

표층처리공법으로 개량된 초연약지반의 지지력산정방법에 관한 연구 A Study for Bearing Capacity Calculation Method of Very Soft Ground with Reinforced Surface

함태규¹⁾, Tae-Gew Ham, 조삼덕²⁾, Sam-Deok Cho, 양기석³⁾, Kee-Sok Yang,
유승경⁴⁾, Seung-Kyong You

- 1) (주)대우엔지니어링 기술연구소 과장, Section Manager, Research & Development Division, Daewoo Engineering Company
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원, Chief Researcher, Geotechnical Eng. Division, Korea Institute of Construction Technology
- 3) 한국항만기술단 기술연구소장, Chief Researcher, Korea Port Eng.
- 4) 명지전문대학 토목과 부교수, Associate Professor, Dept. of civil Eng, Myongji College

SYNOPSIS : 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 49 kinds of the laboratory model tests were conducted. And the result the study suggested β_s , the stiffness coefficient to evaluate the stiffness effect of reinforcement materials. Then, it was also found that the stiffness coefficient, β_s as the testing constant would be appropriate as high as 1.0, 1.1 and 1.5 for geotextile, geogrid and steel bar, respectively. And It was evaluated that the stiffness effect affecting reinforcement improvement effect would be reduced as the thickness of embedded depth increases and that RFe , the stiffness effect reduction coefficient would have positive correlation with H/B. Finally, it was confirmed that the bearing capacity gained from the method to calculate bearing capacity, which was suggested in the study, would almost correctly estimate the capacity, demonstrating the appropriateness of the proposed bearing capacity calculation method.

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

1. 서 론

국내에서는 보강재를 이용한 표층처리공법의 지지력 산정식으로 Terzaghi의 지지력이론을 기본으로 하는 Yamanouchi 제안식(1999)이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 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. 이러한 이유로 현장에서는 과거의 시공실적을 근거로 경험적인 설계가 행해지고 있으며 보강재와 지반간의 상호작용에 기초한 설계정수의 산정방법의 정립이 시급한 과제라고 할 수 있다.

본 연구는 강성도를 고려할 수 있는 표층처리공법 지지력산정방법을 제안하는 것을 목적으로 수치해

석을 통해 경계조건을 고려한 실내모형실험을 제작하여, 표층처리재의 재료특성이 서로 다른 3종류(지오텍스타일, 지오그리드, 강봉(대나무 대체재료))를 이용한 실내실험 및 현장시험을 수행하였다. 실험결과로부터 강성도 효과를 평가할 수 있는 지지력산정식을 제안하였고, 그 적정성을 평가하였다.

2. 시험재료 및 실내모형실험 특성

2.1 시험점토의 물성치

본 연구에서는 전라남도 광양항 3단계 3차 예정지구현장에서 채취한 해성점토를 실내모형실험의 모형 지반에 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. 광양점토시료의 물리적 특성

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

2.2 표층 보강재의 공학적 특성

실내모형실험에서 표층보강재로는 PP직포와 지오그리드, 강봉 등을 사용하였으며, 지오그리드시료는 폴리에스테르 레진(resin)을 압출실린더에 통과시켜 편평한 바(bar) 형태로 추출한 후 냉각, 연신 공정을 통하여 고강도의 스트립(strip) 형태로 만들고, 이를 격자형으로 교차시켜 레이저 기법으로 용접하여 제조한 결합형 지오그리드이다. 표 2에 사용한 지오텍스타일 및 지오그리드의 인장강도 시험결과를 나타내고 있다. 또한 대나무 망 대체재료 선정을 위하여 강성도(캔틸레버시험과 굴곡시험)를 실시하였다 (합태규, 2008).

표 2 광폭인장강도시험 결과

시험횟수 및 항목	경사방향							
	지오텍스타일		지오그리드A		지오그리드B		지오그리드C	
	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		
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

2.3 실내모형실험장치 및 실험조건

본 연구에서 제작한 실내모형실험기는 모형토조, 재하장치, 계측장치로 구성되어 있다. 모형토조 크기는 길이 2,000mm, 높이 1,000mm, 폭 500mm이며, 수치해석을 통한 경계조건을 조사하여 결정하였다. 본 실내 모형실험에서는 최대 100mm까지 측정가능하며 오차범위 1/100mm변위를 측정할 수 있는 자기저항식 변위계(LVDT)와 연약지반 표층처리재의 정성적인 거동을 실시간으로 측정하기 위하여 최대측정범위는 200mm로 오차범위가 1/100mm인 비접촉 변형율계이지(Laser Displacement Transducer)를 이용하였다. 변위계 설치 간격은 예비실험을 통해 결정하였으며 이를 이용하여 성토체 중앙부의 침하와 인접지반의 연직변위를 측정하였다. 그림 1에 제작한 실내 모형시험 장치의 계통도를 나타내고 있다. 또한 본 연구에서 수행한 실내모형실험의 종류 및 조건을 정리하면 표 3 과 같다.

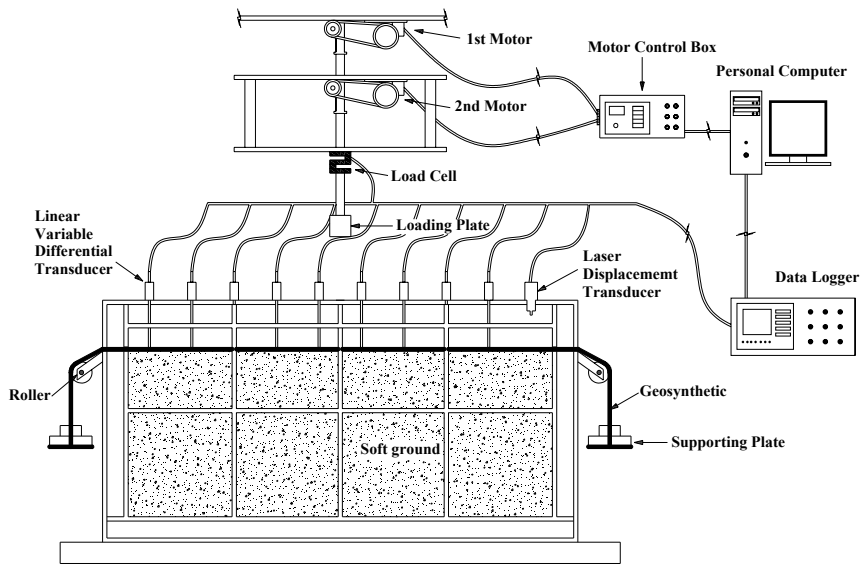


그림 1. 실험모형시험장치 계통도

표 3. 표층처리공법 설계이론 분석을 위한 모형실험 종류 및 실험조건

실험 종류	원지반 함수비 (%)	보강재종류	보강재 인장강도 (tf/m)	인장 변형율 (%)	보강재 강성도 (kgf · m2)	복토 두께 d (cm)	보강재 고정방법
Case 1	125% (3LL)	무보강	-	-	-	0	-
Case 2						0	
Case 3						5	
Case 4						10	
Case 5						20	
Case 6						30	
Case 7						40	
Case 8		지오텍스타일	3.6	16.0	0.004	0	완전구속
Case 9						5	
Case 10						10	
Case 11						20	
Case 12						40	부분구속 (T=23.0kgf)
Case 13						0	
Case 14						0	
Case 15						0	
Case 15	지오그리드A	5.90	6.86	0.133	0	완전구속	

러나 강성재료인 강봉은 西林(1980)가 제안한 비배수 전단강도가 약 0.8 tf/m^2 이하에서는 점토지반의 비배수전단강도에 의존하지 않으며, 西林(1980)가 제안한 θ, r 의 범위는 연성보강재에 적용가능하며 강성도가 큰 대나무 망과 같은 보강재는 적용할 수 없는 것으로 확인되었다.

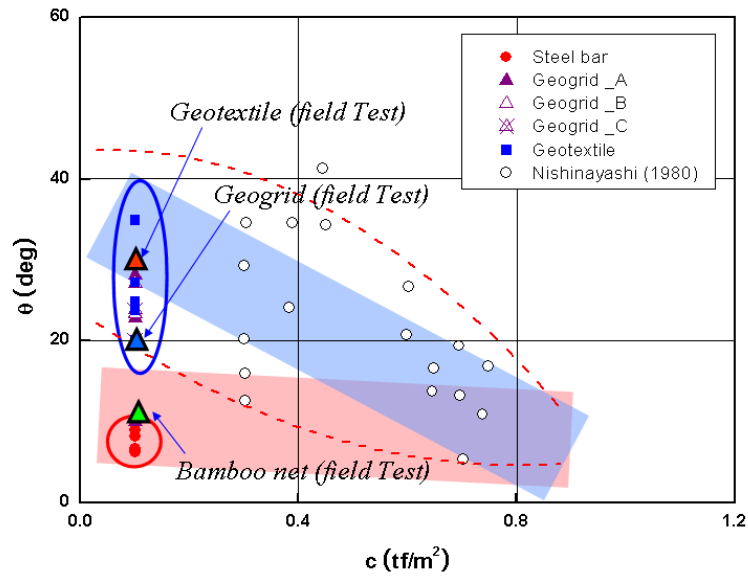


그림 2. 보강재가 수평면과 이루는 경사각 θ 와 점토지반의 비배수전단강도와의 관계

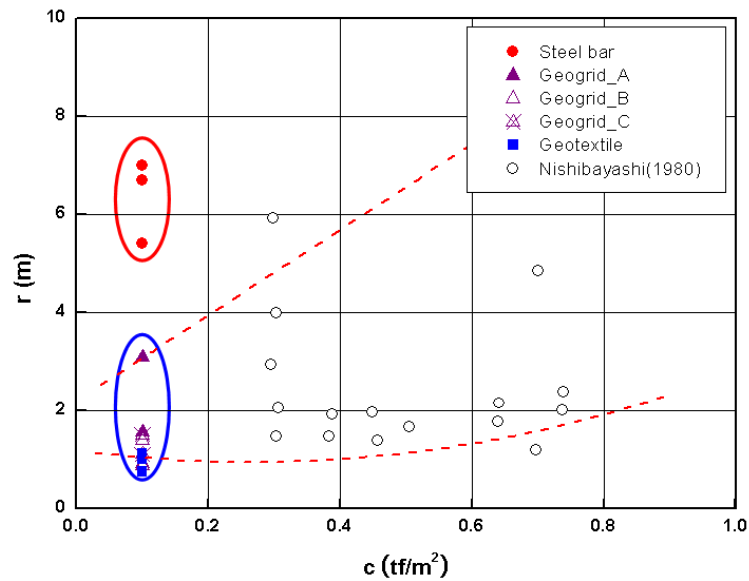


그림 3. 용기망의 반경 r 과 점토지반의 비배수전단강도와의 관계

4. 강성도를 고려한 지지력 산정방법 제안

4.1 표층보강재에 의한 지지력 증가개념

보강재를 부설한 지반의 지지력 증가개념은 그림 4와 같으며, 보강재 포설로 인하여 ①해먹(Hammock)효과, ②용기억제효과, ③침하효과, ④지반과 보강재간의 마찰력효과, ⑤인장력에 의한 전단

저항효과, ⑥복토로 인한 하중분산효과 등을 기대할 수 있다.

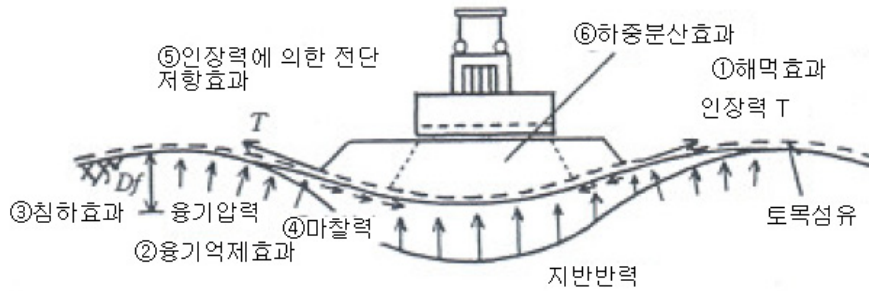


그림 4. 지오텍스타일 부설지반의 변형과 응력 (지오텍스타일을 이용한 보강토의 설계·시공매뉴얼, 1998)

지반과 보강재가 일체가 되는 지지력 산정방법으로는 ①Terzaghi의 지지력이론에 의한 방법, ②지반계수법·케이블이론에 의한 방법, ③판이론에 의한 방법 등이 제안되어 있으며, 국내에서는 일반적으로 Terzaghi의 지지력이론을 기본으로 한 Yamanouchi 제안식(1985)이 사용되고 있다. 이 식은 그림 4의 ①해먹효과, ②지반용기억제효과, ③침하효과를 고려한 것이다.

Terzaghi의 지지력 이론과 보강재 인장력의 연직성분, 연약지반 용기력에 의한 지지력과 시트층방의 문힘량 D_f 에 의한 근입효과를 고려하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_a = \frac{1}{F_s} \left[c \cdot N_c + T_a \cdot \left(\frac{2 \sin \theta}{B} + \frac{N_q}{r} \right) + \gamma \cdot D_f N_q \right] \quad (1)$$

일반적으로 점토층에서는 내부마찰각 ϕ 이 발휘되지 않으므로, $N_q=1$ 이 되며 막효과와 D_f 에 의한 상재압 효과를 무시한 식 (2)를 적용할 수 있다.

$$q_a = \frac{1}{F_s} \left[c \cdot N_c + \frac{2 T_a \cdot \sin \theta}{B} \right] \quad (2)$$

여기서, F_s : 안전율(=2.0), N_c : 지지력계수, c : 점토층의 비배수전단강도(tf/m²), B : 장비폭(m), T_a : 보강재의 허용인장력(tf/m), θ : 인장력이 작용하는 각도(°)

또한 Yamanouchi(1985)는 연약지반 위에 보강재 포설 및 복토완료 후, 복토 상단에서 재하시험시의 하중강도와 침하량의 관계에서 어느 하중강도에서 변곡점이 나타나 지지력이 재 발현됨을 발견하였다. 즉 Prandtl류의 지지력이론에 따르면, 하중직하의 썩기대가 네트에 닿고 네트를 통해서 새로운 형태의 썩기대가 형성된다. 이것을 이용하여 네트공법을 상층이 복토, 하층이 연약지반인 2층계 지반으로 모델화하여 지지력식을 제안하였다.

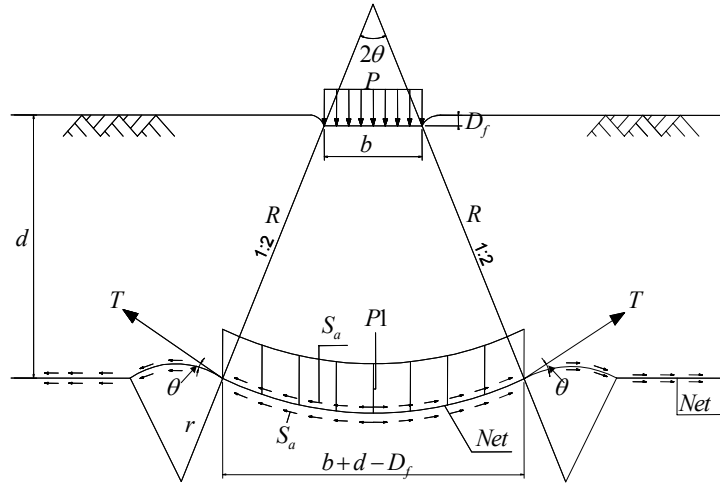


그림 5. 복토완료 후 보강재의 지지력

상층에서 파괴가 발생할 때의 허용 지지력은 식 (3)과 같이 표현되고, 하층에서 파괴가 발생할 때의 허용지지력은 식 (4)로 표현된다. 식 (4)에서 보강재의 전단저항력(S_a), 용기막의 반경(r), 장비의 근입심도(D_f)를 무시하고 간략화하면 식 (5)와 같다. 2층계 지반의 허용지지력은 식 (3)과 식 (5)를 비교하여 작은 값을 적용하는 것이 일반적이다.

$$q_a = \frac{1}{F_s} \{ \beta \gamma_1 b N_r + \gamma_1 D_f N_q \} \quad (3)$$

$$q_a = \frac{1}{F_s} \left(1 + \frac{d - D_f}{b} \right) \cdot \left[\left\{ 5.3c + T \cdot \left(\frac{2 \sin \theta}{b} + \frac{1}{r} \right) + \frac{4S_a \cdot R(1 - \cos \theta)}{b + d - D_f} \right\} + \gamma_1 \cdot D_f \right] \quad (4)$$

$$q_a = \frac{1}{F_s} \cdot \left(1 + \frac{d}{b} \right) \cdot \left(5.3c + \frac{2T_a \cdot \sin \theta}{b} \right) \quad (5)$$

여기서, F_s : 안전율 (=2.0), β : 기초의 형상계수, N_r , N_q : 지지력계수, c : 준설매립층의 비배수전단강도 (tf/m^2), d : 복토층 두께, D_f : 장비의 근입심도, R : 가상원의 반경, γ_1 : 복토층 단위중량, r : 용기막의 반경, b : 시공장비의 접지폭(m), T_a : 보강재의 허용인장력, θ : 보강재가 수평면과 이루는 각도($^\circ$)

4.2 표층처리 보강재 강성도가 지지력 개량효과에 미치는 영향

전술한 것과 같이 Yamanouchi 제안식(1985)에 사용되는 설계정수인 θ 와 r 은 지오그리드 및 지오텍스타일과 같은 연성보강재가 지지력효과에 미치는 영향을 명확히 평가하는데 비해 대나무 망과 같은 강성도가 큰 재료의 지지력효과에 미치는 강성도의 영향을 적정히 평가하지 못하는 것으로 확인되었다. 이로써 본 연구에서는 보강재의 강성도 효과를 평가할 수 있는 지지력평가방법을 제안하였다. 먼저, 보강재의 강성도 효과를 평가할 수 있는 강성도계수 β_s 를 제안하여, 식 (6)의 보강재의 인장력으로 인해 발생하는 지지력 항에 대입하여 지지력효과에 미치는 보강재의 강성도효과를 평가하였다. 제안된 강성

도계수 β_s 는 실험정수로서 지오텍스타일은 1.0, 지오그리드는 1.1, 강봉은 1.5가 적정하다는 것이 실험을 통해 확인되었다.

$$q_a = \frac{1}{F_s} \cdot \left(1 + \frac{d}{b}\right) \cdot \left(5.3c + \frac{2\beta_s \cdot T_a \cdot \sin\theta}{b}\right) \quad (6)$$

여기서, F_s : 안전율(=2.0), c :준설매립층의 비배수전단강도(tf/m^2), d :복토층 두께, D_f :장비의 근입심도, b :시공장비의 접지폭(m), T_a :보강재의 허용인장력, θ :보강재가 수평면과 이루는 각도($^\circ$), β_s :강성도 계수

그림 6은 실내모형실험으로부터 얻은 강성도계수 β_s 와 지오텍스타일로 보정한 강성도비($D/D_{\text{Geotextile}}$)와의 관계를 나타내고 있다. 그림 6으로부터 강성도계수 β_s 는 강성도비($D/D_{\text{Geotextile}}$)와 좋은 상관관계 특성을 나타내는 것으로 확인되었고, 그 관계는 식 (7)로 평가 되었다. 또한 식 (7)을 이용해 실제 현장에서 사용되는 대나무 망의 강성도계수 β_s 를 추정한 결과 2.5인 것으로 평가되었다.

$$\beta_s = 0.82 \cdot (D/D_{\geq \text{otextile}})^{0.095} \quad (7)$$

여기서, β_s 는 강성도계수, $D/D_{\text{Geotextile}}$ 는 강성도비로 보강재의 강성도를 지오텍스타일의 강성도로 보정한 값을 의미한다.

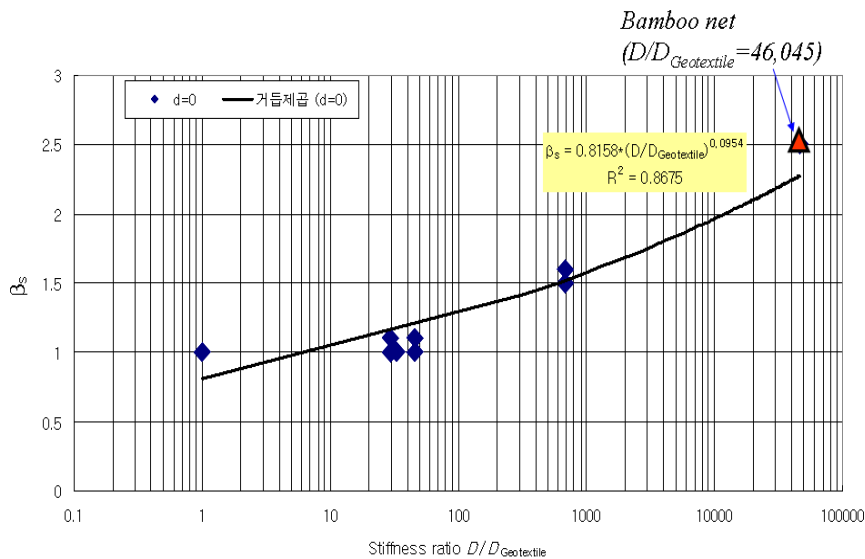


그림 6. 강성도계수 β_s 와 강성도비($D/D_{\text{Geotextile}}$)와의 관계

강성도계수 β_s 는 실험정수로서 복토두께의 증가에 따라 보강재의 강성도 효과는 감소되며 복토두께 증가로 인한 보강재 강성효과 감소경향을 평가하기 위하여 복토두께에 의한 보강재의 강성효과 감소 계수 RFe 가 제안하였다.

그림 7은 현장 및 실내모형실험 자료를 토대로 복토두께에 따른 보강재의 강성효과 감소계수 변화형태를 나타내고 있다. 연약지반에서의 현장시험 특성상 실험 자료의 분산이 심하나, 실내모형실험의 결과는 거의 분산이 없는 관계곡선을 나타내고 있으며 현장시험결과를 만족할 수 있는 보다 안전한 지지력

제안식을 제시할 수 있으므로 실내모형실험 결과를 이용해 관계곡선이 설정되었다. 그림 7로부터 RFe 와 H/B 는 좋은 상관관계 특성을 나타내는 것으로 확인되었고 그 관계 곡선도는 식 (8)과 같다.

$$RFe = EXP(-1.25 \cdot (H/B) - 0.1) + 0.06 \quad (8)$$

여기에서, RFe 는 복토두께에 의한 보강재의 강성효과 감소계수, H 는 복토두께, B 는 시공장비의 접지폭(m)을 의미한다.

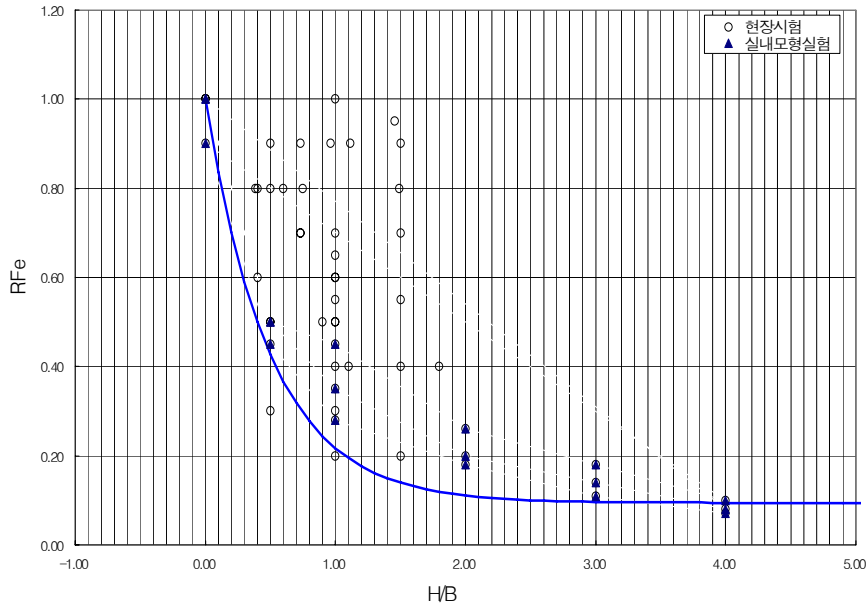


그림 7. 복토두께에 의한 보강재의 강성효과 감소계수 RFe 와 H/B 의 관계

보강재의 허용인장강도(T_a)는 시공 중 보강재가 손상 될 수 있는 것을 고려하여 식 (9)와 같이 보강재의 극한인장강도(T_{max})를 안전율($Fs_{Reinforcement}$)로 나눈 값을 이용하는 것이 일반적이다.

$$T_a = T_{max} / Fs_{Reinforcement} \quad (9)$$

여기서, $Fs_{Reinforcement}$ 는 보강재 손상을 고려한 안전율을 의미한다.

식 (9)에서 안전율($Fs_{Reinforcement}$)에 대한 명확한 근거는 없으며 일반적으로 설계자의 판단에 의해 경험적으로 사용되는 경우가 많다. 본 연구에서는 이러한 애로를 해결하기 위하여 현장에서 사용이 간편하고 근거에 입각한 허용인장강도(T_a)를 식 (10)과 같이 제안하였다. 식 (10)의 RFr 은 시공시 유발되는 보강재 감소계수(복토재 포설시 보강재 손상, 연직배수재 타설시 손상, 화학적, 미생물적 손상 등)로 일반적으로 0.5를 추천하며, 특수환경의 경우는 기술자 판단에 의해 결정한다. 또한 초연약지반인 경우에는 RFr 을 0.25 이하(복토하중에 의한 소성유동, 응력집중 등)로 제안하였다. 여기서 초연약지반이라 함은 일반적으로 지반강도 1.0tf/m^2 이하의 지반으로 기술자의 판단에 의해 결정할 수 있다.

$$T_a = \beta_s \cdot RFr \cdot RFe \cdot T_{max} \quad (10)$$

여기서, β_s :강성도 계수로 Geotextile는 1, 대나무 망은 2.5

T_{max} :보강재의 극한인장강도

RFr :시공시 유발되는 보강재 감소계수

RFe :복토두께에 의한 보강재의 강성효과 감소계수

이상의 결과로부터 원지반의 상단 허용지지력 산정식은 식 (11)과 같이 제안할 수 있다. 여기에서 S_a , r , D_f 의 영향은 미소하므로 이를 무시하면 간편식인 식 (12)가 제안된다.

실내모형실험 결과를 이용해 식 (11)과 식 (12)로부터 지지력을 산정 비교 분석한 결과(그림 8), 간편식인 식 (12)로 산정한 지지력은 완전식인 식 (11)로 산정한 지지력의 90% 이상의 안전측에 해당하며, 간편식인 식 (12)를 이용하여도 무방한 것으로 확인되었다.

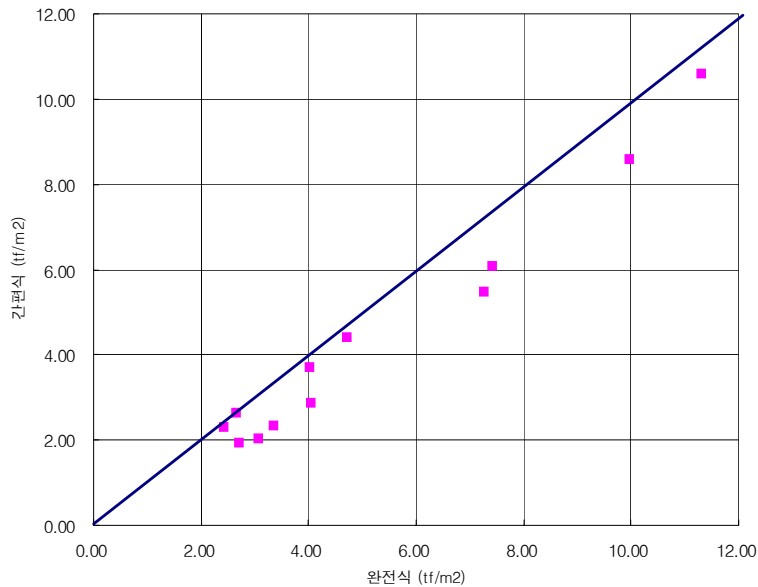


그림 8. 완전식 식 (11) 및 간편식 식 (12)를 이용한 지지력 산정결과

$$q_a = \frac{1}{F_s} \left(1 + \frac{H}{b}\right) \left[\left\{ 5.3c_u + \beta_s \cdot RFr \cdot RFe \cdot T_{max} \left(\frac{2\sin\theta}{b} + \frac{1}{r} \right) + \frac{4 \cdot S_a \cdot R(1 - \cos\theta)}{b + H - D_f} \right\} \right] + \gamma_t \cdot D_f \quad (11)$$

$$q_a = \frac{1}{F_s} \left(1 + \frac{H}{b}\right) \cdot \left\{ 5.3c_u + \beta_s \cdot RFr \cdot RFe \cdot T_{max} \cdot \frac{2\sin\theta}{b} \right\} \quad (12)$$

여기에서,

F_s : 항복지지력에 대한 안전율로 일반적으로 2.0을 추천

H : 복토층 두께

D_f : 장비의 근입심도

b : 시공장비의 접지폭(m)

c : 준설패립층의 비배수 전단강도(tf/m^2)

N_c : 지지력계수로서 5.3 추천

r : 용기망의 반경으로 Geotextile는 2m, 대나무 망은 6m 를 추천

β_s : 강성도 계수로 Geotextile는 1, 대나무 망은 2.5를 추천

RFr : 시공시 유발되는 보강재 감소계수

RFe : 복토두께에 의한 보강재의 강성효과 감소계수

T_{\max} : 보강재의 극한인장강도

θ : 보강재가 수평면과 이루는 각도($^\circ$)로 Geotextile는 20° , 대나무 망은 10° 추천

R : 가상원의 반경

S_a : 보강재의 전단저항력

γ_t : 복토층의 단위중량

그림 9는 새롭게 제안된 지지력 산정법(식 (12))을 이용하여 산정한 제안지지력과 현장시험 결과로부터 얻은 지지력과의 관계를 나타내고 있다. 그림 9로부터 지오텍스타일, 대나무 망 모두 새롭게 제안된 지지력 산정법을 통해 얻은 지지력은 현장시험결과로부터 얻은 지지력보다 안전측임을 보여주고 있으며, 새롭게 제안된 지지력 산정법의 적정성이 확인되었다.

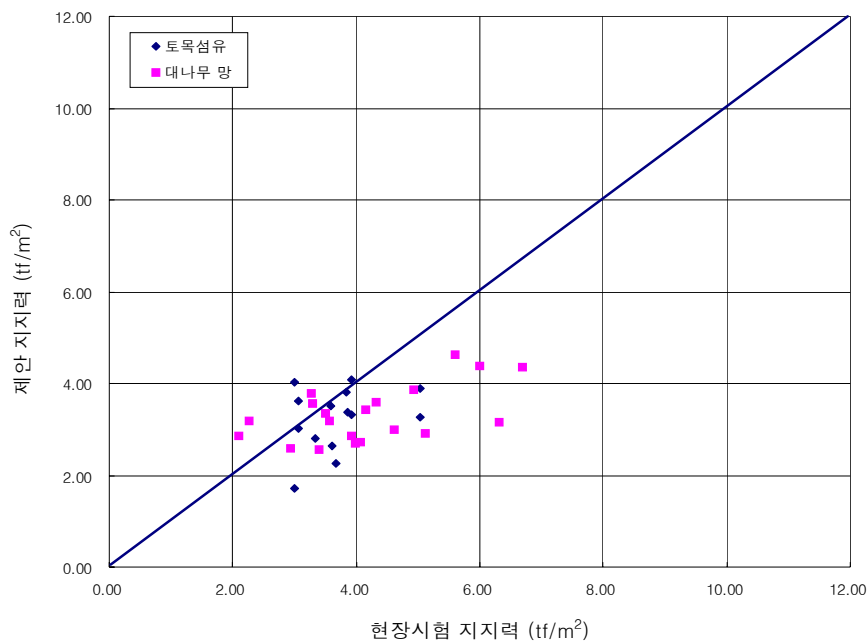


그림 9. 현장시험 지지력과 제안지지력과의 관계

5. 결 론

본 연구에서는 강성도를 고려할 수 있는 표층처리공법 지지력산정방법을 제안하는 것을 목적으로 실내모형실험 및 현장시험을 수행하였다. 실험결과로부터 강성도 효과를 평가할 수 있는 지지력산정식을 제안하였고, 그 적정성을 평가하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 실내모형실험결과로부터 얻은 파라미터(T_i , θ , r)로부터 기존의 Yamanouchi 제안식을 이용해 지지력을 평가한 결과, 연성보강재가 지지력효과에 미치는 영향을 명확히 평가하는데 비해 강성도가 큰 재료의 지지력 효과에 미치는 강성도의 영향을 적정히 평가하지 못하는 것이 확인되었다.
2. 본 연구에서는 보강재의 강성도 효과를 평가할 수 있는 강성도계수 β_s 를 제안하였고, 제안한 강성도계수 β_s 는 실험정수로서 지오텍스타일은 1.0, 지오그리드는 1.1, 강봉은 1.5가 적당하다는 것이 실험을 통해 확인되었다.
3. 보강재 개량효과에 미치는 강성도 효과는 복토두께의 증가에 의해 감소되며, 이러한 강성효과 감소계수 RFe 는 H/B와 좋은 상관관계 특성을 나타내는 것으로 평가되었다.
4. 본 연구에서 제안한 지지력 산정방법을 통해 얻은 제안지지력은 현장시험결과로부터 얻은 지지력을 거의 명확히 추정하고 있으며 제안한 지지력 산정방법의 적정성이 확인되었다.

Acknowledgements

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

참고문헌

1. Yamanouchi(1985), "Recent development in the used synthetic geofabrics and geogrids", Symposium on Recent Developements in Ground improvement techniques. Bankok, pp.205~224.
2. 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.
3. 함태규, 조삼덕, 양기석, 유승경(2008), "보강재의 구속조건에 따른 초연약지반의 지지력개선효과에 관한 연구", 한국토목섬유학회논문집, 제7권, 제3호, pp.41-49.
4. ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施行マニュアル(1998)