

지오그리드를 활용한 철도노반의 보강효과 및
설계기법 개발에 관한 연구
A Study on Reinforcement Effectiveness and
Development of Design Method for
Railway Roadbed by Geogrid

심재범* 신민호** 신은철*** 채영수****
Shim, Jae-bum Shin, Min-Ho Shin, Eun-Chul Chae, Young-Su

ABSTRACT

Since 1970's in Germany and U.S.A., the studies on increasing the bearing capacity of railway roadbed using geogrid have been conducted for the repair, reinforcement, and extension of railways constructed on soft soils.

In this study, the railway roadbed system reinforced with geogrids has been analyzed and investigated using finite element method and results of the previous studies were conducted in Korea and other nations. And the method for estimating the railway roadbed thickness was developed based on the equivalent method using the multi-layer theory and the deformation modulus E_v .

1. 서 론

연약지반상에 구축된 기존 철도의 보수·보강 및 확장시 지오그리드(geogrid)을 활용하여 철도노반의 지지력을 높이는 보강기법들에 대한 연구가 1970년대 이래 독일을 비롯한 철도 선진국에서 활발히 진행되고 있다. 연구의 배경은 다분히 경험에 의존하여 설계·시공된 1900년대 초에 건설된 선로에서 열차속도의 향상에 따른 용량상의 한계로 인해 철도노반 지지구조에 문제점이 노출되어 이에 대한 보수·보강 및 확장이 불가피하다는 것이었다. 이와 같은 연구결과 현재 독일 등에서는 기존 철도의 보수·보강 및 확장시 사용된 지오그리드 시스템은 다층으로 구축된 철도노반의 지지력을 증가시키고, 이로 인해 필요한 노반의 두께를 줄일 수 있는 새로운 공법을 개발하여 실용화 하고 있다(Geobel et al. 1993).

* 한국철도대학 교수, 정회원
** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
*** 인천대학교 교수, 정회원
**** 수원대학교 교수

일반적으로 철도노반의 두께를 산정하는 설계기법으로는 지반반력계수 (K_{30})에 의한 방법과 변형계수(E_v)를 이용하여 다층이론(multi-layered theory)에 근거를 둔 등가방법(equivalent method)에 의해 구하는 방법이다. 그러나 지반반력계수(K_{30})에 의한 철도노반층의 두께 산정은 재하하중 작용시 흙/토목섬유 사이의 상호작용에 따라 일정한 안정화 국면 후에 지지력 개선효과가 나타나는 지오그리드를 적용한 철도노반과 같은 복합지반의 경우에는 상당히 비합리적인 방법이다. 또한, 노반의 파괴는 초기하중에 의해서라기 보다는 반복하중에 의해 야기되어지며, 이 경우 중요한 것은 하중작용 횟수이다. 따라서, 이와 같은 점들을 고려할 때 지오그리드를 활용한 철도노반에서는 변형계수(E_{v2})에 의한 노반두께 산정방법이 보다 합리적이라 사료된다(mais & Maier, 1968).

본 연구에서는 기존 선로의 보수·보강 및 확장시 많이 사용되고 있는 지오그리드로 보강된 지반에 대해 평판재하시험 및 유한요소해석(FEM)을 실시한 후 이들 결과를 토대로 지반의 변형계수(E_v)를 사용하여 우리나라에 적합하게 철도노반의 두께를 산정할 수 있는 다층이론에 근거를 둔 등가방법에 의한 설계방법을 제시하고자 하였다.

본 연구에 사용한 변형계수값(E_v)은 한국철도기술연구원의 주관하에 고속전철 기술개발사업(G7과제)의 일환으로 지오그리드 시스템을 이용한 철도노반의 보강기법에 대한 연구과제들(신은철 등, 1999)의 수행시 행한 평판재하시험 및 기타 국내의 시험 결과들을 근거로 하여 산출하였다.

2. 철도노반계로서 지오그리드 시스템의 적합성 평가

2.1 기본원리

열차하중의 작용하에서의 철도 선로는 변형되며 이 경우 탄성변형뿐만 아니라 소성변형도 나타나게 된다. 탄성변형은 지반침하라 표시되어 지며, 이것은 열차하중에 의해 야기되어 지고 열차하중이 더 이상 작용하지 않으면 원상태로 돌아간다. 소성변형 또는 잔존변형은 반면에 침하로 나타내어 지며, 침하는 대체적으로 도상, 보조도상 및 노반건설에 사용된 재료의 추가적인 다짐의 결과로 나타난다.

일반적으로 지지력의 평가에 결정적인 영향을 미치는 것은 선로에 불균등 침하를 야기시키는 탄성적인 침하이다. 탄성적인 침하에 따라 상부구조 특히 레일은 응력을 받게 되고, 작용하는 응력은 레일의 허용응력을 초과하여서는 안된다. 이에 따라 탄성적인 침하는 제한되어 지며, 철도노반에서는 이러한 탄성적인 침하를 제한하는데 필요한 최소지지력이 요구된다. 불량한 기초지반의 경우에 최소의 지지력 유지는 원지반과 도상층 사이에 하나의 노반층의 설치를 통해 이룰 수 있다. 노반층의 필요한 두께 h 는 지지력의 평가에 의해 산정되며, 노반층의 설치에 따른 재하하중의 분산으로 인해 원지반면의 응력은 허용응력의 범위내에 들게 된다.

Fig 2.1에서 보는 바와 같이 지오그리드로 보강된 철도노반에서 지지력을 평가하기 위해서 즉, 필요한 노반두께를 산정하기 위해서는 2개의 서로 다른 변형계수(E_v)를 알아야 한다. 필요한 2개의 변형계수는 아래와 같이 정의된다(Geobel et al. 1996).

- 변형계수 E_U : 원지반면의 지지력
- 변형계수 E_O : 시공기면 위에서 요구되어 지는 최소지지력

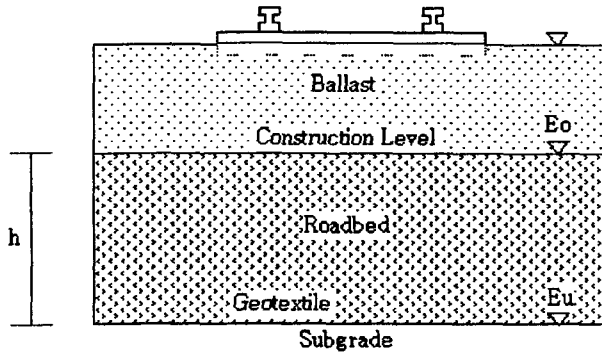


Fig. 2.1 basic Concept

철도선로의 보강된 노반층의 두께를 산정하기 위한 이론적인 방정식은 아직까지 명확히 규명되어 있지 않다. 현 상태에서는 다만 시험선로에서의 측정치들에 대한 평가, 보강된 노반층을 이용한 대규모의 실내시험과 실제적인 경험들에 의해 등가인자(等價因子)들이 개발되었으며, 이 등가인자들을 근거로 보강되지 않은 노반층에 비해 보강된 노반층의 감소된 두께를 다층이론에 따른 변형계수(E_v)에 의해 계산할 수 있게 되었다.

2.2 현장시험 및 방법

본 연구에서는 지오그리드로 보강된 철도노반에 대한 외국의 관련 연구결과들을 토대로, 신우철 등(1999)이 연약지반 위에서 지오그리드로 보강된 지반에 대해 수행한 평판재하시험 결과들을 이용하여 지오그리드의 지지력 개선효과를 평가하고자 하였다.

시험부지는 영종도 인천국제공항 현장에서 실시하였으며, 보강조건에 따른 지지력의 개선 효과를 알아보기 위해 Fig 2.2 및 Table 2.1에서 보듯이 5개의 시험단면에서 각 시험별로 원지반 조건, 흙쌓기 재료 및 지오그리드의 포설층수를 변화시키며 총 21개의 평판재하시험을 실시하였다.

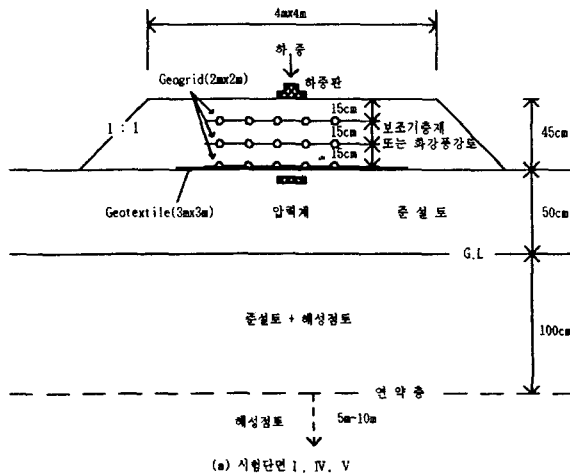


Fig. 2.2 Schematic of Field Test at each Test Series (Geogrid)

Table 2.1 Test Condition of Each Test Series (Geogrid)

시험 단면	시험 번호	성 토 재 료	보 강 조 건		시험단면 구성조건 (cm)	계 측 기 설 치		
			GT	GG		토압계	스트레인 게이지	
I	1	화 강 풍화토	-	-	D.S 50+W.S 45			
	2		-	-	D.S 50+W.S 90	○		
	3		1	1	D.S 50+W.S 45	○		
	4		1	2	D.S 50+W.S 45			
	5		1	3	D.S 50+W.S 45	○		
II	6	준설토	-	-	D.S 50			
III	7	양입도	-	-	SB 45	○		
	8	보 조	1	1	SB 45	○		
	9		1	2	SB 45	○		
	10	기층재	1	3	SB 45	○		
IV	11	빈입도	-	-	D.S 50+SB 45			
	12		1	-	D.S 50+SB 45			
	13		1	1	D.S 50+SB 45	○	○	
	14		보 조	1	2	D.S 50+SB 45	○	○
	15		기층재	1	3	D.S 50+SB 45	○	○
	16			1	4	D.S 50+SB 45	○	○
	17			1	3(1m×1m)	D.S 50+SB 45		
V	18	양입도	-	-	D.S 50+SB 45			
	19	보 조	-	1(바닥면)	D.S 50+SB 45			
	20		1	1(바닥면)	D.S 50+SB 45			
	21		기층재	1	1(중간층)	D.S 50+SB 45		

주 : 1) GT : 지오텍스타일, GG : 지오그리드

2) DS : 준설토, WS : 화강풍화토, SB : 보조기층재, GL : 원지반면

2.3 시험결과

Table 2.2에서는 시험단면 I-V에서 수행한 평판재하시험의 재하-재하에 의한 하중강도-침하량 관계곡선으로부터구한 각 시험번호별 지반반력계수(K_{30}) 및 변형계수(E_v)의 값들을 보여준다. 변형계수(E_v)의 값은 독일 DIN 규정에 따라 구하였으며, E_{v1} 및 E_{v2} 는 첫 번째 재하 및 하중 제거 후 2차 재하하중 때의 변형계수이다.

시험단면별 및 시험번호별로 시험조건들이 서로 다르다. 따라서, 이들 시험들의 지지력 개선 정도를 평가하기 위해 보강되지 않은 각 시험번호별 변형계수(E_{v2})의 값과 보강조건을 달리한 시험번호들이 변형계수(E_{v2}) 사이의 증가비율을 구하여 지지력의 개선정도를 비교·검토하였다. 이 경우 보강되지 않은 시험번호 변형계수 값(E_{v2})을 100%로 하였으며, Fig 2.3에서는 각 시험번호의 지지력(E_{v2})의 증가율을 보여준다.

Table 2.2 및 Fig 2.3에서 보듯이 화강풍화토를 흙쌓기재로 사용한 시험단면 I에서는 보강하지 않은 시험번호 1과 지오텍스타일 1층 및 지오그리드 2층을 보강한 시험번호 4에서 큰 지지력 증가율을 나타내었다. 양입도 보조기층재 및 빈입도 보조기층재를 흙쌓기재로 사용한 시험단면 III 및 IV에서는 지오텍스타일 1층 및 지오그리드 1층씩을 사용한 시험번호 8 및 시험번호 13에서 지지력 증가율이 가장 크게 나타났다.

Table 2.2 Estimation of Modulus of Subgrade Reaction(K_{30}) and Deformation Modulus(E_{v2}) at each Test (Geogrid)

시험 단면	시험 번호	흙쌓기 재료	보 강 조 건		K_{30} (kg/cm ²)	E_{v1} (kg/cm ²)	E_{v2} (kg/cm ²)	지지력 증가율 E_{v2} (%)
			GT	GG				
I	1	화강풍화토	-	-	12	103.8	207.6	0
	2		-	-	15	470.5	646.9	211.6
	3		1	1	15.4	120.4	398.1	91.8
	4		1	2	13.7	225.0	470.5	126.6
	5		1	3	14.8	246.4	470.5	126.6
II	6	준 설 토	-	-	6.0	73.5	882.4	
III	7	양 입 도 보조기층재	-	-	17.4	250	409.1	0
	8		1	1	27.5	436.9	833.3	103.7
	9		1	2	24.8	436.9	692.3	69.2
	10		1	3	19.6	394.7	555.6	35.8
IV	11	빈 입 도 보조기층재	-	-	9.2	236.8	267.9	0
	12		1	-	15.9	300.0	937.5	249.9
	13		1	1	21.5	424.5	1323.5	394.0
	14		1	2	16.3	445.5	671.6	150.7
	15		1	3	20.9	312.5	714.3	166.6
	16		1	4	9.0	405.4	346.2	29.2
	17		1	3(1m×1m)	9.0	312.5	300.0	12.0
V	18	양 입 도	-	-	10.3	263.2	401.8	0
	19	보조기층재 (포설위치)	-	1(바닥면)	30	918.4	1022.7	154.5
	20		1	1(바닥면)	24.8	511.4	1022.7	154.5
	21		1	1(중간층)	14.7	288.5	918.4	128.6

주 : 1) GT : Geotextile 2) GG : Geogrid

또한, 지오텍스타일 및 지오그리드의 포설위치를 조사하기 위한 시험단면 V에서는 지오텍스타일 1층 및 지오그리드 1층을 원지반면 위에 포설한 시험번호 19 및 시험번호 20에서 가장 큰 지지력 증가율을 보여준다.

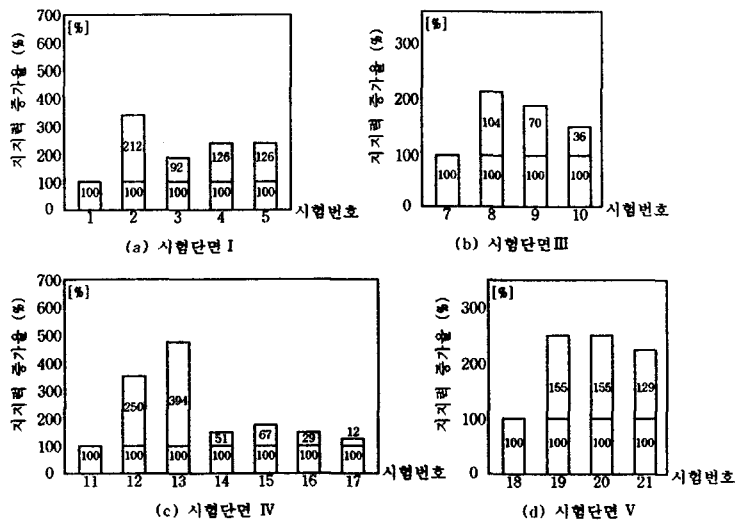


Fig. 2.3 Increasing Rate of Bearing Capacity(E_{v2}) in Non-Reinforced Ground to in reinforced Grond (Ggeogrid)

3. 지오그리드를 이용한 철도노반의 설계기법 개발

3.1 열차하중 및 노반층 상부면에 작용하는 응력의 계산

열차하중을 산정하기 위해서는 경부선 기존 선로의 직선구간을 표준열차 하중이 LS-22인 열차가 150Km/h의 속도로 주행하는 조건을 표준으로 하였다. 또한 노반층 상부면에 작용하는 응력계산을 위해서는 2개의 열차 축하중이 일정한 간격을 갖는 3개의 침묵에 의해 지지되어지는 선로단면에 재하되어 진다고 고려하였다.

따라서, 본 연구에서는 침묵당 간격이 약 59cm(침묵중심간격)인 연속식 PC침묵을 기준으로 사용하였다. 이와 같은 방법으로 계산한 도상층의 하부면에 작용하는 전체응력은 $1.3\text{kg/cm}^2(130\text{MN/m}^2)$ 에 달하였다.

3.2 지오그리드로 보강된 철도노반의 설계기법 개발

Thamm(1999)은 지오그리드 시스템으로 보강된 철도노반에서 열차의 속도가 160Km/h 이 하인 경우 상부노반면의 변형계수 $E_o(E_{v2})=500\text{kg/cm}^2(50\text{MN/m}^2)$ 및 원지반의 변형계수 E_u 를 사용하여 다층이론에 의해 필요한 노반층의 두께를 산정할 수 있는 설계기법을 제안하였다. 이 경우 원지반의 변형계수 E_u 의 값은 $100\text{kg/cm}^2(10\text{MN/m}^2) \leq E_u \leq 300\text{kg/cm}^2(30\text{MN/m}^2)$ 이어야한다.

따라서, 본 연구에서는 현재 기존선 흙쌓기 구간의 대표단면의 조건과 일치하는 화강풍화토를 흙쌓기재로 사용하고 지오그리드로 보강된 Fig 2.2의 시험단면 I을 선정하고, 변형계수 (E_v)를 사용하여 다층이론에 의해 지오그리드로 보강된 철도노반의 필요한 두께를 산정하는 도표를 제안하였다.

Fig 3.1에서 제시된 산정도표는 화강풍화토를 흙쌓기재로 사용한 기존선 흙쌓기 구간의 대표단면의 필요한 노반 두께의 산정을 위해 개발하였다. 또한 Fig 3.2의 산정도표는 앞으로 기존선로의 철도노반 건설시 보조기층재를 흙쌓기재로 사용하게 될 것을 고려하여 제안하였다.

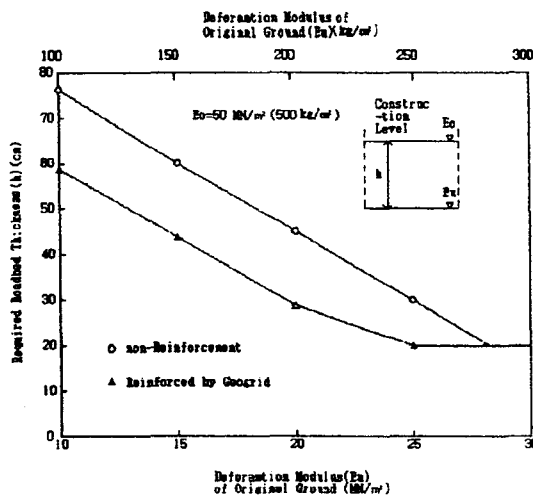


Fig. 3. 1 Estimation of Required Roadbed Thickness(h) Reinforced by Geogrid (Granite Soil Embankment)

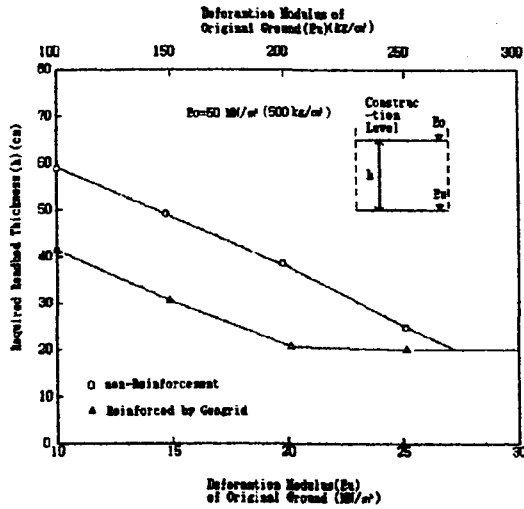


Fig. 4. 2 Estimation of Required Roadbed Thickness(h) Reinforced by Geogrid (Well Graded Subbase Embankment)

4. 결 론

본 연구에서는 국내외에서 기 수행된 현장 평판재하시험 결과를 토대로 지오그리드로 보강된 철도노반의 지지력 개선정도를 평가하였다. 또한 유한요소해석(FEM)을 실시하여 지오그리드로 보강된 철도노반의 침하특성과 지지력 개선효과 및 노반재의 강성도에 따른 보강재의 보강효과를 파악하였다.

이와 같은 시험 및 연구결과들을 바탕으로, 연약지반 위에 구축된 기존 철도선로의 보수·보강 및 확장 시 지반의 변형계수(E_{v2})를 사용하여 지오그리드로 보강된 노반의 두께를 산정할 수 있는 다층이론에 근거를 둔 보다 합리적인 설계방법을 제시하였다.

그러나 본 연구에서 개발된 산정도표가 실무에서 사용되어지기 위해서는 기존 선로에서 지오그리드를 포설한 시험단면을 설치하고 장기간에 걸쳐 계측된 자료가 추가적으로 본 산정도표에 반영되어야 한다.

따라서, 우리나라에서는 현재 전 세계적으로 경제성, 시공성 및 환경친화적인 면에서 많은 장점을 갖고 있는 지오그리드가 철도노반의 보강재로서 굳건히 자리잡기 위해서는 기존 선로에서 지오그리드를 설치한 시험단면을 구축하고 장기간에 걸쳐 현장 계측을 실시하는 등이 분야에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.

참고 문헌

1. 심재범(2000), "토목섬유 시스템을 활용한 철도 노반의 보강 효과 및 설계기법 개발에 관한 연구", 박사학위 논문
2. Geobel, C., Weisemann, U., Liebenenz, K.(1993), "Dauerbelastungsversuche mit Kunststoffbewehrten Tragschichten im Eisenbahnban", 3 Informations und Vortragsveranstaltung ueber Kunststoffe in der Geotechnik, Muenchen

3. Mais, R., Maier, H.(1968), "Ein Beitrag zur Ermittlung des Beanspruchung standarisierter Fahrbahnbefestigungen mit Hilfe der Mehrschichtentheorie", Ph D. Dissertation, Technische Universitaet Muenchen
4. 신은철, 심재범, 김두환(1999), "지오그리드 시스템(geogrid system)을 활용한 노반의 보강 기법", 고속전철 궤도 및 노반 개발, 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, PP. 427~492
5. Geobel, C., Lieberenz, K., Richter, F.(1996), "Der Eisenbahnunterbau", DB. Fachbuch Band 8/20
6. "철도 노반 설계기준(2001)", 건설교통부, 철도청, 현재 준비중
7. DB Netz(1999), "Erdbauwerke planen, bauen und Instandhalten", rili 836
8. "국유철도건설규칙(2000)", 철도청
9. ABAQUS User's Manual Version 5.7
10. Thamm(1997), "Tragschichten von Eisenbahnstrecken", Empfehlungen fuer Bewehrungen aus Geokunststoffe, Deutsche Geosellschaft fuer Geotechnik, Ernst&Sohn, PP. 23~29