

지오그리드로 보강된 철도노반의 침하 거동 Settlement Behavior of Geogrid Reinforced Railroadbed

신은철 *
Shin, Eun-Chul

김두환 **
Kim, Du-Hwan

김남현 **
Kim, Nam-Hyun

ABSTRACT

Recently the geogrids are being used in some large projects such as Incheon International Airport construction, highway construction, and Korean High-Speed Railway construction with not only the merit of simple construction but also reinforcing efficiency for the soft ground. Main function of roadbed is to provide a stable foundation in terms of bearing capacity and settlement for the subballast and ballast layers. Differential settlement of the railroad should be avoided. The cyclic laboratory model tests were performed to investigate the settlement behavior of geogrid reinforced railroadbed. The ratio of settlement of roadbed under cyclic loading with three layers of geogrid reinforced is less than 1/2 of the roadbed thickness without reinforcement.

1. 서 론

지반의 지지력이 양호한 유럽의 철도선로를 도입한 우리나라에서는 많은 연약지반이 존재하고 양질의 성토재가 부족하여 철도 노상토의 팽팽현상, 노반의 지지력 부족에 의한 도상의 과도한 침하가 빈번히 발생하였다. 특히 일반철도와는 달리 고도의 정밀도를 통하여 최고의 주행 안전성을 유지해야하는 고속철도의 경우 전통적인 철도선로 구조로는 상당한 위험성을 안게된다. 일본을 비롯한 선진외국에서는 상기의 문제점을 극복하기 위하여 수많은 연구를 수행하였으며, 1970년대 중반 이후 대부분의 철도선로 노반층을 보강한 강화노반의 형태로 시공을 하고 있다. 적절한 연약지반 보강 공법을 사용하므로써 막대한 비용을 절감할 수 있으며 보다 효율적인 시공이 가능해진다. 토목섬유의 일종인 지오그리드는 고강도와 적절한 신장 특성에 의하여 지반의 인장강도 증가의 효과 등을 얻을 수 있으며, 종래에 사용하던 콘크리트 보강 등의 방법에 비하여 공기 단축, 비용절감, 시공의 간편성 등의 장점이 있어 대규모 공사에서의 사용이 증가하고 있는 추세이다.

본 연구에서는 모형UTM과 모형토조를 이용한 반복재하시험을 수행하여 실제 철도단면 구조에 대한 지오그리드 보강시 동적하중하에서의 철도노반의 침하거동을 고찰하였다.

2. 반복재하 실험 조건

표 1은 반복재하시험에 사용한 성토재료에 대한 공학적 특성을 나타내며 입도분포는 그림 1과 같다. 노반층과 준설토의 흙시료는 통일분류법에 의해 GP/GW, SP로 구분된다.

* 인천대학교 공과대학 토목환경시스템 공학과 교수, 정회원

** 인천대학교 대학원 토목환경시스템 공학과 석사과정

표 1. 성토재료의 공학적 특성

특성	성토재료	노반층	준설토
비중(G_s)	-	-	2.64
균등계수(C_u)	6.5	2.0	2.0
곡률계수(C_c)	1.35	0.84	0.84
흙의 분류	GP(\approx GW)	-	SP
No.200체 통과량(%)	0.9	-	9.0
다점특성	최대전조밀도 γ_{dmax} (g/cm^3)	2.16	1.58
	최적함수비 w_{opt} (%)	9.14	8.6
시험기준 (ASTM)	ASTM D-1557	-	ASTM D-698

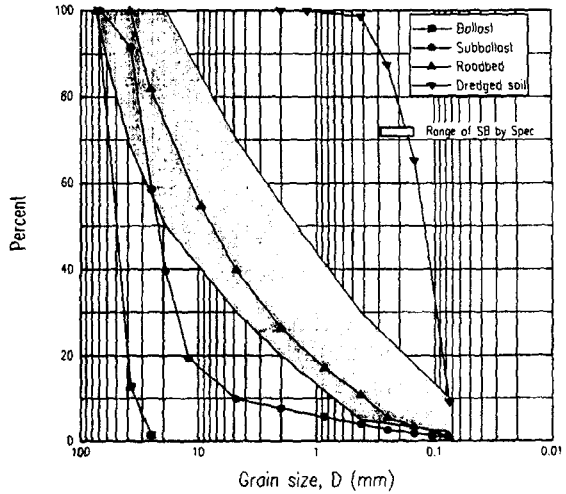


그림 1. 시료의 입도분포 곡선

지오텍스타일을 노상토층 상부에 포설하여 철도노반 시공시 발생하는 분니 현상을 방지하였고 지오그리드 보강재는 성토체 중간에 포설하였다. 표 2는 시험에 사용한 지오그리드와 지오텍스타일의 특성을 나타내고 있으며 그림 2는 시험에 사용한 지오그리드를 나타낸다.

표 2. 시험용 토목섬유의 재료 특성

항목	시료종류	지오그리드	지오텍스타일
재질	-	폴리프로필렌(강성)	폴리에스테르
제조형식	-	양축 방향 신장 격자 구조	부직포
제품 표준 크기	-	4m×50m	8.5m×50m
단위면적당 중량(g/m^2)	-	650	700
최대 인장강도 (kN/m)	-	40.0(양방향)	178
최대 신장율(%)	-	11.0%(양방향)	50~120
5% 신장시 인장강도(kN/m)	-	30.0(폭), 28.0(길이)	-
격자 크기 (mm)	-	34mm×27mm	-
투수계수 (cm/sec)	-	-	10^{-1}

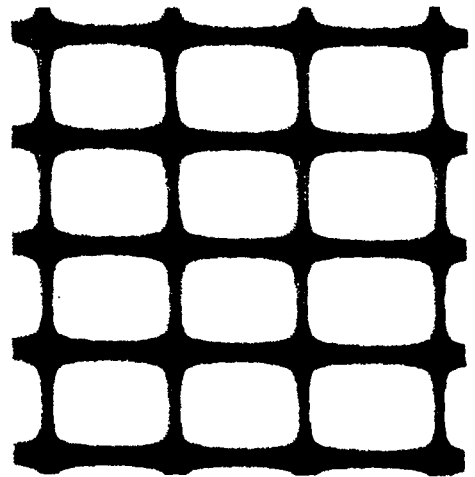


그림 2. 강성 지오그리드 시료

3. 반복재하실험 조건 및 기초지반 조성

대형 만능시험기(UTM)를 이용하여 대형모델 시험을 5회에 걸쳐 실시하여 지오그리드 보강지반의 거동을 조사하였다. 시험 단면은 표 3과 같이 4개 종류의 단면재료로 사용하여 보강조건을 변화

시켜며 실시하였다. 그림 3과 4는 시험 단면의 개략도를 나타낸다. 상부의 도상(Ballast)층 및 보조도상(Subballast)층의 두께는 한국 고속철도 시방규정에 따라 각각 35cm, 20cm로 정해진 상태로서, 모든 시험 세트에서 이 두께를 유지하였다. 연약층은 50cm 두께의 젖은 상태의 준설토로 조성하였고 노반의 두께 및 보강 조건을 변화시키며 지오그리드의 보강 효과를 조사하였다(표4).

표 3. 층별 지반구성 조건

층번호	층의 종류	두께(cm)	구성재료
a	도상	35	-
b	보조도상	20	-
c	노반	40, 80	고속도로 보조기층재
d	원지반	50	연약층 (준설토)

표 4. 시험별 단면 보강 조건

시험번호	노반두께 (cm)	보강재 포설	
		지오텍스타일	지오그리드
1	40	-	-
2	80	-	-
3	40	1	1 (No.1)
4	40	1	3 (No.1,2,3)
5	40	1	2 (No. 1,2)

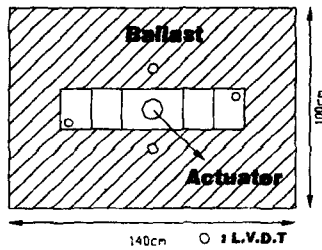
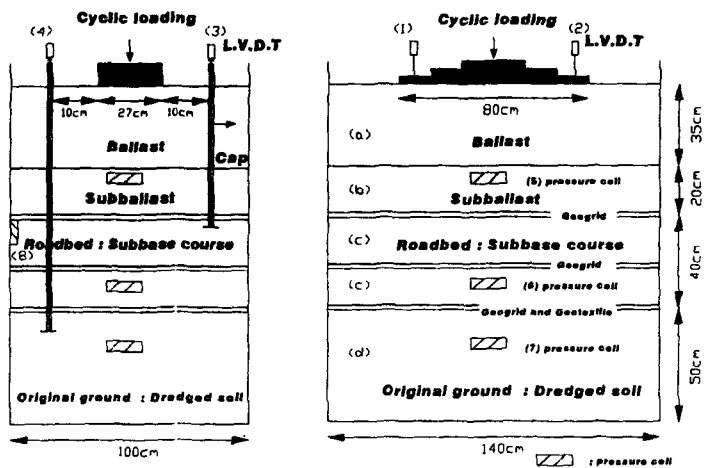


그림 3. 실험단면의 평면도



(b) 정면도

(b) 측면도

그림 4. 계측기 설치 및 실험지반 단면도

토조 및 모형 침목(재하관)은 그림 5에 나타난 바와 같다. 토조는 8mm 두께의 강철 재질로 만들어졌으며, 10mm 두께의 C형강으로 토조의 변형을 방지하였다. 모형토조의 크기는 2종류로 1.4m×1m×1.5m (폭×길이×높이)와 1.4m×1m×2.0m (폭×길이×높이)이다.

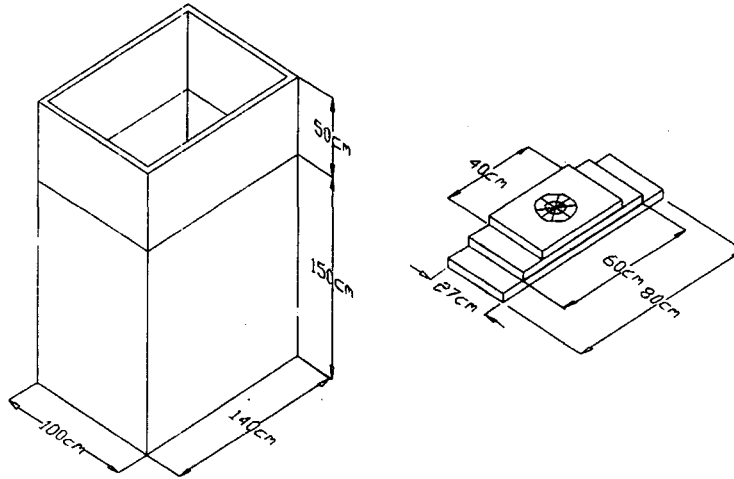


그림 5. 모형토조(좌)와 기초(우)의 모식도

4. 반복재하 실험 방법

고속철도에서 발생하는 동적하중 작용은 약 7Hz이나 점탄성을 보이는 지반 조건으로 인하여 실험실에서는 재하속도를 최대 3.5~4Hz로만 가할 수 있었다. 본 연구에서는 5개의 단계로 하중을 재하 하였으며, 최종적으로 3.5Hz의 속도로 12tonf(≈5.56kgf/cm²)의 하중을 가하였다. 그림 6은 각 단계별 하중 재하방법을 도시한 것이다.

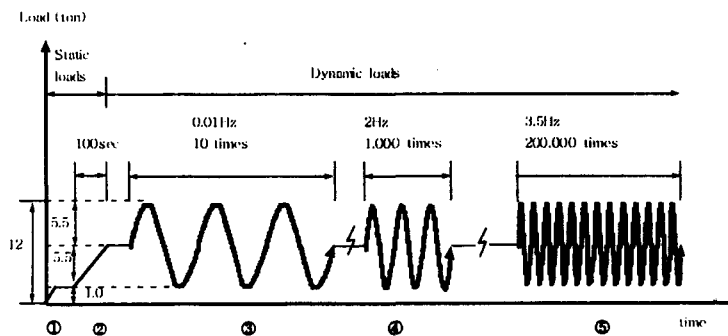


그림 6. 단계별 하중 재하방법

하중 재하순서는 각각의 시험 경우에 대하여 균일하고 안정된 다짐을 위하여 10회 정재하 후 (단계 ③), 2Hz의 재하속도로 1000회 재하하였다(단계④). 이는 각 시험결과와의 상대비교를 위하여 동일한 조건으로 만들기 위함이다. 위와 같은 과정을 통하여 동일한 다짐조건을 만족한 후 단계 ⑤에서는

최종적으로 3.5Hz의 속도로 200,000회의 하중을 재하 하였다. 재하방법은 아래 표 6과 같다.

표 6. 단계별 하중 재하방법

단계	재하형식	최대하중 크기(tonf)	재하 속도	재하 횟수
①	정하중	1.0	0.1 tonf/sec	1
②	정하중	$1.0 + 5.5 = 6.5$	55kgf/sec(0.01Hz)	1
③	정적 반복하중	$6.5 \pm 5.5 = 12.0$	0.01Hz	10
④	동하중	$6.5 \pm 5.5 = 12.0$	2Hz	1,000
⑤	동하중	$6.5 \pm 5.5 = 12.0$	3.5Hz	200,000

그림 7은 대형 만능시험기(UTM)를 이용한 동재하 시험 전·후의 모습을 나타내고 있으며 그림 8은 기초 및 층별 침하 장비를, 그림 9는 데이터 수집 장비를 나타내고 있다.



(b) 실험 전



(a) 실험 후

그림 7. 동재하 실험 모습

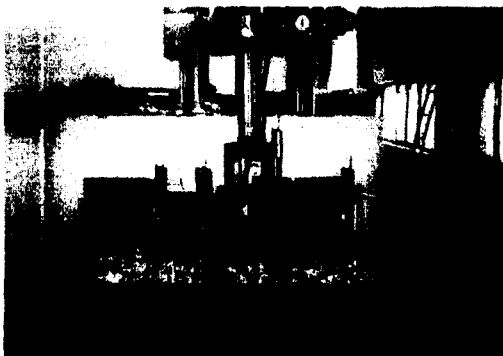


그림 8. 기초 및 층별 침하 계측



그림 9. 데이터 수집

시험장비 및 계측장비는 다음과 같다.

- (1) UTM (만능 시험기)의 허용하중 용량은 정적하중 500kN(약 50tonf), 동적하중 250kN(약 25tonf)이며 최대 반복하중 재하능력은 500Hz (500 cycles/sec)이다.
- (2) 데이터 수집기(Data logger)의 실제 최대 재하 속도는 3.5Hz이었으나, 동하중에 대한 각종 계측기로부터 완전한 데이터 수집을 위하여 초당 200회 또는 100회의 빈도로 측정하였다.
- (3) 토압계는 노상 및 노반의 상부 10cm 깊이에 직경 50cm의 토압계를, 그리고 지오그리드 보강 층 사이에는 직경 3cm의 토압계를 매설하였다. 토압계의 용량은 2kgf/cm²이다.
- (4) L.V.D.T의 최대용량은 100mm이며 감도는 1/1000mm이다.
- (5) 스트레인 게이지는 상재 반복하중에 의한 지오그리드의 변위 또는 거동을 측정하기 위하여 지오그리드 표면에 부착하였다. 사용한 스트레인 게이지의 유효측정 길이는 5mm이며 감도 0.2%이다.
- (6) 침하판은 단면의 층별 침하를 측정하기 위하여 ϕ 6mm의 알루미늄 봉을 연직으로 부착한 80mm(가로)×80mm(세로)×3mm(두께) 크기의 침하판을 사용하였다.

5. 반복재하 실험 결과

그림 10은 지오그리드로 보강된 단면과 무보강 단면의 노반두께가 40cm로 동일한 경우, 반복하중 200,000회 작용시의 무보강 단면에 대한 보강 단면의 노반 상부면의 침하비를 나타내고 있으며 그림 11은 무보강 단면의 노반두께가 80cm이고 보강 단면의 노반두께가 40cm인 경우의 침하비를 나타내고 있다. 여기서 X축(하중 재하 횟수)의 초기치는 초기 정적재하 및 2Hz 반복하중 1,000회 작용에 따른 무보강 단면에 대한 보강 단면의 누적 침하비를 나타내며, 그 이후는 하중재하 단계 ⑤(그림 6)의 반복하중 200,000회에 대한 침하비를 나타내었다. 일반적으로 초기의 정하중 및 동하중에 의하여 대부분의 침하가 발생하는 철도의 지반 구조에서는 하중 단계 ④(그림 6)까지의 안정화 단계를 거친 후의 동하중에 대한 침하 경향은 실제 철도 궤도 구조에 있어서 매우 중요하다. 그림에 도시되어 있는 것과 같이 지오그리드의 보강층수가 증가함에 따라 반복하중 200,000회 작용시의 무보강 단면에 대한 보강 단면의 침하비는 감소함을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10에 나타난 각 유형별 침하비를 검토해본 결과 노반두께가 40cm로 동일한 경우(그림 9)에는 지오그리드로 3층 보강한 경우의 침하비(T_4/T_1)가 0.5이하의 값을 나타내었다. 또한 무보강 단면의 노반두께가 80cm로 보강된 단면의 노반두께 보다 2배 더 큰 경우에도(그림 10) 지오그리드로 3층 보강한 경우의 침하비(T_4/T_2)가 대략 0.7이하의 값을 나타내었다. 모든 보강된 단면에서의 침하비가 1.0이하의 값을 나타내었다. 그림(9,10)에서 알 수 있듯이 지오그리드로 1층 보강한 경우의 침하비(T_3/T_1 , T_3/T_2)는 장기간의 시간이 흐르면 지오그리드로 2층, 3층 보강한 경우와 비교하여 침하비가 더 급격히 증가함을 나타내었다. 따라서 위의 실험결과로부터 알 수 있듯이 지오그리드로 철도 단면을 보강함으로써 하중에 대한 침하를 상당히 줄일 수 있다는 것이 입증되었다.

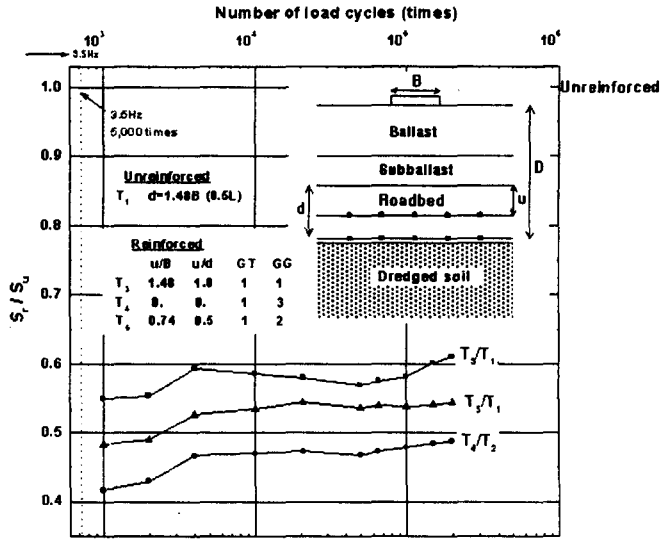


그림 10. 반복하중에 따른 침하비(노반두께 40cm)

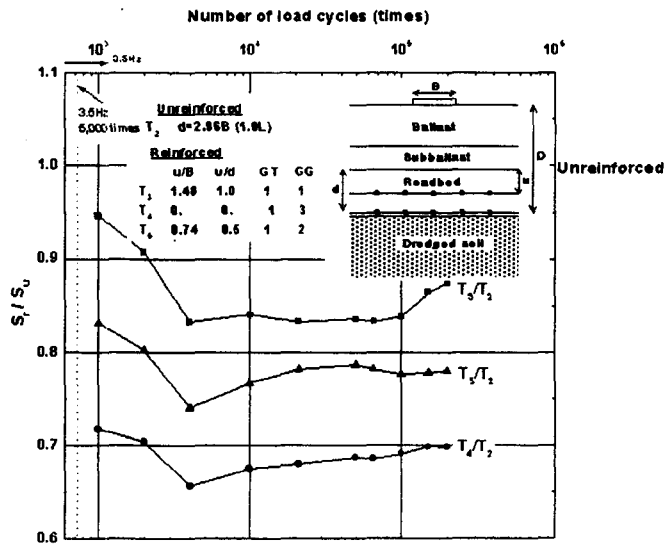


그림 11. 반복하중에 따른 침하비(노반두께 80cm)

6. 결론

본 연구에서는 지오그리드로 보강된 철도노반의 침하거동에 관하여 연구하였다.

- (1) 동적하중 재하에 있어서 지오그리드 포설층수가 증가함에 따라 무보강단면에 대한 보강단면의 침하비가 감소하며 장기간에 걸쳐 지오그리드로 1층 보강한 경우에는 2층, 3층으로 보강한 경우보다 침하비가 급속히 증가함을 예측할 수 있었다.
- (2) 반복하중 200,000회에 대한 노반 상부면의 침하비를 보면 노반두께(40cm)가 동일한 경우에는 지오그리드로 3층 보강한 경우의 침하비가 0.5이하의 값(50% 이상 침하량 감소)을 나타내었고 무보강 단면의 노반두께(80cm)가 보강단면의 노반두께(40cm)보다 2배 큰 경우에는 침하비가 대략 0.7이하의 값(30% 이상 침하량 감소)을 나타내었다.

이상의 연구 결과로부터 지오그리드로 철도노반을 보강하였을때 노반 상부층의 침하를 감소시킴으로 양질의 노반 단면을 줄여 경제적인 설계가 가능한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 G7과제(1998.11~1999.10)의 일환인 「고속철도 궤도 및 노반개발」 과제중 「지오그리드를 활용한 철도노반 보강기술개발」에 관한 연구를 바탕으로 수행하였다. 도움을 주신 인천국제공항공단의 이규진 과장, 한국철도기술 연구원의 황선근 박사, 이일화 연구원을 비롯한 많은 분들께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Das, B.M.(1999), *Shallow Foundations ; Bearing Capacity and Settlement*, CRC Press LLC, pp287~321
- (2) Shin, E.C.(1994), *Shallow Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Clay Under Static and Cyclic Loading*, Ph. D. Thesis, Southern Illinois University at Carbondale, Illinois, USA
- (3) Bathurst, R.J., and Raymond, G.P.(1987), "Geogrid Reinforcement of Ballast Track" *Transportation Research Record* 1153
- (4) Nicola, M.(1997), "Behavior of Geogrids Under Cyclic Loads", *Geosynthetics '97*
- (5) Nicola, M.(1996), "Short and Long Term Behavior of Geogrids Under Static and Cyclic Load", Balkema. ISBN
- (6) Webster, S.L.(1993), "Geogrid Reinforced Base Courses for Flexible Pavements for Light Aircraft : Test Section Construction, Behavior Under Traffic, Laboratory Tests, and Design Criteria", *Final Report of U.S Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station*
- (7) Göbel, C.H., Weisemann, U.C. and Kirschner, R.A.(1994), "Effectiveness of Reinforcing Geogrid in a Railway Subbase under Dynamic Loads", *Geotextiles and Geomembranes* 13, pp.91-99.
- (8) Milligan, G.W.E. and Love, J.P.(1984), "Model Testing of Geogrids under An Aggregate Layer on Soft Ground."
- (9) Holtz, R.D., Christopher, B.R. and Berg, R.R.(1995). "Geosynthetic Design & Construction Guidelines : Participant Notebook, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute Course No. 13213, Publication No. FHWA-HI-95-xxx, pp.36-42.