

강성도를 고려한 연약지반 표층처리공법 지지력산정방법에 관한 연구 A Study on Bearing Capacity Evaluation Method of Surface Reinforcement Method for Soft Ground in Consideration of Stiffness

함태규¹⁾, Ham, Tae-Gew, 서세관²⁾, Seo, Se-Gwan, 조삼덕³⁾, Cho, Sam-Deok, 양기석⁴⁾, Yang, Kee-Sok, 유승경⁵⁾, You, Seung-Kyong

- 1) 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원 (Senior Researcher, Geotechnical Engineering Resarch Division, KICT, hamtg@kict.re.kr)
- 2) 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원 (Researcher, Geotechnical Engineering Resarch Division, KICT)
- 3) 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원 (Research Fellow, Geotechnical Engineering Resarch Division, KICT)
- 4) 정회원, 한국항만기술단 기술연구소장 (Chief Researcher, Korea Port Eng)
- 5) 정회원, 명지전문대학 토목과 부교수 (Associate Professor, Dept of civil Eng, Myongji College)

ABSTRACT : This study, as basic research which was intended to develop the surface reinforcement method using reinforcement material which is applicable to very soft ground in Korea, was aimed at proposing Bearing Capacity Evaluation method for the surface ground improvement method. To that end, a wide width tensile test using geotextile, geogrid and steel bar (substitute for bamboo) and 21 kinds of the laboratory model tests with the end restraint conditions of the reinforcement that comprises the constrained and partially constrained (3 types) conditions were conducted.

According to result of tests, Terzaghi's bearing capacity method is adequate to calculate bearing capacity in non-stiff material(geotextile, geogrid). But, It can't adequate to stiff material(bamboo net). So, New bearing capacity method suggest surface reinforcement method of very soft ground which Terzaghi's bearing capacity method modify for effect of stiffness.

요 지 : 본 연구는 국내의 초연약지반에 적용 가능한 표층보강재를 이용한 연약지반 표층처리공법을 정립시키기 위한 기초적 연구로서 표층처리공법에 사용되는 보강재의 강성도를 고려한 지지력산정방법을 제안하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 직포, 지오그리드, 강봉(대나무 대체재료)을 이용하여 광폭인장시험 및 보강재의 단부 구속조건을 완전구속, 부분구속(3종류)으로 한 21 종류의 실내모형시험을 수행하였다. 실험결과, Terzaghi의 지지력이론식은 직포와 지오그리드와 같은 연성보강재 사용시에는 지지력산정이 적절하나, 대나무 망과 같은 강성도가 큰 재료에 대해서는 강성도를 적절히 표현하지 못하는 것으로 평가되었으며, 초연약지반 표층처리공법의 지지력산정방법을 Terzaghi 지지력이론식을 수정하여 강성도의 영향을 정확히 평가하는 새로운 지지력이론식을 제안하였다.

Keywords : Reinforce material, Bearing capacity ratio Model test, Soft ground

1. 서론

현재 국내에서는 표층처리공법의 지지력 산정식으로 야마노우치 제안식(1985)이 일반적으로 사용되고 있으나, 직포나 지오그리드와 같은 연성재료를 대상으로 보강재의 인장강도를 기대하여 지지력을 산출하고 있다. 최근 국내에는 대나무 망과 같은 강성보강재를 사용한 표층처리공법이 적용되고 있으며 이러한 강성보강재를 사용할 경우의 지지력에 산정은 야마노우치 제안식(1985)으로 표현할 수 없다. 이러한 이유로 현장에서는 과거의 시공실적을 근거로 경험적인 설계가 행해지고 있으며 보강재와 지반간의 상호작용에 기초한 설계정수의 산정방법 및 강성도 효과를 표현할 수 있는 지지력 산정식의 정립이 시급한 과제라고 할 수 있다.

본 연구는 국내의 초연약지반에 적용 가능한 지지력개선효과에 미치는 보강재의 강성도의 영향을 고려한 지지력 이론식을 제안하는 것을 목적으로 하고 있으며 이를 위하여 직포, 지오그리드, 강봉(대나무 대체재료)을 이용한 실내모형실험을 수행하였다.

2. 시험점토의 물성치 및 표층보강재의 공학적 특성

본 연구에서는 전라남도 광양항에서 채취한 해성점토를 실내모형실험의 모형지반에 사용하였다. 채취한 시료는 불순물을 제거한 후 재성형하여 실험에 사용하였고, 시료를 대상으로 물리적 특성과 역학적 특성을 조사하기 위해 각종 토질시험을 실시한 결과 광양 점토시료는 비중 2.65, 액성한계(LL) 45.9% 및 소성지수(PI) 24.2%이며, 통일분류법의 분류기준에 의하면 CL로 분류되는 것으로 확인되었다. 표 1에 물성시험결과를 나타내었다.

표 1. 광양준설토시료의 물리적 특성

시료	G_s	LL (%)	PI (%)	흙 분류 (소성도표)	γ_t (kN/m ³)	No.200 통과량(%)
광양준설토	2.65	45.9	21.7	CL	16.82	98

실내모형실험에서 표층보강재로는 PP직포와 지오그리드, 강봉 등을 사용하였으며, 지오그리드시료는 결합형 지오그리드를 사용하였다. 또한 대나무 망 대체재료 선정을 위하여 강성도(캔틸레버시험과 굴곡시험)를 실시하였다(함태규, 2008).

그림 1은 직포, 지오그리드A, 지오그리드B, 지오그리드C 의 경사방향의 최대광폭인장강도시험과 강봉을 사용하여 실시한 인장시험결과를 나타내고 있다. 표 2에는 그 측정값을 나타내고 있다. 시험결과는 시험 시 사용한 시료의 리브수와 강봉 수에 대한 단위 폭(1m)당의 비율을 고려하여 인장강도를 환산한 값이다. 강봉은 7톤 습지도저의 무한궤도(폭 0.55m, 길이 3.0m)와 대나무 망 현장타설 폭 0.5m×0.5m를 상정하여 강봉 망을 0.1m×0.1m 로 제작하였다(그림 2 참조).

표 3에 본 연구에서 사용한 보강재의 강성도를 나타내고 있다. 표로부터 지오그리드A의 강성도는 직포의 33배, 강봉 망은 직포의 690배 인 것을 알 수 있다. (함태규, 2008)

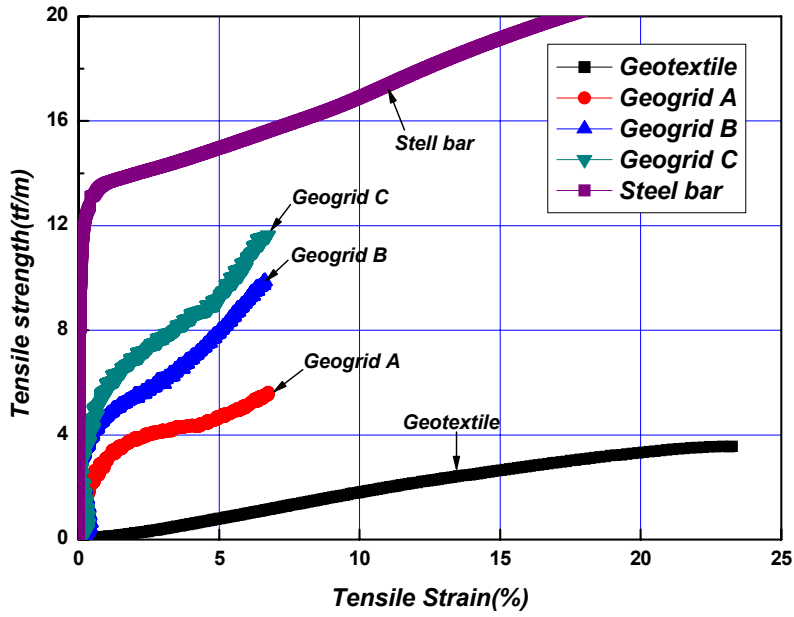
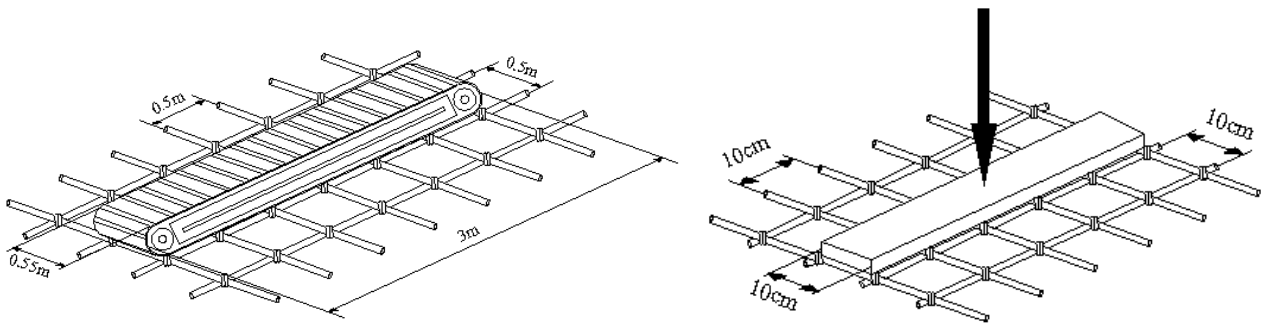


그림 1. 인장강도와 인장변형률 곡선



(a) 대나무 망과 7t 습지도저 무한레도

(b) 강봉 망과 실내모형실험 재하판

그림 2. 강봉 망 배열도

표 2. 인장강도시험 결과

시험횟수 및 항목	직포		지오그리드A		지오그리드B		지오그리드C		강봉	
	최대 인장 강도 (t/m)	인장 변형률 (%)	최대 인장 강도 (t/m)	인장 변형률 (%)	최대 인장 강도 (t/m)	인장 변형률 (%)	최대 인장 강도 (t/m)	인장 변형률 (%)	최대 인장 강도 (t/m)	인장 변형률 (%)
1	3.46	21.1	7.46	8.69	9.66	5.96			13.01	0.4
2	3.68	16.5	5.83	7.12	9.48	6.80	11.98	6.77	-	-
3	3.80	16.9	4.47	4.22	9.87	7.03	13.35	7.75	-	-
4	3.30	20.7	5.52	6.74	9.87	6.64	11.63	6.73	-	-
5	3.81	17.3	6.23	7.54	9.65	7.20			-	-
평균	3.61	16.0	5.90	6.86	9.71	6.73	12.32	7.08	13.01	0.4

표 3. 강성도 시험결과

보강재	강성도(kgf · m ²)
직포	0.004
지오그리드A	0.133
지오그리드B	0.118
지오그리드C	0.183
강봉 망	2.76

3. 실내모형실험 방법

본 연구에서 사용한 실내모형실험기는 모형토조, 재하장치, 계측장치로 구성되어 있고, 모형토조 크기는 길이 2000mm, 높이 1000mm, 폭 500mm이며, 최대 100mm까지 측정가능하며 오차범위 1/100mm변위를 측정할 수 있는 자기저항식 변위계(LVDT)를 이용하였다(함태규 등, 2008).

본 연구에서는 점토지반의 함수비를 120%(약 3LL)로 조절하여 목표높이 (80cm)까지 타설하고, 표층보강재를 거치시켰다. 표층보강재의 구속방법은 완전구속, 부분구속조건의 2가지 조건으로 실시하였다. 보강재의 단부에 T=23.0kgf의 선행하중을 가하여 보강재의 느즈러짐을 펴고, 본 연구에서 제작한 클램프를 이용하여 보강재 양 단부를 고정시키는 것을 완전구속조건, 보강재의 단부에 추를 이용하여 선행하중을 가하는 것을 부분구속조건이라고 정의하였다. 부분구속의 선행하중은 23.0kgf, 55.6kgf, 85.6kg의 3종류로 실시하였다.(그림 5) 또한 그림 6과 같이 본 연구에서 제작한 클램프를 이용하여 양 끝단을 완전 고정시키는 것을 완전구속조건으로 정의하였다.

재하방법은 실제 현장에서의 급속시공(비배수조건)을 모사하기 위하여 급속하중을 기본으로 하며, 2개의 모터를 이용하였다. 먼저 제1모터를 이용하여 재하속도 400mm/min로 각 단계별 하중의 ±1.0kgf까지 재하 후, 제2모터를 이용하여 재하속도 0.1mm/min로 각 단계별 하중의 ±0.01kgf까지 재하 하였다. 각 단계의 재하가 완료된 후 15분경과 후 차기 하중을 증가시키는 방법으로 점토지반의 중앙에서 단계적으로 하중을 재하 시켰다. 각 단계별의 재하시간은 예비모형실험을 통해 결정하였고, 하중 증가 없이 침하가 지속적으로 진행되는 하중을 극한하중(Ultimate load)으로 정의하여 극한하중에서 각각의 실험을 종료하였다. 실험 종료 후에는 본 연구에서 제작한 교반기를 이용하여 토조안에서 직접 교반시킨 후 차기 시험을 실시하였다. 표 4에 실시한 실내모형실험 조건을 나타내고 있다.

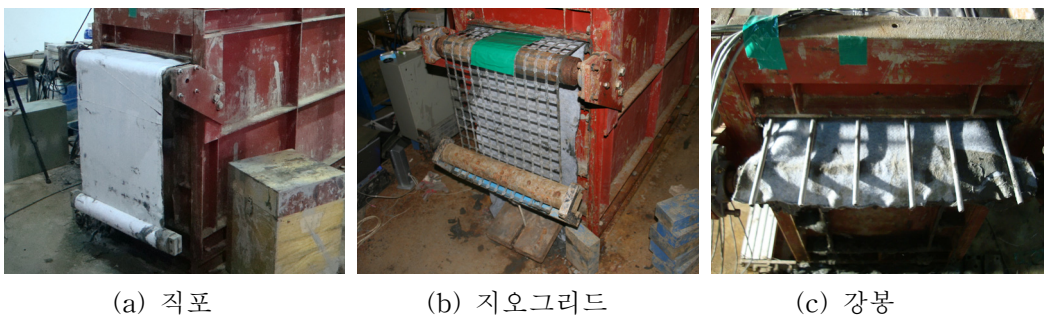
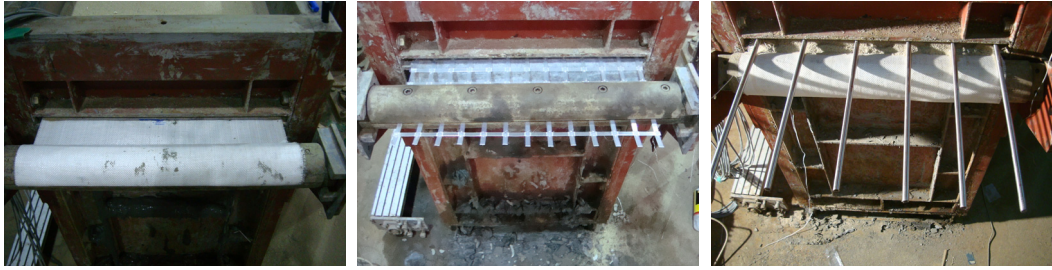


그림 5. 보강재 부분구속



(a) 직포

(b) 지오그리드

(c) 강봉

그림 6. 보강재 완전구속

표 4. 실시한 실내모형실험 조건

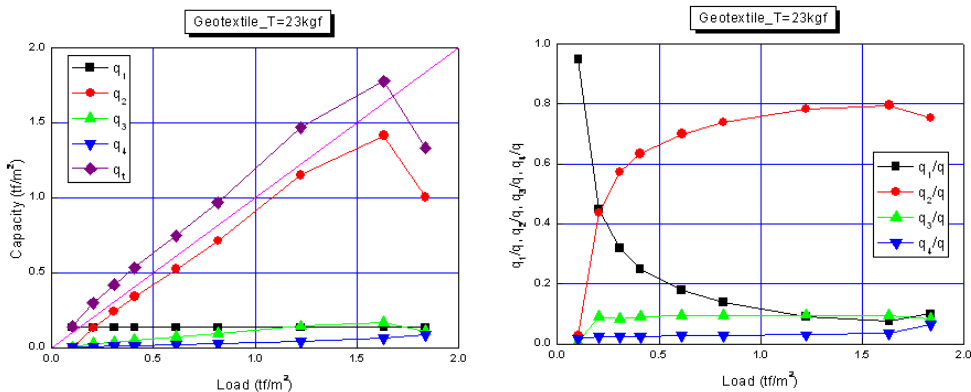
실험 종류	원지반 함수비 (%)	보강재종류	인장강도 (tf/m)	인장변형율 (%)	보강재 강성도 (kgf · m ²)	보강재 고정방법
Case 1	124% (3LL)	무보강	-		-	-
Case 2		직포	3.6	16.0	0.004	완전구속
Case 3						부분구속 (T=23.0kgf)
Case 4						부분구속 (T=55.6kgf)
Case 5						부분구속 (T=85.6kgf)
Case 6						완전구속
Case 7		지오그리드A	5.90	6.86	0.133	부분구속 (T=23.0kgf)
Case 8						부분구속 (T=55.6kgf)
Case 9						부분구속 (T=85.6kgf)
Case 10		지오그리드B	9.71	6.73	0.118	완전구속
Case 11						부분구속 (T=23.0kgf)
Case 12						부분구속 (T=55.6kgf)
Case 13						부분구속 (T=85.6kgf)
Case 14						완전구속
Case 15		지오그리드C	12.32	7.08	0.183	부분구속 (T=23.0kgf)
Case 16						부분구속 (T=55.6kgf)
Case 17						부분구속 (T=85.6kgf)
Case 18						완전구속
Case 19		강봉	13.01	0.4	2.760	부분구속 (T=23.0kgf)
Case 20						부분구속 (T=55.6kgf)
Case 21						부분구속 (T=85.6kgf)

4. 실내모형실험 결과 및 분석

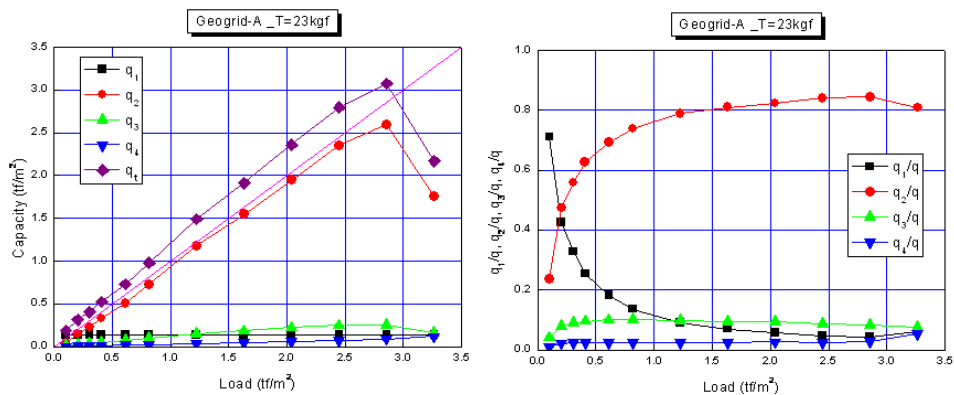
4.1 표층보강재별 지지력기본식의 설계정수 감도분석

그림 7(a), 8(a), 9(a)는 각각의 보강재에 선행하중 23.0kgf으로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과를 재하응력과 식(3)을 통해 산출한 지지력과의 관계로 나타낸 것이다. 또한 그림 7(b), 8(b), 9(b)는 지지력에 미치는 각각의 지지력 항의 감도정도를 분석하고자 재하응력과 q_1/q , q_2/q , q_3/q , q_4/q 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 7(a), 8(a), 9(a)로부터 야마노우치 제안식으로 산정한 지지력 q 는 재하응력의 증가와 함께 거의 같은 값의 증가 정도를 보이다가 극한하중에 이르렀을 때 재하응력보다 작은 지지력 값을 나타내며 파괴에 이르는 모형실험 결과를 거의 정확히 표현하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7(b), 8(b), 9(b)의 결과를 살펴보면 실험에 사용된 보강재 모두 재하응력 $0.4\text{tf}/\text{m}^2$ 까지는 지지력 항 중 점착력으로 인한 지지력 항(q_1)의 효과가 가장 크고, 재하응력 $0.4\text{tf}/\text{m}^2$ 이후부터 재하하중에 의한 보강재의 인장력이 발생되어 지지력 항(q_2)의 효과가 급격히 증가되어 지지력의 약 70%이상을 차지하는 것을 알 수 있다.

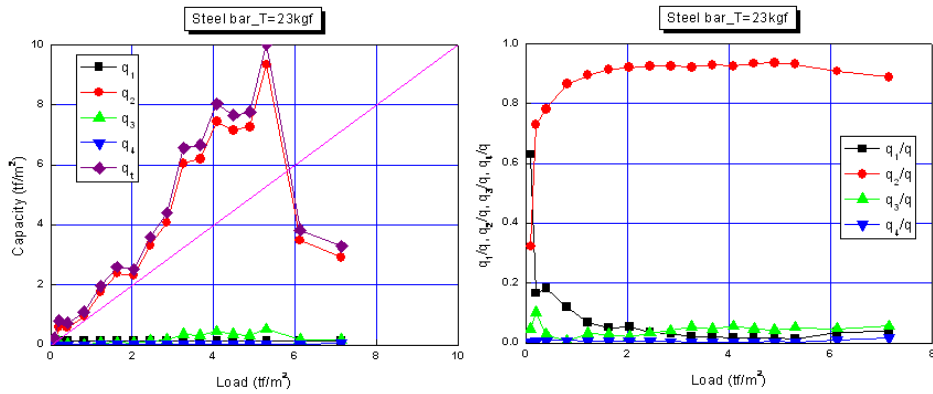
그림 12에 선행하중 23.0kgf로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과를 보강재별로 재하응력과 q_2/q 의 관계를 나타내고 있다. 그림으로부터 직포는 인장력에 의한 전단저항효과가 차지하는 비율 q_2/q 가 78%, 지오그리드A는 81%, 강봉 망은 91%로, q_2/q 항은 강성도에 의존하는 것으로 나타났다.



(a) 재하응력과 지지력과의 관계 (b) 재하응력과 q_1/q , q_2/q , q_3/q , q_4/q 와의 관계
그림 7. 직포를 선행하중 23.0kgf로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과



(a) 재하응력과 지지력과의 관계 (b) 재하응력과 q_1/q , q_2/q , q_3/q , q_4/q 와의 관계
그림 8. 지오그리드A를 선행하중 23.0kgf로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과



(a) 재하응력과 지지력과의 관계 (b) 재하응력과 $q_1/q, q_2/q, q_3/q, q_4/q$ 와의 관계
 그림 9. 강봉 망을 선행하중 23.0kgf로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과

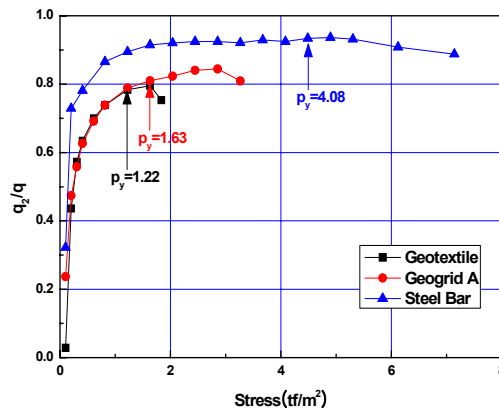


그림 10. 재하응력과 인장력으로 인한 지지력 항 q_2/q 과의 관계

그림 13은 실험을 통해 얻어진 한계지지력과 야마노우치 제안식(1999)을 이용해 계산된 한계지지력의 관계를 나타내고 있다. 그림 중 ①은 실무에서 과거의 시공실적을 근거로 한 경험적인 설계방법을 이용한 지지력($D_f=0, \theta=20^\circ, r=3m$), ②는 실내모형실험으로부터 얻어진 설계파라미터를 이용한 지지력을 나타내고 있다. 그림으로부터 ①경험적인 설계방법은 과소평가되는 것을 알 수 있다. 또한 ②실내모형실험으로부터 얻어진 설계파라미터를 이용한 지지력은 연성재료에 있어서는 실험값과 거의 동일한 값을 나타내는데 비해 강봉 망은 현저히 적은 값을 나타낸다. 이것의 원인은 강봉 망의 강성도를 고려하지 않은 것이라 판단된다. 따라서 식(4)와 같은 강성도 효과를 포함하는 강성도 계수(α)를 제안하였다.

$$q_d = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = cN_c + \frac{2(\alpha T)\sin\theta}{B} + \frac{\alpha T}{r}N_q + \gamma D_f N_q \quad (4)$$

여기에서, q_d :극한지지력, c :점착력, N_c, N_q :지지력형상계수, T :보강재의 인장강도, B :재하폭, θ :보강재와 수평면이 이루는 각도, r :재하중근방의 용기망의 반경, γ :지반의 단위체적중량, D_f :연약지반의 침하량, α :강성도계수를 나타내고 있다.

그림 13에 ③은 식(4)를 이용해 산출된 지지력을 나타내고 있다. 그림으로부터 실험을 통해 얻어진 지지력과 강성도효과를 고려하여 제안된 식을 이용해 산출된 지지력은 거의 동일한 값을 나타내며 식(4)는 지지력에 미치는 보강재의 강성도효과를 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

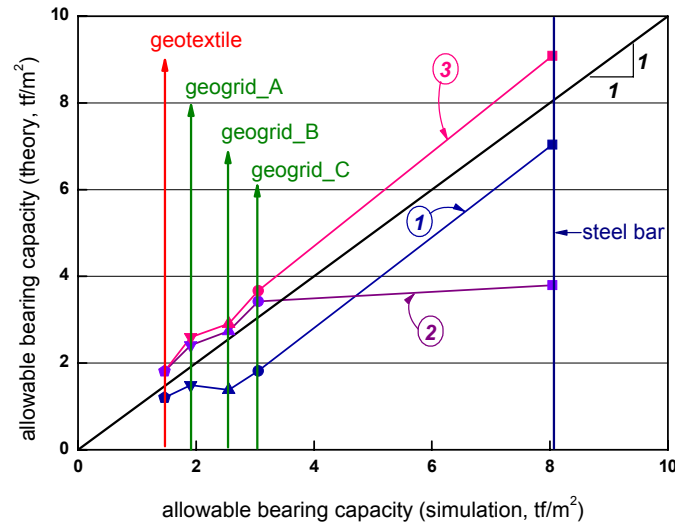


그림 11. 실험을 통해 얻어진 한계지지력과 지지력식을 이용해 산출된 지지력과의 관계

5. 결론

보강재의 강성도 영향을 고려한 지지력산정방법을 제안하기 위하여 보강재의 재료특성이 서로 다른 직포, 지오그리드, 강봉을 이용하여 실내모형실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 보강재 종류에 관계없이 재하응력 0.4tf/m^2 까지는 지지력 항(q_1)의 효과가 가장 크고, 재하응력 0.4tf/m^2 이후부터는 보강재의 인장력이 급격히 증가하여 지지력 항(q_2)의 효과가 전체 지지력에 약 70%이상 차지하는 것으로 나타났다.
2. 선행하중 23.0kgf 로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과, 직포는 지지력 항(q_2)의 효과가 차지하는 비율 q_2/q 가 78%, 지오그리드A는 81%, 강봉 망은 91%로 나타나, q_2/q 항은 강성도에 의존한다 판단된다.
3. 본 연구에서 제안한 강성도를 고려한 지지력 산정방법은 실험을 통해 얻은 결과를 거의 정확히 추정하는 것으로 나타났으며, 추후 여러 가지 시험을 통한 검증이 필요하다 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설기술혁신사업 (06건설핵심-D02)의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Yamanouchi (1985), "Recent developments in the used synthetic geofabrics and geogrids", Symposium on Recent Developments in Ground improvement techniques. Bankok, pp.205-224
2. 矢島壽一, 丸尾武樹, 塚田幸廣(1988), "ジオテキスタイルを用いた強化路盤の変形挙動と効果", 第3回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集, pp.60-65.
3. 함태규, 조삼덕, 양기석, 유승경(2008), "보강재의 구속조건에 따른 초연약지반의 지지력개선효과에 관한 연구", 한국토목섬유학회논문집, 제7권, 제3호, pp.41-49.