KSR 0006 / PP 84~91, 2000.

지오그리드로 보강한 고속철도 노반의 거동 특성

Behavior of High-Speed Rail Roadbed Reinforced by Geogrid under Cyclic Loading

신은철[1], 김두환[2]
Eun-Chul Shin, Du-Hwan Kim

Key Words : *Cyclic plate load test(반복평판재하시험), Bearing capacity ratio(지지력비), Elastic rebound ratio(탄성회복비), Subgrade modulus(지반탄성계수), Dynamic load test(동하중 재하시험), Permanent settlement(영구 침하)*

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. With the test results, the bearing capacity ratio, elastic rebound ratio, subgrade modulus and the strain of geogrids under loading were investigated.

Based on these plate load tests, laboratory model tests under cyclic loading were conducted to estimate 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

철도 선로 건설시 연약지반의 처리문제 및 적절한 대책의 강구는 주행의 안전성, 경제성 측면에서 매우 중요한 과제이다. 특히, 고도의 정밀도를 통하여 최고의 주행성을 유지해야 하는 고속철도의 경우 전통적인 철도선로 구조로는 한계가 있다. 따라서, 일본을 비롯한 선진외국에서는 1970년대 중반 이후 대부분의 철도노반은 노반층을 보강한 강화노반의 형태로 시공되고 있다. 토목섬유의 일종인 지오그리드는 높은 인장강도와 적절한 신장 특성에 의해 지반의 지지력이 증가되는 효과 등을 얻을 수 있으며, 종래에 사용하던 지반 치환 및 개량공법 등에 비해 공기 단축, 비용절감, 시공의 간편성 등의 장점이 있다. 이로 인해 지오그리드는 철도노반 건설에서 그 사용량이 점차 증가하는 추세이다. 토목섬유를 철도에 적용하려는 시도는 Bathurst & Raymond[1]와 Webster[2] 등의 현장시험을 통하여 이루어진바 있다. 그러나, 지금까지는 주로 도상 자갈층과 노반의 경계면에 지오텍스타일을 포설하였을 경우에 대한 보강효과의 조사가 대부분이므로, 강화노반의 개념을 적용하는 고속철도 노반에 대한 연구와는 차이점이 있다. 특히 보조 도상층과 강화노반층의 적용을 기본으로 하는 국내 고속철도의 노반 구조에서 반복하중에 따른 장기 안정성 문

*1 정회원, 인천대학교 토목환경시스템 공학과
*2 인천대학교 환경방재 연구소 연구원

제에 대한 연구는 미미하였다. 본 연구에서는 연약지반 위의 성토단면(노반)에서 지오그리드의 보강조건을 변화시켜가며 반복평판 재하시험을 실시하여 정하중에 대한 보강효과를 조사하였다. 또한, 대형 실내 모형시험을 실시하여 동적하중하의 고속철도 노반 구조에서 지오그리드의 보강효과 및 노반의 거동 특성을 조사하였다.

2. 시험 조건

현장 평판시험에 의한 정하중 재하시험 및 실내 동하중 재하시험에 사용한 시료의 공학적 특성을 Table 1에 나타내었다. 노반의 성토재는 입도가 다른 2가지의 보조 기층재를 사용하였다.

Table 1 Physical properties of soil specimens

Materials / properties	Roadbed		Ground soil
	Series I	Series II	
Specific Gravity, G_s	-	-	2.64
Coefficient of uniformity, C_u	9.56	6.5	2.0
Coefficient of gradation, C_c	1.46	1.35	0.84
Group symbol(USCS)	GP	GP (≈GW)	SP
No.200 sieve finer, %	0.22	0.9	9.0
$\gamma_{d(max)}$, tonf/m^3	2.23	2.16	1.58
Optimum moisture content, w_{opt}(%)	8.15	9.14	8.6

연약지반상에 철도노반 구축시 발생하는 분니현상을 방지하기 위해 지오텍스타일을 원지반 상부에 포설하고 지오그리드 보강재를 성토재 하부 또는 중간에 포설하였다. 본 연구에 사용된 지오텍스타일은 폴리에스테르 재질의 부직포 형태이며, 지오그리드는 폴리프로필렌으로 만든 격자형 강성 그리드를 사용하였다. Table 2는 현장 및 실내 시험에 사용한 토목섬유의 특성치를 나타낸다.

Table 2 Properties of geosynthetics

Property	Geogrid	Geotextile
Polymer type	Polypropylene	Polyester
Manufacturing type	Biaxial stiff geogrid	Nonwoven
Product Size, m	4×50	8.5×100
Mass per unit area, g/m^2	650	700
Thickness, mm	6.5 (Junction)	4.5
Carbon black content	2%	-
Permeability, cm/sec	-	10^{-1}
	MD, CD	
Number of rib	34, 23	-
Maximum tensile strength, kN/m	37.5, 40.8	1.75
Yield point elongation,%	10.1, 12.4	50~120
Tensile strength at 2% elongation, kN/m	20.2, 14.1	-
Tensile strength at 5% elongation, kN/m	32.3, 27.5	-
Aperture size, mm	34×27	-

3. 현장 평판재하시험

지오그리드의 최적 포설 위치 및 포설층수, 하중작용에 대한 토압의 전달, 지오그리드의 변위 등을 측정하기 위해 현장 평판재하시험을 실시하였다. 또한, 현장시험을 통하여 보강재에 의한 지지력 증가 효과와 지반탄성계수, 지반반력계수의 변화 등에 미치는 인자들에 대하여 조사하였다.

3.1 현장 조건

시험 부지는 영종도 인천국제공항 건설 현장으로 해성점토 퇴적층이 5~10 m 정도인 지반 위에 약 1 m 두께로 준설 매립한 상태이며, 지하수위는 지표면과 거의 일치하였다. 이 지반을 원지반(연약지반)으로 정하고 보조기층재로 성토하여 Fig. 1과 같이 단면을 조성하였다. 준설 매립토층은 전반적으로 세립의 모래(SM)층으로 구성되어 있으며, 표준관입 시험 결과 N치는 3~5정도로 나타났다. 해성퇴적토층은 연약한 점토질 실트(M

L)로 구성되어 있으며, 상부 약 3~5 m 정도는 N치가 1~3으로 연약한 상태이다[3].

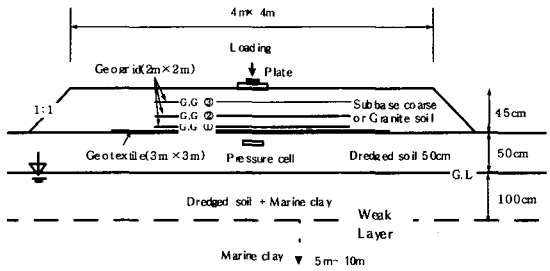


Fig. 1 Schematic diagram of the test section

3.2 시험 방법

평판재하시험은, Fig. 1에서 보는 바와 같이, 직경이 30 cm인 재하판을 사용하였으며, 유압잭을 일부 수정 제작하여 반복하중(Loading - Unloading)을 재하할 수 있도록 하였다. 지오그리드에 스트레인 게이지를 부착하였으며, 토압계를 매설하여 작용하중에 대한 거동을 측정하였다.

3.3 시험 결과

(1) 보강에 의한 지지력 증가

평판재하시험의 하중—침하 관계 곡선으로부터 침하별 지지력 증가 효과를 식 (1)과 같이 토목섬유를 보강하지 않은 단면과 보강한 단면의 지지력비로 나타낼 수 있으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

$$BCR_s = \frac{q_r}{q} \tag{1}$$

단면조건과 관계없이 모든 시험에서 지오그리드에 의한 보강효과를 나타내었으나, u/B가 1/3 이하인 경우 지오그리드 신축의 반복으로 지반이 교란되어 보강효과가 저감됨을 알 수 있다 (T_6). Series Ⅱ로부터 지오그리드 1개층 포설시의 최적 포설 심도는 연약지반과 상부 양질의 성토재의 경계면이며, 지오그리드의 보강 조건에 따라 BCR_s가 최대 1.8~2.0으로 나타났다. 또한 성토

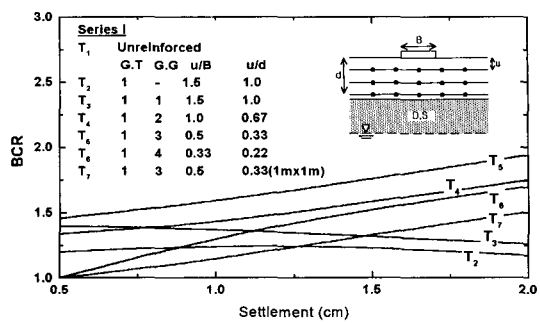


Fig. 2 Bearing capacity ratio, BCR_s <Series I>

재의 다짐이 양호한 경우 보강재의 보강효과가 잘 발현되며, 지오텍스타일은 오히려 지지력을 저감시킬 수 있으므로 현장의 원지반 조건에 따라 사용여부를 결정하여야 한다.

다음은 시험 결과로부터 얻은 지지력비에 대한 관계식이다.

- 굵은골재를 많이 함유한 단면의 지지력 증가
  ; Series Ⅰ ($u/d > 1/3$)

$$BCR_i = 2 - \frac{1}{2}(u/d) \tag{2}$$

$$BCR_{in} = 0.6 + 0.16(u/d) \tag{3}$$

$$BCR_s = BCR_i + BCR_{in} \cdot S \tag{4}$$

여기서, BCR_i =초기 지지력비

BCR_{in} =침하에 따른 지지력비의 증가율

BCR_s = 복토 두께에 따른 침하별 지지력비

S = 침하량(cm)

(2) 탄성 회복률의 변화

각 하중 단계별 전체 침하량(S_s)과 탄성회복량(R_e)과의 비율을 탄성회복률을 식 (5)로 나타내었으며, 시험 결과는 Fig. 3과 같다.

$$ERR = \frac{R_e}{S_s} \tag{5}$$

Series Ⅰ에서 굵은 골재가 다량 함유된 지반의 탄성 회복률은 하중의 크기와 관계없이 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이 결과로부터 지반의 파괴는 흙의 탄성이 일정한 한도 이하로 저하

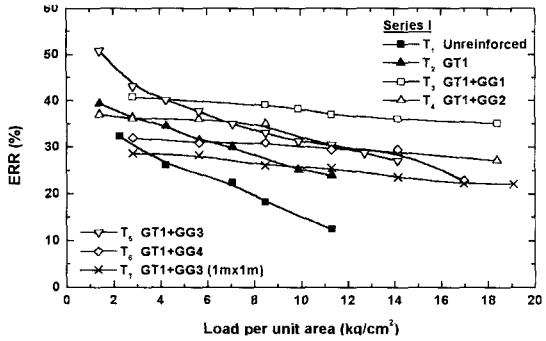


Fig. 3 Elastic rebound ratio, ERR <Series I>

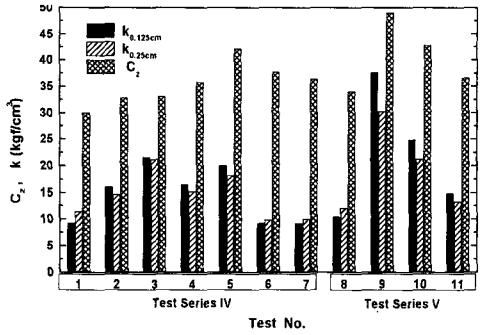


Fig. 4 Subgrade modulus and spring constant

된 상태에서의 소성변형에 의한 것임을 알 수 있다. 또한 T_6의 경우 전반적으로 탄성 회복률이 낮으며, 이것은 지반 조성시 복토 두께가 상대적으로 작아 동일한 다짐에너지에서는 충분한 다짐이 이루어지지 않았으며, 반복하중에 대하여 지반의 교란현상이 발생하였기 때문으로 볼 수 있다.

(3) 지반탄성 계수 및 지반반력 계수

하중강도 q와 단계 하중에 대한 지반의 탄성 침하량 S_e의 관계 그래프로부터 Barkan[4]은 지반탄성계수(subgrade modulus, C_z)를 구하는 방법을 식 (6)과 같이 제시하였다.

$$C_z = \frac{q}{S_e} = 1.13\frac{E}{1-\mu^2}\frac{1}{\sqrt{A}} = 2.26\,G\,\frac{(1+\mu)}{1-\mu^2}\frac{1}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

Fig. 4로부터 지반탄성계수는 무보강에 비하여 최대 약 1.5배의 증가율을 보였으며 이것은 지반의 소성 변형 절감 효과가 있음을 의미한다.

(4) 지오그리드의 변위

Fig. 5는 단계별 하중 재하에 따른 지오그리드의 최대 변위를 나타낸다. 여기서 주목할 것은 연약층과 양질의 성토체 사이에 놓인 지오그리드는 중심에 놓인 ①번 게이지와 중심으로부터 1 m 떨어진 지점 ②에서의 지오그리드가 모두 인장되었음을 알 수 있다. 반면에 상부에 놓인 ⑤, ⑥번

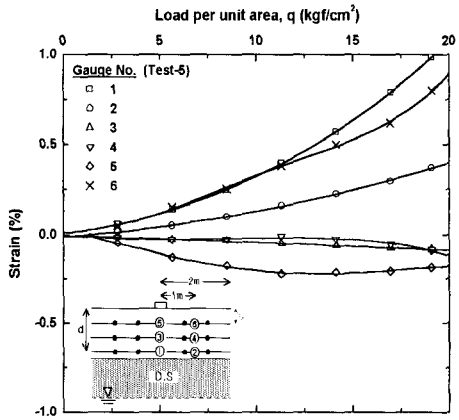


Fig. 5 Strain of geogrids due to plate load test

게이지는 중심에서는 압축이, 중심으로부터 1 m 떨어진 지점에서는 인장력이 발생하였음을 알 수 있다. 또한 중간층에 놓인 ③, ④ 번 게이지는 약간의 압축이 있었을 뿐 거의 변하지 않아 보강효과에 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 이 결과로부터 상대적으로 연약한 지반 위에 놓인 성토체에서 지오그리드의 포설은 지반의 탄성을 높여주며, 결과적으로 철근콘크리트 슬라브(Slab)와 유사한 거동을 유발시킨다고 말할 수 있다.

기존에 발표된 여러 문헌에 의하면 지오그리드의 보강 효과는 대체적으로 보강재 포설 개수에 비례하며, 보강재가 어느 일정한 개수 또는 포설 깊이에 이르면 지지력은 더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 나타낸다고 알려졌다. 그러나 이러한

자료는 균질한 토체가 기초폭보다 상대적으로 매우 큰 무한 단면의 경우에 대한 실내 시험 결과이며, 현장조건과는 차이가 있음을 알 수 있다.

시험 결과로부터 연직 방향으로 균질하지 않은 단면, 또는 상대적으로 연약한 지반이 하부에 존재할 경우 보강효과를 고려한 지오그리드의 포설 위치는, 두 이질층의 경계면이 가장 효과적인 보강 심도로 나타났다. 또한, 단면의 중간 또는 중립축에 가까운 곳에 포설시 지오그리드의 보강효과는 미미하게 나타났다. 그러나 여기서 말하는 중립축은 상부 복토재의 두께와 다짐 정도에 따라 달라질 수 있다. 모든 시험 결과로부터 상재하중에 대한 지지력 보강효과는 지오그리드가 약 1 % 이내의 신장시에 이루어졌다.

4. 실내 동적하중 재하시험

지오그리드에 의한 고속철도 노반의 보강효과를 조사하기 위하여 현장 평판 재하시험 결과를 바탕으로 동적하중 재하시험을 실시하였다.

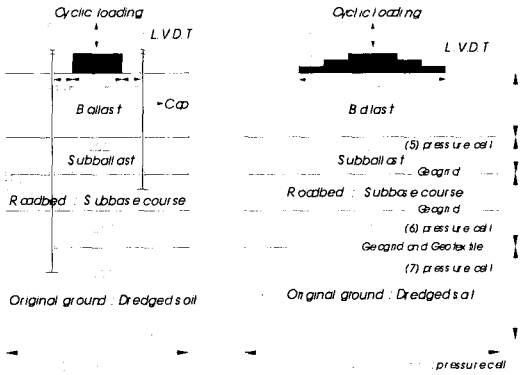
4.1 시험 조건

시험 단면은 Table 3과 같이 보강조건을 변화시키며 실시하였다. Fig. 6은 시험 단면의 모식도를 나타낸다. 토조의 크기는 1×1.4×2.0 m이며, 기초는 한쪽 레일에 대한 철도 침목 유효면적을 고려하여 27×80 cm 크기의 강철재질로 만들어 사용하였다.

상부의 도상(Ballast)층 및 보조도상(Subballast)층의 두께는, Fig. 6에서 보는 바와 같이, 한국 고속철도 시방규정에 따라 각각 35 cm, 20 cm로 정해진 상태로서, 모든 시험 세트에서 이 두께를 유지하였다. 연약층은 습윤 상태의 준설토를 사용하여 50 cm의 두께로 조성하였으며, 노반의 두께 및 보강 조건을 변화시켜가며 지오그리드의 보강효과를 조사하였다. 사용한 보강재 및 성토재는 현장 평판재하시험에 사용한 재료와 동일하며 도상자갈의 압축강도는 2,240 kg/cm^2, 마모율(LAA)은 12.31 %로 나타났다.

Table 3 Details of test conditions

Test No.	Thickness of Roadbed(cm)	Reinforcement	
		Geotextiles	Geogrids
T_1	40	-	-
T_2	80	-	-
T_3	40	1	1
T_4	40	1	2
T_5	40	1	3



(a) Front view (b) Side view

Fig. 6 Schematic diagram of the test

4.2 시험 방법

본 연구에서는 5개의 단계로 하중을 재하하였으며, 최종적으로 3.5 Hz의 속도로 12 tonf(≃5.56 kgf/cm^2)의 하중을 가하였다. Fig. 7은 각 단계별 하중 재하방법을 보여주고 있다.

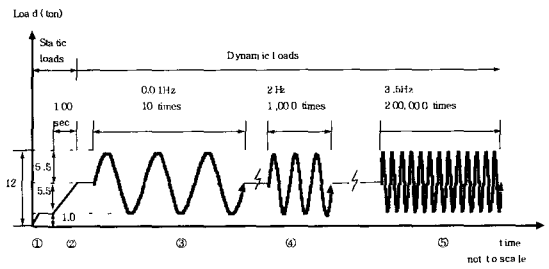


Fig. 7 Loading procedure

하중 단계 ①에서는 상부 도상층의 안정화를 위하여 0.1 tonf/sec의 속도로 1 tonf을, 단계 ②에서는 100초 동안(55 kgf/sec) 추가적으로 5.5 tonf의 하중을 가하였다. 단계 ③에서는 동하중에 대한 지반의 안정적 하중작용을 위하여 0.01 Hz의 속도로 10회에 걸쳐 하중을 작용시켰다. 단계 ④에서는 2 Hz로 1000회, 단계 ⑤에서는 최종적으로 3.5 Hz의 속도로 200,000회의 하중을 재하시켰다.

4.3 시험 결과

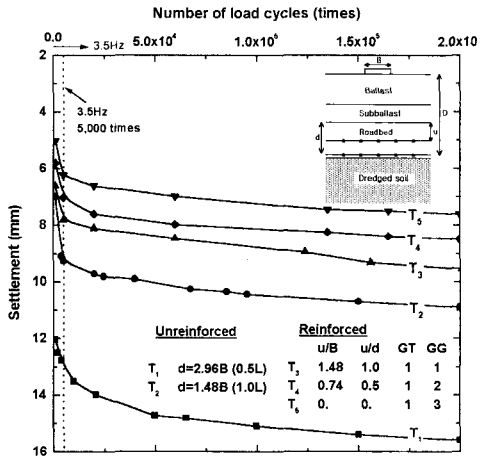
(1) 침하량

Fig. 8(a)는 반복하중 200,000회에 대한 노반 상부면의 침하를 나타낸다. 여기서, X축(하중 재하 횟수)의 초기치는 초기 정적재하 및 2 Hz 반복하중 1,000회 작용에 따른 누적 침하를 나타내며, 그 후 Fig. 7의 하중재하 단계 ⑤의 동재하 200,000회에 대한 침하를 나타내었다.

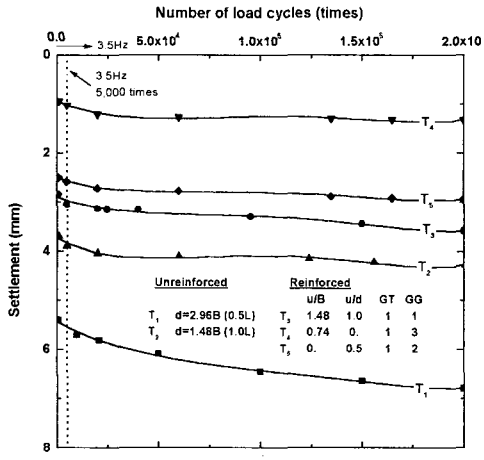
일반적으로 철도노반 구조에서 지지력의 증가는 보조도상의 추가적인 다짐현상과 전체 노반시스템의 안정화 국면 후에 비로소 분명하게 나타난다. 그러므로 본 시험에서 하중 단계 ④까지의 안정화 단계를 거친 후의 동하중에 대한 침하 경향은 실제 철도 궤도 구조에 있어서 매우 중요하다.

Fig. 8(b)는 노상과 강화노반층 경계면의 침하를 나타낸다. 지오그리드의 보강층수가 증가함에 따라 재하하중에 대한 침하는 감소하며, 재하횟수에 대한 침하 발생률(그래프 기울기)이 완만해짐을 알 수 있다.

Fig. 8에 나타난 각 경우별 침하량을 검토해본 결과 지오그리드 3층 보강의 경우에 침하량이 최소로 나타났다. 한편 무보강 지반의 경우 (T_1)는 3층보강 (T_5)의 경우보다 2배 이상의 침하량이 발생하였다. 또한 T_3의 경우와 T_2의 경우를 고려해볼 때 1층의 지오텍스타일과 지오그리드를 포설하였을 때 토층이 2배 두꺼운 경우보다 침하량이 적게 나타난 것을 관찰할 수 있다. 따라서, 지오그리드를 사용하여 철도노반 구조물로써 작용 하중에 따른 침하량을 상당히 줄일 수 있다는 것이 입증되었다.



(a) Top of the roadbed



(b) Bottom of the roadbed

Fig. 8 Settlement due to static and dynamic loading

Fig. 9는 Fig. 8로부터 보강지반의 침하 (S_r)와 무보강 지반의 침하 (S_u)의 비율을 나타낸 것이다. 지오그리드의 2층 및 3층 보강시 침하 저감효과가 10만회 하중 재하 후 안정화 단계로 접어듦을 볼 수 있다. 이 그림으로부터 철도노반 구조에서 지오그리드의 최적 보강 위치는 노반 최하

부와 최상부라고 말할 수 있다. 노반의 최상부는 보조도상과 맞닿은 부분으로 보조도상의 굵은 입경이 지오그리드의 보강효과에 큰 영향을 준다고 볼 수 있다.

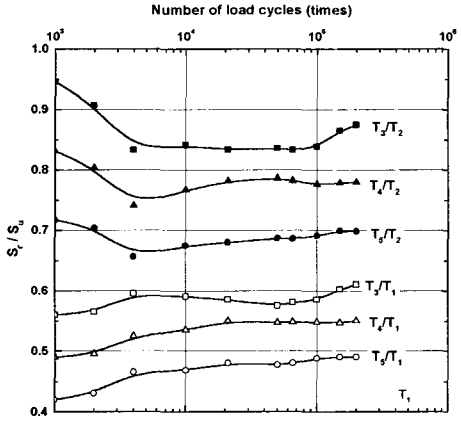


Fig. 9 Settlement ratio with number of cycles

(2) 토압의 전달

Fig. 10은 상부 반복하중에 의해 전달된 노상(준설토지반)상부의 토압의 계측 결과이다. 본 연구에서는 하중의 크기와 재하 속도를 제어하였으나, 상부 도상자갈과 보조도상 재료의 다짐특성은 입경의 불균질성으로 인해 계측 결과간의 절대적인 비교평가는 어렵다고 판단된다. 전체적으로 보강한 단면의 하중 전달률이 큰 것은 상재 하중에 의한 지반의 침하는 적은 대신 지오그리드에 의해 구속된 토압이 상대적으로 크게 전달된 것에 기인되었다고 볼 수 있다. Fig. 10에서 주목해야 할 것은 하중 재하횟수에 대한 토압의 최대값과 최소값의 비율을 들 수 있다. 즉 무보강 40 cm의 노반두께를 갖는 T_1에서는 최대 전달 하중이 가장 작은 반면에 제하(Unloading)시 원래 상태로의 토압의 회복률이 작은 것을 알 수 있다.

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.

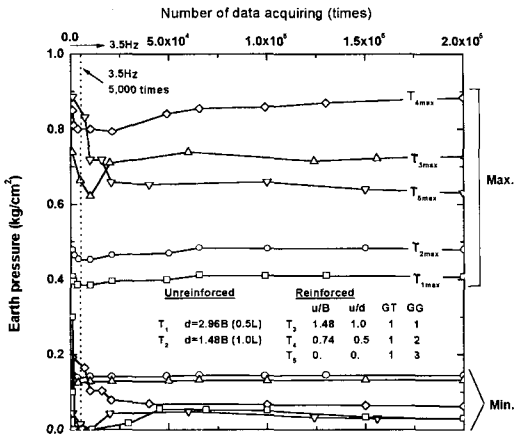


Fig. 10 Net earth pressure due to static and dynamic loading ; bottom of the roadbed

(3) 지오그리드의 변위

하중작용에 따른 포설된 지오그리드의 변위의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 노반의 중간층과 하부에 그리드를 포설한 T_4에서 게이지 11번과 12번은 중간층, 13~15번 게이지는 하부층에 포설한 그리드의 변위를 나타낸다. 하중의 재하횟수가 증가함에 따라 대체적으로 하부 지오그리드의 경우에 인장 변위폭이 더욱 크며 하중 제하에 따른 복원량을 감안할 때 이것과 침하 또는 토압과 비교하여 설명할 수 있다. 즉 지오그리드에 의하여 상부 노반의 토체가 하나의 일체로 작용하였음을 알 수 있다. 따라서, 노반의 안정화와 이에 따른 지반의 침하량 감소를 위한 지오그리드의 적용성이 매우 우수하다고 할 수 있다.

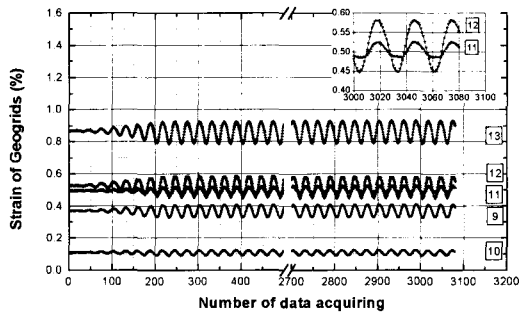


Fig. 11 Strain of geogrids (T_4)

5. 결 론

(1) 현장 평판재하시험 결과 지오그리드 1층 보강시 최적 포설 심도는 연약지반(원지반)과 상부 복토 단면의 경계부로 나타났다.

(2) 지오그리드의 보강에 의한 지지력 증가 효과는 보강층수에 비례하지만 상부 복토재가 부족하면 반복하중으로 인한 지반의 교란현상이 발생하여 역효과를 일으킬 수 있다. 그러나 고속철도 단면에서는 상부 도상 및 보조도상에 의한 복토 또는 구속 효과로 지지력이 보강층수에 비례하는 것으로 나타났다.

(3) 지지력 증가 효과는 최대 2.0으로 수렴하였으며, 양입도인 보조기층재로 복토시 2.5 cm 이상 침하시에도 BCR값은 뚜렷한 정점 없이 계속 증가하는 경향을 보였다.

(4) 지반의 하중 재하-제하에 의한 탄성 회복률은 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 곡선으로부터 장기적으로 철도 단면의 내구성을 증가시키는 효과를 예상할 수 있다.

(6) 동적하중에 의해 노상에 전달되는 토압은 지오그리드 보강에 따라 증가하는데, 이것은 침하가 줄어듦으로써 발생한다고 볼 수 있다. 하중 작용에 의한 최대 토압과 하중 제거 시 회복되는 양을 비교하면 동하중에 대해서도 지반의 탄성 증가 효과가 크게 증가함을 알 수 있으며 이것은 지오그리드가 반복하중에 의한 잔류 침하 억제에 매우 효과가 크다는 것을 나타내고 있다.

(7) 정적·동적 하중에 대한 지오그리드의 인장 변형은 변형은 1 % 이내에서 발생하므로 기존 지오그리드를 철도 노반에 사용 시 안정하다고 사료되나, 실제 철도 선로에서 현장 시험을 실시하는 등 보다 광범위한 연구 검토가 필요하다.

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 보강하였을 때 양질의 노반 단면을 줄여 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 건설교통부 G7 과제(1998. 11~1999. 10)의 일환인 「고속철도 궤도 및 노반개발」 과제중 「지오그리드를 활용한 철도노반 보강 기술개발」에 관한 연구를 바탕으로 수행하였으며, 한국철도기술연구원의 황선근 박사를 비롯한 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Bathurst, R.J. and Raymond, G.P., "Geogrid Reinforcement of Ballast Track", Transportation Research Record 1153, 1987
2. 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, 1993
3. 신공항 건설공단, "인천국제공항 국제업무 및 행정관리지역 토질 조사 및 지반처리 실시 설계", 신공항 건설공단 연구보고서, 1996
4. Barkan, D.D., "Dynamics of Base and Foundations", McGraw-Hill Book Company, New york, 1962