

# 보강재의 강성도를 고려한 연약지반 표층처리공법 지지력 산정방법에 관한 연구

## Characteristics of Settlement for Non-woven Geotextile through Cyclic Loading Model Test

함 태 규 <sup>1*</sup>	Ham, Tae-Gew	서 세 관 <sup>2</sup>	Seo, Se-Gwan
조 삼 덕 <sup>3</sup>	Cho, Sam-Deok	양 기 석 <sup>4</sup>	Yang, Kee-Sok
유 승 경 <sup>5</sup>	You, Seung-Kyong		

### 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 the design parameter 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. Moreover, a new procedure was proposed to take into account the effect of the stiffness of Reinforce materials on bearing capacity theory of Surface Reinforcement Method for Soft Ground.

### 요 지

본 연구는 국내의 초연약지반에 적용 가능한 표층보강재를 이용한 연약지반 표층처리공법을 정립시키기 위한 기초적 연구로서 표층처리공법 지지력 산정방법을 제안하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 직포, 지오그리드, 강봉(대나무 대체재료)을 이용한 보강재의 단부 구속조건을 완전구속, 부분구속(3종류)으로 한 21 종류의 실내모형실험을 수행하였다. 또한 실험결과를 이용해 보강재의 강성도가 지지력효과에 미치는 영향을 고려한 지지력 산정방법을 제안하였다.

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

## 1. 서 론

표층처리공법으로 처리된 연약지반의 성토하중으로 인한 공학적인 거동분석에 관한 연구는 福往 등(1967), 山内(1979), Watari 등(1986), 平尾(1997), 矢島 등(1988), 西林(1980) 등을 시작으로 여러 연구자들에 의해 시도되었

으며, 특히 Watari 등(1986)은 표층처리공법 현장시험을 통하여 보강재가 성토완료시 최대 인장력이 발휘된 후 점차로 감소되고, 지반변수는 지반강도, 하중조건 등에 의해 크게 변화된다는 결과를 발표하는 등 유의한 정보를 제공하고 있다. 그 후 Yamanouchi(1985)는 Terzaghi의 지지력 이론에 보강재의 인장강도로 인해 발생하는 지지력 항을

1\* 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engr. Resarch Division, KICT, E-mail: hamtg@kict.re.kr)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Engr. Resarch Division, KICT)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engr. Resarch Division, KICT)

4 정회원, 한국항만기술단 기술연구소장 (Member, Chief Researcher, Korea Port Engr.)

5 정회원, 명지전문대학 토목과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept of civil Engr., Myongji College)

표 1. 광양준설토시료의 물리적 특성

시료	G <sub>s</sub>	LL (%)	PI (%)	흙 분류 (소성도표)	γ <sub>t</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	No.200 통과량 (%)
광양준설토	2.65	45.9	21.7	CL	16.82	98

추가하여 표층보강재공법의 지지력 산정식을 제안하였다. 현재 국내에서는 표층처리공법의 지지력 산정식으로 Yamanouchi 제안식(1985)이 일반적으로 사용되고 있으나, 보강재로 인한 지지력 증가 효과는 각각 독립적으로 발굴되지 않고 상호관계를 가지고 있으며, 설계에 사용되는 미지의 설계정수는 지반조건이나 시공조건에 따라 복잡하게 변화되며 변형에 수반되는 설계정수의 추정은 매우 어렵다. 또한 Yamanouchi 제안식(1985)은 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 Yamanouchi 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 영향 평가가 가능한 지지력 산정방법을 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.

실내모형실험에서 표층보강재로는 PP 직포와 지오그리드, 강봉 등을 사용하였으며, 지오그리드시료는 폴리에스테르 레진(resin)을 압출실린더에 통과시켜 편평한 바(bar)

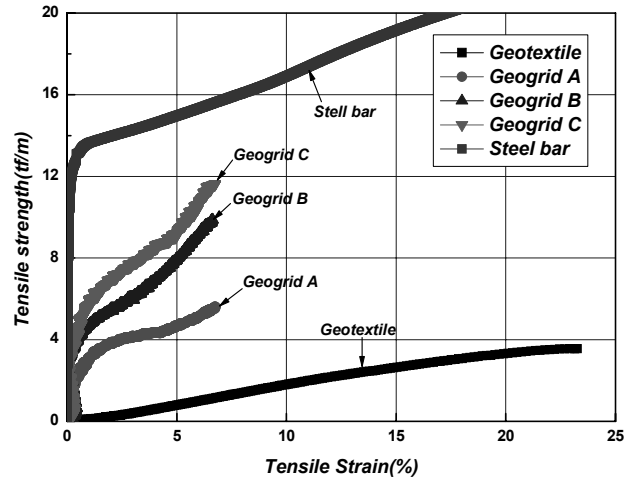


그림 1. 인장강도와 인장변형을 곡선

형태로 추출한 후 냉각, 연신 공정을 통하여 고강도의 스트립(strip) 형태로 만들고, 이를 격자형으로 교차시켜 레이어 기법으로 용접하여 제조한 결합형 지오그리드이다. 또한 대나무 망 대체재료 선정을 위하여 강성도(캔틸레버 시험과 굴곡시험)를 실시하였다(함태규 등, 2008).

그림 1은 직포, 지오그리드A, 지오그리드B, 지오그리드 C의 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×0.5m을 상정하여 강봉 망을 0.1m×0.1m로 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 등, 2008).

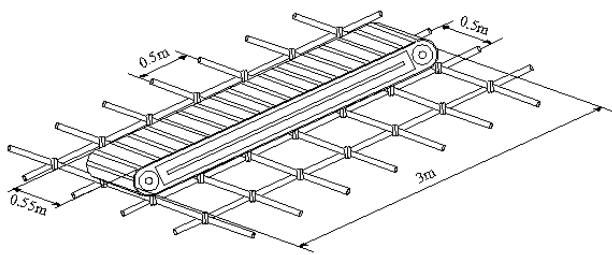
## 3. 실내모형실험 방법

### 3.1 실내모형실험 장치

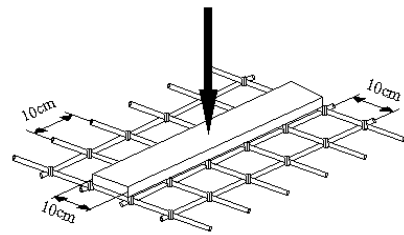
본 연구에서 제작한 실내모형실험기는 모형토조, 재하

표 2. 인장강도시험 결과

시험횟수 및 항목	직포		지오그리드A		지오그리드B		지오그리드C		강봉	
	최대인장 강도 (t/m)	인장 변형률 (%)	최대인장 강도 (t/m)	인장 변형률 (%)	최대인장 강도 (t/m)	인장 변형률 (%)	최대인장 강도 (t/m)	인장 변형률 (%)	최대인장 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



(a) 대나무 망과 기습지도저 무한계도



(b) 강봉 망과 실내모형실험 재하판

그림 2. 강봉 망 배열도

표 3. 강성도 시험결과

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

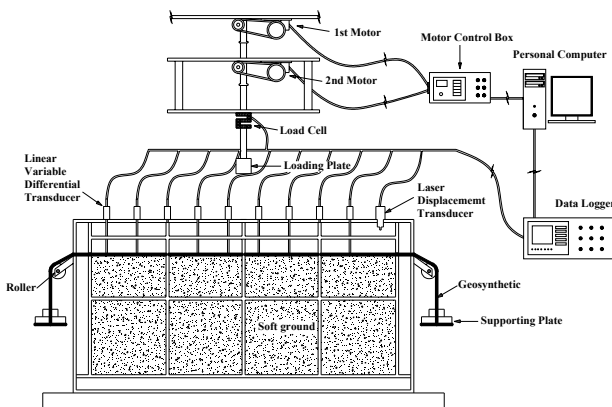


그림 3. 실험모형시험장치 계통도

장치, 계측장치로 구성되어 있다. 모형토조 크기는 길이 2000mm, 높이 1000mm, 폭 500mm이며, 수치해석을 통한 경계조건을 조사하여 결정하였다. 본 실내모형실험에

서는 최대 100mm까지 측정가능하며 오차범위 1/100mm 변위를 측정할 수 있는 자기저항식 변위계(LVDT)와 연약 지반 표층처리재의 정성적인 거동을 실시간으로 측정하기 위하여 최대측정범위는 200mm로 오차범위가 1/100mm 인 비접촉 변형율게이지(Laser Displacement Transducer)를 이용하였다. 변위계 설치 간격은 예비실험을 통해 결정하였으며 이를 이용하여 성토체 중앙부의 침하와 인접지반의 연직변위를 측정하였다. 또한 8개의 Strain gage를 사용하여 표층보강재의 인장변형율을 측정하였다. 그림 3에 제작한 실내 모형시험 장치의 계통도, 그림 4에 보강재의 표층거동 분석을 위한 LVDT의 위치 및 Strain gage의 위치를 나타내고 있다.

### 3.2 실험방법 및 계획

본 연구에서는 점토지반의 함수비를 120%(약 3LL)로 조절하여 목표높이(80cm)까지 타설하고, 표층보강재를 거치시켰다.

표층보강재의 구속방법은 완전구속, 부분구속조건인 2가지 조건으로 실시하였다. 보강재의 단부에 T=23.0kgf의 선행하중을 가하여 보강재의 느러짐을 펴고, 본 연구에서 제작한 클램프를 이용하여 보강재 양 단부를 고정시

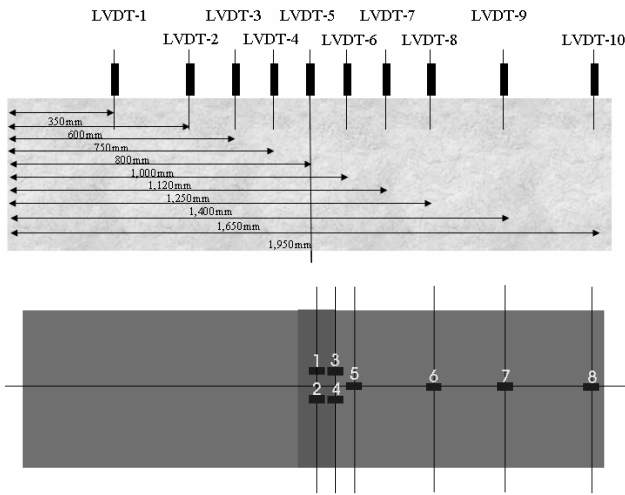


그림 4. LVDT 및 Strain gage 위치

키는 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 완전고정시키는 것을 완전구속조건으로 정의하였다.

재하방법은 실제 현장에서의 급속시공(비배수조건)을 모사하기 위하여 급속하중을 기본으로 하며, 2개의 모터를 이

용하였다. 먼저 제1모터를 이용하여 재하속도 400mm/min로 각 단계별 하중의  $\pm 1.0\text{kgf}$ 까지 재하시킨 후, 제2모터를 이용하여 재하속도 0.1mm/min로 각 단계별 하중의  $\pm 0.01\text{kgf}$ 까지 재하를 실시하였다. 각 단계의 재하가 완료된 후 15분경과 시에 차기 하중을 증가시키는 방법으로 점토지반의 중앙에서 단계적으로 하중을 재하시켰다. 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.

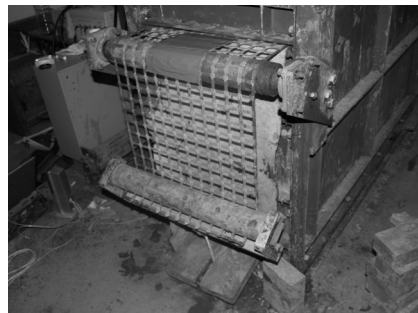
#### 4. 실내모형실험 결과 및 분석

##### 4.1 설계파라미터 산정방법

본 연구에서는 平尾(1997)가 제안한 방법으로 재하판의 단부와 최대용기위치를 연결하는 가상원을 상정하여, 현의 길이  $L(m)$ , 현과 수평면과 이루는 각을  $\phi(\text{deg})$ , 점토지반의 최대용기량을  $\Delta H_{\max}(m)$ , 재하판단부와 최대용기



(a) 직포



(b) 지오그리드



(c) 강봉

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)	인장변형률 (%)	보강재 강성도 (kgf·m <sup>2</sup> )	보강재 고정방법
Case 1	124% (3LL)	무보강	-		-	-
Case 2		직포	3.6		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		0.133	부분구속 (T=23.0kgf)
Case 8						부분구속 (T=55.6kgf)
Case 9						부분구속 (T=85.6kgf)
Case 10		지오그리드B	9.71		0.118	완전구속
Case 11						부분구속 (T=23.0kgf)
Case 12						부분구속 (T=55.6kgf)
Case 13		지오그리드C	12.32		0.183	부분구속 (T=85.6kgf)
Case 14						완전구속
Case 15						부분구속 (T=23.0kgf)
Case 16						부분구속 (T=55.6kgf)
Case 17		강봉	-		2.760	부분구속 (T=85.6kgf)
Case 18						완전구속
Case 19						부분구속 (T=23.0kgf)
Case 20						부분구속 (T=55.6kgf)
Case 21						

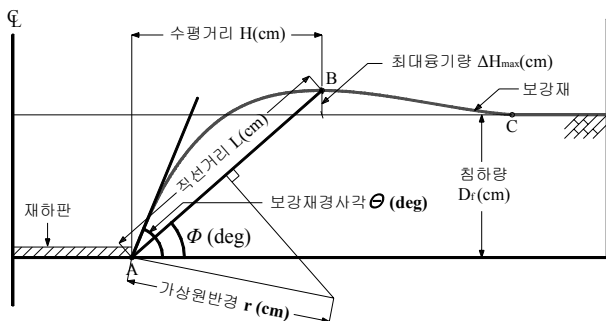


그림 7. 표층처리 보강재의 변형도

(단부장력 T=85.6kgf, 우단면)

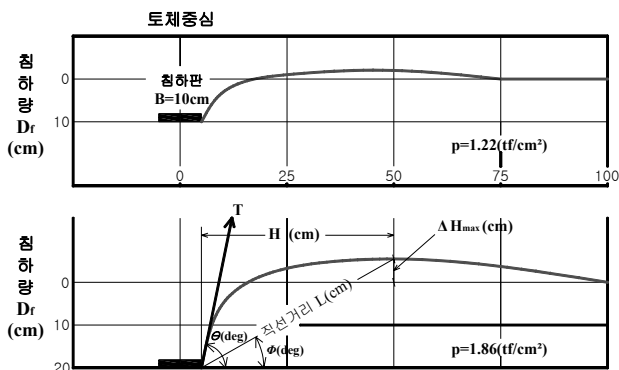


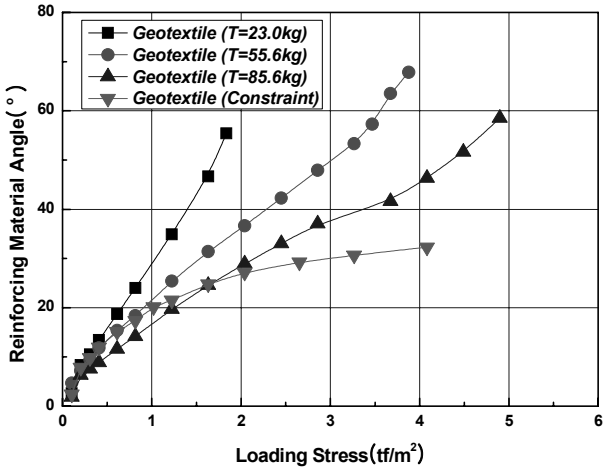
그림 8. 실내모형실험으로부터 측정된 표층처리 보강재의 변형도

량이 발생하는 위치까지의 수평거리를  $H(m)$ 로 하여 기하학적으로 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 현의 길이  $L(m)$ 과 용기망의 반경  $r(m)$ 을 구하였다.

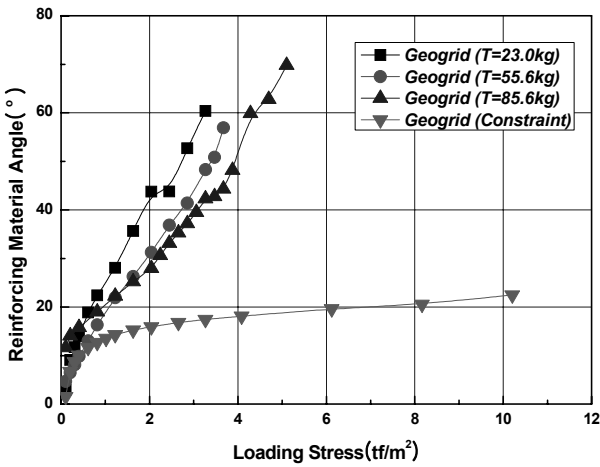
$$L = \sqrt{(\Delta H_{max} + D_f)^2 + H^2} \quad (1)$$

$$r = L/2 \cdot \sin(\theta - \phi) \quad (2)$$

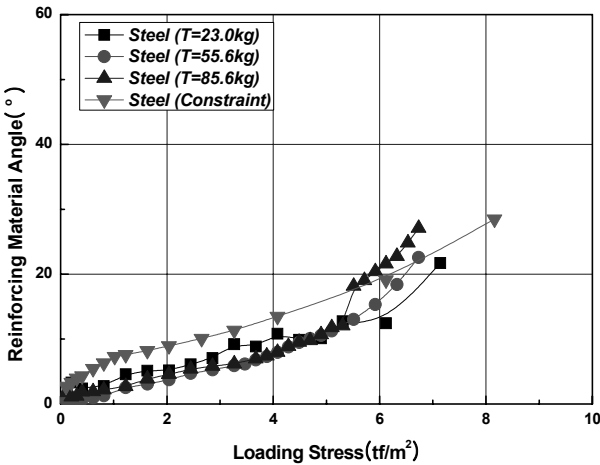
상기한 방법으로 보강재가 수평면과 이루는 경사각  $\theta$ 를 산출한 결과를 재하응력과 보강재가 수평면과 이루는 경사각  $\theta$ 과의 관계로 그림 9에 나타내고 있다. 그림으로부터 직포, 지오그리드A, 강봉 망 모두 재하응력의 증가에 따라 경사각  $\theta$ 도 함께 증가하고 있으며 그 증가 정도는 구속조건에 따라 서로 다른 것을 알 수 있다. 직포와 지오그리드A는 단부 구속응력이 증가하면 재하응력의 증가에 따른 경사각  $\theta$ 의 증가 정도가 감소하는데 비해 강성도가 큰 강봉 망은 구속조건에 따른 차이가 확인되지 않았다. 이로써 재하응력의 증가에 따른 경사각  $\theta$ 의 증가 정도는 직포와 같은 연성재료는 보강재 구속조건에 크게 의존하며, 강성도가 큰 재료는 구속조건에 의존하지 않는 것으로



(a) 직포



(b) 지오그리드



(c) 강봉

그림 9. 재하응력과 보강재가 수평면과 이루는 경사각  $\theta$  과의 관계 평가되었다.

그림 10에 강성도는 거의 동일한 값을 나타내고 인장강도가 서로 다른 지오그리드 A, B, C를 이용해 실시한 실험 결과를 재하응력과 보강재가 수평면과 이루는 경사각  $\theta$

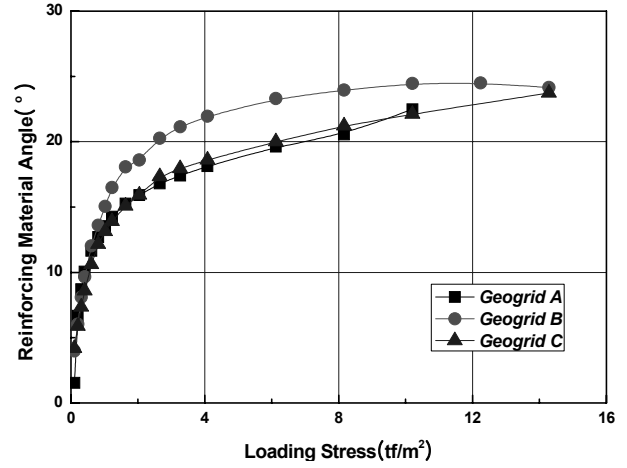


그림 10. 재하응력과 보강재가 수평면과 이루는 경사각  $\theta$ 와의 관계 (지오그리드)

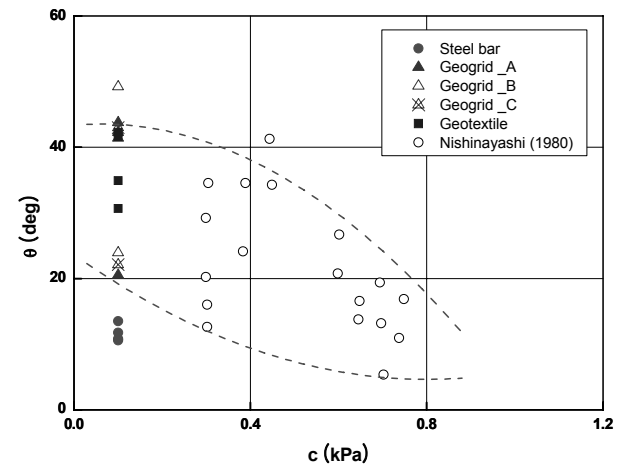


그림 11. 보강재가 수평면과 이루는 경사각  $\theta$ 와 점토지반의 비배수전단강도와의 관계

과의 관계로 나타내고 있다. 그림으로부터 지오그리드 A, B, C 모두 재하응력의 증가에 따른 경사각  $\theta$ 의 증가정도는 거의 동일한 것을 알 수 있으며, 본 연구에서 실시한 재하응력  $14\text{tf/m}^2$ 까지는 경사각  $\theta$ 의 증가정도는 인장강도에 의존하지 않는 것으로 평가되었다.

그림 11에 완전구속조건에서 실시한 실험결과를 항복응력에서 설계정수를 산출하여 보강재가 수평면과 이루는 경사각  $\theta$ 와 점토지반의 비배수전단강도와의 관계를 나타내고 있다. 또한 그림 12에 용기망의 반경  $r$ 과 점토지반의 비배수전단강도와의 관계로 나타내고 있다. 그림 11, 12 중에는 西林(1980)에 의해 산정된 기존의 설계정수를 함께 표시하였다. 그림 12로부터 직포의 보강재가 수평면과 이루는 경사각  $\theta$ 는  $30.6^\circ \sim 42.2^\circ$ 에 해당하며 지오그리드는  $22.1^\circ \sim 43.7^\circ$ , 강봉은  $10.5^\circ \sim 13.5^\circ$ 인 것으로 평가되었다. 이로써 본 연구에서 사용한 직포와 지오그리드의  $\theta$ 는

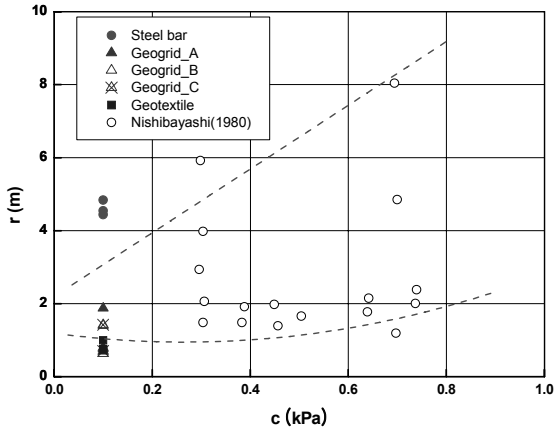


그림 12. 용기망의 반경  $r$  과 점토지반의 비배수전단강도와와의 관계

西林(1980)에 의해 제안된 범위안에 포함되는데 비해 강봉 망은 제안된 범위보다 작은 값을 나타내는 것으로 평가되었다. 西林(1980)가 제안한  $\theta$ 의 범위는 연성재료를 사용한 일본의 시공사례를 이용해 제안되었으며  $\theta$ 는 점토지반의 비배수전단강도에 의존하는 것을 고려하여 그 범위를 정하였다. 본 연구에서 사용된 직포와 지오그리드는 연성재료로  $\theta$ 는 점토지반의 비배수전단강도에 의존하며 西林(1980)가 제안한  $\theta$ 의 범위에 포함되는 것으로 평가되었다. 그러나 강성재료인 강봉 망은 西林(1980)가 제안한 비배수 전단강도가 약  $0.8\text{tf/m}^2$  이하에서는  $\theta$ 가 점토지반의 비배수전단강도에 의존하지 않으며, 西林(1980)가 제안한  $\theta$ 의 범위는 연성보강재에 적용가능하며 강성도가 큰 대나무 망과 같은 보강재는 적용할 수 없는 것으로 평가되었다.

## 4.2 강성도를 고려한 지지력산정방법

### 4.2.1 표층보강재에 의한 지지력 증가 구도 및 지지력 산정방법

보강재를 부설한 지반의 지지력증가구도는 그림 13과 같으며, 보강재 부설로 인하여 ①해먹효과, ②용기억제효과, ③침하효과, ④지반과 보강재간의 마찰력효과, ⑤인장력에 의한 전단저항효과, ⑥복토로 인한 하중분산효과 등을 기대할 수 있다. 이러한 효과는 각각 독립적으로 발굴되지 않고 상호관계를 가지고 있으며, 현시점에서는 각각의 효과가 충분히 해명되어 있지 않다.

지반과 보강재가 일체가 되는 지지력 산정방법으로는 ①Terzaghi의 지지력이론에 의한 방법, ②지반계수법·케이틀이론에 의한 방법, ③판이론에 의한 방법 등이 제안되어 있으며, 국내에서는 일반적으로 Terzaghi의 지지력이

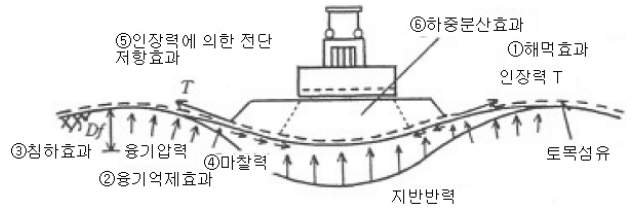


그림 13. 토목섬유 부설지반의 변형과 응력(토목섬유를 이용한 보강토의 설계·시공메뉴얼, 1995)

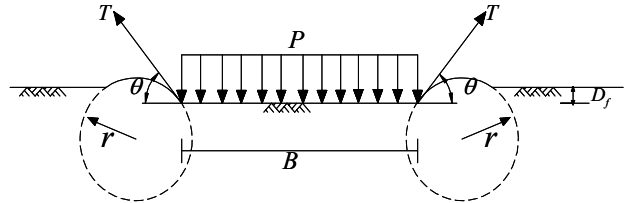


그림 14. Terzaghi의 지지력산정식 개념도

론을 기본으로 한 Yamanouchi 제안식(식 (3))이 사용되고 있다. 이 식은 그림 13의 ①해먹효과, ②지반용기억제효과, ③침하효과를 고려한 것이다.

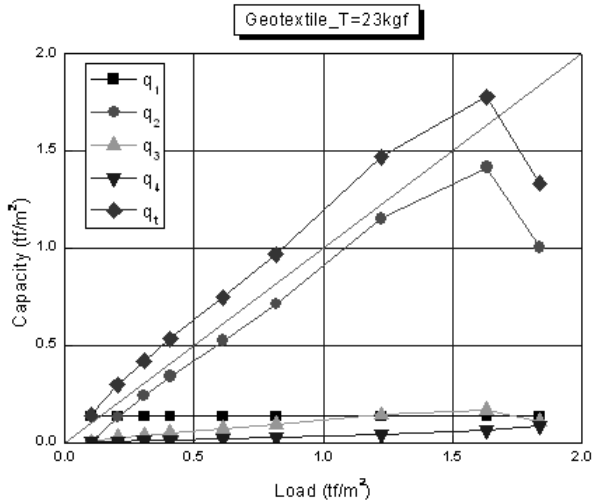
$$q_d = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$$

$$= cN_c + \frac{2T\sin\theta}{B} + \frac{T}{r}N_q + \gamma D_f N_q \quad (3)$$

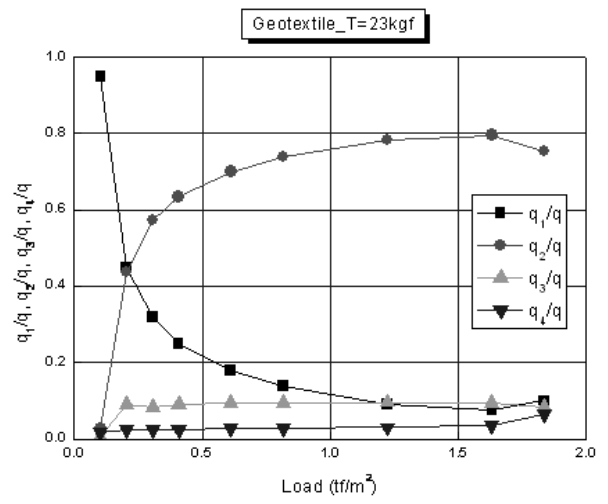
여기에서,  $q_d$ :극한지지력,  $c$ :점착력,  $N_c, N_q$ :지지력형상계수,  $T$ :보강재의 인장강도,  $B$ :재하폭,  $\theta$ :보강재와 수평면이 이루는 각도,  $r$ :재하중근방의 용기망의 반경,  $\gamma$ :지반의 단위체적중량,  $D_f$ :연약지반의 침하량을 나타내고 있다.

### 4.2.2 지지력기본식의 설계정수 감도분석

그림 15(a), 16(a), 17(a)은 함수비를 124%의 점토지반 위에 직포, 지오그리드A, 강봉 망을 선행하중 23.0kgf로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과를 재하응력과 식 (3)을 통해 산출한 지지력과 관계로 나타낸 것이다. 또한 그림 15(b), 16(b), 17(c)는 지지력에 미치는 각각의 지지력 항의 감도정도를 분석하기 위하여 재하응력과  $q_1/q$ ,  $q_2/q$ ,  $q_3/q$ ,  $q_4/q$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 15(a), 16(a), 17(a)로부터 Yamanouchi 제안식으로 산정한 지지력은 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 15(b), 16(b), 17(c)로부터 직포, 지오그리드A, 강봉만 모

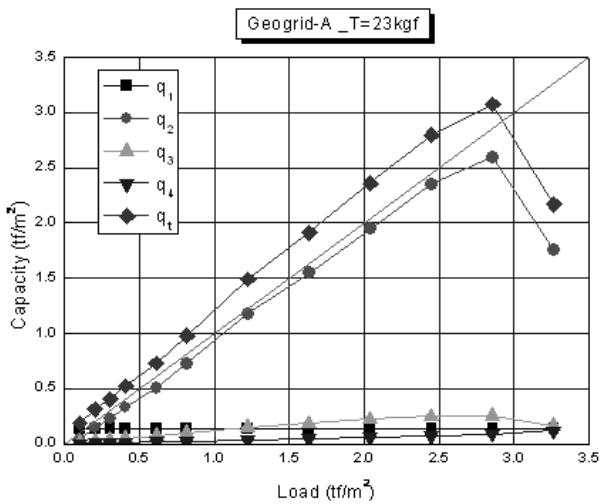


(a) 재하응력과 지지력과의 관계

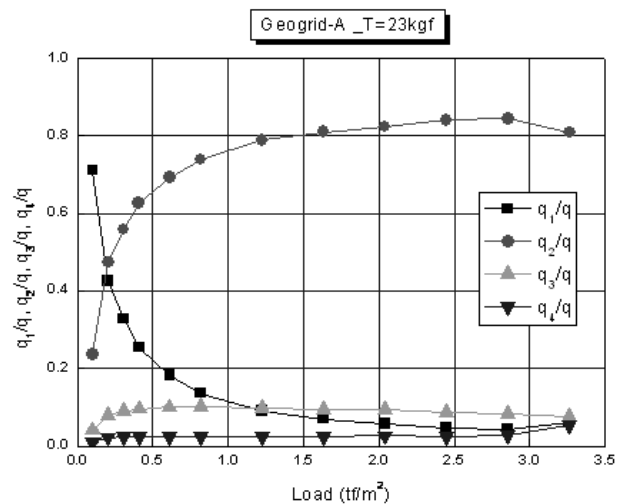


(b) 재하응력과  $q_1/q$ ,  $q_2/q$ ,  $q_3/q$ ,  $q_4/q$ 와의 관계

그림 15. 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 16. 지오그리드A를 선행하중 23.0kgf로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과

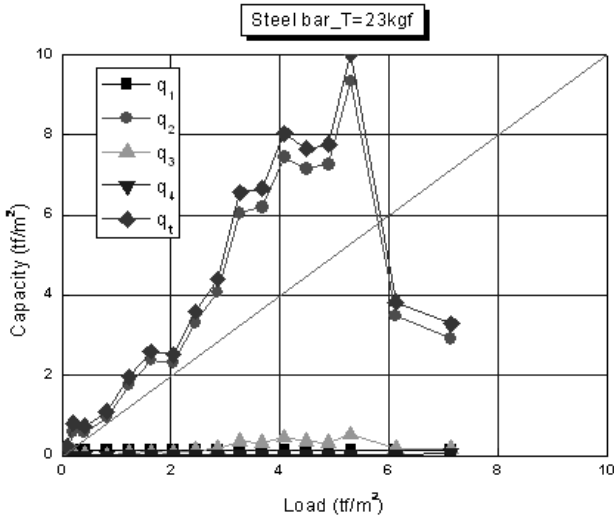
두 재하응력  $0.4\text{tf/m}^2$  까지는 지지력 항 중 점착력으로 인한 지지력 항( $q_1$ )의 효과가 가장 크고, 재하응력  $0.4\text{tf/m}^2$  이후부터 성토하중에 의해 지반이 침하 또는 융기되려고 할 때 보강재에 인장력이 발생되어 경사방향의 인장력으로 인해 발생하는 지지력 항( $q_2$ )의 효과가 급격히 증가되어 지지력의 약 70%이상을 차지하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 보강재의 종류(지오그리드, 강봉) 및 구속조건(완전구속, 부분구속)에 무관하게 거의 동일한 경향을 나타내었다.

그림 18에 선행하중 23.0kgf로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과를 재하응력과  $q_2/q$ 의 관계를 나타내고 있다. 그림 중 각 시료의 항복응력을 화살표로 나타내고 있

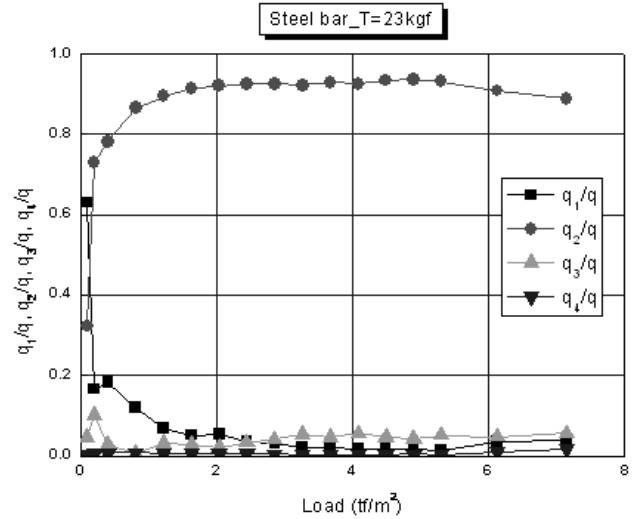
다. 그림으로부터 직포는 인장력에 의한 전단저항효과가 차지하는 비율  $q_2/q$ 가 78%, 지오그리드A는 81%, 강봉 망은 91%로,  $q_2/q$ 는 강성도에 의존하는 것으로 평가되었다.

그림 18은 실험을 통해 얻어진 한계지지력과 Yamanouchi 제안식(1999)을 이용해 계산된 한계지지력의 대표적인 관계를 나타내고 있다. 그림 중 ①은 실무에서 과거의 시공 실적을 근거로 한 경험적인 설계방법을 이용한 지지력 ( $D=0$ ,  $\theta=20^\circ$ ,  $r=3\text{m}$ ), ②는 실내모형실험으로부터 얻어진 설계파라미터를 이용한 지지력을 나타내고 있다. 그림으로부터 ①경험적인 설계방법을 이용한 지지력은 모든 시료에 있어 실험을 통해 얻어진 지지력보다 작은 값을 나타내며 과소평가되는 것을 알 수 있다. 또한 ②실내모형실험





(a) 재하응력과 지지력과의 관계



(b) 재하응력과  $q_1/q$ ,  $q_2/q$ ,  $q_3/q$ ,  $q_4/q$ 와의 관계

그림 17. 강봉 망을 선행하중 23.0kgf로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과

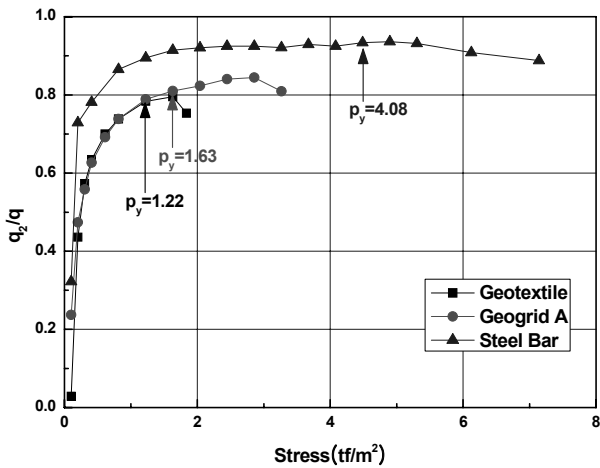


그림 18. 재하응력과 인장력으로 인한 지지력 항  $q_2/q$ 와의 관계

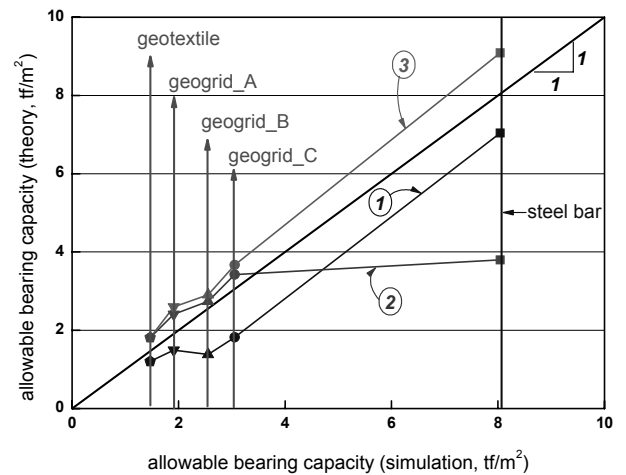


그림 19. 실험을 통해 얻어진 한계지지력과 지지력식을 이용해 산출된 지지력과의 관계

으로부터 얻어진 설계파라미터를 이용한 지지력은 연성재료에 있어서는 실험값과 거의 동일한 값을 나타내는데 비해 강봉 망은 현저히 적은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 강봉 망의 강성도 효과를 고려하지 않은 것에 원인이 있는 것으로 사료되며 본 연구에서는 식 (4)와 같이 식 (3)의 제 2항에 보강재의 강성도 효과를 나타내는 강성도 계수를 제안하였다.

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

여기에서,  $q_d$ :극한지지력,  $c$ :점착력,  $N_c$ ,  $N_q$ :지지력형상 계수,  $T$ :보강재의 인장강도,  $B$ :재하폭,  $\theta$ :보강재와 수평

면이 이루는 각도,  $r$ :재하중근방의 용기망의 반경,  $\gamma$ :지반의 단위체적중량,  $D_f$ :연약지반의 침하량,  $\alpha$ :강성도계수를 나타내고 있다.

그림 18에 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 사료된다.

향후 강성도 계수에 대해선 여러 가지 실험을 이용한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

지지력개선효과에 미치는 보강재의 강성도의 영향을 평가하기 위하여 보강재의 재료특성이 서로 다른 직포, 지오그리드, 강봉을 이용하여 보강재의 단부 구속조건을 달리한 실내모형실험을 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 직포와 지오그리드A는 단부 구속응력이 증가하면 재하응력의 증가에 따른 경사각  $\theta$ 의 증가 정도가 감소하는데 비해 강성도가 큰 강봉 망은 구속조건에 따른 차이가 확인되지 않았다. 이로써 재하응력의 증가에 따른 경사각  $\theta$ 의 증가정도는 직포와 같은 연성재료는 보강재 구속조건에 크게 의존하며, 강성도가 큰 재료는 구속조건에 의존하지 않는 것으로 평가되었다.
2. 지오그리드A, B, C 모두 재하응력의 증가에 따른 경사각  $\theta$ 의 증가정도는 거의 동일하며, 본 연구에서 실시한 재하응력  $14\text{tf/m}^2$ 까지는 경사각  $\theta$ 의 증가정도는 인장강도에 의존하지 않는 것으로 평가되었다.
3. 직포와 지오그리드의  $\theta$ 는 점토지반의 비배수전단강도에 의존하며西林(1980)가 제안한  $\theta$ 의 범위에 포함된다. 그러나 강성재료인 강봉 망은西林(1980)가 제안된 범위보다 작은 값을 나타내며,西林(1980)가 제안한  $\theta$ 의 범위는 연성보강재에 적용가능하며 강성도가 큰 보강재는 적용할 수 없는 것으로 평가되었다.
4. 재하응력  $0.4\text{tf/m}^2$ 까지는 지지력 향 중 점착력으로 인한 지지력 향( $q_1$ )의 효과가 가장 크고, 재하응력  $0.4\text{tf/m}^2$  이후부터 성토하중에 의해 지반이 침하 또는 융기되려고 할 때 보강재에 인장력이 발생되어 경사방향의 인장력으로 인해 발생하는 지지력 향( $q_2$ )의 효과가 급격히 증가되어 지지력의 약 70%이상을 차지하는 것으로 평가되었다.
5. 선행하중 23.0kgf로 부분구속하여 실시된 실내모형실험결과, 직포는 인장력에 의한 전단저항효과가 차지하는 비율  $q_2/q$ 가 78%, 지오그리드A는 81%, 강봉 망은

- 91%로,  $q_2/q$ 는 강성도에 의존하는 것으로 평가되었다.
6. 본 연구에서 제안한 보강재의 강성도가 지지력효과에 미치는 영향을 고려한 지지력 산정방법은 실험을 통해 얻은 결과를 거의 정확히 추정하는 것으로 평가되었다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 함태규, 조삼덕, 양기석, 유승경 (2008), “보강재의 구속조건에 따른 초연약지반의 지지력개선효과에 관한 연구”, 한국토목섬유학회논문집, 제7권, 제3호, pp.41-49.
2. 福往隆二, 西林清茂 (1967), “ビニロンシートによる軟弱地盤表層処理工法”, 第22回土木工学会年次学術講演概要集, pp.1-4.
3. 山内豊聰, 後藤恵之輔 (1979), “敷網工の実用支持力公式の一提案”, 九州大学工学週報, Vol.52, No.3, pp.201-207.
4. 平尾和年 (1997), ジオテキスタイルによる軟弱地盤の支持力改良とその評価法に関する研究, 九州大学博士論文, pp.42-46.
5. 矢島寿一, 丸尾武樹, 塚田幸広 (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.
6. 西林清茂 (1980), “表層被覆工法(シート)”, 土木施行, Vol.21, No.13, pp.48-56.
7. 土木研究センター, ジオテキスタイル補強土普及委員会 (1995), ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル, pp.203-206.
8. Watari, Y. et al. (1986), “Field study of behavior of geogrids and soft ground”, 3th Int. Conf. of Geotextiles, pp.187-191.
9. Yamanouchi (1985), “Recent developments in the used synthetic geofabrics and geogrids”, Symposium on Recent Developments in Ground improvement techniques, Bangkok, pp.205-224.

(논문접수일 2009. 5. 13, 심사완료일 2009. 6. 19)