

기초의 근입깊이를 고려한 지오그리드 보강 사질토지반의 지지력 평가 Bearing Capacity of Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand With Embedment Depth

신은철¹⁾, Eun Chul Shin, 신동훈²⁾, Dong Hoon Shin, 오영인³⁾, Young In Oh

¹⁾시립 인천대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

²⁾시립 인천대학교 대학원 토목공학과 석사과정, M. S. Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

³⁾시립 인천대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Ph. D. Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

SYNOPSIS : The laboratory tests on geogrid-reinforced sand were conducted with considering embedment effect. The relative densities of sand are 60% and 80%, respectively. The embedment depths of foundation were varied as $D_f/B=0, 0.5, 1.0$. Based on the model test results, $(u/B)_{cr}$, BCR_u , and $(b/B)_{cr}$ were determined. The optimum depth of reinforcement was determined. The embedment depth of foundation is greatly contributed on the bearing capacity of geogrid-reinforced sand.

Key words : geogrid-reinforced, strip foundation bearing capacity, embedment depth, bearing capacity ratio

1. 서론

토목섬유(Geosynthetics)는 1970년대 초기 주로 토사의 세굴방지 및 여과의 목적으로 사용된 이래로 토목 구조물의 설계 및 시공에 있어서 타 공법에 비해 저렴한 비용과 시공의 용이성 등으로 인하여 전세계적으로 연간 10억 m^2 이상의 사용량을 보이고 있으며, 그 사용량은 점차 증가하고 있다. 이러한 추세에 따라 국내에서도 각종 구조물을 지지하는 지반의 보강에 있어서 토목섬유를 활용하려는 움직임이 고조되고 있다. 구조물 설계에 있어서 기초를 지지할 지반의 지지력 특성을 파악하는 것은 매우 중요하며, 기초의 종류, 설치방법과 형상등에 다른 영향 또한 기초의 지지력에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 지오그리드 보강 사질토지반에 축조된 얇은 기초의 지지력에 대하여 실내모형실험을 통한 연구를 수행하였다.

지오그리드로 보강된 사질토지반의 지지력 및 침하에 관한 연구는 여러 연구자들에 의하여 실시되어 왔다. 그러나 지오그리드 제품의 특성 차이, 상대밀도(D_r)에 따른 지지력 차이 그리고 모델 실험시 실제 스케일(scale)에 의한 영향 등으로 인하여 합리적인 설계인자를 구하는 것이 쉽지 않으며, 기초의 근입깊이(D_f)에 따른 지지력 특성에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 모형실험을 통하여 지오그리드로 보강된 사질토 지반의 지지력 및 침하 특성을 살펴봄으로써, 실제 지반공학적 문제의 적용에 있어서 합리적이고 경제적인 설계인자를 도출하였다.

2. 연구내용 및 범위

사질토 지반에 축조된 줄기초의 지지력 특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 무보강 상태일 때와 지오그리드로 보강했을 때의 지지력 및 침하 특성을 분석하였다. 지반조성에 사용된 시료는 주문진 표준사를 사용하였으며, 지반조성 시 다짐도는 상대밀도(D_r) 60%와 80%에 대하여 실험을 실시하였다. 지오그리드는 양축방향 연신강성지오그리드를 사용하였으며, 모델기초의 폭을 B , 지오그리드의 포설 폭을 b , 기초 아래 첫 번째 보강층의 심도를 u 그리고 모델기초의 근입깊이를 D_f 라 하면, D_f/B 가 각각 0, 0.5, 1일 때 무보강 그리고 지오그리드의 층수를 1~6층까지 변화시켜가면서 지반을 조성하여 지반의 지지력 및 침하특성을 연구하였다. 또한 첫 번째 보강층의 최적심도비(u/B)_{cr}를 결정하기 위하여 0, 0.25, 0.6, 0.8로 변화를 주었고, 지오그리드의 최적포설폭비(b/B)_{cr}를 결정하기 위하여 2~10까지 변화시켜가면서 실험을 실시하였다.

3. 시험방법

3.1 지오그리드

일반적으로 지오그리드는 폴리프로필렌(PP)이나 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)을 소재로 한 판상(강성) 지오그리드와 폴리에틸렌 PET로서 양축 방향연신인 Biaxial 지오그리드와 일축 방향연신인 Uniaxial 지오그리드가 있다. Biaxial 지오그리드는 주로 연약지반 보강용으로서 도로, 포장, 구조물 및 절·성토 보강용으로 사용되며, Uniaxial 지오그리드는 보강토 옹벽, 급사면 축조 및 초연약지반 보강용으로 사용된다. 또한 지오그리드의 방향은 생산라인의 방향에서 롤(Roll)이 진행되는 방향이 MD(Machine direction)이고, 이와 직교하는 방향이 TD(Transverse direction)이다. 각 지오그리드의 형상을 그림 3.1과 3.2에 나타내었다. 본 연구에 사용된 지오그리드는 테낙스(Tenax)사 제품으로서 지지력 시험에서는 모형실험의 Scale Effect를 고려하여 최대인장강도가 가장 작은 지오그리드(그림 3.1)를 사용하였으며, 지오그리드의 물리적 특성은 표 3.1에 나타낸 바와 같다.

표 3.1 지오그리드 물리적 특성

특성 제품	구조	재질	단위중량 (g/m^2)	제품 사이즈 (m)	최대 인장강도 (KN/m)		최대신장율 (%)		5% 신장시 인장강도 (KN/m)	
					TD	MD	TD	MD	TD	MD
LBO210	양축신장 격자구조	PP	230	4×100	20.5	14.5	13.0	16.0	15.0	9.5

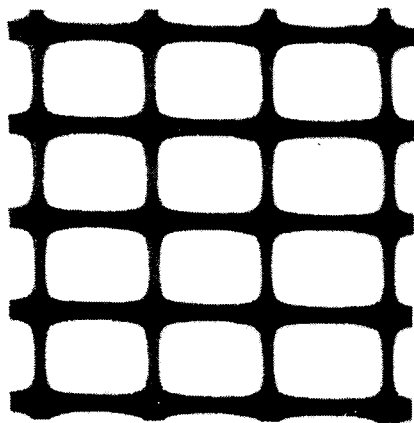


그림 3.1 양축방향 연신 지오그리드

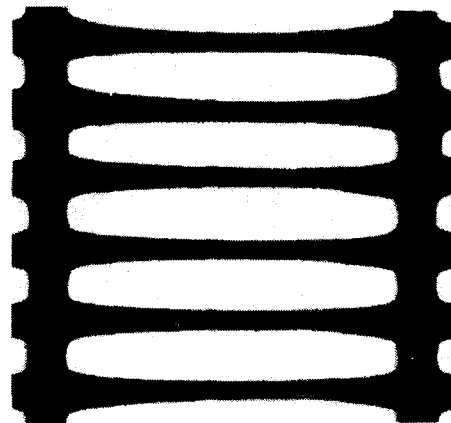


그림 3.2 일축방향 연신 지오그리드

3.2 주문진 표준사

지지력 시험에 사용된 시료는 주문진 표준사로서 공학적 특성을 분석하기 위하여 기본물성시험을 실시하였다. 비중시험 결과, 주문진 표준사의 비중(G_s)은 2.65로서 일반적인 사질토의 비중 값을 보여주었으며, 표준사의 입도분포시험 결과, 유효입경(D_{10})은 0.375mm이고, 균등계수(C_u)는 1.53, 곡률계수(C_c)는 1.10으로 통일분류법(USCS)에 의하여 입도가 불량한 모래인 SP로 판별되었다. 또한 최대간극비(e_{max})와 최소간극비(e_{min})를 얻기 위한 진동테이블(Shaking Table)시험결과 각각 0.91, 0.48로 나타났다. 상기의 기본물성시험 결과는 표 3.2에 나타낸 바와 같으며, 그림 3.3은 주문진 표준사의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

표 3.2 주문진 표준사의 공학적 특성

물성치	결과
유효입경(D_{10})	0.375(mm)
균등계수(C_u)	1.53
곡률계수(C_c)	1.10
최대간극비(e_{max})	0.91
최소간극비(e_{min})	0.53
비중(G_s)	2.65
통일분류법 USCS	SP

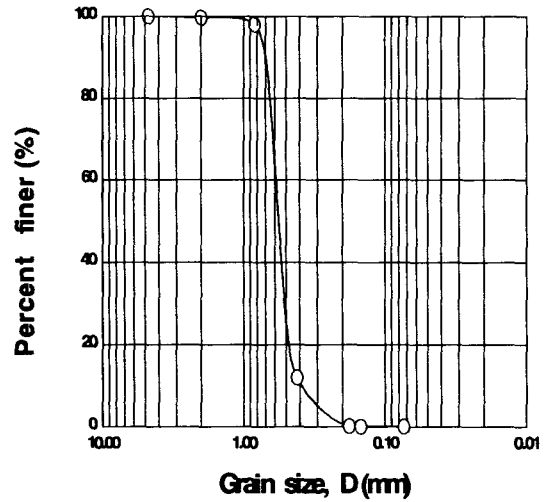


그림 3.3 주문진 표준사의 입도분포곡선

3.3 지지력 시험

3.3.1 지지력 시험장치

본 연구에 사용된 토조는 폭 17.4cm, 길이 93cm 그리고 높이 55cm의 모형토조로서 전면판은 하중재하시 지반의 파괴 메카니즘을 관찰하기 위하여 두께 20mm의 투명 아크릴로 구성되었다. 벽면 마찰을 최소화하기 위하여 각 안쪽 벽면에 표면조도가 매우 작은 유광 시트지를 부착하였으며, 하중 재하시 발생하는 토조의 변형을 줄이기 위하여 토조 상부에 고정판을 설치하였다.

실험에 사용된 기초는 하중 재하시 목재의 변형을 방지하기 위하여 상부에 두께 1cm의 알루미늄 판이 부착된 줄기초이며, 크기는 폭(B) 6.7cm, 길이(L) 17cm 그리고 높이(H) 7.7cm이다. 기초의 길이는 평면 변형을 고려하기 위하여 토조의 폭 보다 4mm작은 길이로 6.7cm 제작하였고, 기초 상부에 부착된 알루미늄판 중심에 하중 재하시 편심을 받지 않도록 원형 홈을 내었다. 또한 바닥면의 조도를 고려하기 위하여 모래를 접착하였다. 줄기초의 모식도는 그림 3.4에 나타낸 바와 같다.

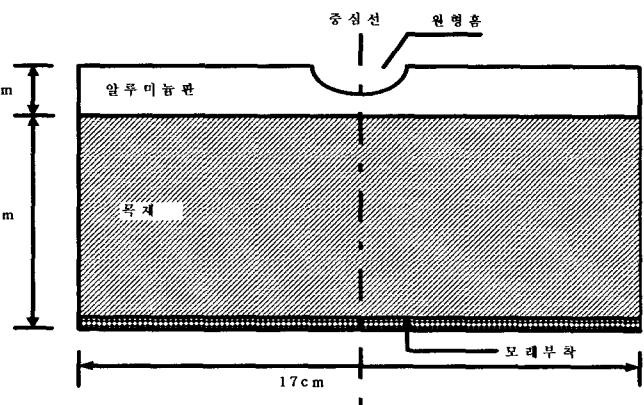


그림 3.4 줄기초(Strip Foundation)의 모식도

실내모형 지지력시험은 재하시험용 보강프레임에서 실시하였으며, 재하하중 측정을 위한 로드셀(Loadcell)의 최대허용하중은 5ton이고, 하중재하는 최대압력이 58ton인 유압실린더를 사용하였다. 하중 재하 속도는 2mm/min로 하였으며, 실린더 속도제어와 유압의 흐름속도제어를 동시에 사용하였다. 또한 침하량 측정은 0.01mm의 정밀도를 지닌 다이얼 게이지를 기초의 양측에 부착하여 측정된 값을 평균하여 사용하였다. 그림 3.5와 3.6는 지지력 실험장치를 보여주고 있다. 일반적으로 사질토의 지반조성에서는 균질한 지반을 갖도록 강사법(Raining Technique)이 사용되고 있다. 본 연구에서는 요구되는 상대밀도의 지반 조성을 위하여 일정한 높이에서 강사를 실시하였으며, 주기적으로 캔에 채워진 모래 량을 확인함으로써 요구된 밀도의 지반 균질도를 맞추었다.

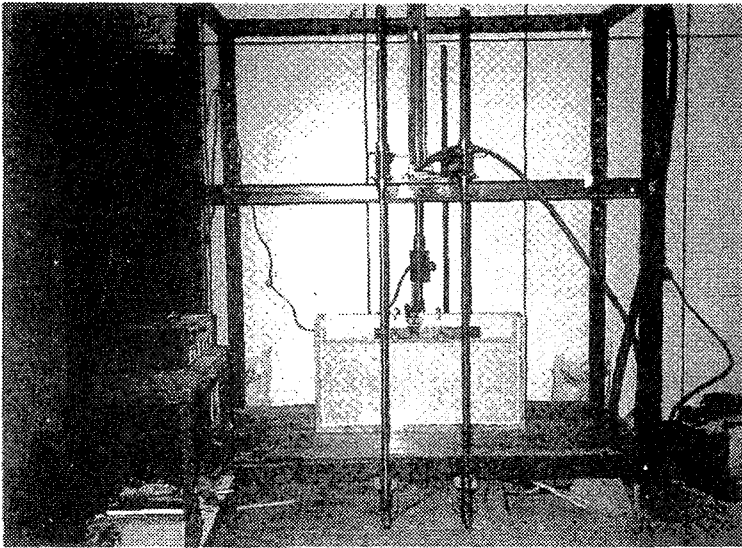


그림 3.5 지지력 실험 장치 전경

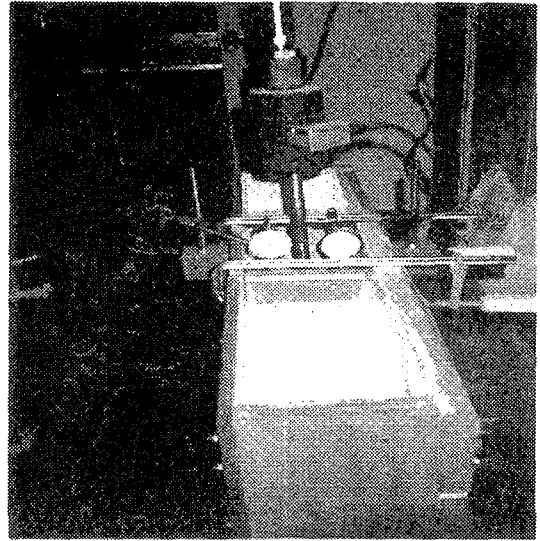


그림 3.6 지지력 실험 장치 설치

3.3.2 지지력 시험방법

본 연구의 지반조성 및 실험장치의 모식도는 그림 3.7에 나타내었으며, 지반조성에 사용된 상대밀도(D_r)는 60%와 80%이다. 모델기초의 폭을 B , 지오그리드의 포설 폭을 b 그리고 모델기초의 근입깊이를 D_f 라 하면 D_f/B 가 각각 0, 0.5, 1 일 때 무보강 그리고 지오그리드의 층수를 1~6 층까지 변화시켜가면서 지반을 조성하여 지반의 지지력 및 침하특성을 연구하였다. 이 때 보강심도(d)는 기초 저면으로부터 보강층수(N)에 따른 보강깊이(d)를 나타내고 있으며, 식 3.1로 나타낼 수 있다.

$$d = u + (N-1) h \quad (3.1)$$

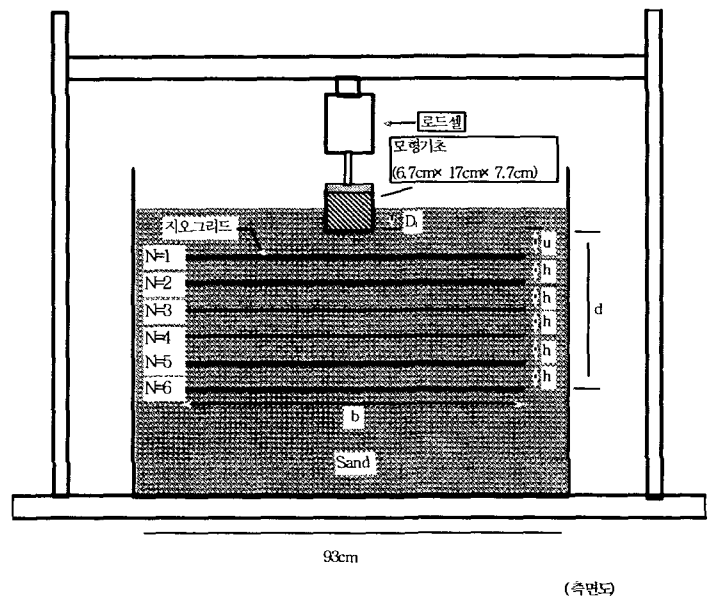


그림 3.7 실내 지지력시험 모식도

4. 실험결과 및 분석

4.1 무보강 사질토지반의 극한지지력

지오그리드의 포설에 따른 보강효과를 분석하기 위하여 가장 먼저 무보강 사질토지반의 극한지지력을 상대밀도(D_r) 60%, 80%일 때에 대하여 실험을 실시하였다. 무보강 사질토지반의 하중재하시험에 따른 실험결과는 표 4.1에 나타낸 바와 같으며, 그림 4.1은 하중-침하 곡선을 나타낸 것이다. 무보강 사질토 지반에서는 모든 경우에 대하여 기초의 폭에 대한 침하비(S/B)가 14%~18% 사이에서 명확한 극한점을 보인 다음 침하비(S/B)가 커질수록 지지력은 감소하는 경향을 보여주었다. 한편 상대밀도가 증가할수록 그리고 근입깊이비(D_f/B)가 증가할수록 더 작은 침하비(S/B)에서 극한점을 나타내었다. 또한 상대밀도가 큰 촘촘한 지반보다 상대밀도가 작은 느슨한 지반일수록 근입깊이비(D_f/B)가 증가할 때, 극한지지력비(BCR_u)는 더욱 증가하는 것으로 나타났다.

표 4.1 무보강 사질토 지반의 근입 깊이비에 따른 BCR_u

D_r (%)	D_f/B	q_u (kg/cm^2)	$(S/B)_{cr}$ (%)	BCR_u
60	0	0.335	16.6	-
	0.5	0.448	16.4	1.46배
	1.0	0.555	14.2	1.66배
80	0	0.448	16.3	-
	0.5	0.597	15.3	1.33배
	1.0	0.621	13.8	1.39배

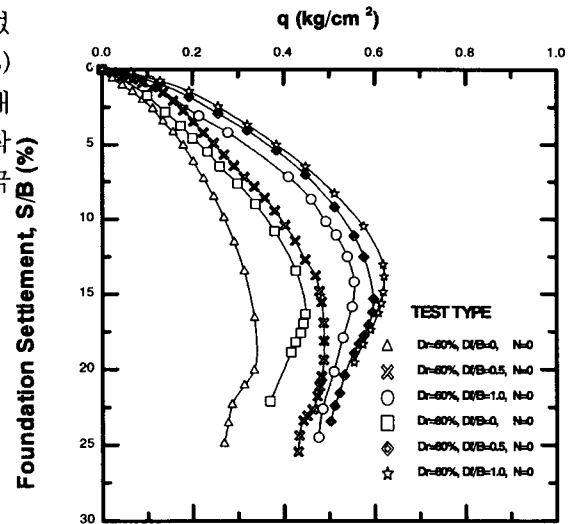


그림 4.1 무보강사질토 지반의 하중-침하곡선

4.2 첫 번째 보강층의 최적심도비 (u/B)_{cr} 결정

기초 저면으로부터 첫 번째 보강층의 최적심도비를 결정하기 위하여, 본 연구에서는 사질토 지반의 상대 밀도(D_r)를 60%로 조성하여 첫 번째 지오그리드의 최적 포설심도(u)를 결정하였다.

지오그리드의 보강층은 1층으로 하였으며, 지오그리드의 폭(b)은 충분한 인장력을 갖도록 b/B 를 8로 하고, u/B 를 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8로 변화시켜서 실험을 수행하였다. 본 실험의 결과를 그림 4.2에 나타내었다. 첫 번째 보강심도비 (u/B)에 따른 극한 지지력비(BCR_u)는 u/B 가 0.4일 때 최대 지지력 값을 나타내다가 심도가 깊어질수록 보강효과가 점차 감소하는 경향을 보여주었다. 따라서 첫 번째 보강층의 최적심도비(u/B)_{cr}는 0.4로 결정하였으며, 이때 첫 번째 최대 보강심도비(u/B)_{max}는 약 0.6으로 나타났다.

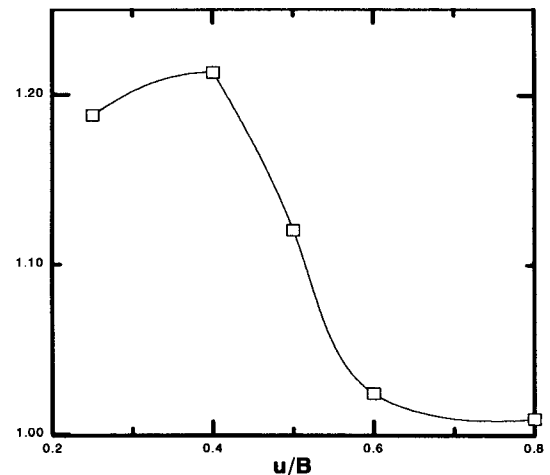


그림 4.2 첫 보강층의 심도비에 따른 극한 지지력비

4.3 지오그리드의 최적포설폭비 (b/B)_{cr} 결정

상대밀도(D_r) 60%의 사질토 지반에 대하여 결정된 최적심도비 (u/B)_{cr}=0.4의 위치에서 포설폭비(b/B)를 2, 4, 6, 8, 10으로 변화를 주어 1층의 지오그리드를 보강한 후 실험을 수행하였다. 그림 4.3은 포설폭비(b/B)에 따른 극한지지력비(BCR_u)를 나타낸 것이며, 이 결과에 따른 극한지지력비(BCR_u)의 증가율을 표 4.2에 나타내었다. 그림 4.3와 표 4.2에 나타난 바와 같이 포설폭비(b/B)가 4일 때 극한지지력비가 급격히 증가하여 6이상이면 증가폭이 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지오그리드의 최적포설폭비(b/B)_{cr}를 6으로 결정하였다.

표 4.2 포설폭비(b/B)에 따른 BCR_u의 증가율

(b/B)	(BCR _u)	(BCR _u)의 증가율 (b/B=2)
2	1.113	-
4	1.192	1.071 배
6	1.206	1.084 배
8	1.213	1.090 배
10	1.221	1.097 배

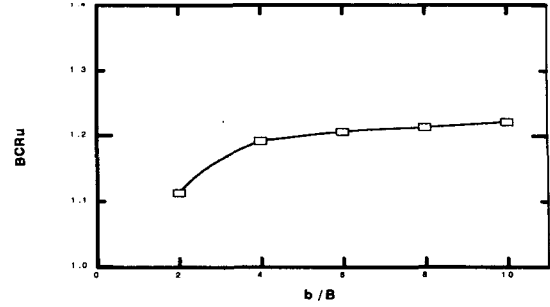


그림 4.3 포설폭비(b/B)에 대한 (BCR_u)

4.4 상대밀도(D_r) 60%일 때, 근입깊이비(D_f/B)에 따른 지지력

사질토 지반의 상대밀도(D_r)가 60%일 때, 근입깊이비(D_f/B)와 보강층수(N)에 따른 지지력시험결과는 표 4.3에 나타난 바와 같으며, 각각의 근입깊이비에 대한 하중-침하관계곡선은 그림 4.4(a), (b), (c)에 나타난 바와 같다.

표 4.3 근입깊이비와 보강층수에 따른 극한지지력 및 극한지지력 증가비 (D_r = 60%)

종류	보강층수(N)							
	0	1	2	3	4	5	6	
D _f /B=0	q _u (kg/cm ²)	0.335	0.370	0.425	0.625	0.707	0.79	0.807
	BCR _u	-	1.10	1.27	1.87	2.11	2.36	2.41
D _f /B=0.4	q _u (kg/cm ²)	0.488	0.550	0.696	0.957	1.185	1.33	1.45
	BCR _u	-	1.13	1.43	1.96	2.43	2.73	2.97
D _f /B=1.0	q _u (kg/cm ²)	0.555	0.651	0.864	1.110	1.435	1.685	1.830
	BCR _u	-	1.17	1.56	2.00	2.59	3.04	3.31

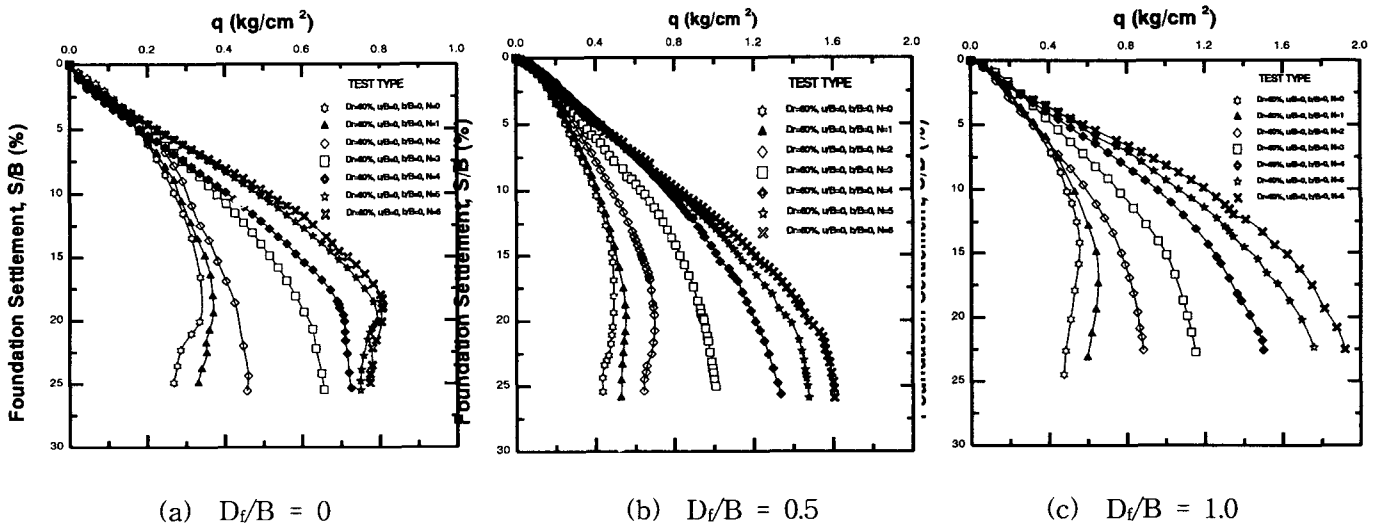


그림 4.4 근입깊이비에 따른 하중-침하관계곡선 (D_r = 60%)

상대밀도(D_r) 60%일 때, 근입깊이비(D_f/B)에 따른 실험결과, 극한지지력을 나타내는 극한침하비(S/B)_{cr}는 19~20%일 때 나타났으며, 보강층수(N)가 3~4일 때 무보강에 비하여 극한지지력비(BCR_u)의 증가 효과가 가장 큰 증가폭을 나타내었다. 또한 보강층수가 5층까지는 계속된 지지력 증가를 보이다가 보강층수(N)가 6층일 때는 보강심도(d)가 상부하중에 의한 영향범위에서 벗어나기 때문에 지지력의 증가폭이 작아지는 경향을 나타내었다.

4.5 상대밀도(D_r) 80%일 때, 근입깊이비(D_f/B)에 따른 지지력

사질토 지반의 상대밀도(D_r)가 80%일 때, 근입깊이비(D_f/B)와 보강층수(N)에 따른 지지력시험결과는 표 4.4에 나타난 바와 같으며, 각각의 근입깊이비에 대한 하중-침하관계곡선은 그림 4.5(a), (b), (c)에 나타난 바와 같다.

표 4.4 근입깊이비와 보강층수에 따른 극한지지력 및 극한지지력 증가비 ($D_r = 80\%$)

종류		보강층수(N)						
		0	1	2	3	4	5	6
$D_f/B=0$	q_u (kg/cm^2)	0.448	0.470	0.540	0.636	0.768	0.830	0.901
	BCR_u	-	1.05	1.21	1.42	1.71	1.85	1.98
$D_f/B=0.4$	q_u (kg/cm^2)	0.597	0.680	0.820	1.026	1.240	1.410	1.520
	BCR_u	-	1.14	1.37	1.72	2.08	2.36	2.54
$D_f/B=1.0$	q_u (kg/cm^2)	0.621	0.850	1.040	1.240	1.540	1.770	1.910
	BCR_u	-	1.34	1.67	1.72	2.00	2.85	3.08

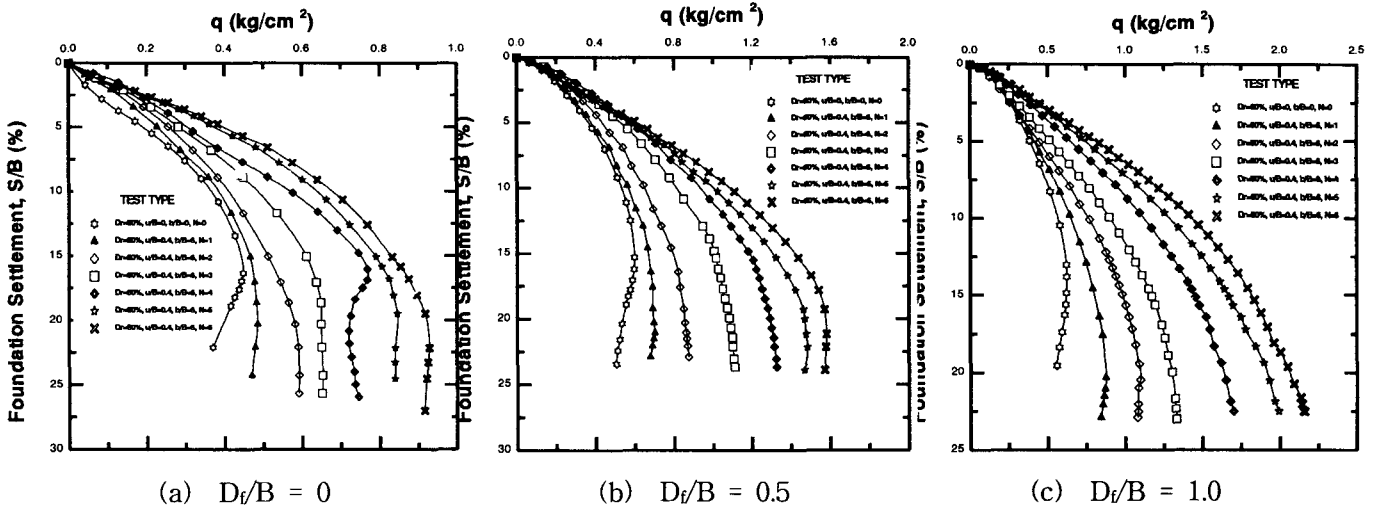


그림 4.5 근입깊이비에 따른 하중-침하관계곡선 ($D_r = 80\%$)

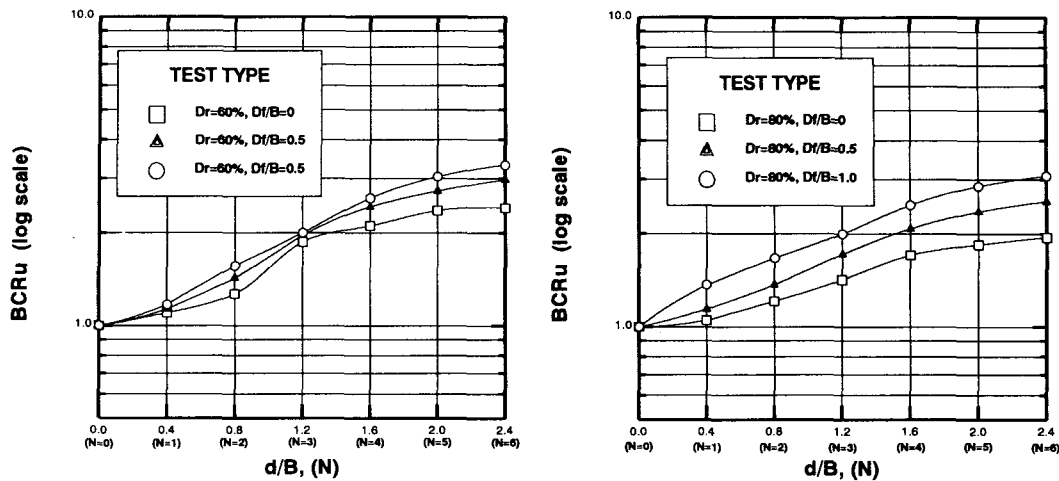
상대밀도(D_r) 80%일 때, 근입깊이비(D_f/B)에 따른 실험결과, 극한지지력을 나타내는 극한침하비(S/B) $_{cr}$ 는 16~18%일 때 나타났으며, 보강층수(N)가 3~4일 때 무보강에 비하여 극한지지력비(BCR_u)의 증가 효과가 가장 큰 증가폭을 나타내었다.

4.6 지오그리드의 최적 보강깊이비(d/B) $_{cr}$

최적 보강심도비(d/B) $_{cr}$ 를 결정하기 위한 실험 결과로서 상대밀도 60%, 80%일 때, 근입깊이비(D_f/B)에 따른 보강층수(N) 및 보강심도비(d/B)-극한지지력비(BCR_u)의 관계는 표 4.5에 나타난 바와 같으며, 극한지지력비 변화곡선은 그림 4.6(a), (b)에 나타난 바와 같다. 전체적으로 보면 상대밀도가 작은 느슨한 사질토 지반일 때 지지력의 증가 효과가 크다는 것을 알 수 있으며, 보강층수(N)가 5이상 일 때 극한지지력비(BCR_u)의 증가폭이 줄어들음을 알 수 있다.

표 4.5 근입깊이비에 따른 보강층수 및 보강심도비-극한지지력비의 관계

보강층수(N)	보강심도비(d/B)	극한지지력비(BCR_u)					
		$D_f/B=0$		$D_f/B=0.5$		$D_f/B=1.0$	
		$D_r=60\%$	$D_r=80\%$	$D_r=60\%$	$D_r=80\%$	$D_r=60\%$	$D_r=80\%$
0	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	0.4	1.10	1.05	1.13	1.14	1.17	1.37
2	0.8	1.27	1.21	1.43	1.37	1.56	1.67
3	1.2	1.87	1.42	1.96	1.72	2.00	2.00
4	1.6	2.11	1.71	2.43	2.08	2.59	2.48
5	2.0	2.36	1.85	2.73	2.36	3.04	2.85
6	2.4	2.41	1.95	2.97	2.55	3.31	3.08



(a) $D_r = 60\%$

(b) $D_r = 80\%$

그림 4.6 보강심도비(d/B) 및 보강층수(N)에 따른 극한지지력비(BCR_u)

5. 결론

1. 첫번째 보강층의 최적심도비(u/B)_{cr}는 0.4로 나타났으며, 첫번째 최대보강심도비(u/B)_{max}는 0.6, 지오그리드의 최적포설폭비(b/B)_{cr}는 6으로 결정되었다. 또한 상대밀도가 60%일 때, 극한지지력(q_u)을 나타내는 극한침하비(S/B)_{cr}는 약 19~20% 사이에서 발생하였으며, 상대밀도가 80%일 때는 약 16~18%사이에서 발생하여 상대밀도가 높은 지반일수록 더 작은 침하비(S/B)에서 극한지지력(q_u)을 나타내었다.
2. 동일한 상대밀도에서는 근입깊이비(D_f/B)가 증가할수록 극한지지력비(BCR_u)의 증가폭이 커져서 지지력 효과가 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 상대밀도 60%의 지반보다 상대밀도 80%의 지반이 보강재 설치에 따른 지지력 증가 효과는 감소하는 것으로 나타났다.
3. 보강층수(N)에 따른 극한지지력(q_u)과 근입깊이비(D_f/B)의 관계를 고찰하여 보면 근입깊이비(D_f/B)가 커질수록 그리고 보강층수(N)가 증가할수록 극한지지력(q_u)도 증가하였다.

감사의 글

본 논문은 (주)프라임시스템에서 인천대학교에 연구 의뢰한 “테낙스 지오그리드 보강지반의 지지력 및 시공시 안정성에 관한 연구”에 의해 작성되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Braja M. Das(1998), "Principle of Foundation Engineering", PWS, Fourth Edition.
2. Ingold, T.A., Miller, K.S.(1982). Analytical and laboratory investigation of reinforced clay. Proc. 2nd International Conference on Geotextiles, Vol. 3, 587-592.
3. Khing, K.H., Das, B.M., Puri, V.K., Cook, E.E., and Yen, S.C.(1993). Bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced sand. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 12, No. 4, 351-361.
4. Shin, E.C.(1994), "Shallow Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Clay Under Static and Cyclic Loading", Ph. D. Dissertation, Southern Illinois University at Carbondale, USA
5. Omar, M.T.(1995), "Bearing Capacity of Surface Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Clay Slope", Ph. D. Dissertation, Southern Illinois University at Carbondale, USA