작하여 강우시 발생하는 노반의 거동을 반복재하실험을 수행하였다. 본고는 선진외국에서 철도노반재료로서 활용하고 있는 고로 슬래그강화노반과 흙노반을 두께별, 노상지지력별로 노반을 조성하여 일정 반복재하시 물을 살수하여 노반의 변화 과정을 살펴본다. 1)

2. 실험구성

실 대형모형실험에 사용된 토조의 규격은 22m(L)×6m(W)×3m(H)이다. 전체 토조 22m에서 3.5m를 1단면으로 하여 총 5단면을 조성하였다. 재하시스템은 하중재하장치>Loading System, MTS), 하중 반력대>Loading Frame), 자동제어장치>Control System) 등 3 가지로 구성되어 있으며, 이밖에도 펌프실, 냉각장치 등이 있다. Actuator는 최대하중을 25tonf 재하할 수 있으며, Stroke는

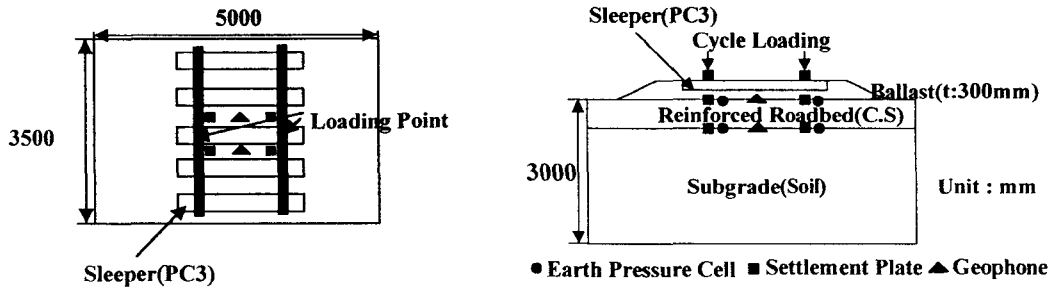
* 정회원 · 한국철도기술연구원 책임연구원 공학박사
** 비회원 · 한국철도기술연구원 주임연구원 공학석사
***정회원 · 한국철도기술연구원 선임연구원 공학석사
****비회원 · 한국철도기술연구원 · 연구원 공학석사

125mm으로 설계되어져 있다.

실 대형 모형실험은 현장조건과 유사하도록 실험지반을 조성하였으며, 노상부를 양질의 화강풍화토를 사용하여 조성하였다. <표 1>은 실험에 사용된 노상토와 슬래그의 기본물성시험결과를 나타내었다. 일반적으로 통일분류법에서 균등계수가 4또는 6보다 크고 곡률계수가 1~3의 범위에 있을 때 입도분포가 좋다고 말하는데 노상토의 입도분포결과 곡률계수(Cg)가 0.96로 1이하를 나타내고 있지만, 전체적으로 입도분포가 양호하다고 판단된다.

<표 1> 노상토의 기본물성시험결과

실험항목	노상토의 실험결과	실험항목	슬래그노반의 실험결과
Sieve Analysis	D ₁₀ (mm) : 0.16 Cu : 11.87 Cg : 0.96	입도분포	D ₁₀ (mm) : 0.4 Cu : 12.5 Cg : 1.13
비중	2.59	비중	겉보기 비중 : 2.73 단위용적중량 : 1,713kgf/m ³
Compaction	최대건조밀도(γ_{dmax}) : 17.1kN/m ³ 최적함수비(ω_{opt}) : 11.3%	Compaction Test	최대건조밀도(γ_{dmax}) : 2.15t/m ³ 최적함수비(ω_{opt}) : 9.5%
Triaxial Compression Test(CD)	c=24.71kN/m ² ψ :32.9°	일축압축강도	14.02kgf/cm ²
Passing of No. 200	12%	마모율	35.5%

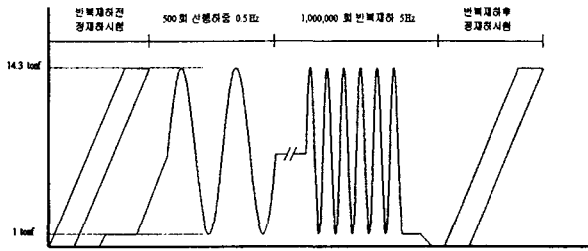


<그림 1> 실 대형 모형토조 평면도 및 단면도

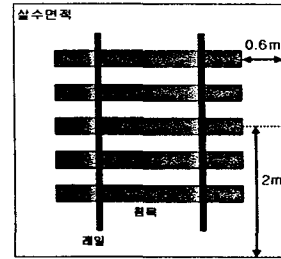
<그림 1>은 실 대형 모형토조의 단면도와 평면도를 나타내었다. 실 대형 모형토조내에 설치된 계측센서는 토압계, 침하판, 속도계를 노반표면과 노상표면 좌·우측 2개씩 설치하였다.

살수시험에 앞서 우선적으로 실 현장에서 MTT작업을 통한 궤도 안정화와 같은 효과를 갖기 위한 도상부 안정화작업을 다음과 같이 수행하였다. 본 실험을 수행하기 전 Actuator을 통하여 각 침목당 재하하중 1tonf에서 14.3tonf 까지 0.5Hz의 진동수로 500회 반복하중을 재하하였다. 이러한 방법을 통해 도상부를 안정화시킨 후 최대하중 14.3tonf의 하중으로 5Hz의 진동수로 반복하중 100만 회까지 반복재하를 수행하면서 일정한 반복재하횟수마다 레일 및 노반, 노상의 침하특성을 관찰하였다. 본 실험은 흙노반과 슬래그 강화노반의 살수시 침하특성을 살펴보기 위하여 반복재하횟수 100,000회, 400,000회, 500,000회, 800,000회 4차에 걸쳐 80L씩 총 320L의 물을 살수하였다. <그림 3>에서와 같이 살수면적은 약 8.9m²이다.

<표 2>에서와 같이 살수실험조건은 노상지지력에 따른 침하특성, 노반재료별 침하특성을 주 목적으로 실험을 실시하였다.



<그림 2> 하중재하순서



<그림 3> 살수면적

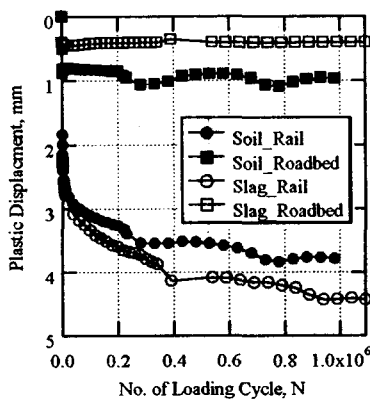
<표 2> 살수실험 실험조건

실험번호	노상 지반반력계수	노반두께	시 료	살수시점
Test 1	7kgf/cm ³	80cm	노상지저력	100,000회
Test 2	11kgf/cm ³	80cm		400,000회,
Test 3	11kgf/cm ³	30cm	재료별	500,000회,
Test 4	11kgf/cm ³	30cm		800,000회

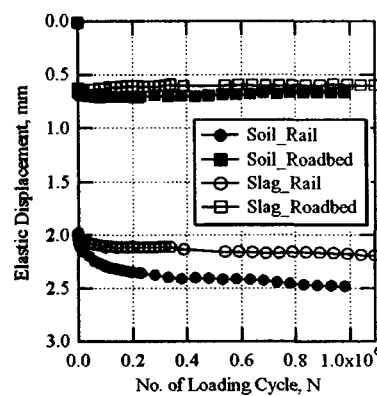
3. 실험결과 및 분석

3.1 노반재료별 침하특성

<그림 3>은 양호한 노반상태에서의 탄·소성침하량을 나타내었다. <그림 3(a)>에서와 레일면에서 발생된 소성 침하량은 흙노반이 슬래그노반보다 약간 작게 측정되었다. 이러한 경향은 실험조건마다 도상부의 다짐조건 및 다짐정도가 다르기 때문에 발생된 실험적 오차라고 생각된다. 노반면의 소성침하량의 경우 흙노반보다 슬래그노반이 침하가 적게 발생하는 것을 볼 수 있다. <그림 3(b)>는 재료별 탄성침하량을 나타내었다. <그림 3(b)>에서와 같이 슬래그노반이 흙노반보다 탄성침하량이 적게 발생하였으며, 노반면의 탄성침하량은 거의 유사하게 침하가 발생한 것을 볼 수 있다. 강우나 환경적 제약을 받지 않은 초기 양호한상태의 노반이기 때문에 이러한 결과가 발생한 것으로 판단된다.



(a) 소성침하량

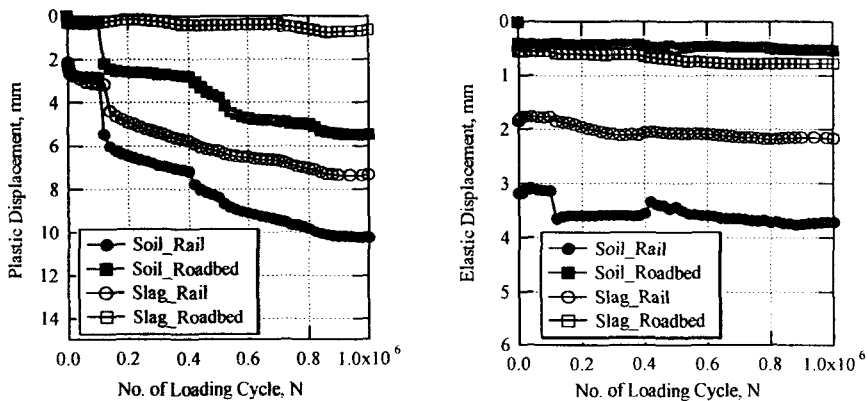


(b) 탄성침하량

<그림 3> 양호한 노반상태에서의 재료별 탄·소성 침하량

<그림 4>은 살수실험에 의한 탄·소성침하결과를 나타내었다. <그림 4(a)>에서와 같이 초기 살

수시점인 10만회에서의 가장 큰 침하폭을 볼 수 있으며 흙노반과 슬래그노반에서의 레일면 발생된 소성침하량은 2.1mm, 1.2mm가 발생하였다. 양호한 노반조건과 비교할 경우 흙노반에서 레일면은 양호한 노반보다 침하량이 약 2.3배 더 침하가 발생하였으며, 노반면의 경우 약 5.65배로 노반면이 물로 인해 상대적으로 슬래그노반보다 상당히 연약화되는 것을 볼 수 있다. 반면 슬래그노반의 경우 레일면에서는 약 1.93배, 노반면에서는 1.62배로 흙노반보다는 적게 발생한 것을 알 수 있다. <그림 4(b)>는 살수실험에 의한 각 위치별 탄성침하량을 나타내었다. <그림 4(b)>에서와 같이 살수로 인한 탄성침하특성은 양호한 노반조건일 때 보다 상대적으로 침하가 더 발생하였으며 노반면의 경우 1mm이내의 탄성침하량이 발생한 것을 볼 수 있다. <그림 4(a)(b)>에서와 같이 동일한 두께에서 흙노반과 강성이 큰 재료인 슬래그 강화노반으로 노반을 시공하였을 경우 흙노반보다 소성침하와 탄성침하가 적게 발생하는 것을 알 수 있다.

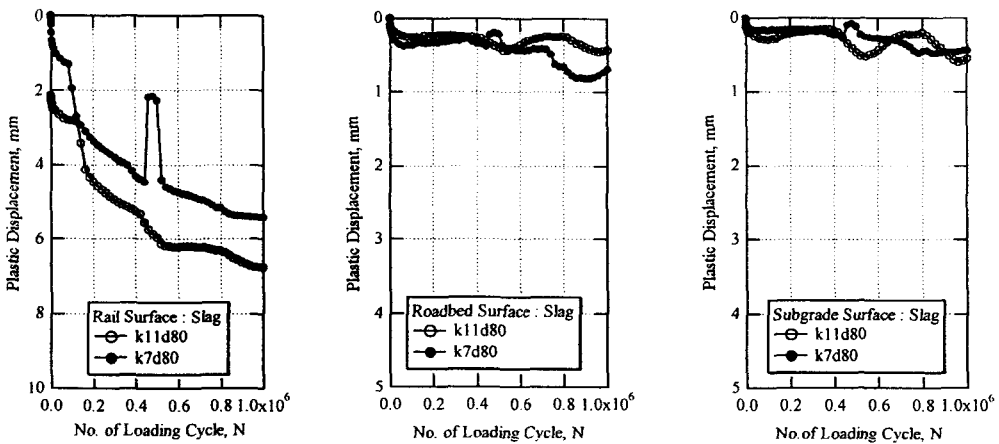


(a) 소성침하량 (b) 탄성침하량

<그림 4> 살수시험에서의 재료별 탄·소성 침하량

3.2 노상지지력에 따른 위치별 탄·소성침하량

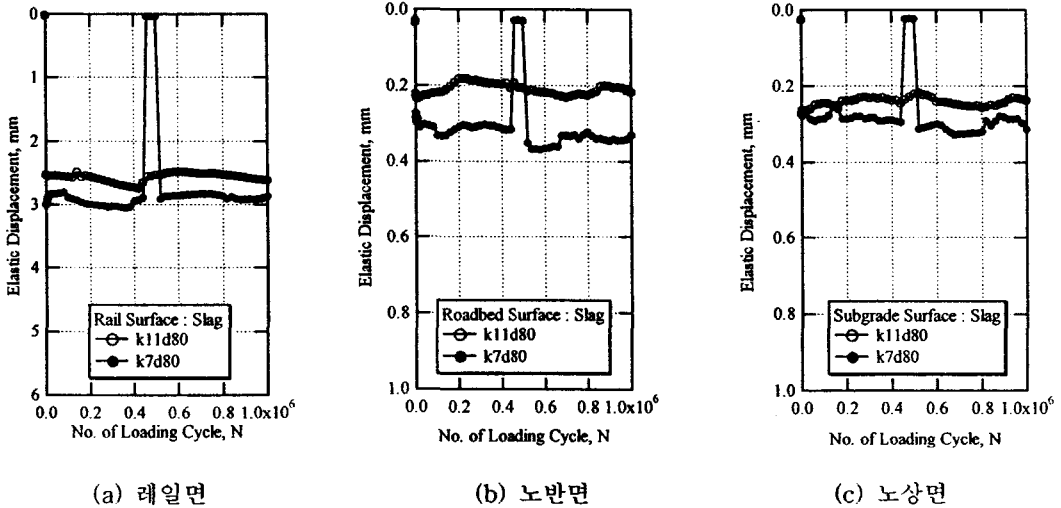
동일한 노반재료와 동일한 노반두께일 때 노상의 지지력에 따른 침하특성은 <그림 5>와 <그림 6>에 나타내었다.



(a) 레일면 (b) 노반면 (c) 노상면

<그림 5> 슬래그노반에서의 소성침하량

<그림 5>에서와 같이 노상지지력이 7kgf/cm^3 (k7d80), 11kgf/cm^3 (k11d80) 2조건에서 노반두께 80cm로 하였을 경우 살수에 의한 소성침하특성을 나타내었다. 레일면의 소성침하량의 경우 k11d80, k7d80의 초기 살수시점에서 1.2~1.4mm의 가장 큰 침하폭을 보이고 있다. 100만회 재하된 후 최종적으로 약 4.8~6.7mm 소성침하량이 발생하였다. 노반면과 노상면의 경우 살수에 의한 침하변화량이 매우 미소한 것을 보아 슬래그노반의 경우 강우에 대하여 매우 안정된 재료인 것을 볼 수 있다.



<그림 6> 슬래그노반에서의 탄성침하량

<그림 6>은 노상지지력에 따른 탄성침하량을 나타내었다. <그림 6>에서와 같이 탄성침하량의 경우 노상지지력이 큰 경우가 침하가 적게 발생하는 것을 볼 수 있으며, 노반면과 노상면에서 발생한 탄성침하량은 1mm 이내로 매우 작은 변위를 발생하는 것을 볼 수 있다.

<표 3>과 <표 4>는 살수시점 전·후에 계측된 레일의 침하폭과 노반의 침하폭을 나타내었다. <표 3>에서와 같이 살수초기시점인 10만회에서 가장 큰 침하폭을 볼 수 있으며, 반복횟수가 증감함에 따라 노반부의 안정화로 인해 살수로 인한 침하폭이 상대적으로 적게 발생하는 것을 볼 수 있다. 수치가 제시되지 않은 항목은 살수시점 전·후의 침하폭이 매우 작으므로 수치상으로 기입을 하지 않았다. 전체적으로 흙노반의 경우 슬래그노반보다 약 2배정도의 침하폭이 더 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 노반두께가 80cm의 경우 50만회이후의 경우 살수에 의한 레일면에서의 침하폭이 매우 작게 발생하는 것을 볼 수 있다.

<표 3> 살수로 인한 반복재하횟수에 대한 레일의 침하폭

반복재하횟수	100000	120000	400000	420000	500000	520000	720000	740000
Rail Displacement								
soil	3.014	5.1187	6.7897	7.3523	7.9129	8.264	8.9984	9.2163
침하폭	2.1047		0.5626		0.3511		0.2179	
k11d30	3.1668	4.3876	5.4626	5.5675	5.7685	5.9192	6.6892	6.7824
침하폭	1.2208		0.1049		0.1507		0.0932	
k11d80	2.8536	4.145	5.3221	6.131	-	-	-	-
침하폭	1.2914		0.8089		-		-	
k7d80	1.0691	2.4842	-	-	-	-	-	-
침하폭	1.4151		-		-		-	

< 표 4 > 살수로 인한 반복재하횟수에 대한 노반 침하량

반복재하횟수	100000	120000	400000	420000	500000	520000	720000	740000
Roadbed								
soil	0.2253	1.3122	1.8997	2.4459	2.7897	3.3358	3.8467	4.0019
침하폭	1.0869		0.5462		0.5461		0.1552	

<표 4>는 살수로 인한 반복재하횟수에 대한 노반 침하폭을 나타내었다. 노반면에서의 살수에 의한 침하폭은 약 2.4mm의 침하량이 발생하였으며, 슬래그 노반의 경우는 살수와는 관계없이 0.001mm~0.1mm의 침하량의 변화를 나타내었다.

4. 결론

기존철도의 흙노반과 슬래그 강화노반의 살수(80L씩 4회)에 대한 노반거동의 평가를 위하여 실물 대형시험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 흙노반의 경우 양호한 노반조건과 비교할 경우 레일면에서는 약 2.3배, 노반면에서는 약 5.65배 정도 더 침하가 발생하였다.
2. 슬래그노반의 경우 레일면에서는 약 1.93배, 노반면에서는 1.62배 더 침하가 발생하였다.
3. 살수로 인한 레일면에서의 침하폭은 흙노반의 경우 3.2mm이며, 슬래그노반의 경우 1.57mm로 약 2배의 침하가 더 발생하였다.
4. 살수로 인한 노반면에서의 침하폭은 흙노반의 경우 2.4mm, 슬래그노반의 경우 0.1mm가 발생하였다.

본 연구를 통해 기존철도의 노반지지력 저하는 경제성, 시공성, 유지보수 등 종합적인 검토를 통해 시급히 수정이 이루어져야할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. E. T. Selig and J. M. Waters, "Track Geotechnology and Substructure Management", *Thomas Telford*.
2. Muramoto, K. and Sekine, E. (1998), "A Study on the Compaction Control of Embankments to Receive Train Loads", RTRI Report, Vol. 12, No. 4.
3. Sekine, E. and Muramoto, K. (1995), "Bearing Capacity of Actual Existing Roadbed", *RTRI Report Vol. 9, No. 7*, pp. 19~24.
4. 村本勝己, 關根悦夫(1998), "列車荷重を受ける盛土の締固め管理手法に関する検討", RTRI REPORT, Vol. 12, No. 4, pp.31-36.