

고속전철 강화노반의 침하예측에 관한 연구

A Study on the Settlement Prediction of Reinforced Roadbeds

*황선근¹⁾, Seon-Keun Hwang, 신민호²⁾, Min-Ho Shin, 이일화³⁾, Il-Wha Lee,
조용권⁴⁾, Yong-Kwon Cho

- 1) 한국 철도기술연구원 책임연구원, Chief researcher, Korea Railroad Research Institute
- 2) 한국 철도기술연구원 시설전기연구본부장, Director General, Korea Railroad Research Institute
- 3) 한국 철도기술연구원 주임연구원, Researcher, Korea Railroad Research Institute
- 4) 한국 철도기술연구원 연구원, Researcher, Korea Railroad Research Institute

SYNOPSIS : The benefit of reinforced roadbeds, such as roadbed reinforced with slag and roadbed with crushed stone has been known among engineers. In this study, model soil box test is executed to determine optimum roadbed thickness. As a result, a empirical solution for the settlement of reinforced roadbeds was suggested.

Furthermore, optimum thickness of reinforced roadbed could be determined based on the settlement characteristic of reinforced roadbed among the several variables.

Keywords : reinforce roadbed, settlement prediction, optimum thickness

1. 서론

궤도의 구성은 열차하중을 직접 지지하는 레일, 침목, 도상자갈, 노반, 노상층으로 구성되며 절토부나 지하수가 높은 곳에서는 별도의 배수층을 두고 있다. 일반적으로 도상자갈의 하부구조가 노반의 범주에 포함된다.

고속전철은 기존 철도보다 고속으로 운행되기 때문에 동하중에 의한 축중이 크므로 강화노반을 채택하여 노반의 지지력을 증대시킨다. 강화노반으로 사용되는 재료로는 아스팔트, 쇄석, 슬래그 등 다양한 종류가 있으며 시공법이나 유지관리기법에 있어서도 많은 차이를 가지고 있다. 일반적으로 노반의 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 조건은 노반의 하부층인 노상의 지지력으로서 고속전철에서는 노상의 시공관리기준을 별도로 규정하고 있다.

고속전철 노반은 열차의 주행안전에 매우 중요한 영향 요소로서 건설에서부터 유지관리에 이르기까지 장기적인 계획을 세워 다양한 검토를 하여야 한다. 노반의 안정성에 영향을 미치는 요소는 열차조건, 지반조건, 기후조건, 지형조건 등 다양하므로 이러한 모든 조건을 고려한 설계가 요구되지만 일반적으로 설계시에는 단순화하여 설계를 한다. 본 연구에서는 이러한 영향조건을 고려하여 국내 지반에 적합한 강화노반의 설계기준 자료를 제시하기 위하여 강화노반의 지지력 특성을 분석하였다. 또한 노반의 동적 거동특성을 분석하기 위하여 토조를 이용한 반복재하시험을 수행하여 장기적인 열차의 주행하중에 대한 영향성을 검토하였다.

본 연구에서는 고속전철 노반에 적용되고 있는 강화노반을 실제 열차하중을 고려한 동적 반복재하시험을 통하여 최적두께 산정의 기초자료를 확보하기 위한 지반의 동적변형, 지반의 응력상태 등 지반의 동특성 등을 파악하고 이를 토대로 지반의 거동을 예측하여 시험적으로 타당한 해를 제시하고자 하였다.

적용되는 변수는 강화노반의 재료, 두께, 노상조건, 강우조건에 따라 노반 각 층에서의 침하량, 응력, 진동특성 등을 분석하여 노반의 최적단면을 제시하기 위한 기본자료를 나타내었다.

2. 시험 종류 및 방법

2.1 모형토조시험의 종류

시험에서 구성되는 단면을 다음의 그림 1에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 각 층은 노상의 K_{30} 값이 7 kgf/cm^3 또는 11 kgf/cm^3 인 두가지 경우에 대하여 그 위에 놓이는 강화노반층의 두께가 변화되고 있으며, 이로써 층두께를 변수로 한 실험결과는 노상의 지지력에 따라 최적의 단면제시가 가능하게 된다.

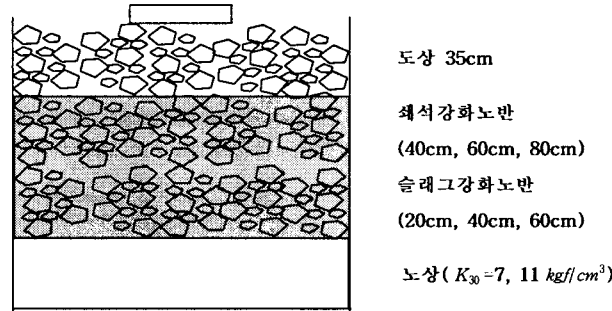


그림 1 시험에 사용되는 단면의 구성

모형토조시험을 이용하여 강화노반의 침하특성을 규명하기 위한 시험의 종류는 표 1과 같다.

표 1 모형토조시험의 종류

지지력 (K_{30})	강화노반 재료두께(cm)		비고
	쇄석	슬래그	
7 kgf/cm^3	40	40	*침수상태 실험으로 살수후 재하실험 1 회추가
	60*	60	
	80	80	
11 kgf/cm^3	20		
	40		
	60		

2.2 모형토조 시험방법

모형토조시험에 이용된 재하하중의 결정에 있어서 설계차량의 윤중은 8.5ton을 사용하였다. 설계하중에는 충격율과 캔트부족량이 고려되었다.

$$P_w' = P_w \times i \times (1 + c) \quad (1)$$

여기서, P_w : 윤중(= 설계축중/2), i : 속도충격율(= $1.0 + 0.3 \left(\frac{V}{100} \right)$), c : 캔트 부족량(=0.3)

본 시험에서의 하중재하 절차는 그림 2와 같다. 그림에서와 같이 10회 정재하 후(③), 2Hz의 재하속도로 1000회 재하(④)하였다. 이는 재하시험전에 다짐상태의 조절이 힘든 도상자갈층에서 발생하는 즉시 침하량을 줄여주어 이의 영향을 어느정도 배제하고자 하는 목적으로 수행하였다. 따라서 1000회의 선행 재하후의 도상자갈층의 다짐정도는 일정한 조건으로 유지되는 것으로 가정하였다. 위와 같은 과정을 통하여 동일한 다짐조건을 만족한후 200,000회까지 반복재하시험을 3.5Hz로 실시하였다.

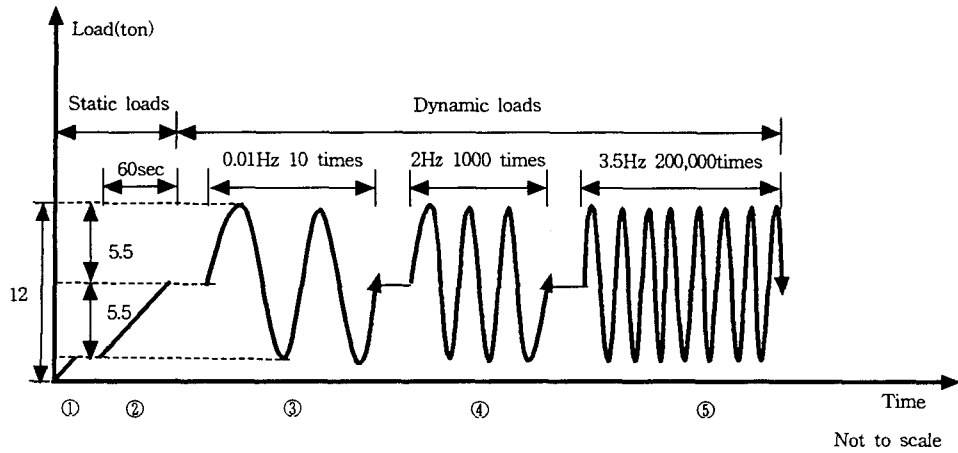


그림 2 재하하중의 재하형태와 선행하중

모형토조 실험에 사용된 각 계측기(속도계, 침하판, 토압계)는 그림 3에 보이는 것과 같이 설치하였다. 이들의 계측기에서 실험중 발생되는 데이터는 각각 SA390과 데이터로거에 의하여 저장하였다.

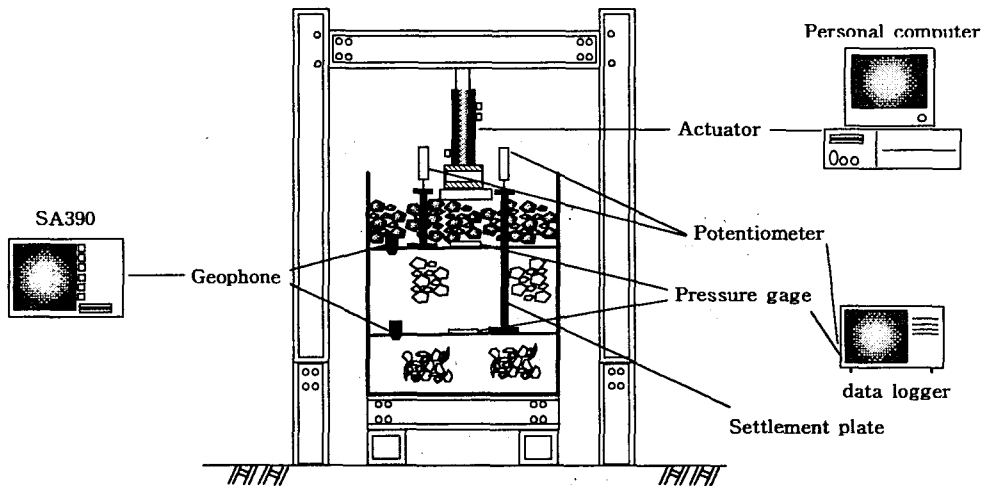
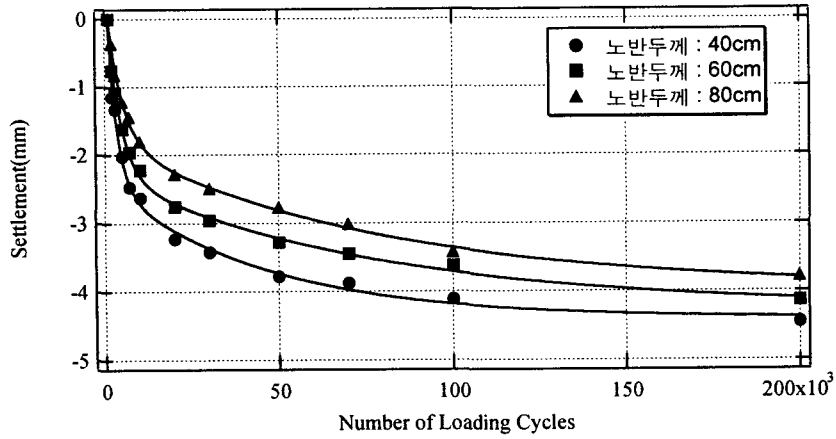


그림 3 모형토조 시험기의 전체 계통도

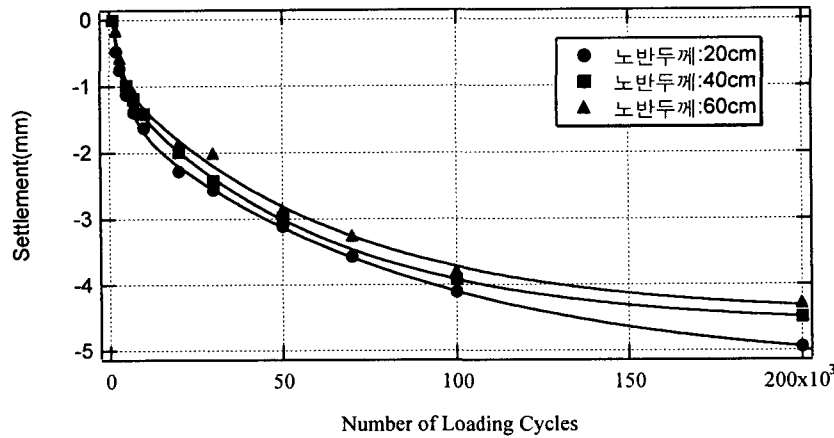
3 시험 결과 및 고찰

3.1 노반재료의 두께에 따른 침하 특성

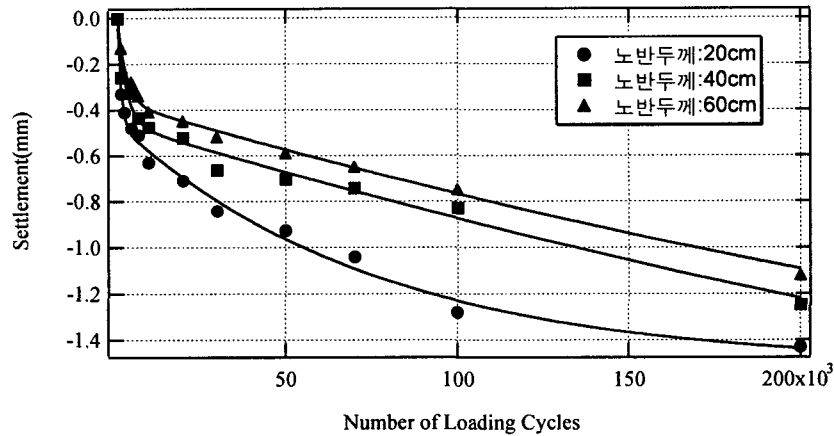
노반재료 및 지지력별로 노반 두께가 다른 경우, 노상상부면, 노반상부면, 침목저면의 침하량을 측정하였는데 본 분석에서는 궤도의 설계의 기준이 되는 노반 상부면을 분석하였다. 그 결과는 그림 4와 같으며 노반의 두께가 증가함에 따라 노반상부면에서의 침하율은 재하횟수에 따라 일정한 경향 없이 감소함을 알 수 있다.



(a) $K_{30} = 7 \text{ kgf/cm}^3$, 쇠석강화노반



(b) $K_{30} = 7 \text{ kgf/cm}^3$, 슬래그강화노반

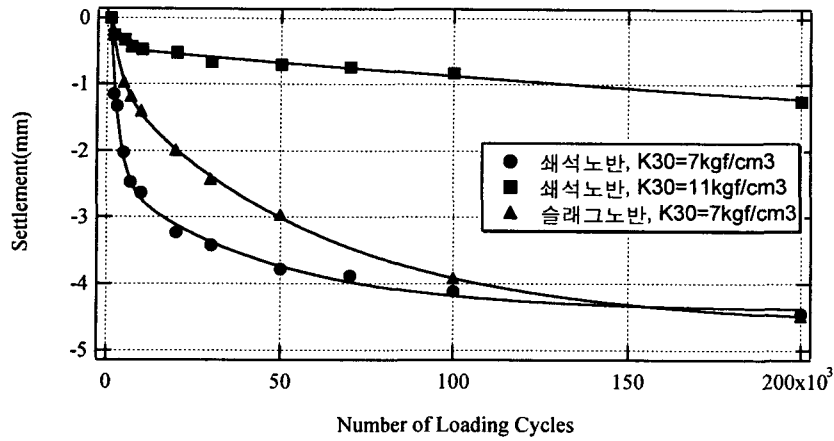


(c) $K_{30} = 11 \text{ kgf/cm}^3$, 쇠석강화노반

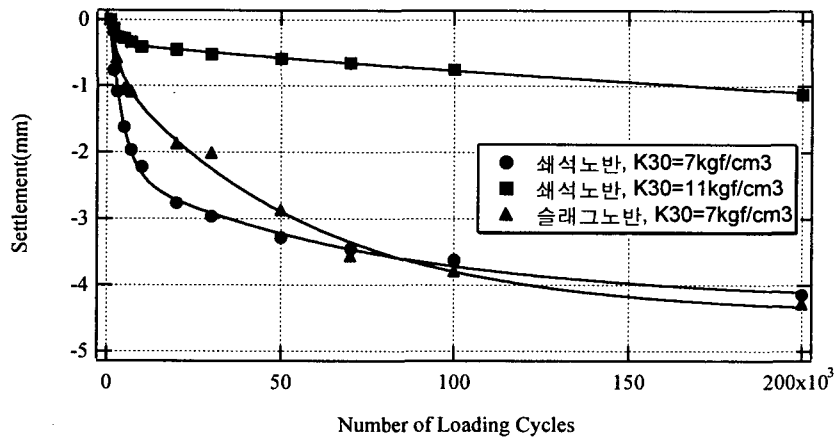
그림 4 노반재료의 두께에 따른 강화노반상부면에서의 침하특성

3.2 노상의 지지력에 따른 침하특성

지지력에 대한 재료별 침하특성결과는 그림 5와 같다. 노상의 지지력이 동일한 경우 노반상부면에서의 쇠석강화노반과 슬래그강화노반의 침하량의 차이는 거의 없으며 동일한 쇠석강화노반이라도 지지력에 차이가 있을 경우 침하량의 차이가 지지력은 같고 재료가 다를 경우보다 더 큰 것으로 나타났다.



(a)노반두께 40cm



(b)노반두께 60cm

그림 5 노상의 지지력에 따른 강화노반상부면에서 침하특성

3.3 침수시의 침하특성

침수시의 동적반복재하시험을 통하여 마모/파쇄 특성이 침하에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 측정함과 동시에 모형토조에서 가장 한계적인(critical) 상태를 묘사하였다. 그림 6에서와 같이 강우에 의한 침수조건을 재현한 실험의 경우 기존의 함수비를 이용한 실험보다 침하량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 설계시 강우에 의한 침수가 발생할 경우에 대한 고려가 매우 중요함을 의미한다.

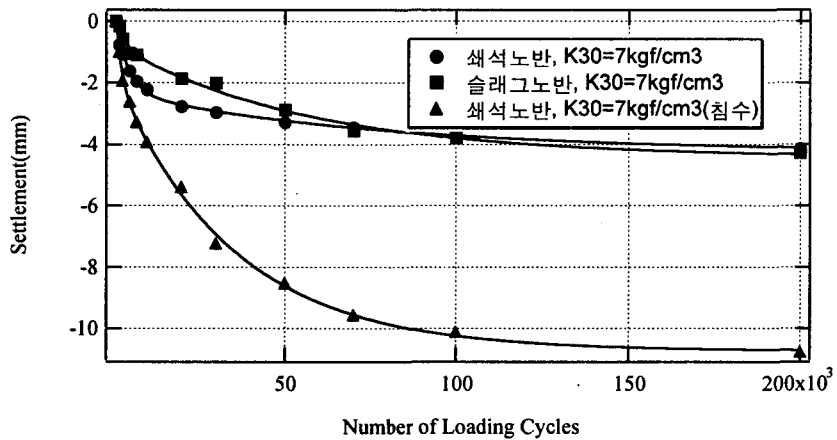


그림 6 강우에 따른 수침조건하에서의 노반 상부면에서 침하특성

3.4 두께 및 지지력의 변화에 따른 침하특성

그림 7에서는 강화노반의 두께변화 및 노상의 지지력변화에 따른 침하량의 감소효과를 보여주고 있다. 그림 7에서 감소값(Decreasing value)은 두께 10cm변화 또는 지지력 1kgf/cm³변화에 대한 노상상부면에서의 전침하량에 대한 감소침하량의 비를 나타내고 있다. 범례에서 (1)은 노상의 지지력을 7kgf/cm³으로 고정하고 노반의 두께를 10cm 증가시켰을 경우, (2)는 노상의 지지력을 11kgf/cm³으로 고정하고 두께를 10cm 증가시켰을 경우, (3)은 노반의 두께를 40cm로 고정하고 노상의 지지력을 1kgf/cm³만큼 증가시켰을 경우, (4)는 노반의 두께를 60cm로 고정하고 노상의 지지력을 1kgf/cm³만큼 증가시켰을 경우의 침하감소량에 해당한다.

그림 7과 같이 침하감소량은 노반의 두께를 10cm 증가시키는 것(그림 7의 (1), (2)의 경우) 보다 지지력을 1kgf/cm³만큼 증가시키는 것(그림 7의 (3), (4))이 효과적으로 나타났다. 이는 노반상부면에서의 침하량은 강화노반을 설치하였을 경우 강화노반에 의해 일어나는 침하량보다 노상에서 침하량이 더 지배적임을 알 수 있다. 이는 실제 물성값에서도 알 수 있듯이 노반과 노상의 강성의 차이가 많이 난다.

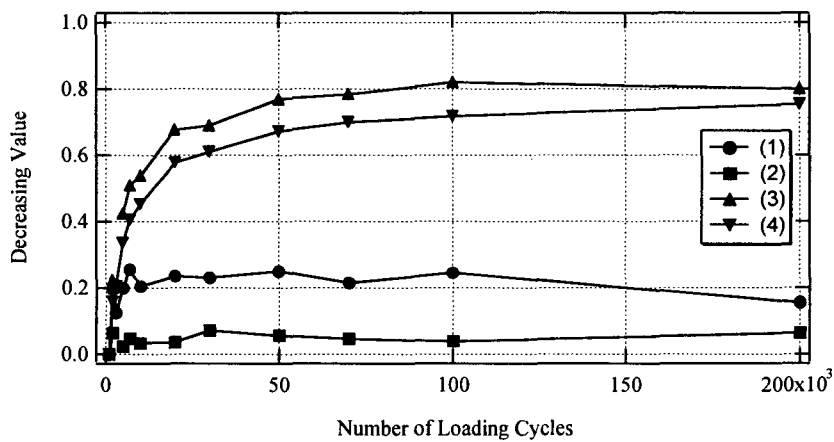


그림 7 두께 및 지지력의 변화에 따른 침하특성

3.5 노반에서의 최종 침하량

강화노반의 두께변화에 따른 쇄석강화노반($K_{30} = 7\text{kgf/cm}^3$ 과 $K_{30} = 11\text{kgf/cm}^3$ 인 경우), 슬래그 강화노반($K_{30} = 7\text{kgf/cm}^3$ 인 경우)의 노반과 도상경계면에서 최종 침하량은 그림 8과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 범례에서 ●, ▲, +가 이루는 직선의 기울기는 두께의 증감에 따른 침하량의 증감크기를 나타낸다. 강화노반의 두께가 증가하면 재하횟수 200,000회일 때 침하량은 거의 선형비로 감소하는 것을 알 수 있으며, 노상의 지지력이 증대되면 노반과 도상 경계면에서의 침하가 현저히 줄어들며 두께 변화에 따른 침하량의 차이가 작아짐을 알 수 있다.

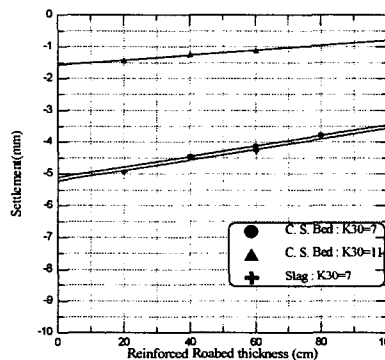


그림 8 노반에서의 최종침하량

3.6 실험식 제안

각각의 실험들로부터 재하횟수에 따른 노반과 도상 경계면 및 침목면에서의 침하량의 상관관계식을 다음과 같이 실험식의 형식으로 제안할 수 있으며 실험식에 적용되는 상수 및 적합도는 표 2와 같다. 이를 이용하면 적정 재하횟수에서의 소성 침하량을 예측할 수 있다.

$$S = k_0 + k_1 \exp(-k_2 N) + k_3 \exp(-k_4 N) \quad (2)$$

여기서, S : 침하량, N : 재하횟수, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 : 상수

표 2 노반상부면에서 소성침하량 예측을 위한 실험식에 사용되는 상수 및 적합도

노반두께 \ 지지력	쇄 석 강 화 노 반 ($K_{30}=7\text{kgf/cm}^3$)				
	k_0	k_1	$k_2(1 \times 10^{-5})$	k_3	$k_4(1 \times 10^{-4})$
40cm	-4.41	1.99	2.19	3.41	3.76
60cm	-4.25	1.91	1.29	2.88	2.63
80cm	-3.98	2.20	1.28	2.26	2.32

노반두께 \ 지지력	쇄 석 강 화 노 반 ($K_{30}=7\text{kgf/cm}^3$)				
	k_0	k_1	$k_2(1 \times 10^{-5})$	k_3	$k_4(1 \times 10^{-4})$
20cm	-5.32	3.92	1.17	1.80	2.58
40cm	-4.63	3.67	1.64	1.38	3.15
60cm	-4.47	3.65	1.57	1.42	4.01

노반두께 \ 지지력	쇄 석 강 화 노 반 ($K_{30}=7\text{kgf/cm}^3$)				
	k_0	k_1	$k_2(1 \times 10^{-5})$	k_3	$k_4(1 \times 10^{-4})$
40cm	-5.32	3.92	1.17	3.41	3.76
60cm	-4.25	1.91	1.29	2.88	2.63
80cm	-3.98	2.20	1.28	2.26	2.32

식 2와 표 2를 이용하면 연간 노반상부면의 침하량을 예측할 수 있다.

제안식에 의한 노반상부면의 침하량을 기준으로 노반의 두께를 결정하고자 할 때 임의의 재하횟수에서 노반상부면에서의 소성침하량을 예측하여 노반의 소성침하량의 허용값에 적합한 노반두께를 결정할 수 있다.

그림 9에서 이 값들의 변화를 보여주고 있으며 이 도표를 이용하여 설계자가 허용소성침하량을 결정하면 하중횟수(재하기간)에 대한 가장 적절한 노반두께를 결정할 수 있다.

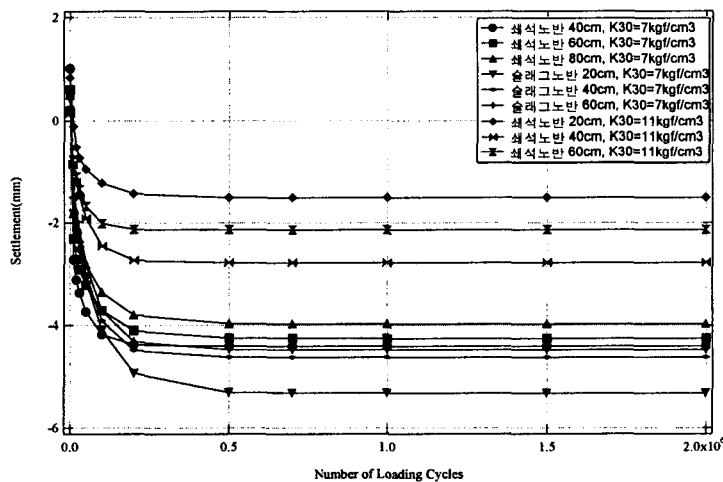


그림 9 노반상부면에서 예상침하량

6 결론

각 노반조건에 해당하는 경우를 이론적인 검증과 모형토조시험을 통하여 강화노반의 변형특성을 검토하였다. 연구결과를 종합 정리하면 다음과 같다.

- (1) 슬래그의 경우 시간의 지남에 따라 수경작용으로 인하여 압축강도가 매우 크게 증가하여 180일 강도가 30kgf/cm^2 이상으로 증가하게 된다. 본 시험에서는 양생을 하지 않고 초기상태로 최적함수비만 맞추어 시험하였으나 충분한 강도가 확보되는 것으로 나타났다. 그러므로 충분한 양생을 고려한다면 쇄석강화노반과 비교하여 설계 두께를 절감할 수 있다.
- (2) 노반의 침하량을 제어하는데 있어서 최적의 방법은 노상강도를 높이는 것이고 강도의 증대가 여의치 않을 경우 강화노반의 적절한 두께를 산정할 수 있다.
- (3) 두께에 따른 침하증감량은 두께증가비와 최대침하량 감소비가 흙강화노반, 쇄석강화노반, 슬래그강화노반 모두 선형성을 유지하고 있다.
- (4) 전체적으로 흙강화노반보다는 슬래그 또는 쇄석강화노반이 동일두께에서 더 효과적임을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부와 산업자원부 및 과학기술부에서 시행한 선도기술개발사업중 “고속전철 궤도 및 노반 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 고속전철사업기획단(1991) “고속철도 흙구조물 설계표준시방서 해설(안)”, 고속전철 사업기획단
2. 이종득 (1996), 철도공학, 노해출판사 제3판
3. Coenraad Esveld (1989), "Modern Railway Track"
4. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York(1993), pp.234-236.
5. Dingqing Li and Ernest T. Selig(1998), "Method for Railroad Track Foundation Design I, II, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.124, No.4
6. Das, B. M.(1993), *Principles of Soil Dynamics*, PWS-KENT
7. Dowding, C. H.(1996), *Construction Vibrations*, Prentice-Hall
8. Ernest T. Selig and John M. Waters(1994), "Track Geotechnology and Substructure Management", Redwood Books
9. Li, D. and Selig, E. T. (1998), "Method of Railroad Track Foundation Design. II: Applications", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 323-329.