

지오그리드로 보강한 성토지반의 응력분포

Stress Distribution under a Geogrid-Reinforced Soil Pad

이 규 진 ^{*1}	Lee, Kyu-Jin
신 방 웅 ^{*2}	Shin, Bang-Woong
신 은 철 ^{*3}	Shin, Eun-Chul

Abstract

Settlement of shallow foundation is a function of the nature and magnitude of the stress distribution in the underlying soil layer(s) which is transmitted from the soil imposed on the foundation by superstructure. Placing geogrid layers at a shallow depth in soil for reinforcement helps redistribute and reduce the intensity of stress in soil. Field test results for measuring stress in soil below a circularly loaded area at the top of a soil pad reinforced with multiple layers of geogrid are presented. The tests were conducted on reclaimed land at the proposed Incheon International Airport. The stress distribution is a function of the intensity of a load on the foundation, number of geogrid layers used for reinforcement, and thickness of the geogrid-reinforced soil.

요 지

얇은 기초의 침하하는 기초에 가해지는 상재 하중이 지반에 전달될 때 분포되는 응력의 특성과 크기에 관련되어 일어난다. 일반적으로 지반의 보강재로 사용되는 지오그리드로 두께가 작은 토체를 보강하면 지중에 전달되는 응력을 재분포시켜 감소시킨다. 이 논문에서는 현장시험을 통하여 여러 층의 지오그리드로 토체를 보강시 토체 상부에 가해지는 원형 등분포 하중하에서 토체의 응력 분포를 측정하였다. 인천국제 공항 건설 현장의 준설 매립 구간에서 행하여진 이 시험을 통하여, 지오그리드로 보강한 토체의 하중 분포는 기초에 가해지는 하중 강도와, 보강재 포설층수, 토체의 두께의 함수로 나타낼 수 있다.

Keywords : Approximate method, Circular load, Foundation, Geogrid, Stress

1. 서 론

지난 20여년동안 지오그리드와 지오텍스타일은 보강토 옹벽과 제방의 건설시 지반의 보강재로 광범위하게 사용되어 왔다. 최근에는 실내 및 현장 시험을 통하여, 지오그리드로 보강한 지반에 의해 지지되는 얇은 기초의 극한 지지력 및 허용 지지력에 관련된 시험 결과가 발표되었다(Das 외 2인, 1993; Gabr 외 2인, 1988). 또한 허용 하중하에서 얇은 기초의 침하를 줄이기 위

하여 조립질 토체를 지오그리드로 보강하여 건설하려는 시도들이 행하여지고 있다(Webster, 1993).

얇은 기초의 침하를 계산하려면 기초로부터 토층으로 전달되는 연직하중의 분포를 알아야 한다. 따라서, 지반 공학자들은 보강하지 않은 지반에 작용하는 연직 응력의 분포를 주로 Boussinesq의 방정식(Boussinesq, 1883)을 통하여 산출하여 왔다. Boussinesq의 방정식은 탄성론에 입각한 이론으로서, 균질하고 탄성적인 등방성

*1 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 졸업
 *2 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수
 *3 정회원, 인천대학교 공과대학 토목환경시스템 공학과 교수

재료에 정하중 작용시 전달되는 응력 계산을 나타내며 다른 경험적인 방법으로는 일반적으로 널리 사용되는 2:1 분포법이 널리 사용되어 왔다.

현재까지 지오그리드로 보강한 토체에 의하여 지지되는 기초에 하중 작용시 지반에 전달되는 응력의 분포를 계산하기 위한 이론적 또는 경험적인 식이 개발되지 않은 실정이다. 이 논문에서는 인천국제공항 건설 현장에서 실시된 현장 재하 시험결과를 통하여 앞에서 기술한 과제를 해결하고자 한다.

2. 연구 배경

그림 1은 보강하지 않은 연성 지반 표면에 등분포의 원형하중이 작용하는 경우를 나타낸다. 원형 재하 단면의 지름은 B이며, 단위 면적당 작용하는 하중의 크기는 q이다. Boussinesq의 방정식에 의하면, 상재 하중 q에 의한 깊이 z에서의 응력 증가량 (σ_{max})은 식 (1)로부터

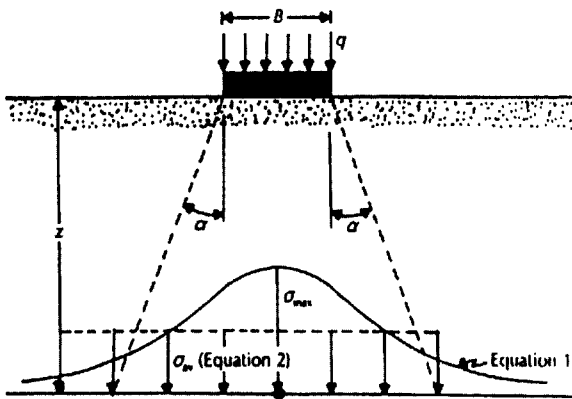


그림 1. 보강하지 않은 지반에 원형 등분포 하중 작용시 응력의 분포

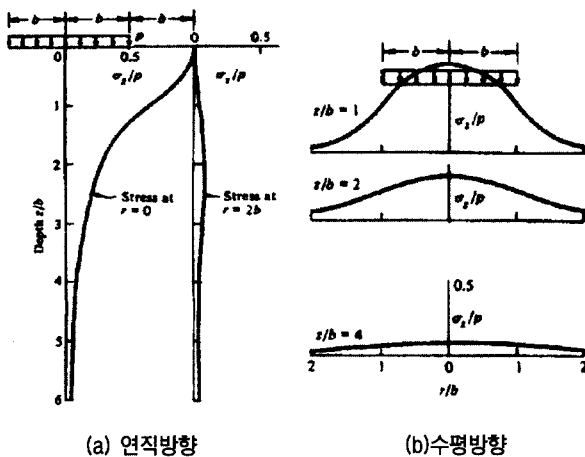


그림 2. 연직 원형하중에 의한 응력 분포

구할 수 있다.

$$\sigma_{max} = q \left\{ 1 - \frac{1}{\left[\left(\frac{B}{2z} \right)^2 + 1 \right]^{1.5}} \right\} \quad (1)$$

앞 절에서 기술한 바와 같이, 기초 아래 z깊이에서의 응력의 평균 증가량 (σ_{av})을 산정하기 위하여 2 : 1 분포법과 같은 근사법들이 사용된다(그림 1 참조). 이 방법에 의하면, 원형단면에 작용하는 하중은 연직선으로부터 α 의 각도를 이루는 경계면을 통하여 균질하게 분포된다. 따라서, 응력분포는

$$\sigma_{av} = \frac{q \left(\frac{\pi}{4} B^2 \right)}{\frac{\pi}{4} (B + 2z \tan \alpha)^2} = \frac{qB^2}{(B + 2z \tan \alpha)^2} \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2는 Perloff(1975)가 제시한 하중 전달 분포도이며, Perloff에 의하면 원형 등분포 하중은 재하 지점 부근에서는 하중 중심 부근에 응력이 집중되지만, z/b가 약 4인 경우(z/B가 2인 경우) 전달된 하중을 등분포 하중으로 볼 수 있다고 발표한 바 있다.

응력 분포의 경계면이 2:1을 이룬다면, α 는 26.56°이다. $\alpha = 26.56^\circ$ 라고 가정하면, z/B에 따른 σ_{av} 식(2)와 σ_{max} 식(1)의 비율은 표 1과 같다. 표 1에 주어진 값에 기초하여, σ_{av}/σ_{max} 의 평균값은 $\sigma_{max}/q \leq 10\%$ 범위에서 0.9로 볼 수 있다.

따라서,

$$\sigma_{av} = 0.9 \sigma_{max} \approx \frac{qB^2}{(B + 2z \tan \alpha)^2} \quad (3)$$

또는,

표 1. σ_{av}/σ_{max} 의 변화

z/B	σ_{max}/q [식(1)]	σ_{av}/q	σ_{av}/σ_{max}
0	1	1	1
0.25	0.911	0.64	0.703
0.50	0.647	0.444	0.686
0.75	0.424	0.327	0.771
1.00	0.285	0.25	0.877
1.50	0.144	0.16	1.00
2.00	0.087	0.111	1.28

$$\alpha \approx \tan^{-1} \left[\frac{\left(\frac{qB^2}{0.9\sigma_{\max}} \right)^{0.5} - B}{2z} \right] \quad (4)$$

Gabr 외 2인(1998)은 모래를 사용하여 실내 모형 시험을 실시하였는데, 단면의 심도별로 토압계를 매설하였으며, 이 시험 결과로부터 지오그리드 보강시 하중 전달각 α 의 값은 일정하지 않으며, q 값이 증가함에 따라 감소한다고 발표하였다. 유사한 방법으로, 그림 3과 같이 지오그리드로 보강된 조립질토체에 놓인 기초에 의한 평균적인 응력 증가값 (σ_{av})을 계산할 수 있을 것이다. 그림 3에서, 원형 재하면의 직경은 B 이다. 지오그리드로 보강된 토체의 전체 두께는 d 이며, 가장 위에 포설된 지오그리드가 하중 재하판 바닥면으로부터 깊이 u 에 위치한다. 연속적으로 포설된 지오그리드 사이의 흙의 두께는 h 이다. 그러므로 전체 토체 두께 d 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = u + (N-1)h \quad (5)$$

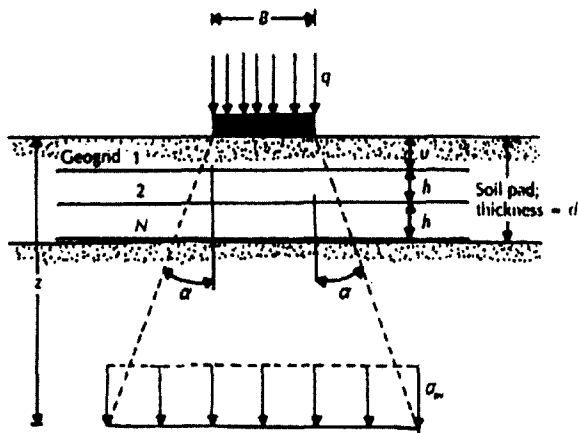


그림 3. 지오그리드로 보강한 지반에 원형 등분포하중 작용시 응력 분포

여기서, N =지오그리드 포설층수
 식 (5)가 σ_{av} 를 구하기 위하여 사용될 수 있다면, σ 값은 다음과 같은 함수의 값으로 볼 수 있다.

$$\sigma = f(u/B, h/B, \text{지오그리드의 강성}) \quad (6)$$

3. 현장 재하 시험

표 2에 표시된 총 6회의 현장 지지력 시험을 인천국제 공항 건설현장에서 준설 매립지역에서 실시하였다. 그림 4는 원지반 흙인 해성점토, 준설토와 성토재료인 조립토의 입도분포를 나타낸다. 그림 5(a)는 하부 지반조건을 나타내며, 시험 1, 2, 3, 4의 조건을 나타낸다. 그림 5(b)는 시험 5와 시험 6의 조건을 나타낸다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 각각의 시험은 조립토체를 다짐하여 상부 유효면적이 $4\text{m} \times 4\text{m}$ 가 되도록 조성하였다. 각각의 시험 단면은 1개층의 지오택스타일을 원지반에 포설한후 조립질재로 성토하여 조성하였다. 포설된 지오택스타일의 단면적은 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 이며 지오그리드는 각각의 조건에

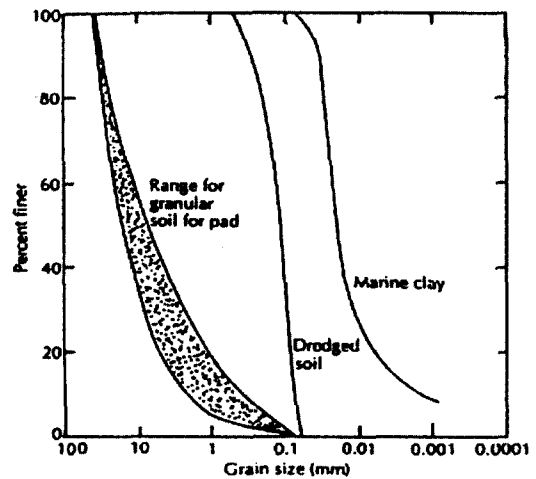
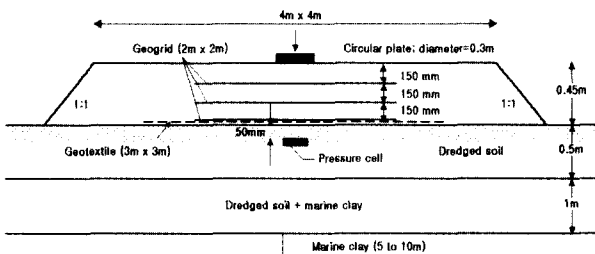
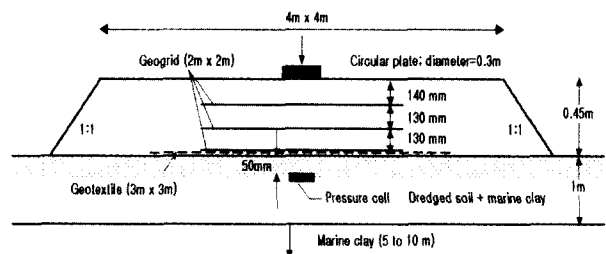


그림 4. 해성점토, 준설토, 성토재의 입도분포



(a) 시험 1, 2, 3, 4



(b) 시험 5, 6

그림 5. 현장 시험 단면도

표 2. 현장 재하시험 조건

시험 번호	z(mm)	z/B	보강조건		
			N	u/B	u/d
1	500	1.67	-	-	-
2	500	1.67	1	1.5	1.0
3	500	1.67	1, 2	1.0	0.67
4	500	1.67	1, 2, 3	0.5	0.33
5	450	1.5	1	1.33	1.0
6	450	1.5	1,2,3	0.47	0.35

따라 2m×2m의 크기로 포설하였다. 표 3은 시험에 사용한 지오텍스타일과 지오그리드의 물리적 특성을 나타낸다. 하중은 직경 0.3m 크기의 재하판을 사용하여 각각의 시험에 대하여 단계별로 재하하였다. 재하판의 중심 직하에 전달되는 하중의 분포를 측정하기 위하여 성토 바닥면에 직경 50mm 크기의 토압계를 매설하였다 (그림 5).

4. 시험 결과

재하판에 가해진 단위 면적당 하중 (q)과 하중재하에 따라 토압계에 전달된 순응력 증가량은 그림 6과 같다. 시험시 토압계는 재하판의 중앙 직하에 설치하였으므로, 토압계에 측정된 토압을 σ_{max} 로 볼 수 있다. 그림 6으로부터 임의의 보강 조건에서 σ_{max} 의 값은 재하 하중 (q)이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 또한, 주어진 q 값에 대하여, σ_{max} 의 값은 보강층수가 증가할수록 감소하였다.

이와 같은 q 와 σ_{max} 의 값으로부터 식(4)를 이용하면, 각각의 시험에 대한 α 값을 계산할 수 있으며 그 결

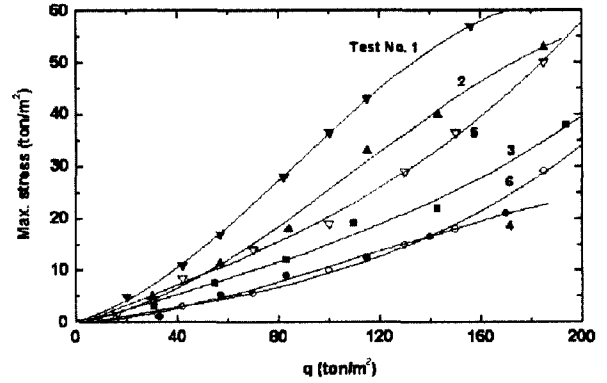


그림 6. σ_{max} 와 q 의 관계

과를 이용 $q - \alpha$ 그래프를 그리면 그림 7과 같다. 이 그래프를 보면, 임의의 시험에서 α 값은 q 값이 증가함에 따라 감소하며, $q = 100 \sim 160 \text{ ton/m}^2$ 에서 일정하게 수렴함을 알 수 있다.

지오그리드를 보강하지 않은 단면 조건의 경우 시험 1에서, α 값은 $q = 20 \text{ ton/m}^2$ 일 때 23°에서 $q = 100 \text{ ton/m}^2$ 일 때 12°로 감소함을 알 수 있다. 시험 2, 3, 4는 h/B , d/B , 그리고 z/B 등이 같은 유사한 지반에서 실시되었다. 이 시험에서 지오그리드의 포설층수가 증가할수록 즉, u/B 가 감소할수록 임의의 q 에 대한 α 값이 증가하였다. 시험 2와 같이 지오그리드를 1층 보강하고 h/B , d/B , 그리고 z/B 등의 값을 작게 변화시킨 시험 5의 결과, α 값은 시험 2에 의한 값보다 크게 나타났음을 알 수 있다.

또한, 같은 보강조건으로 시험한 시험 4와 6의 경우는 시험 6의 경우 u/B 의 값이 시험 4의 경우보다 작으나 원지반이 좀 더 연약한 상태로서 지오그리드의 변형이

표 3. 시험에 사용된 토목섬유의 재료 특성

특성	지오그리드	지오텍스타일
고분자 형식	폴리프로필렌	폴리에스테르
제조 형식	양축 방향 신장	부직포
제품 표준 크기	4m×50m	8.5m×50/100m
단위면적당 질량(g/m²)	650	700
두께(mm)	6.5(Junction)	4.5
최대 인장강도 (tonf/m)	MD : 3.75; CD: 4.08	1.745
최대 신장율(%)	MD : 10.1; CD: 12.4	50-120
2% 신장시 인장강도(tonf/m)	MD : 2.02; CD: 1.41	-
5% 신장시 인장강도(tonf/m)	MD : 3.23; CD: 2.75	-
격자 크기 (mm)	34(MD)×27(CD)	-
카본 블랙 함유량(%)	2	-

주) MD—machine direction; CD—cross machine direction

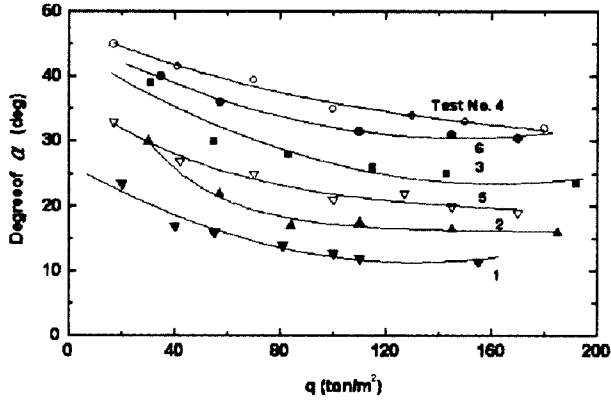


그림 7. α 와 q 의 관계

보다 많이 일어난 결과로 추정된다.

Gabr 외 2인(1998)은 모래를 사용한 실내 시험에서 $0.3m \times 0.3m$ 크기의 정방형 재하판을 사용하여 지지력 시험을 하였으며, 재하판 중심 직하에서 토압을 측정하였다. 이 시험에서, $u/B=0.5 \sim 1$, $h/B=1$, 그리고 d/B 는 $2.5 \sim 3$ 이었다. 시험결과에 의하면 임의의 q 에 대한 α 의 변화는 본 논문의 연구 결과와 유사하다.

그러나, Gabr 외 2인(1998)의 실험 결과 α 값은 본 논문의 결과보다 훨씬 작은 것으로 발표하였으며, 이는 실내 시험에서는 일반적으로 지오그리드를 사용하는 경우, 현장에서 직접 시행하는 경우보다 상대적으로 연약 지반에 지오그리드를 포설하는 경우와 다르기 때문에 충분한 지오그리드의 발현이 일어나지 않기 때문으로 판단된다.

5. 결론

지오그리드로 보강한 조립질토층의 상부에 놓인 등분포 원형 하중에 의해 전달되는 응력을 측정, 분석하기 위하여, 연약지반의 준설 매립지역에 시공중인 인천국제공항 건설부지에서 현장 재하시험을 실시하였다. 이 실험에서는 원형재하판의 중심 직하에 전달되는 응력을 측정하므로써 일반적으로 사용되는 2:1 하중분포법 등과 같은 평균응력 분포를 재분석하였다. 이 연구에서는, 연직 하중 재하시 분포되는 평균응력 (σ_{av})에 대하여 응력이 전달되는 하부지역을 결정하는 α 값과 관련시켜 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) 임의의 보강 조건에서, α 값은 재하판에 가해진 단위 면적당 하중이 증가함에 따라 감소하며 각각의

시험 조건에서 하중이 $q=100 \sim 160 \text{ ton/m}^2$ 일때, 일정하게 수렴한다.

- (2) d/B 가 일정한 임의의 토층에서, 보강재의 포설층수가 증가함에 따라 즉 u/B 가 감소함에 따라, α 값은 함께 증가하며 같은 조건에서 지오그리드 1층을 더 보강함에 따라 α 값이 약 10° 정도 증가하며 하중의 증가에 따라 감소율도 일정한 것으로 나타났다.
- (3) 지오그리드 보강 효과의 경우와 마찬가지로, 보강에 따른 하중분포 각도 α 값의 증가는 원지반이 연약할수록, u/B 가 어느 정도까지 작을 경우, 하중에 보다 효과적으로 작용하는 것으로 나타났다.

※ 기 호

B = 재하판의 직경(m)

d = 재하판 바닥으로 부터 보강재 포설심도(m)

h = 지오그리드 포설 연직 간격(m)

N = 지오그리드 포설층수

q = 재하판에 가해진 단위 하중의 크기(t/m^2)

u = 재하판 바닥과 최상부 지오그리드의 연직 간격(m)

z = 재하판 바닥면으로부터의 심도(m)

참고 문헌

1. 신은철, 김두환, 이상조, 이규진, 1999, "반복평판재하시험을 통한 지오그리드 보강지반의 거동 특성," '99 가을 학술발표회 논문, 사단법인 한국지반공학회, pp. 285-292.
2. Boussinesq, J., 1883, Application des Potentials á L'Etude de L'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques, Gauthier-Villars, Paris.
3. Das, B. M., Khing, K. H., & Shin, E. C., 1993, Stabilization of weak clay with strong sand and geogrid at sand-clay interface, Transportation Research Record 1611, National Research Council, Washington, D.C. : 55-64.
4. Gabr, M. A., Dodson, R., and Collin, J. G., 1988, "A Study of Stress Distribution in Geogrid-Reinforced Sand," Geosynthetics in Foundation Reinforcement and erosion Control System, Geotechnical Special Publication No.76, ASCE, pp. 62-76
5. Perloff, W.H., 1975, Pressure distribution and settlement, Foundation Engineering Handbook, H. F. Winterkorn and H. Y. Fang, eds., Chapter 4, Van Nostrand Reinhold, New York, N.Y.
6. Webster, S.L., 1993, "Geogrid Reinforced Base Courses for Flexible Pavements for Light Aircraft".

(접수일자 2000. 12. 27)