

동적하중 재하시 강화노반 재료별 침하 특성

Characteristics of Displacement of the Reinforced Roadbed Materials with Cyclic Loading

황선근¹, 이성혁², 최찬용³

Seon-Keun Hwang, Seong-Hyeok Lee, Chan-Yong Choi

Keywords : *Stiffness of Subgrade*(노상지지력), *Cyclic Loading*(동적하중), *Reinforced Roadbed*(강화노반), *Plastic Displacement*(소성침하),

Abstract

In this study, performance of reinforced railroad roadbeds with the reinforced roadbed materials were investigated through the real scale roadbed tests. It was also found that the reinforced roadbed with reinforced roadbed materials has less elastic and plastic settlement than the one with soil. The slag roadbed was more effective than the crushed stone roadbed with the same condition for load distribution. Therefore considering overall characteristics of reinforced roadbed material, the optimum thickness was recommended as 50 cm. Furthermore the real scale model test under the simulated rainfall condition, the settlement in the slag roadbed was about 8 times smaller than the settlement in the soil roadbed.

1. 서론

일반적으로 철도 노반은 열차의 안전한 주행을 확보하기 위하여 궤도를 견고하게 지지하고 궤도에 대하여 적당한 탄성을 부여함과 동시에 노상의 연약화 방지, 노상으로의 하중을 분산한다. 열차가 통과시 열차 하중 및 진동은 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. 즉 노반의 역할은 열차 통과에 의한 동적 하중 및 진동에 대해서 궤도를 안전하게 지지하는 것이라 할 수 있다.

또한, 열차가 소정의 속도로 운행할 수 없게 되는

경우도 종종 발생한다. 따라서 노반이 불량한 선구에서 일반 구간에 비해 상당한 많은 유지보수 노력이 필요하다. 기존의 철도노반은 땅각기 또는 토취장에서 채취한 흙을 가지고 성토를 하여 장기간 동안 자중에 의해 자연 침하되도록 하여 궤도를 부설하여 왔으므로 사용연수 경과에 따른 도상자갈 관입의 증대, 분니, 침하 등에 의해 궤도 보수량이 급증하고 있는 실정이다.

노반이 불안정하면 노반의 지지력이 저하됨으로써 레일부에서는 궤도 틀림이 발생하기 쉬워 보수에 많은 어려움이 발생하여 유지보수주기가 증가하게 된다.

한편, 외국의 경우 노반에서 발생하는 문제점들을 해결함으로써 막대한 유지보수비용을 절감하고자 재래선과 신간선에는 강화노반을 채택하고 있다. 따라서, 본 연구는 철도의 유지관리하는 측면에서 가장 중요한 항목인 침하량에 대하여 실 대형 실험을 통해 실제 현장조건과 유사하게 실험단면을 조성한 후 궤도부, 노반부, 노상부에서 열차하중에 대한 각 층별 침하량을 계측하였으며, 강우로 인한 각 단면별 침하특성을 고찰하였다.

1) 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀, 책임연구원
2) 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀, 선임연구원
3) 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀, 주임연구원

2. 각 국의 허용 침하 기준

2.1 국철의 허용 침하기준

국철의 경우 열차의 안전운행에 지장이 없도록 궤도변위에 대한 허용치를 철도청 보선업무자료의 궤도정비기준에서 제시를 하고 있다. 하지만 노반의 변위와 이에 대한 정비기준은 현장 경험에 의존하고 있는 실정이다. <표 1>, <표 2>는 각각 국내 국철 궤도정비기준 및 고속철도 궤도 보수계획 기준²⁾을 나타내었다.

Table 1 Criterion Maintenance of Track in KNR (Unit : mm)

구분	본선	측선
궤간	+10 , 2	+10 , 2
수평	7	9
면마춤 (고저)	직선 레일길이 10m/7mm	직선 레일길이 10m/9mm
	곡선 레일길이 2m/3mm	곡선 레일길이 2m/4mm
출마춤	레일길이 10m/7mm	레일길이 10m/9mm

※ 궤도틀림은 노반의 침하 및 솟음에 관련하여 변할 수 있지만 노반의 변위와 상관없이 온도 및 발라스트, 침목 등의 영향에 의해서 변형될 수 있다.

Table 2 Criterion Restoration Plan of High Speed Train(mm)

파역	신호	허용값	측정기선	비고
0~25m	수평	9	10	
	고저	7		
	방향	7		
	궤간	직선		
		곡선	.5, +10	
	평면성	6	3	
26~60m	고저	8	30	km당 이 크기의 틀림은 1개 이하이어야 한다.
	방향	7		

2.2 일본에서의 노반 허용 침하량

선로에 있어서의 침하 현상은 대부분이 레일에 작용하는 열차하중에 의한 것이다. 이 작용조건을 종래의

궤도이론에서는 차축에 의한 충격과 진동이라고 생각하였으나 근래에 와서는 차륜과 레일의 접촉면에 있어서의 요철에 의해 발생하는 진동이라고 추측되고 있다. 그러므로 선로나 차량의 특성치를 알게 되면 도상의 유동에 의한 침하와 도상자갈의 노반내 침입에 의한 침하를 계산할 수 있다. 일본의 철도총합기술연구소(RTRI)의 연구결과에 의하면 침하 발생의 주 원인은 노상의 영향이며 양호한 노상(단일입경이 아닌 사질토)의 경우 도상침하에 대한 노상침하의 비는 0.13~0.19 이나 불량노반(이암, 풍화토 등 점성토)의 경우, 그 비는 1.3~3.1로 노상의 영향이 대단히 크다는 것을 알 수 있다. 또한 불량노반과 양호한 노반별로 구분하여 열차속도에 대한 선로의 침하량을 구해보면 불량노반에서의 침하는 양호한 노반의 경우에 비하여 4배 가까이 크고 노반이 불량할수록 속도에 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 침하량에 대한 관리를 위하여 설계시 허용침하량을 산정하여 사용하는데 일반적으로 고속철도 노반의 허용침하기준은 노반부에서의 침하량으로서 통상 일본에서는 그 기준을 2.5mm로 정하고 있다. 허용침하량의 산정은 노상의 안정 및 탈선한계, 승차감 등이 고려된다.

탈선한계에 따른 허용변위량은 10mm정도이지만 차량의 종류에 따라 다르며 궤도보수 등을 고려하면 일률적으로 정하는 것이 어렵다. 반복되는 열차주행에 의한 큰 진동변위는 도상자갈을 느슨하게 하여, 결과적으로는 도상자갈의 보수주기를 단축시키게 된다. 따라서 보수가 요구되는 범위내에서 변위를 정할 필요가 있으며 이것은 선로조건이나 보수체제에 따라서 다르지만, 약 2~5mm정도라고 알려져 있다.

노반의 허용침하량은 궤도레일패드와 도상발라스트의 압축량이 1mm정도라고 하면, 안전성 한도의 침하량은 레일의 허용침하량으로부터 그 값을 빼어 9mm, 승차감 등을 고려하면 침하량은 1~4mm로 된다.

따라서 노반의 허용침하량은 4mm 이내로 되지만 강화노반의 경우는 포장표면의 차수성을 확보하기 위해서 균열이 생기지 않은 한도의 침하량으로 할 필요가 있어 일본에서는 2.5mm를 사용하고 있다⁸⁾(철도구조물 등설계표준·동해설, 토구조물 : 철도총합기술연구소).

3. 실 대형 실험 영향인자

$$f = 1/T = V/d \tag{5}$$

3.1 하중조건 및 주파수 조건

시험하중은 설계속도 200km/h를 기준으로 LS22하중이 적용되었으며 직선부 장대레일을 기준으로 산정하였다. <식 2>를 이용하여 충격계수(i)를 계산하면 1.6이 된다. 또한, 재하하중을 구하기 위하여 표준하중과 충격에 의한 표준편차를 이용하여 (표준하중)+(표준편차×1)을 시험하중으로 산정하였다.

$$m + 1\sigma \rightarrow P_{st} + 1S_p \tag{1}$$

$$i = 1.0 + 0.3\left(\frac{V}{100}\right) \tag{2}$$

m: 표준하중, σ , S_p : 표준편차

i: 충격계수

V: 열차속도(km/h)

$$S_p = 0.5 \times P_{st} \times (i - 1) \tag{3}$$

$$\therefore S_p = 0.5 \times 11 \times (1.6 - 1) = 3.3$$

설계윤중 $P_w = 11 + 3.3 = 14.3\text{ton}$

설계축중 $P_a = 14.3 \times 2 = 28.6\text{ton}$

여기서 S_p : 표준편차

동적재하시 하중크기는 앞서 구한 설계하중 14.3tonf이 최대하중이 되도록 하였으며, 최소하중은 1tonf으로 하중을 재하하였다.

또한, 실험에 사용된 재하 주파수는 차량의 대차중심간 거리(d), 열차주행 속도(V), 통과주기(T)로부터 다음의 <식 4>에 의하여 구할 수 있다.

$$d = V \cdot T$$

$$\therefore T = \frac{d}{V} \tag{4}$$

여기서, 재하 진동수 $f = 1/T$ 이므로,

상기의 조건으로 계산하면 재하 주파수는 약 5Hz가 된다.

3.2 실험조건

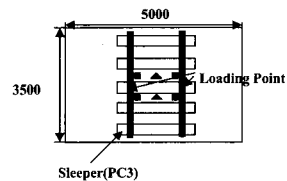
실 대형실험에 사용된 토조의 규격은 22m(L)×5m(W)×3m(H)이다. 전체 토조 22m에서 3.5m를 1단면으로 하여 총 5단면을 조성하였다. Actuator는 최대하중을 25tonf 재하할 수 있으며, Stroke는 125mm으로 설계되어 있다.

실험 기반은 현장조건과 유사하도록 조성하였으며, 노상부는 노반재료로 사용된 양질의 화강풍화토를 사용하여 조성하였다. <표 3>은 실험에 사용된 노상토와 쇄석 및 슬래그의 기본물성시험결과를 나타내었다.

Table 3 Properties of Roadbed Materials Tested

노반재료	최대건조 단위중량 (gf/cm ³)	최적 함수비 (%)	입도시험			비중
			D ₁₀ (mm)	C _u	C _g	
화강풍화토	1.74	11.3	0.16	11.87	0.96	2.59
쇄석	2.45	7.65	0.8	13.5	2.35	2.70
슬래그	2.15	9.55	0.25	25.2	0.91	2.81

<그림 1>은 실 대형실험 단면도와 평면도를 나타내었다. 실 대형 토조내에 설치된 계측센서는 토압계, 침하판, 속도계를 노반표면과 노상표면 좌·우측 2개씩 설치하였다. 본 논문에서는 침하 계측결과에 대하여 기술하였다.



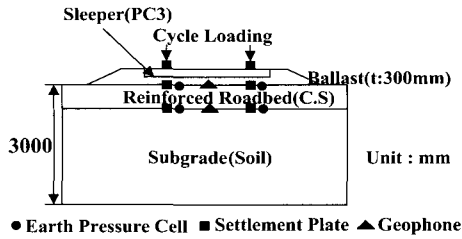


Fig. 1 A Plan & Cross Sectional view of Full Scale Test

<표 4>은 본 연구에서 수행된 실험조건을 나타내었다. <표 4>에서와 같이 노상의 지반반력계수(k_{30})를 11kgf/cm^3 으로 동일조건으로 조성한 후 노반두께를 30cm, 50cm, 80cm로 증가하였을 경우 침하 특성을 검토하였다. 또한, 현장에서의 강우조건을 재현하기 위하여 노반두께 30cm에 대하여 노반재료에 따른 살수시험을 실시하였다. 여기서, 살수시험은 동일면적내에서 동일 살수량을 살포하여 강화노반과 흙노반과의 상호비교를 하였다. 살수시점은 재하횟수 100,000회, 400,000회, 500,000회, 800,000회 4차례에 걸쳐 80L씩 총 320L의 물을 살수하였으며, 살수면적은 약 8.9m^2 이다.

Table 4 Condition of Full Scale Test

실험조건	노반재료	살수시험	노반재료
k11d30	쇄석/슬래그	k11d30	쇄석/슬래그
k11d50	쇄석/슬래그	k11d30	흙노반
k11d80	쇄석/슬래그		
k11d30	흙노반		

4. 실험결과 및 고찰

4.1 노반두께별 침하특성

본 연구에서의 침하량 분석은 소성침하량의 경우 평균값을 사용하였으며, 탄성침하량은 Peak-to-Peak값을 각각 사용하여 분석하였다.

실험에서 사용된 범례는 k로 표시 하는 것은 노상지력을 의미하며 d는 노반두께를 의미한다. 예를 들어, k11d30의 경우 노상지력이 11kgf/cm^3 이며, 노반두께 30cm인 단면을 의미한다.

레일부에서의 침하량은 선로를 유지보수하는 기준이

되는 중요한 항목이다. <그림 2>과 <그림 3>는 레일부에서 발생된 소성침하량과 탄성침하량을 나타내었다. 일반적으로 강화노반재료인 쇄석노반과 슬래그노반이 흙노반보다 침하가 적게 발생한 것을 볼 수 있으며, 소성침하량의 경우 최종 100만회 침하량의 84%가 20만회이전에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 하중이 가해짐에 따른 도상 발라스트가 공극의 재배열 및 압축에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 초기침하를 발생시키기 위해 현장에서 열차가 운행하기 전에 충분히 안정화를 시켜 급격한 침하가 발생하지 않도록 하여야 할 것으로 판단된다.

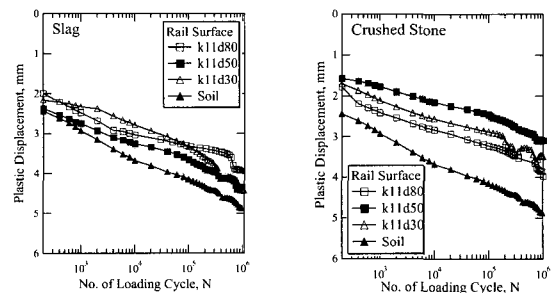


Fig. 2 Plastic Displacement with Roadbed Thickness at Rail Surface

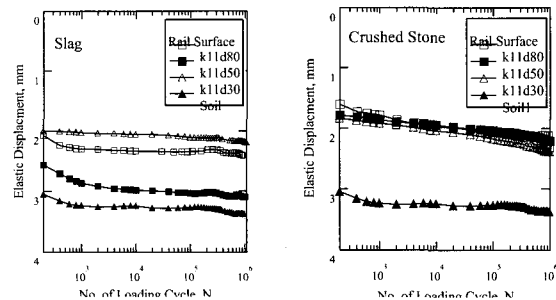


Fig. 3 Elastic Displacement with Roadbed Thickness at Rail Surface

<그림 4>와 <그림 5>은 노반재료별 100만회 재하된 후 최종 소성침하량과 탄성침하량을 나타내었다. <그림 4>에서와 같이 동일한 노상의 지지력일 때 노반두께가 증가함에 따라 소성침하와 탄성침하 모두 감소하는 것을 볼 수 있다. 슬래그노반의 경우 노반두께가 80cm일 때가 30cm일때보다 침하가 약 35%의 감소하는 것을 볼 수 있다.

<그림 5>은 쇄석노반에서의 소성침하량과 탄성침하량을 나타내었다. 노반두께 30cm, 50cm, 80cm에서의 소성침하량은 각각 1.19mm, 1.01mm, 0.73mm로 노반두께 30cm에 대하여 노반두께 50cm, 80cm의 경우 15.9%, 38.7% 감소율을 보이고 있다. 탄성침하량의 경우 거의 노반두께의 영향이 미소한 것으로 판단된다. 이러한 현상은 실험단면의 노상의 상태가 매우 양호한 지반이기 때문이라고 판단된다.

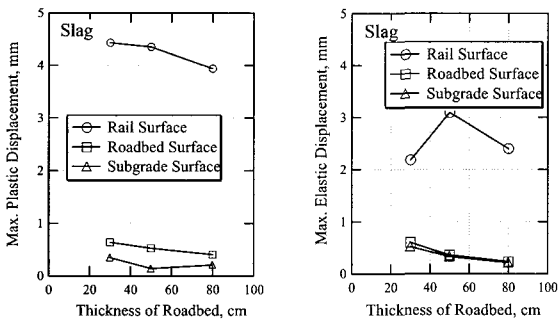


Fig. 4 Elastic & Plastic Displacement after 100million Cycle loading at Slag Roadbed

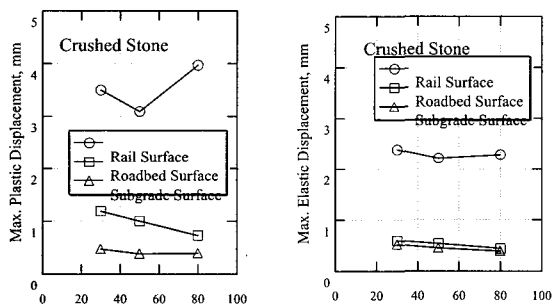


Fig. 5 Elastic & Plastic Displacement after 100million Cycle loading at Crushed Stone Roadbed

<그림 6>~<그림 7>은 노반재료별 노반두께에 따른 침하율(%)을 나타내었다. 여기서, 침하율(Displacement Ratio, %)은 <식 6>와 같이 레일부에서 발생한 침하에 대하여 노반부와 노상부의 침하량으로 나눈 값을 의미한다. 실험조건마다 도상 발라스트의 다짐정도 차이로 인한 영향을 배제하여 정량적으로 분석하기 위하여 침하율(%)을 이용하여 결과를 분석하였다.

$$\text{침하율} (\%) = \frac{\text{노반 및 노상에서의 침하량}}{\text{레일부에서 발생한 침하량}} \times 100 \quad <6>$$

<그림 6>에서의와 같이 쇄석노반의 경우 소성침하율은 노반부에서 20~40%, 노상부에서는 10~18% 정도의 침하율을 보이고 있다. 반면 슬래그노반의 경우 20%이하의 침하율을 보이고 있다. 따라서, 슬래그노반이 쇄석노반보다 강성이 큰 재료로서 침하를 억제효과가 크다고 할 수 있다.

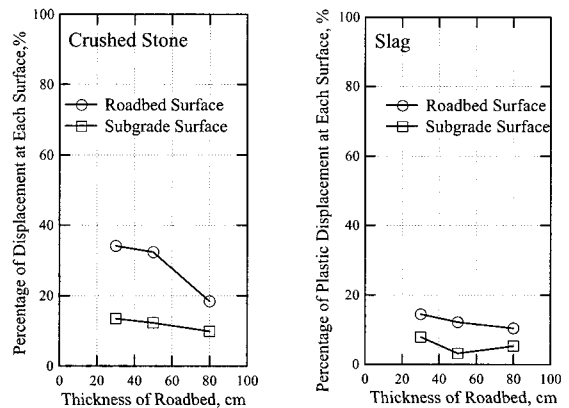


Fig. 6 Displacement Ratio of Plastic with Roadbed Thickness

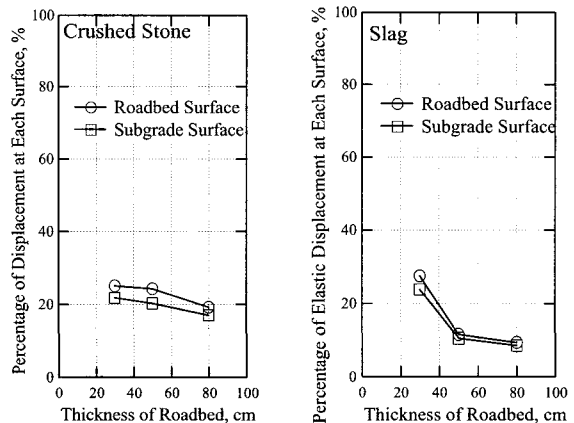


Fig. 7 Displacement Ratio of Elastic with Roadbed Thickness

4.2 노반재료별 물이 침하에 미치는 영향

앞서 기술한 바와 같이 실험실 조건은 현장에 비해

다짐관리 및 환경조건이 양호한 상태이므로 침하량 발생은 대부분 관리기준에 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 일반적으로 현장조건은 실 대형실험에 비해 다소 가혹한 환경조건에 있을 것으로 판단된다. 따라서, 살수시험은 강우를 고려한 조건을 재현하기 위하여 실시하였다. 실험조건으로는 노반재료의 특성을 파악하기 위하여 흙노반 30cm와 슬래그, 쇄석노반 30cm를 비교하였다. 노상지지력(k_{30})은 11kgf/cm^3 에 대하여 실험을 실시하였다.

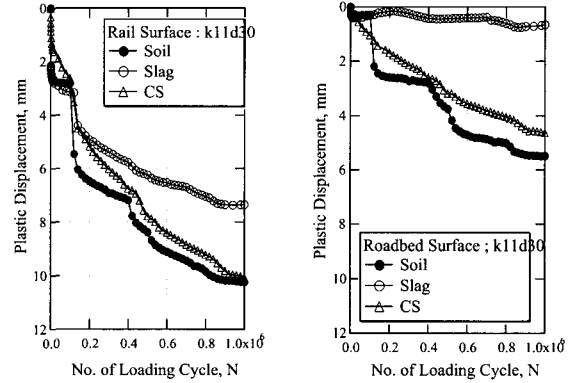
기존에 노반재료로 활용되고 있는 흙노반과 강화노반재료로 사용되고 있는 슬래그와 쇄석에 대하여 살수시 레일부와 노반부, 노상부에 발생된 소성침하량과 탄성침하량을 비교하였다.

<그림 8>는 살수시 레일부와 노반부에 발생된 소성 침하량과 탄성침하량을 비교하였다. <그림 8>에서와 같이 소성침하량의 경우 살수시점인 100,000회에서 급격한 침하가 발생하는 것을 볼 수 있으며 슬래그노반과 흙노반 모두 살수에 의하여 침하량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 레일부의 최종침하량은 흙노반의 경우 약 10.2mm가 발생하였으나, 강화노반재료인 슬래그와 쇄석의 경우 각각 7.6mm, 9.8mm의 침하가 발생하였다.

궤도정비기준에서 제시된 허용 변위기준인 7mm를 기준으로 하였을 경우 흙노반의 경우 340,000회, 쇄석노반의 경우 440,000회, 슬래그노반의 경우 800,000회에 기준에 달하는 것을 볼 수 있다. 동일한 조건이라고 가정한다면, 쇄석노반과 고로 슬래그노반의 경우 흙노반보다 각각 1.3배, 2.34배 침하억제 효과가 있는 것을 알 수 있었다.

100만회 재하 후 노반부에서 발생된 소성침하량의 경우 흙노반에서는 5.5mm의 침하가 발생하였으나, 슬래그노반의 경우 1mm이내의 작은 침하가 발생하였다. 쇄석노반의 경우 급격하게 감소하여 최종적으로 약 4.8mm로 다소 큰 침하를 보였다. 쇄석노반이 상대적으로 슬래그노반보다 크게 침하가 발생한 것은 주로 3가지의 원인으로 보아진다. 첫 번째는 입자사이의 공극이 슬래그노반보다 크기 때문에 물에 의해 세립분이 하부로 내려가면서 추가적인 침하가 발생한 것으로 판단된다. 두 번째는 쇄석노반의 경우 노반을 조성 후 1주일 이내에 실험을 실시하여 상대적으로 슬래그노반보다 시공에 의한 안정화가 충분히 되지 않았기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 세 번째는 슬래그 노반의 경우 수경성으로 침하가 적게 발생한 것으로 판단된다. 슬래그노반의 경우 노반부에서의 침하량은 흙노반과 비교

할 경우 약 5.5배 이상 침하가 적게 발생하였으며, 쇄석노반의 경우 약 1.2배 침하가 적게 발생하였다.



(a) Rail Surface (b) Roadbed Surface
Fig. 8 Plastic Displacement with Roadbed Materials

5. 결론

실제 현장에서 열차운행과 동일한 철도하중을 반복적으로 재하하여 국내·외에서 철도 강화노반재료로 사용되고 있는 슬래그, 쇄석, 화강풍화토(흙) 등 3종의 재료에 대해 실 대형실험을 실시하여 각 재료의 동적하중에 대한 침하 특성을 분석하였다. 또한, 현장에서의 강우조건을 재현하기 위하여 살수시험을 실시하여 재료별 침하 거동 평가를 실시하였다. 본 논문에서 제시된 주요결론은 아래와 같다.

1. 노반두께의 증가에 따라 탄·소성 침하량은 적어지며, 노반두께를 각각 30cm, 50cm, 80cm 포설한 경우 노반부에서는 33~37%, 노상부에서는 22~26% 정도의 침하가 측정되었다.
2. 소성침하율(%)은 쇄석노반의 경우 노반부에서 20~40%, 노상부에서 10~18% 정도의 침하가 발생하였으며, 슬래그노반의 경우 노반 및 노상에서의 침하율은 20%이하로 슬래그노반이 쇄석노반보다 침하 측면에서 우수한 재료인 것을 볼 수 있다.
3. 노반두께 50cm 이상으로 할 경우 침하량이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있으며, 침하 측면에서 가장 경제적인 노반두께임을 알 수 있었다.
4. 노반에 살수하였을 때 침하가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며, 레일부의 허용침하량 7mm를 기

준으로 쇄석노반, 고로슬래그노반이 흙노반에 비해 1.3배, 2.34배 침하가 적게 발생한 것을 볼 수 있다. 따라서, 강화노반으로 시공하였을 경우 기존 흙노반 보다 유지보수주기의 증가로 인해 보수비용이 상대적으로 감소할 것으로 판단된다.

5. 노반부에서 발생된 소성침하량은 흙노반의 경우 5.5mm 발생하였으나, 슬래그노반의 경우 1mm 이내로 5배이상 침하가 적게 발생하였다.

REFERENCES

1. 한국철도기술연구원, "철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한 연구(4차년도 연차보고서)", 2001. 12.
2. 이종득, "철도공학", 노해 출판사, 1997. 3.
3. 철도청, "국유철도건설규칙", 철도청, 2000. 8.
4. 철도청, "보선업무자료(1997)", 철도청, 1997.
5. 한국고속철도건설공단, "고속철도 노반공사 공사 시방서", 한국고속철도건설공단, 1997. 5.
6. Ernest T. Selig, John M. Waters, Track Geotechnology and Substructure Management, Thomas Telford, 1994.
7. 須長誠, 關根悅夫, "經濟的な強化路盤の開発に關する研究", RTRI REPORT Vol. 5, No. 10, '91. 10., PP 25~33.
8. 運輸省 鐵道局, "鐵道構造物等設計標準・同解説 土構造物", 鐵道總合技術研究所, 1992. 10.