

지오그리드로 보강한 고속철도 노반의 동적 거동

The behavior of high-speed rail roadbed reinforced by geogrid under cyclic loading

신은철 *
Shin, Eun Chul

김두환 **
Kim, Du Hwan

김종인 **
Kim, Jong-In

ABSTRACT

The general concept of reinforced roadbed in the high-speed railway is to cope with the soft ground for the bearing capacity and settlement of foundation soil. The cyclic plate load tests were performed to determine the behavior of reinforced ground with multiple layers of geogrid underlying by soft soil. Five series of test were conducted with varying the soil profile conditions including the ground level, type of soil, and the thickness of each soil layer. Based on these plate load tests, laboratory model tests under cyclic loading were conducted to know the effect of geogrid reinforcement in particular for the high-speed rail roadbed. The permanent settlement and the behavior of earth pressure in reinforced roadbed subjected to a combination of static and dynamic loading are presented.

1. 서 론

도로, 철도 등 대규모 건설사업에 있어서 연약지반의 처리문제 및 적절한 대책의 강구는 주행의 안전성, 경제성 측면에서 매우 중요한 문제이다. 특히 고도의 정밀도를 통하여 최고의 주행성을 유지해야 하는 고속철도의 경우 전통적인 철도선로 구조로는 한계가 있으며 따라서, 일본을 비롯한 선진외국에서는 1970년대 중반 이후 대부분의 철도선로의 노반층을 보강한 강화노반의 형태로 시공을 하고 있다. 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 특히 대규모 공사에서의 사용이 증가하고 있는 추세이다.

토목섬유를 철도에 적용하려는 시도는 Barhurst & Raymond(1987)와 Webster(1993) 등이 현장시험을 통하여 입증한바 있다. 그러나 지금까지의 자료는 주로 도상 자갈층과 노반의 경계면에 대한 보강효과 조사가 대부분이었으며, 강화노반의 개념을 적용하는 고속철도와는 차이점이 있다. 특히 보조도상층과 강화노반층의 적용을 기본으로 하는 국내 고속철도 구조에서의 반복하중에 의한 장기 안정성 문제에 대한 연구는 미미하였다. 본 연구에서는 연약지반 위의 성토단면에 대하여 지오그리드 보강 조건을 변화시키며 평판재하시험을 실시하므로써 정하중에 대한 보강효과를 조사한 후 대형 실내지력 시험을 통하여 실제 철도단면 구조에 대한 지오그리드 보강시 동적하중하에서의 보강 효과 및 지반의 거동특성을 조사하였다.

* 인천대학교 공과대학 토목공학과 교수, 정회원

** 인천대학교 대학원 석사과정

2. 시험 조건

현장 평판시험을 통한 정재하 시험 및 실내 동하중 재하 시험에 사용한 시료의 공학적 특성은 표 1과 나타내었다. 성토재는 보조기층재, 화강풍화토, 준설토를 사용하였으며, 그림 1에서는 각종 성토재와 원지반의 해성점토의 입도분포를 나타낸다. 그림 1의 빗금친 부분은 시방성에서 규정한 보조기층재의 입도분포를 나타낸다.

표 1. 성토재료의 공학적 특성

특 성	성토재료	보조기층재		화강 풍화토	준설토
		빈입도 (단면Ⅳ)	양입도 (단면Ⅲ,Ⅴ)		
비중(G_s)	-	-	-	2.65	2.64
균등계수(C_u)	9.56	6.5	5	2.0	2.0
곡률계수(C_c)	1.46	1.35	1.35	0.84	0.84
흙의 분류	GP	GP(\approx GW)	SP	SP	SP
No.200체 통과량(%)	0.22	0.9	4.81	9.0	9.0
다 짐 특 성	최대건조밀도 $\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	2.23	2.16	2.06	1.58
	최적함수비, $W_{opt}(\%)$	8.15	9.14	10.6	8.6
	시험기준 (ASTM)	D다짐	D다짐	A다짐	A다짐

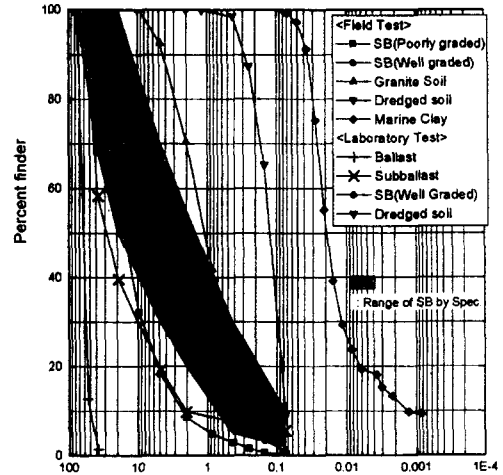


그림 1. 시료의 입도분포곡선

철도노반 시공시 분니 현상을 방지하기 위하여 지오텍스타일을 노상토층 상부에 포설하고 지오그리드 보강재를 성토체 중간에 포설하였다. 이 연구에 사용된 지오텍스타일은 폴리에스테르로 축조된 부직포 형태이며, 지오그리드는 폴리프로필렌으로 만든 격자형 강성그리드를 사용하였다. 표 2는 현장 및 실내 시험에 사용한 토목섬유의 특성을 나타낸다.

표 2. 시험용 토목섬유의 재료 특성

항 목	시료 종류	지오그리드	지오텍스타일
재 질		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}

3. 현장 평판재하시험

지오그리드의 최적 포설 위치 및 포설폭, 보강에 따른 토압의 변화등을 조사하기 위하여 총 21회에 걸친 평판재하시험을 소정의 연약지반 위에서 성토재료, 단면조성 및 보강재의 포설 등의 조건을 변화시키며 실시하였다. 현장시험을 통하여 보강재에 의한 지지력 증가 효과와 탄성계수, 전단탄성계수의 변화 등에 미치는 인자들에 대하여 조사하였다.

3.1 현장 조건

시험 부지는 영종도 인천국제공항 현장으로 해성퇴적토층이 5~10m 정도인 지반 위에 약 1m 두께로 준설매립한 상태에서 지하수위는 지표면과 거의 일치하였다. 이 지반을 원지반(연약지반)으로 정하여 각각 준설토, 화강풍화토, 보조기층재 등으로 성토하여 그림 2와 같이 단면을 조성하였다. 준설매립토층은 전반적으로 세립의 모래(SM)로 구성되어 있으며, 표준관입 시험 결과 N치는 3~5 정도로 나타났다. 해성퇴적토층은 연약한 점토질 실트(ML)로 구성되어 있으며, 상부 약 3~5m 정도는 N치가 2~4로 연약한 상태이다.

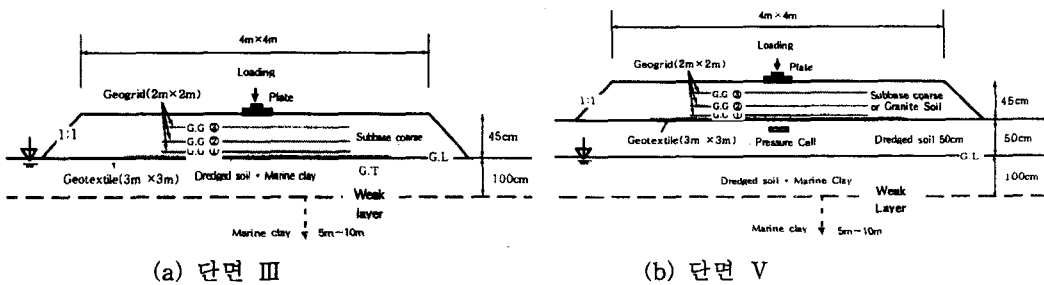


그림 2. 시험 단면의 개략도(현장 평판시험)

3.2 시험 방법

평판재하 시험은 직경이 30cm인 재하판을 사용하였으며, 유압잭을 일부 수정 제작하여 반복하중(Loading-Unloading)을 재하할 수 있도록 하였다. 수직변위는 1/100mm 감도의 다이얼게이지를 2개를 사용하였으며, 그림 2와 같이 토압계를 매설하여 측정하였다.

하중은 재하-제하(Loading-Unloading)방식으로 가하였다. 이에 따라 Barkan(1962)이 제시한 식(1)과 식(2)에 따라 보강에 따른 지반탄성계수(subgrade modulus)와 전단탄성계수(shear modulus)의 변화를 얻을 수 있었다.

$$C_s = \frac{q}{S_e} = 1.13 \frac{E}{1-\mu^2} \frac{1}{\sqrt{A}} = 2.26 G \frac{(1+\mu)}{1-\mu^2} \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

$$G = \frac{(1-\mu) C_s \sqrt{A}}{2.26} \quad (2)$$

여기서, C_s = 지반탄성계수(subgrade modulus)

3.3 시험결과 요약

그림 3은 대표적인 시험 결과를 나타낸다. 단면조건과 관계 없이 모두 지오그리드에 의한 보강효과를 볼 수 있으나, 그림 3(a)에서와 같이 상대적으로 단면의 두께가 작고 지반이 연약한 경우에는 보강재의 포설 갯수와 지지력이 정비례하지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 3(b)로부터 지오그리드의

최적 포설 심도는 연약지반과 상부 양질의 성토재의 경계면으로 나타났다. 지오그리드의 보강 조건에 따라 BCR이 최대 1.8~2.0까지 나타났다. 지반탄성계수는 무보강에 비하여 최대 약 1.5배의 증가를 보였다.

결과적으로 지오그리드에 의한 BCR과 전단 탄성계수, 지반반력계수 등은 모두 성토재의 입도와 다짐도에 지배받으며, 지오그리드에 의한 보강효과도 이러한 다짐관리에 따라 더 큰 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

그림 3(a)에서 보강재 포설층수에 따라 지지력이 오히려 감소되는 것은 복토재의 두께가 충분치 않아 상부하중에 대하여 지반이 얇은 파괴를 일으킴으로써 발생한다고 할 수 있다. 실제 고속철도 지반 구성은 노반외에 보조도상층과 도상층이 존재하며 따라서, 충분한 복토 두께에 의하여 그 거동이 다를 것으로 예상할 수 있으며, 이와 같은 현장 시험 결과를 바탕으로 다음과 같이 UTM을 사용한 동적하중 재하시험을 실시하였다.

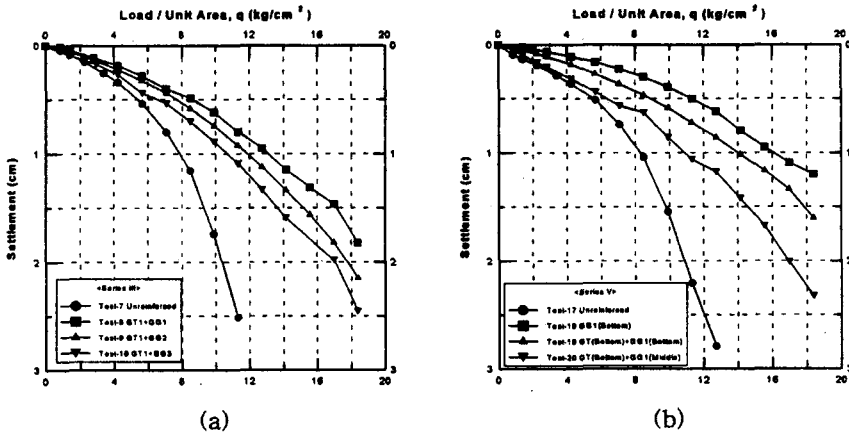


그림 3. 하중-침하 곡선(평판재하시험)

4. 실내 동적하중 재하시험

현장 평판 재하시험 결과를 바탕으로 지오그리드에 의한 고속철도 노반의 보강효과를 조사하기 위하여 동적하중 재하시험을 5회에 걸쳐 실시하였다. 시험 단면은 표 3과 같이 4개 종류의 단면재료로 사용하여 보강조건을 변화시켜 가며 실시하였다(표 4). 그림 4는 시험 단면의 개략도를 나타낸다. 토조의 크기는 1m×1.4m×2.0m이며, 기초는 한쪽 레일에 대한 철도 침목 유효면적을 고려하여 27cm×80cm 크기로 강철재질로 만들어 사용하였다. 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 조성하였으며 노반의 두께 및 보강 조건을 변화시키며 지오그리드의 보강 효과를 조사하였다(그림 5, 표4). 사용한 보강재 및 성토재는 현장평판시험에 사용한 재료와 동일하며(표 1~2) 입도분포는 그림 1과 같다. 도상자갈의 압축강도는 2240kg/cm², 마모율(LAA)은 12.31%로 나타났다.

<표 3> 층별 지반구성 조건

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

<표 4> 시험별 단면 조건

시험번호	노반두께 (cm)	보강재 포설	
		G.T	G.G
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)

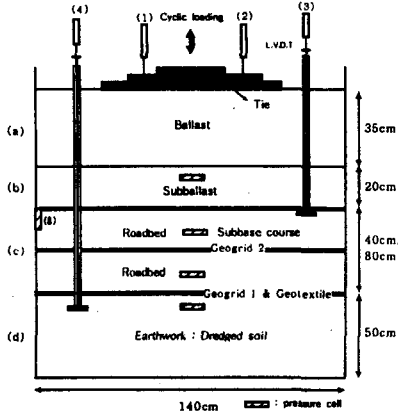


그림 4. 시험 단면(측면도)

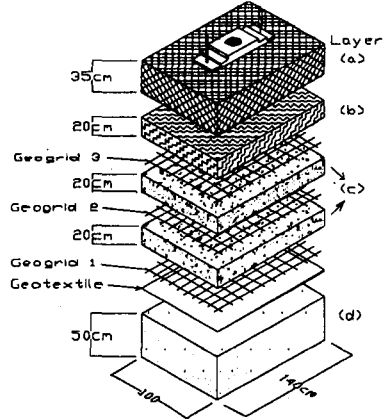


그림 5. 단면의 층별 상세도

4.2 시험 방법

고속철도에서 요구하는 동적하중 작용은 약 7Hz이나 점탄성을 보이는 지반 조건으로 인하여 실험실에서는 재하속도를 최대 3.5~4Hz로만 가할 수 있었다. 본 연구에서는 5개의 단계로 하중을 재하하였으며, 최종적으로 3.5Hz의 속도로 12tonf(≈5.56kgf/cm²)의 하중을 가하였다. 그림 6은 각 단계별 하중 재하방법을 도시한 것이다. 단계 ①에서는 상부 도상층의 안정화를 위하여 0.1tonf/sec의 속도로 1tonf을, 단계 ②에서는 100초동안(55kgf/sec) 추가적으로 5.5tonf의 하중을 가하였다. 단계 ③에서는 동하중에 대한 지반의 안정적 하중작용을 위하여 0.01Hz의 속도로 10회에 걸쳐 하중을 작용시켰다. 단계 ④에서는 2Hz로 1000회, 단계 ⑤에서는 최종적으로 3.5Hz의 속도로 200,000회의 하중을 재하하였다. 재하방법은 표 5에서 다시 요약하였다.

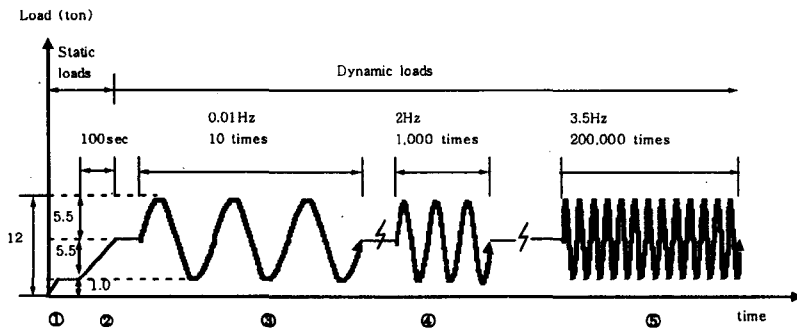


그림 6. 단계별 하중 재하방법

<표 5> 단계별 하중 재하방법

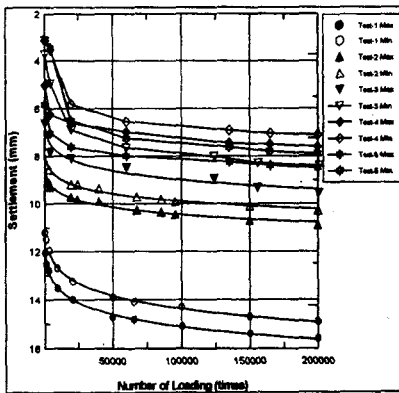
단계	재하형식	최대하중 크기(tonf)	재하 속도	재하 횟수
①	정하중	1.0	0.1 tonf/sec	1
②	정하중	1.0 + 5.5 = 6.5	55kgf/sec(0.01Hz)	1
③	정적 반복하중	6.5 ± 5.5 = 12.0	0.01Hz	10
④	동하중	6.5 ± 5.5 = 12.0	2Hz	1,000
⑤	동하중	6.5 ± 5.5 = 12.0	3.5Hz	200,000

시험장비 및 계측 사항은 다음과 같다.

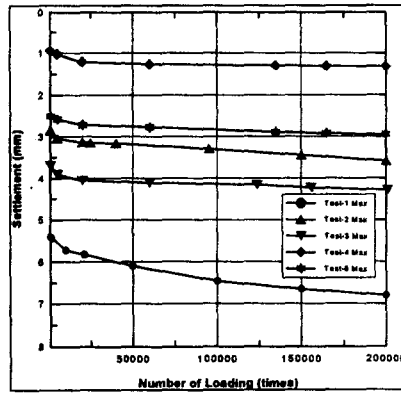
- (1) UTM : 최대재하 능력 - 500kN(정하중), 250kN(동하중)
- (2) 데이터 수집 : 동적 데이터 로거(200times/sec)
- (3) 토압계 : 용량 2kg/cm²
- (4) 변위계 : 용량 100mm, 감도 1/100mm
- (5) 스트레인 게이지 : 용량 5mm, 감도 0.2%

5. 시험 결과

그림 7는 반복하중 200,000회에 대한 노반 상부면의 침하를 나타낸다. 여기서 X축(하중 재하 횟수)의 초기치는 초기 정적재하 및 2Hz 반복하중 1,000회 작용에 따른 누적 침하를 나타내며, 그 후 하중재하 단계 ⑤(그림 6)의 동재하 200,000회에 대한 침하를 나타내었다. 여기서 각각의 그래프는 시험 단면별로 동재하에 의한 최대침하 및 탄성회복에 의한 최소 침하를 재하 횟수에 따라 나타내었다. 일반적으로 철도의 지반 구조에서는 초기의 정하중 및 동하중에 의하여 대부분의 침하가 일어나므로 하중 단계 ④까지의 안정화 단계를 거친 후의 동하중에 대한 침하 경향은 실제 철도 궤도 구조에 있어서 매우 중요하다. 그림 9(b)는 노상과 강화노반 사이면의 침하를 나타낸다. 지오그리드의 보강층수가 증가함에 따라 재하하중에 대한 침하는 감소하며, 재하횟수에 대한 침하 발생율(그래프 기울기)이 완만해짐을 알 수 있다. 그림 7, 그림 8에 나타난 각 경우별 침하량을 검토해본 결과 지오그리드 3층보강의 경우에 침하량이 최소로 나타났다. 한편 무보강 지반의 경우(Test-1)는 3층(Test-4)의 경우보다 2배 이상의 침하량이 발생하였다. 따라서 지오그리드에 의한 철도 단면을 보강하므로써 하중에 대한 침하량을 상당히 줄일수 있다는 것이 입증되었다.



(a) 보조도상과 강화노반 경계부



(b) 강화노반과 노상의 경계부

그림 7. 반복하중에 따른 층별 침하

그림 8은 상부 반복하중에 따른 노상(준설토지반)상부 토압의 계측 결과이다. 본 연구에서는 하중의 크기와 재하 속도를 제어하였으나, 상부 도상자갈과 보조도상 재료의 다짐은 균질하지 않으므로 절대적인 비교는 어렵다고 판단된다. 전체적으로 보강한 단면의 하중 전달률이 큰 것은 상재 하중에 의한 지반의 침하는 적은 대신 지오그리드에 의해 구속된 토압이 상대적으로 크게 전달된 것으로 볼 수 있다. 그림 8에서 주목해야 할 것은 하중재하횟수에 대한 토압의 최대값과 최소값의 비율을 들 수 있다. 즉 무보강 45cm의 노반두께를 갖는 Test-1에서는 최대 전달 하중이 가장 작은 반면에 재하(Unloading)시 원래 상태로의 토압의 회복률이 작은 것을 알수있다. Test-2의 경우에도

같은 경향이 나타난 것을 알 수 있었다. 반면에 지오그리드 보강 단면의 경우 전달된 대부분의 하중이 제하에 의하여 소멸되는 것은 지오그리드에 의한 노반의 탄성이 증가했기 때문이다.

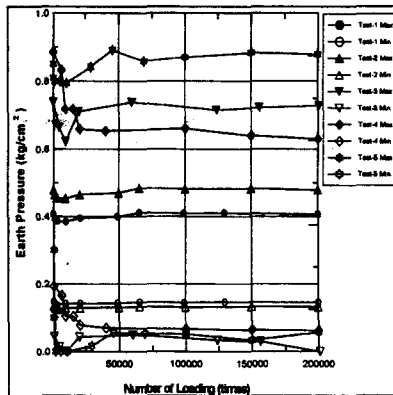
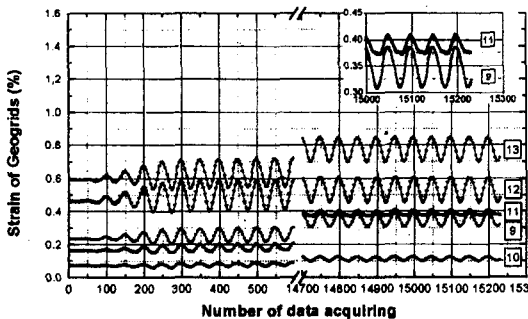
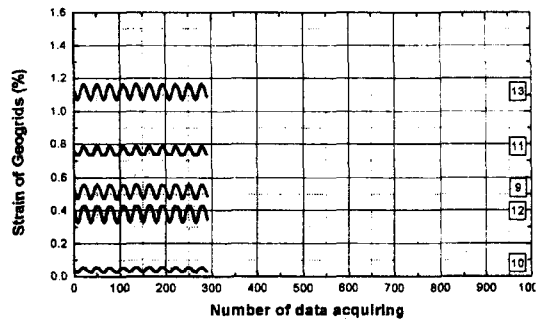


그림 8. 상부 노상의 토압

그림 9에서 지오그리드의 변위의 변화를 볼 수 있다. 노반의 중간층과 바닥에 그리드를 포설한 Test-5에서 게이지 11번과 12번은 중간층, 13~15번 게이지는 바닥층에 포설한 그리드의 변위를 나타낸다. 하중의 재하횟수가 증가함에 따라 대체적으로 하부 그리드의 경우에 인장 변위폭이 더욱 크며 하중 제하에 따른 복원량을 감안할때 이것과 침하 또는 토압과 비교하여 설명할 수 있다. 즉 지오그리드에 의하여 상부 노반의 토체가 하나의 덩어리로 작용하며, 이것은 철근콘크리트보와 비교할 수 있다. 따라서 노반의 안정화와 이에 따른 지반의 침하량 감소를 위하여 지오그리드의 적용성은 매우 우수하다고 할 수 있다.



(a) 단계 ⑤ 초기



(b) 단계 ⑤ 200,000회 작용시

그림 9. 재하 횟수에 따른 지오그리드의 변위(Test-5)

6. 결론

본 연구에서는 고속철도 노반 보강을 위한 지오그리드의 적용성과 보강효과 등에 관하여 연구하였다.

- (1) 현장 평판 재하 시험 결과 지오그리드 1층 보강시 최적 포설 심도는 연약지반(원지반)과 상부 복토단면의 경계부로 나타났다.
- (2) 지오그리드의 보강에 의한 지지력 증가 효과는 보강층수에 비례하지만 상부 복토재가 부족하

면 반복하중으로 인한 지반의 교란현상이 발생하여 역효과를 일으킬 수 있으나, 상부 도상 및 보조도상에 의한 복토 또는 구속 효과로 고속철도 단면에서는 보강층수에 비례하는 것으로 나타났다.

- (3) 지지력 증가 효과는 화강풍화토 지반의 경우 최대 1.2~2.0으로 수렴하였으며, 양입도인 보조기층재로 복토시 2.5cm 이상 침하시에도 BCR값은 뚜렷한 정점 없이 계속 증가하는 경향을 보였다.
- (4) 지반의 하중 재하-제하에 의한 탄성회복률은 보강하지 않은 단면의 값과 대체로 평행하거나 완만한 감소율을 나타내었다. 탄성 회복률은 무보강 지반과 보강한 지반을 비교하면, 보강 지반이 단면별로 최고 2배로 나타났다.
- (5) 실내 동적하중 재하에 따른 보강 효과는 지오그리드 포설층수에 따라 증가하며 지오그리드 3층 보강시 무보강의 경우와 비교하여 침하량이 1/2 이하로 감소되었다. 또한 200,000회까지의 반복하중에 대한 침하 곡선로부터 장기적으로 철도 단면의 내구성을 증가시키는 효과를 예상할 수 있다.
- (6) 동적하중에 대한 노상에 전달되는 토압은 지오그리드 보강에 따라 증가하는데, 이것은 침하가 줄어들어서 발생한다고 볼 수 있다. 하중 작용에 의한 최대 토압과 하중 제거시 회복되는 양을 비교하면 동하중에 대해서도 지반의 탄성 증가 효과가 크게 증가함을 알 수 있으며 따라서 반복하중에 의한 잔류 침하 억제에 효과가 매우 양호하다.

이상의 실험 결과로부터 지오그리드는 노반 상부층의 침하 억제와 지반의 탄성을 높여주므로써, 장기적인 하중에 대한 지지력 확보 및 침하 감소에 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 지오그리드로 철도노반을 보강하였을때 양질의 노반 단면을 줄여 경제적인 설계가 가능하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 G7과제인 「고속전철 토공 및 지반진동 저감기술 개발」의 일환으로 수행하였다. 현장시험을 위하여 도움을 주신 인천국제공항공단의 이규진 과장, (주)삼성물산의 김남포 차장, 시료를 제공해주신 (주)프라임 시스템, 세원산업(주) 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 신공항 건설공단(1996), 인천국제공항 국제업무 및 행정관리지역 토질 조사 및 지반처리 실시 설계, 신공항 건설공단 연구보고서
- (2) B.M. Das(1993), Principles of Soil Dynamics, pp151~156, PWS-KENT, Boston, USA
- (3) B.M. Das(1999), Shallow Foundations ; Bearing Capacity and Settlement, CRC Press LLC, pp287~321
- (4) E.C. Shin(1994), Shallow Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Clay Under Static and Cyclic Loading, Ph. D. Thesis, Southern Illinois University at Carbondale, Illinois, USA
- (5) R.J. Bathurst and G.P Raymond(1987), "Geogrid Reinforcement of Ballast Track", Transportation Research Record 1153
- (6) M. Nicola(1997), "Behavior of Geogrids Under Cyclic Loads", Geosynthetics '97
- (7) M. Nicola(1996), "Short and Long Term Behavior of Geogrids Under Static and Cyclic Load", Balkema. ISBN
- (8) S.L. Webster(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