

## 반복 평판재하시험을 통한 지오그리드 보강지반의 거동 특성 Behavior of Geogrid-Reinforced Soil with Cyclic Plate Load Test

신은철<sup>1)</sup>, Eun Chul Shin, 김두환<sup>2)</sup>, Du Hwan Kim, 이상조<sup>2)</sup>, Sang Jo Lee, 이규진<sup>3)</sup>, Kyu Jin Lee

<sup>1)</sup> 시립인천대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

<sup>2)</sup> 시립인천대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

<sup>3)</sup> 충북대학교 토목공학과 박사과정 수료, Ph D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Chungbuk National Univ.

**SYNOPSIS** : The cyclic plate load test were performed to determine the behavior of reinforced soft ground with multiple layers of geogrid. Five series of test were conducted with varying the soil profile conditions which including the ground level, type of soil, and the thickness of each soil layer. The plate load test equipment was slightly modified to apply the cyclic load. Based on the cyclic plate load test results, the bearing capacity ratio(BCR), subbase modulus, shear modulus, the elastic rebound ratio, and reinforcing parameters are presented.

**Key words** : Cyclic plate load test, Geogrid, Shear modulus, Elastic rebound, BCR

### 1. 서 론

토목섬유증 보강재로 개발된 지오그리드는 기초지반의 지지력 향상, 사면의 안정, 보강토 옹벽뿐만 아니라 말뚝 기초와 복합적으로 활용하는 방안등 그 적용범위가 날로 늘어나고 있다. 국내에서는 주로 보강토 옹벽등에 주로 사용하던 지오그리드를 도로, 철도 및 공항 관련 주요 시설의 지반보강을 위하여 적용하기 위한 시도가 활발히 진행중이다. 특히 연약 지반위에 도로를 건설하기 위하여 종래에 사용하던 콘크리트 보강 등의 방법에 비하여 공기 단축, 비용절감, 시공의 간편성 등의 장점이 있는 지오그리드의 사용은 인천국제공항 등의 대규모 공사에서도 그 사용이 증가되는 추세이다. 지오그리드에 의한 지반의 보강효과는 여러 학자(Guido et al., 1985; Guido et al., 1986; Omar et al., 1993; Yetimoglu et al., 1994; Das & Shin, 1998)에 의하여 입증된바 있다. 이와 같은 기존의 자료는 균질한 지반에 대한 실내 모형지지력 시험에 의한 연구가 많았다. 본 연구에서는 총 21회에 걸친 평판재하시험을 소정의 연약 지반 위에서 성토재료, 단면조성 및 보강재의 포설 등의 조건을 변화시키며 실시하였다. 현장시험을 통하여 보강재에 의한 지지력 증가 효과와 탄성계수, 전단탄성계수의 변화 등에 미치는 인자들에 대하여 연구하였다.

## 2. 시험 조건

### 2.1 시험 단면

시험 부지는 영정도 인천국제공항 현장으로 해성퇴적토층이 5~10m 정도인 지반 위에 약 1m 두께로 준설패립한 상태로 지하수위는 지표면과 거의 일치하였다. 이 지반을 원지반(연약지반)으로 정하여 각각 준설토, 화강풍화토, 보조기층재 등으로 성토하여 그림 1과 같이 단면을 조성하였다. 표 1은 각 시험 단면의 구성 재료 및 보강 조건을 나타낸다. 준설패립토층은 전반적으로 세립의 모래(SM)로 구성되어 있으며, 표준관입 시험 결과 N치는 3~5정도로 나타났다. 해성퇴적토층은 연약한 점토질 실트(ML)로 구성되어 있으며, 상부 약 3~5m정도는 N치가 2~4로 연약한 상태이다.

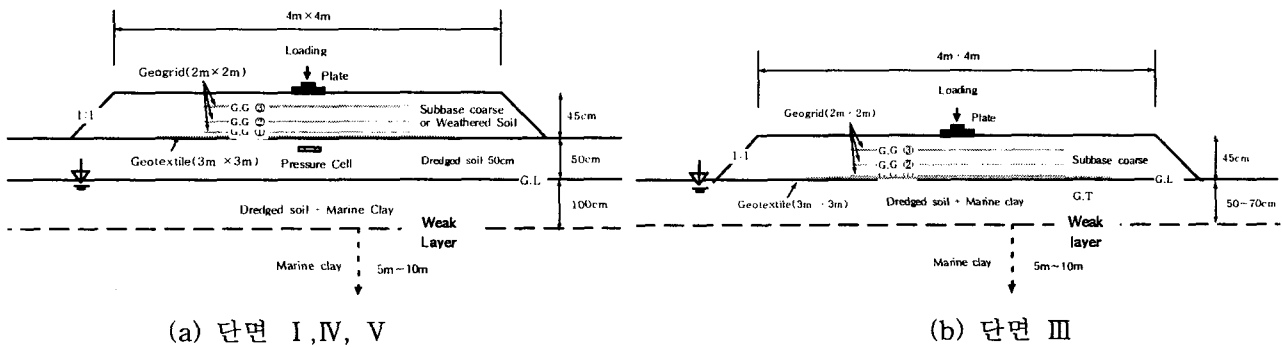


그림 1. 시험 단면의 개략도

시험 I 에서는 입도가 SP에 해당하는 화강풍화토를 사용하였으며, 시험 II는 원지반 위에 50cm 복토한 준설토 지반에서 실시하였다. 시험 III에서는 원지반 위에 보조기층재를 복토한 경우이며, 그 외의 경우에는 지하수의 이동에 의한 영향을 줄이기 위하여 원지반 위에 준설토로 50cm 복토한 지반 위에서 단면 조건을 변화시키며 시험을 실시하였다. 시험 V는 지오그리드의 최적 포설심도를 확인하기 위하여 실시하였다. 반복하중에 의한 기초 연약지반의 팽팽현상 방지를 위하여 일반적으로 지오텍스타일을 사용하므로 지오그리드 보강시에는 지오텍스타일을 바닥에 먼저 포설하는 것을 원칙으로 하였다.

표 1. 시험 단면 조건

단면 부호	단면 번호	성토 재료	보강 조건		보강 단면 구성 조건	단면 부호	단면 번호	성토 재료	보강 조건		보강 단면 구성 조건
			G.T	G.G					G.T	G.G	
I	1	화강 풍화토	-	-	D.S 50cm+W.S 45cm	IV	11	빈입도 보조기 층재	-	-	D.S 50cm+SB 45cm
	2		-	-	D.S 50cm+W.S 90cm		12		1	-	D.S 50cm+SB 45cm
	3		1	1	D.S 50cm+W.S 45cm		13		1	1	D.S 50cm+SB 45cm
	4		1	2	D.S 50cm+W.S 45cm		14		1	2	D.S 50cm+SB 45cm
	5		1	3	D.S 50cm+W.S 45cm		15		1	3	D.S 50cm+SB 45cm
II	6	준설토	-	-	D.S 50cm		16		1	4	D.S 50cm+SB 45cm
III	7	양입도 보조기 층재	-	-	SB 45cm	17	1	3 1m x 1m	-	D.S 50cm+SB 45cm	
	8		1	1	SB 45cm	18	-	-	-	D.S 50cm+SB 45cm	
	9		1	2	SB 45cm	19	-	1 바닥면	-	D.S 50cm+SB 45cm	
	10		1	3	SB 45cm	20	1	1 바닥면	-	D.S 50cm+SB 45cm	
						21	1	1 중간층	-	D.S 50cm+SB 45cm	

G.L : 원지반, D.S : 준설토, W.S : 화강풍화토, SB : 보조기층재, G.T : 지오텍스타일, G.G : 지오그리드

## 2.2 시험 방법

하중은 재하-제하(Loading-Unloading)방식으로 가하였으며, 단면 재료와 지오그리드 보강조건에 따른 지지력 및 전단탄성계수값의 변화, 토압의 변화에 대하여 조사하였다. 그림 2는 반복재하 평판재하시험(Cyclic plate load test)의 일반적인 하중-침하 관계곡선을 나타낸다. 여기서 각 하중 단계별로 하중에 대한 탄성 침하의 관계를 그림 3와 같이 그릴수 있으며, 식(1)에 의하여 지반반력 계수 k값을 구할수 있다. 식(1)의 평판에 대한 지반반력계수를 이용하여 연직하중에 대한 지반탄성계수는 식 (2), (3)에 의하여 구할 수 있다(Terzaghi, 1955).

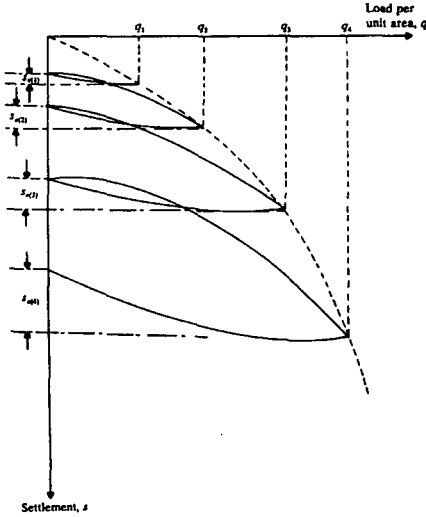


그림 2. 반복평판재하시험의 하중-침하 곡선

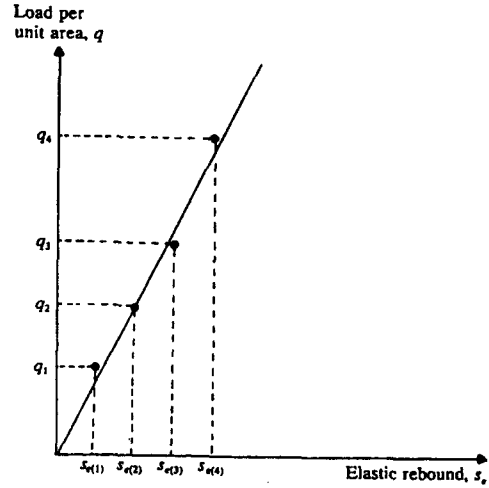


그림 3. 하중-탄성회복 관계

(가) 지반탄성계수의 산정

$$k_{plate} = \frac{qA}{S_e} \quad (1)$$

점성토 :  $k_{foundation} = k_{plate} \left( \frac{\text{foundation width}}{\text{plate width}} \right)$  (2)

사질토 :  $k_{foundation} = k_{plate} \left( \frac{\text{foundation width} + \text{plate width}}{2 \times \text{plate width}} \right)^2$  (3)

(나) 전단탄성계수 G의 산정

그림 3의 q와  $S_e$ 의 관계 그래프로부터 Barkan(1962)은 지반탄성계수(식4)로부터 지반의 전단탄성계수(shear modulus, G)를 구하는 방법을 식(5)와 같이 제시하였다.

$$C_z = \frac{q}{S_e} = 1.13 \frac{E}{1-\mu^2} \frac{1}{\sqrt{A}} = 2.26 G \frac{(1+\mu)}{1-\mu^2} \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

$$G = \frac{(1-\mu) C_z \sqrt{A}}{2.26} \quad (5)$$

여기서,  $C_z$  = 지반탄성계수(subgrade modulus)

### 3. 시료의 특성

#### 3.1 성토재료

표 2는 각 단면의 성토재료에 대한 공학적 특성을 나타내며 입도분포는 그림 3과 같다.

표 2. 성토재료의 공학적 특성

특성	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	
곡률계수( $C_c$ )	1.46	1.35	1.35	0.84	
흙의 분류	GP	GP(≈GW)	SP	SP	
No.200체 통과량(%)	0.22	0.9	4.81	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

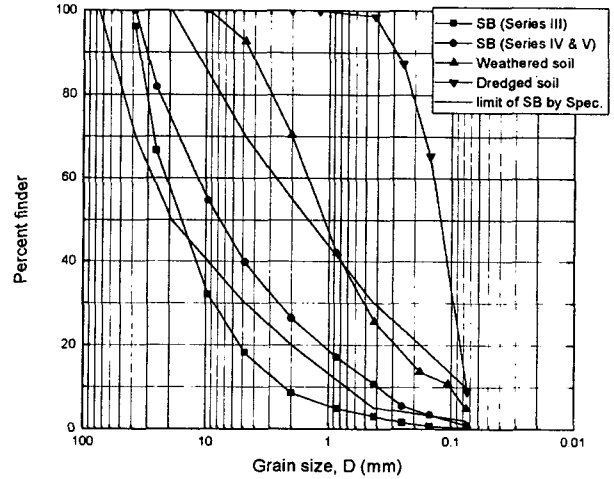


그림 5. 시료의 입도분포

#### 3.3 보강재의 공학적 특성

표 3은 시험에 사용한 지오그리드와 지오텍스타일의 특성을 나타낸다. 각각의 시험 성토단면은 4m × 4m, 지오텍스타일은 3m × 3m, 지오그리드는 2m × 2m의 넓이로 포설하였다.

표 3. 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)		-	$10^{-1}$

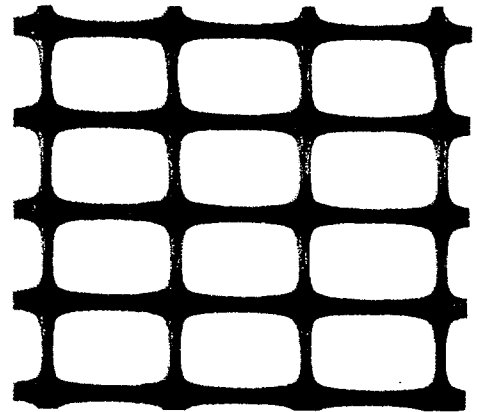


그림 6. 지오그리드 시료

### 4. 시험 결과

#### 4.1 단계별 하중 - 침하

그림 6은 보강재의 유무와 보강 조건에 대한 하중-침하 곡선으로서 지오그리드에 의한 지지력 증가는 보강층수에 비례하지만 3층 보강시 오히려 값이 저하되는 것을 볼 수 있다. 최대 4층 보강을 한 단면 3

에서도 비슷한 경향을 나타내는데 이것은 지오그리드의 보강 효과는 보강층수보다 상부 복토층의 충분한 두께 또는 다짐 정도에 큰 영향을 받는 것으로 판단할 수 있다. 이와 같은 현상은 보조기층의 입도 분포, 최대 입경의 크기, 보강층간의 두께, 하중재하 조건과 긴밀한 관계를 갖고 있는 것으로 추측된다. 그림 6(c)와 같이 주로 입자크기가 큰 골재로 구성되어 입도 분포가 좋지 않을 경우 복토재 내부에 포설한 지오그리드는 오히려 지반을 교란시키는 영향을 줄 수 있음을 나타낸다. 그림 6(d)에서 지오그리드 1층 보강시 최적 포설위치는 연약지반과 양호한 복토단면 사이라는 것을 보여준다. 일반적으로 지오그리드의 보강 효과는 골재의 맞물림에 의한 인발저항의 증가 효과에 의한 것이므로 지반이 어느 정도 변형을 일으킬 때 뚜렷한 효과를 나타낸다. 따라서 상부복토재를 다질때 지오그리드의 충분한 변형 또는 맞물림 작용이 일어나기 위해서는 연약지반과의 경계면에 포설하는 것이 적절하며, 탄성이 증가한 지오그리드 보강지반은 인장강도의 증가로 하나의 덩어리(lump)로 거동한다. 철근콘크리트 단면과 같이 거동하며 유사하게 최적 포설 심도는 양질의 성토층 최하부라고 결론지을 수 있다. 이것은 지반의 탄성계수와 전단탄성계수, 탄성회복비를 통해서도 원인을 유추할 수 있다.

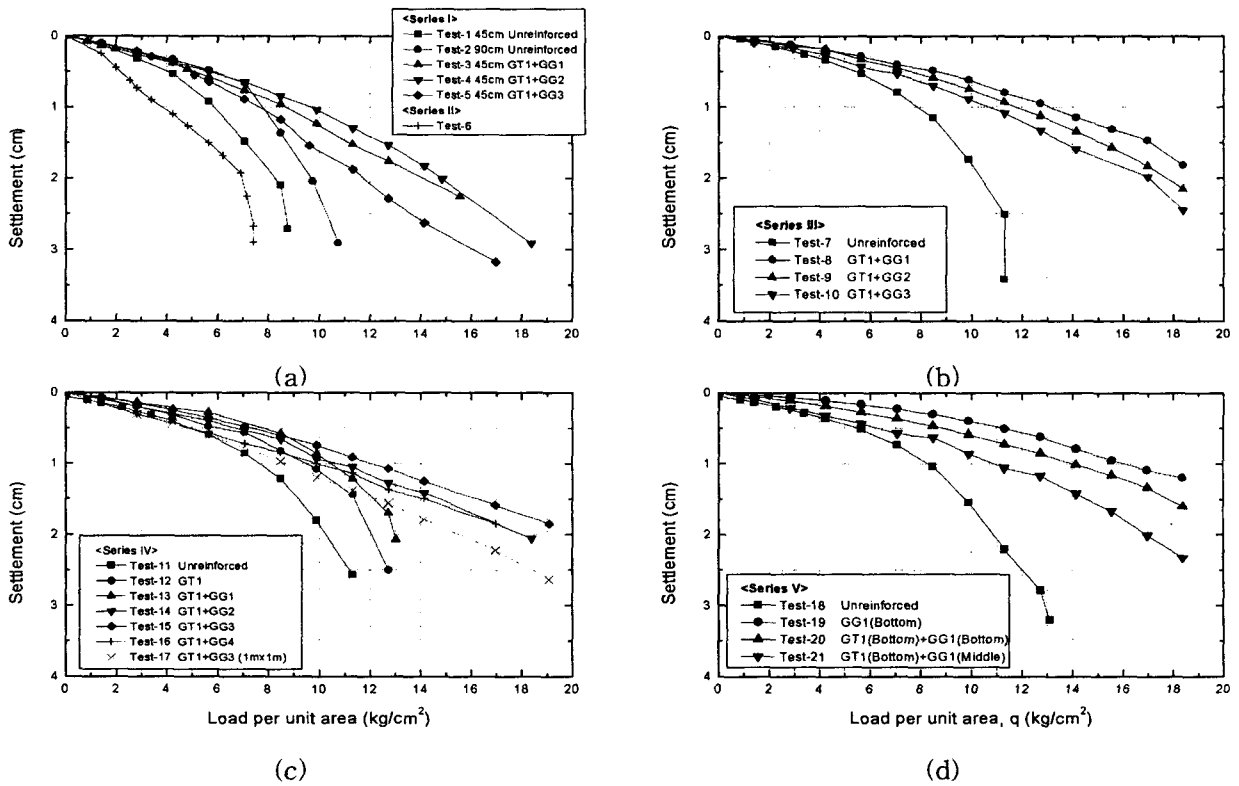


그림 6. 단계별 하중-침하 곡선

#### 4.2 지지력 증가비 (BCR)

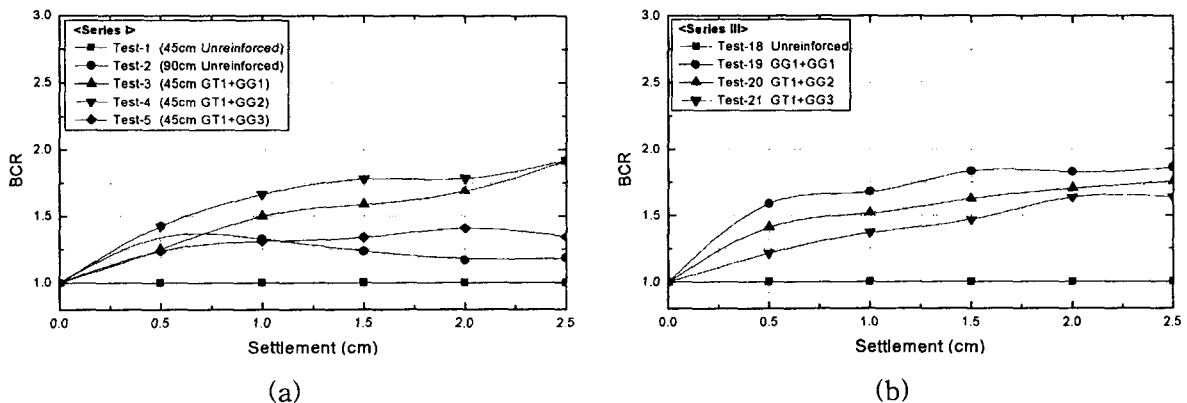
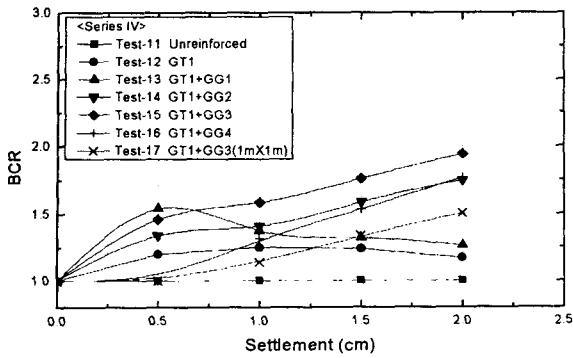
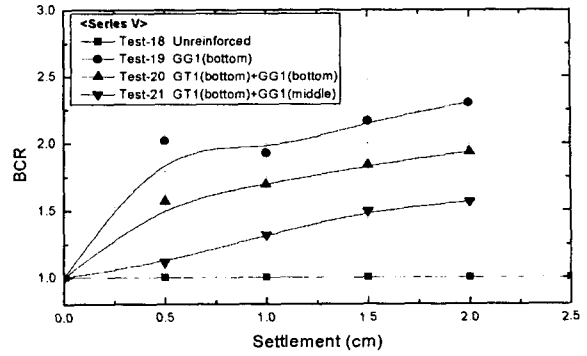


그림 7. 보강조건에 따른 BCR값의 변화



(c)



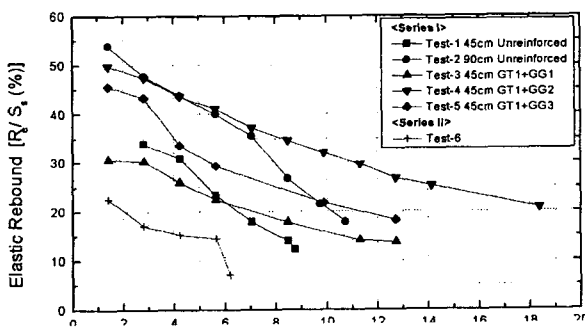
(d)

그림 7. 보강조건에 따른 BCR값의 변화(계속)

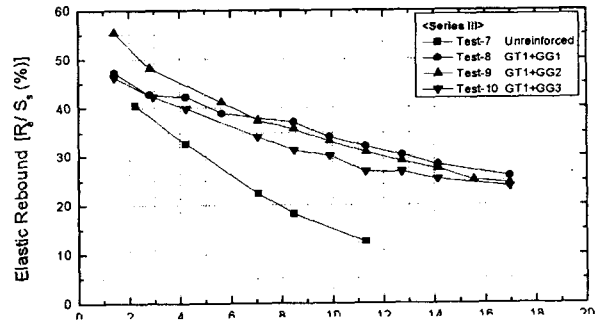
그림 7은 무보강에 대한 보강시 지지력의 증가비율을 침하에 관해 나타낸 것이다. 그림 7(a)에서 단면 두께가 2배인 화강풍화토는 초기 약 0.5cm 침하때까지 지지력의 증가를 보이거나 이후 점차 감소하여 BCR이 1.2이하로 나타났다. 반면에 지오그리드로 보강한 경우에는 꾸준한 증가세를 보였다. 그림 7(c)에서 지오그리드 3장을 각각 2m×2m(Test-15)와 1m×1m(Test-17)로 보강한 경우를 비교해본 결과 0.5cm 침하의 경우 약 31%의 차이를 보이다가 2.5cm 침하시 22%로 줄어드는 경향을 나타내었다.

### 4.3 탄성회복률의 변화

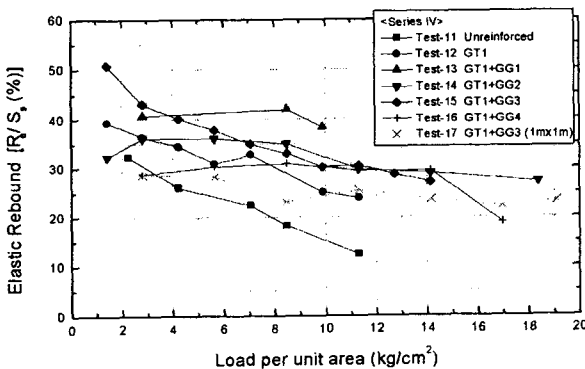
각 하중 단계별 전체 침하량( $S_e$ )과 탄성회복량( $R_e$ )과의 비율을 나타내면 그림 8과 같다. 그림 (c)에서 굵은 골재가 다량 함유된 빈입도 지반의 탄성회복률이 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다.



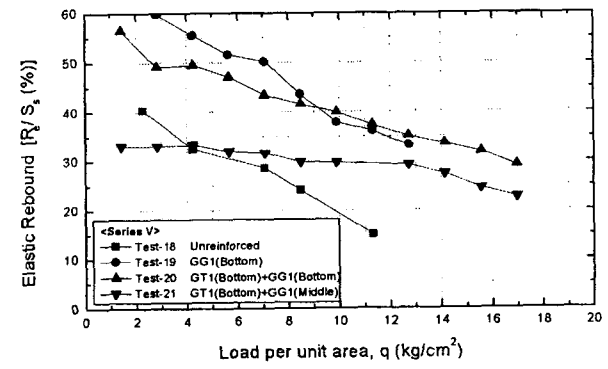
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 8. 탄성회복률의 변화

#### 4.4 지반 탄성 계수의 변화

그림 9는 식 (4)에 의하여 지반탄성계수를 나타낸 그림으로서 지오그리드의 보강 효과 정도인 BCR값의 변화와 같은 경향을 나타내었다. 지오그리드의 보강효과는 복토두께, 성토 재료의 입도(다짐도)와 관계가 있음을 알 수 있다.

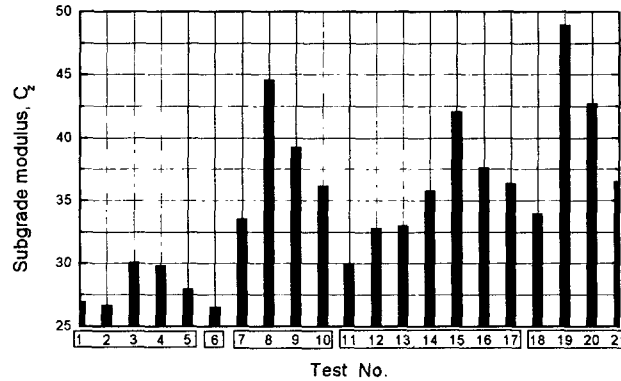


그림 9. 지반 탄성계수의 변화

#### 5. 결론

- (1) 연약지반위 일정한 두께의 성토단면에 대한 지오그리드의 최적 보강 위치는 연약지반과 성토단면 사이라고 할 수 있다.
- (2) 지오그리드 보강에 의한 지지력 증가 효과는 보강층수에 비례하나 상부 복토 두께, 입도분포, 최대 입경, 그리고 다짐조건에 지배된다. 복토 두께가 부족할 경우 특히 하부 지반이 연약할수록 보강 상부에서 반복하중으로 인한 지반의 교란현상이 발생하여 역효과를 일으킬 수 있다.
- (3) 지지력 증가 효과는 화강 풍화토지반의 경우 약 1.0~1.5cm 침하후 1.2~1.75로 수렴하였으며, 보조 기층재로 성토시 대체로 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 단면 별로 최고 2배 정도 크게 나타났다. 상대적으로 굵은 골재를 많이 포함한 지반에서는 탄성회복률이 하중의 크기와 관계 없이 거의 일정하게 유지되었다.
- (5) 지반의 탄성계수로부터 전단 탄성계수를 구할 수 있으며, 이 값은 성토 재료의 종류와 관계 없이, BCR과 같은 경향을 나타내었다.

이상의 결과를 종합하면 지반의 지지력 향상과 탄성거동을 위한 인장강도의 증가효과를 만족하려면 적절한 다짐 및 성토재 입도관리가 필요하다.

#### 감사의 글

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

## 참고문헌

- (1) 신공항 건설공단(1996), 인천국제공항 국제업무 및 행정관리지역 토질 조사 및 지반처리 실시 설계, 신공항 건설공단 연구보고서
- (2) B.M. Das and E.C. Shin(1998), "Ultimate Bearing Capacity of Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand", 4th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development
- (3) B.M Das (1993), Principles of Soil Dynamics, pp151~156, PWS-KENT, Boston, USA
- (4) D.D, Barkan(1962), Dynamics of Base and Foundations, McGraw-Hill Book Company, New York
- (5) 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
- (6) R.M. Koerner (1997), Designing with Geosynthetics, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 4th Ed., pp315~386
- (7) 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