

## 표층보강 초연약지반 거동의 예측 방법 개발

### Development of Prediction Method for Behavior of Reinforced Very Soft Clay

이종선<sup>1)</sup>, Jongsun Lee, 이철호<sup>2)</sup>, Chulho Lee, 유승경<sup>3)</sup>, Seung-Kyong You, 최항석<sup>4)</sup>, Hangseok Choi

<sup>1)</sup> 바우 컨설팅 지반터널부 사원, Staff, Geotechnical / Tunnel Division, Bau Consultant. Co., Ltd

<sup>2)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University

<sup>3)</sup> 명지전문대학 토목과 부교수, Associate Professor, Dept. of civil Eng, Myongji College

<sup>4)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University

**SYNOPSIS :** In this study, the mechanical behavior of very soft ground that is reinforced on the surface has been investigated with the aid of a series of numerical analyses. Key material properties of each dredged soft ground, reinforcement and backfill sand mat have been parametrically estimated in the numerical analysis. Along with the result of the study previously performed, a series of in-situ loading conditions and settlement exerted by surface reinforcing operation by construction vehicles has been numerically simulated. These result have been used to evaluate the limit bearing capacity for the unreinforced and reinforced soft ground. Also, the results of the numerical analysis obtained in this research were compared with Yamanouchi's empirical correlation for the limit bearing capacity. Engineering charts listed in this paper for estimating the limit bearing capacity provide field engineers with preliminary design tool for surface reinforcement of very soft ground.

**Keywords :** soft ground, reinforcement, numerical analysis, limit bearing capacity, engineering chart

## 1. 서론

준설토에 의해 매립된 지반은 일반적으로 함수비가 높고 유기질토가 함유되어 있으며 압축성이 큰 특징을 가지고 있다. 때문에 준설토매립지반은 그 사용목적에 맞는 소정의 강도를 갖도록 개량해야 하며, 이를 위한 다양한 심층개량공법이 실시되고 있다. 보강되지 않은 준설토매립지반은 지지력이 매우 낮으며 지반개량을 위한 장비 및 인력의 진입조차 어렵기 때문에 장비주행성을 확보하기 위한 표층개량공법이 실시되어야 한다. 현재 국내에서는 표층처리된 지반의 지지력을 판정하기 위해 보통 Yamanouchi(1979)가 제안한 지지력 공식을 사용하고 있다. Yamanouchi에 의한 지지력 공식은 Terzaghi의 지지력 이론을 바탕으로 시트의 인장력 및 응기에 의한 구속효과를 고려하며, 사용되는 입력정수의 결정이 까다로우며 적합한 설계기준으로 제시하기 어렵다. 따라서 현재 초연약지반에 작용하는 단기하중에 대한 역학적 거동 및 보강재의 보강효과를 적절히 반영할 수 있는 합리적인 표층처리 설계의 연구가 필요하다. 유승경 등(2008)은 표층처리된 초연약지반에 적용할 수 있는 수치해석 방법을 제시한 바 있으며, 본 연구에서는 적용성이 확인된 수치해석 방법을 이용하여 표층처리된 준설토매립지반의 조건에 따른 수치해석을 실시하

였다. 이를 바탕으로 초연약지반의 거동을 확인하고 극한 지지력을 파악하였다. 또한 이 극한지지력을 이용하여 표층처리공법의 설계도표를 제시하고 다양한 현장조건에 따른 초연약지반의 거동을 예측하였으며, Yamanouchi의 지지력 이론에 의한 극한 지지력과의 비교, 검토하였다.

## 2. 현장조건에 따른 초연약지반의 침하거동 해석

### 2.1 수치해석 개요

유승경 등(2008)은 상용 수치해석 프로그램을 이용하여 표층처리된 초연약지반의 거동을 확인하였으며, 표층처리된 초연약지반에 적용할 수 있는 구성모델 및 물성치를 예측하고 그 적용성을 판단하였다. 본 연구에서는 표층처리된 초연약지반에 적용할 수 있는 수치해석 방법을 통하여 시공장비의 접지면적 및 접지압을 고려한 표층처리된 연약지반 거동을 예측하였다. 이를 위해 초연약지반 함수비, 표층보강재 종류, 복토의 두께, 재하폭을 달리한 수치해석을 실시하였다. 일반적인 준설매립현장의 조건을 고려하여 초연약지반의 깊이는 12m로 설정하였으며, 폭은 20m의 2차원 축대칭 모델을 사용하였다. 초연약지반의 함수비 95%~140%에 따른 물성치를 적용하였으며 표층보강재는 Geotextile 및 대나무망을 해석에 적용하였다. 복토의 두께는 0.5m~2m를 적용하였다. 표층처리공법에 이용되는 시공장비의 접지면적은 종류에 따라 다양하다. 따라서 시공장비의 종류에 따른 접지면적을 2차원 축대칭 모델에 적용할 수 있는 환산단면으로 바꾸어 반단면 재하폭을 설정하였다. 표 1은 수치해석에 사용된 재하폭과 이에 따른 시공장비의 접지면적 및 접지압을 나타낸다. 표 2, 3, 4는 유승경 등(2008)에 수행된 수치해석을 통해 얻어진 초연약지반, 표층보강재, 복토재의 구성모델 및 물성치를 나타낸다. 그림 1, 2는 수치해석에 사용된 표층처리된 초연약지반의 모델 및 격자형상을 나타낸다. 여기서 B는 반단면 재하폭, d는 복토두께를 나타낸다.

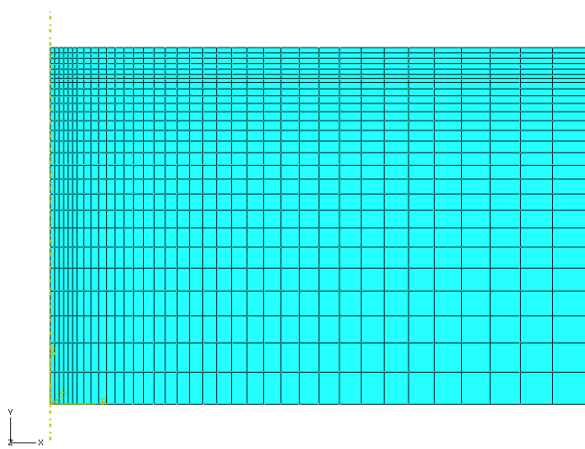


그림 1. 수치해석 메쉬형상

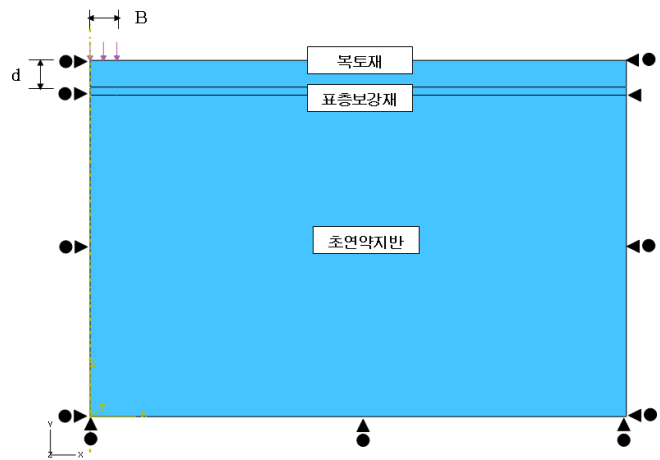


그림 2. 수치해석 모델 및 해석조건

표 1. 해석에 적용된 재하폭 및 접지면적과 적용장비

반단면 재하폭(m)	접지면적( $m^2$ )	적용 장비	접지압(kPa)
0.8	2.0	습지도저	20~25
1	3.1	소형 도저	25~30
1.2	4.5	중·대형 도저	35~45
1.5	7.1	PBD 장비	75~120

표 2. 초연약지반 해석모델의 종류

해석 모델	함수비(%)	구성모델	$\gamma_t$ ( $kN/m^3$ )	E (kPa)	$\nu$	$\phi$ (°)	yield stress(kPa)
초연약지반	95	Drucker-Prager	17	12	0.45	0	1.2
	125		17	7	0.45	0	0.8

표 3. 표층보강재 해석모델의 종류

해석 모델	두께(cm)	구성모델	$\gamma_t$ ( $kN/m^3$ )	E(kPa)	$\nu$	yield stress(kPa)
Geotextile	2	Elasto-Plastic	17	$8 \times 10^4$	0.1	800
대나무			17	$5 \times 10^6$	0.1	$1.2 \times 10^4$

표 4. 복토재 해석모델의 종류

해석 모델	두께(m)	구성모델	$\gamma_t$ ( $kN/m^3$ )	E(kPa)	$\nu$	c(kPa)	$\phi$ (°)
복토재	0.5	Morh-Coulomb	17	$1.2 \times 10^3$	0.3	40	35
	1.0						
	1.5						
	2.0						

## 2.2 무보강 초연약지반의 침하거동

표층보강재 및 복토가 설치되지 않은 무보강 지반에 대한 수치해석을 실시하고 재하압력-침하량 관계를 확인하였다. 그림 3, 4는 각 반단면 재하폭에 대한 무보강 초연약지반의 침하관계를 초연약지반 함수비에 따라 나타낸 것이다. 초연약지반의 함수비가 증가함에 따라 침하량이 증가하는 경향을 보이며, 반단면 재하폭의 증가에 따라 침하량이 증가하는 경향을 보인다.

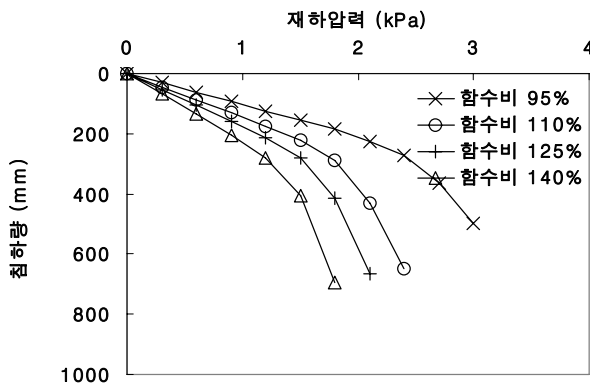


그림 3. 반단면 재하폭 0.8m의 무보강 초연약지반 침하거동

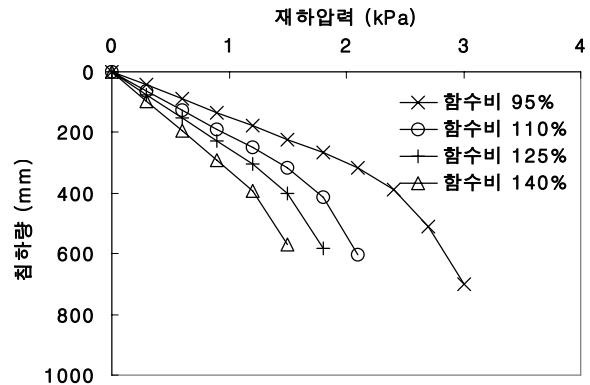


그림 4. 반단면 재하폭 1.2m의 무보강 초연약지반 침하거동

### 2.3 Geotextile보강 초연약지반의 침하거동

Geotextile로 보강된 초연약지반의 함수비, 반단면 재하폭 및 복토 두께에 따른 침하거동을 확인하였다. 그림 5에서 8은 Geotextile로 보강된 함수비 95%인 초연약지반의 반단면 재하폭에 따른 침하거동을 나타낸다. 복토두께가 증가함에 따라 침하량이 감소되는 경향을 보인다. 또한 반단면 재하폭이 증가함에 따라 침하량이 증가하는 경향을 보이며, 이는 동일한 재하압력에서 재하폭의 증가에 따라 가해지는 하중이 커지므로 발생하는 것을 알 수 있다.

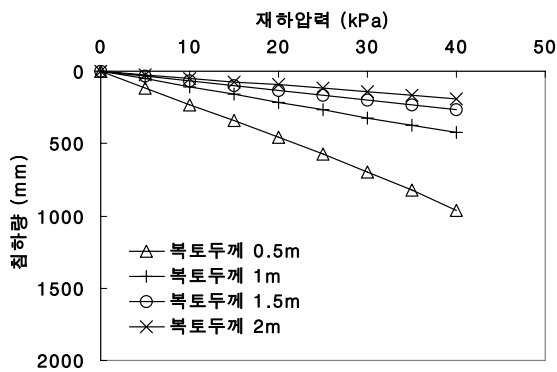


그림 5. 반단면 재하폭 0.8m의 침하거동

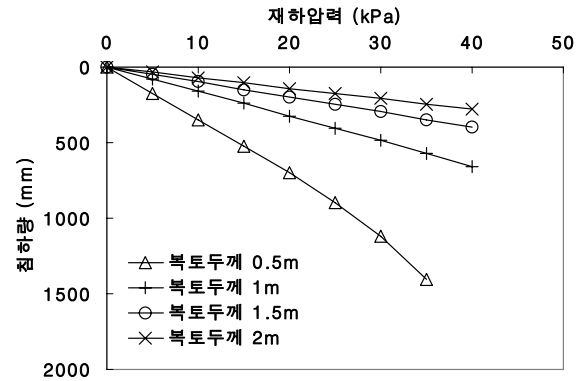


그림 6. 반단면 재하폭 1m의 침하거동

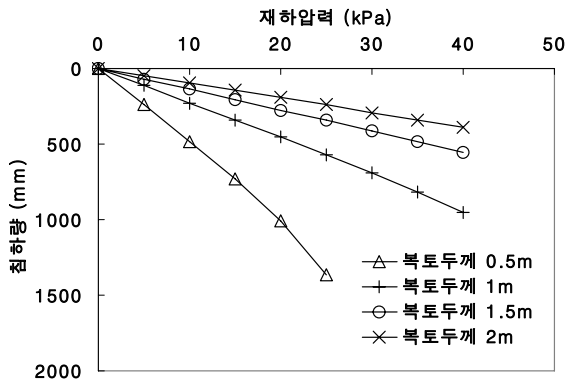


그림 7. 반단면 재하폭 1.2m의 침하거동

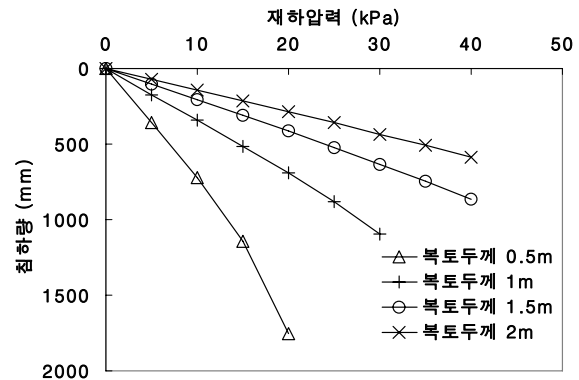


그림 8. 반단면 재하폭 1.5m의 침하거동

### 2.4 대나무보강 초연약지반의 침하거동

그림 9에서 12는 대나무로 보강된 함수비 95%인 초연약지반의 반단면 재하폭에 따른 침하거동을 나타낸다. Geotextile과 동일하게 복토두께가 증가함에 따라 침하량이 감소되는 경향을 보이며, 반단면 재하폭이 증가함에 따라 침하량이 증가하는 경향을 나타낸다. 대나무로 보강된 경우, Geotextile로 보강된 경우에 비하여 침하량이 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 두 보강재의 강성의 차이에 따른 것으로 판단된다.

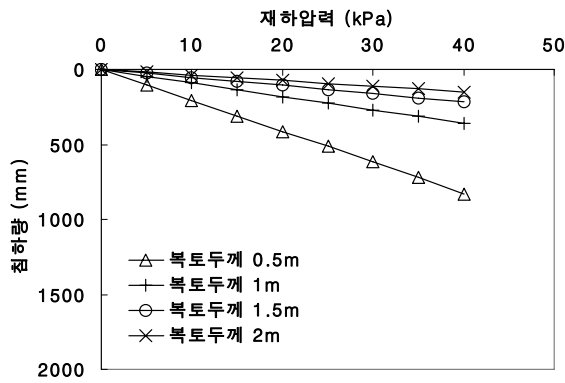


그림 9. 반단면 재하폭 0.8m의 침하거동

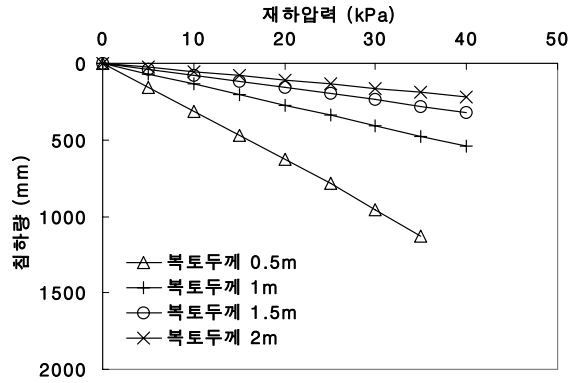


그림 10. 반단면 재하폭 1.0m의 침하거동

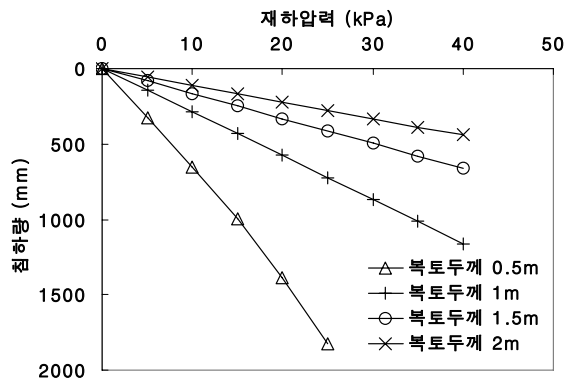


그림 11. 반단면 재하폭 1.2m의 침하거동

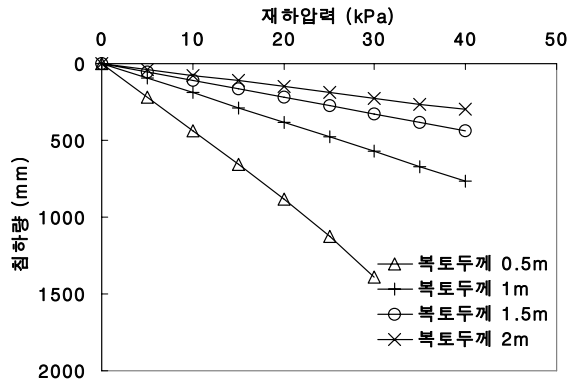


그림 12. 반단면 재하폭 1.5m의 침하거동

### 3. 극한 지지력 평가

K.H.Khing 등(1994)은 연약점토에 Geogrid 및 복토로 보강된 지반의 BCR(Bearing Capacity Ratio)을 판단함에 있어 극한 침하량을 이용한 극한지지력을 이용하였다. 여기서 극한 침하량은 재하폭의 10%에 해당하는 침하량을 의미한다. 또한, 신은철 등(2002)은 Geogrid로 보강된 모래지반의 BCR을 극한 침하량에 의해 산정하였으며, 극한 침하량을 재하폭의 2.5%, 5%로 가정하였다. 본 논문에서는 극한 침하량을 재하폭의 10%로 가정하여 극한 지지력을 산정하였다.  $BCR_s$ 는 극한 침하량을 이용한 무보강 지반 지지력과 보강된 지반 지지력의 비를 나타내며 다음 식 1과 같이 나타낸다. 여기서  $q_{ur}$ 은 표층처리된 초연약지반의 극한 지지력,  $q_u$ 는 무보강 초연약지반의 극한 지지력을 나타낸다.

$$BCR_s = \frac{q_{ur}}{q_u} \quad (1)$$

#### 3.1 무보강 초연약지반의 극한 지지력

다음 그림 13은 반단면 재하폭에 대한 각 함수비에 따른 무보강 초연약지반의 극한 지지력을 나타낸다. 반단면 재하폭의 변화에 따른 극한 지지력의 변화가 0.05kPa 이내인 것을 확인하였으며, 함수비가 증가함에 따라 극한 지지력이 감소하는 경향을 나타낸다.

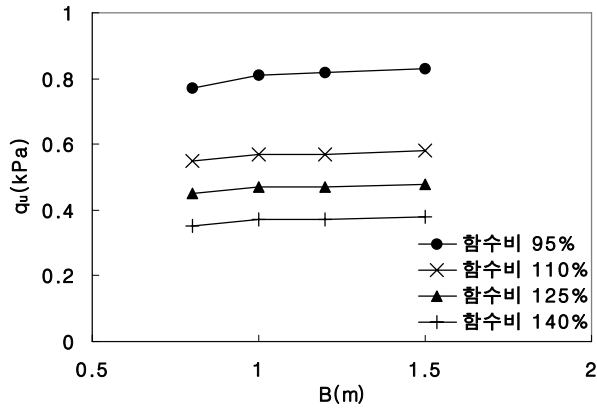


그림 13. 무보강 초연약지반의 극한지지력

### 3.2 Geotextile보강 초연약지반의 극한 지지력

다음 그림 14, 15는 Geotextile로 보강된 경우 각 초연약지반 함수비에 따른 극한 지지력을 나타낸 것이다. 반단면 재하폭이 증가함에 따라 극한 지지력은 감소하는 경향을 나타내며 복토두께가 증가할수록 극한 지지력은 증가하는 경향을 보인다. 다만 복토두께가 0.5m인 경우 반단면 재하폭의 변화에 따른 극한 지지력의 변화가 상대적으로 작음을 확인할 수 있다. 또한 Geotextile로 보강된 초연약지반은 초연약지반 함수비에 의한 지지력 변화가 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 보강된 경우 지반의 거동이 보강재의 보강효과에 의존하기 때문인 것으로 판단된다.

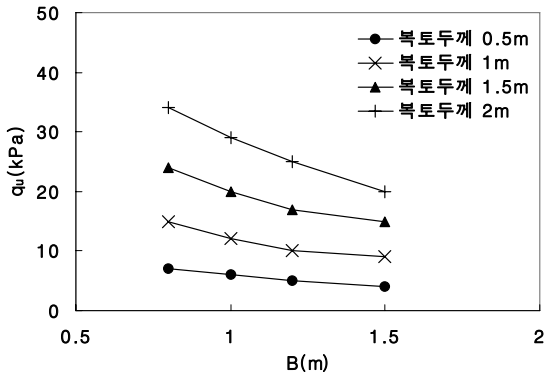


그림 14. 함수비 95% 초연약지반의 극한지지력

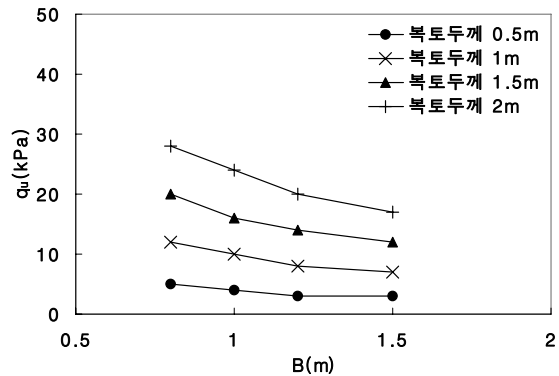


그림 15. 함수비 125% 초연약지반의 극한지지력

### 3.3 대나무보강 초연약지반의 극한 지지력

그림 16, 17은 대나무로 보강된 경우 각 초연약지반 함수비에 따른 극한 지지력을 나타낸 것이다. 대나무로 보강된 경우, Geotextile로 보강된 경우와 마찬가지로 반단면 재하폭이 증가함에 따라 극한 지지력은 감소하는 경향을 나타내며, 복토두께가 증가할수록 극한 지지력은 증가하는 경향을 보인다. 대나무로 보강된 초연약지반 또한 초연약지반 함수비에 의한 지지력 변화가 상대적으로 크지 않은 것을 확인하였다.

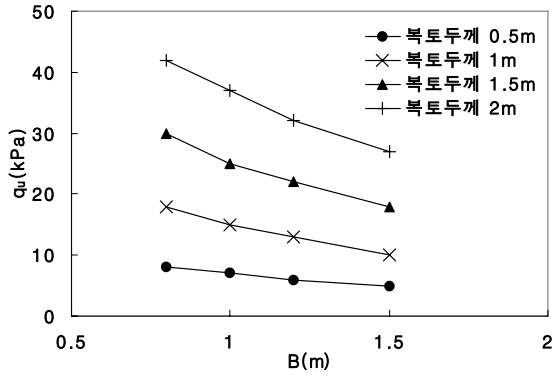


그림 16. 함수비 95% 초연약지반의 극한지지력

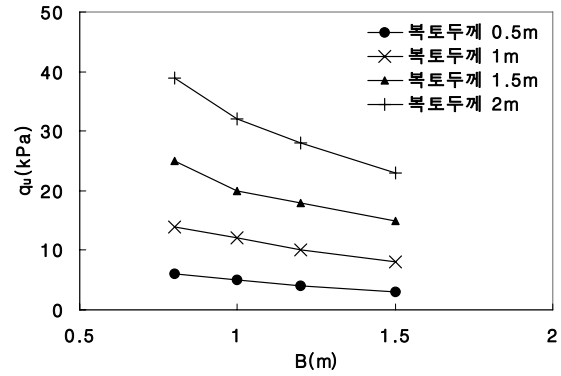


그림 17. 함수비 125% 초연약지반의 극한지지력

#### 4. 표층처리공법 설계도표를 통한 표층보강된 초연약지반 예측

3장에서 확인된 다양한 조건에 따른 보강된 초연약지반의 극한지지력을 표층처리공법의 설계도표로 이용할 수 있다. 가령 어떤 장비를 사용하고자 할 때 그 장비를 사용할 수 있는 적절한 표층처리방법을 선정할 수 있다. 초연약지반의 함수비는 95%이며 안전율은 1.5라 가정하고, 소형도저를 사용할 수 있는 표층처리방법을 확인해 보고자 한다. 표 1을 참고하면 소형도저의 접지압은 약 20kPa, 반단면 재하폭은 0.8m이다. 소형도저의 접지압에 안전율을 적용하여 소형도저를 사용할 수 있는 표층보강된 초연약지반의 극한 지지력을 확인하면 약 30kPa이다. 이 극한 지지력을 그림 14, 16의 설계도표에 적용하여 표층보강방법을 확인하면 Geotextile로 보강한 경우 복토를 약 2m를 포설해야 하며, 대나무로 보강한 경우 복토를 1.5m 이상 포설해야 함을 확인할 수 있다.

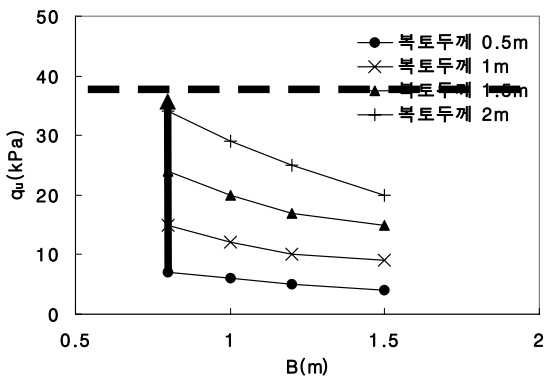


그림 18. Geotextile보강 초연약지반의 극한지지력 (초연약지반 함수비 95%)

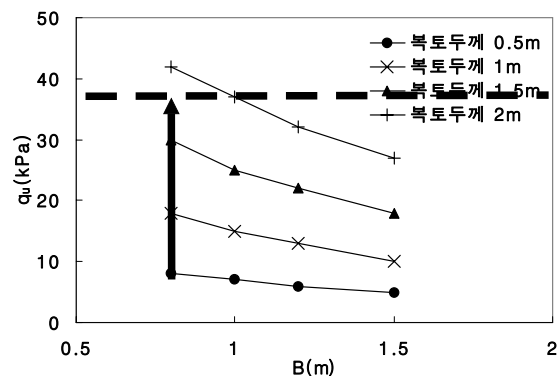


그림 19. 대나무보강 초연약지반의 극한지지력 (초연약지반 함수비 95%)

#### 5. 기존 지지력 이론식과 비교

표층처리공법의 설계방법 중 대표적인 Yamanouchi에 의한 지지력 산정식을 본 연구에서 제안된 지지력과 비교, 검토하였다. 초연약지반 함수비 125%의 결과를 기준으로 재하폭, 복토 두께, 보강재의 종류

를 수치해석과 동일하게 적용하여 Yamanouchi의 방법에 의한 지지력을 산정하였다. 다음 식 2는 Yamanouchi의 지지력 산정식을 나타낸다. 여기서, 마찰저항력( $S_a$ ) 및 용기막의 반경( $r$ ), 장비의 근입 심도( $D_f$ )는 지지력에 미치는 영향이 미소하므로 이를 무시하고 간략화하면 다음 식 3과 같다.

$$q_u = \frac{(b+d-D_f)}{b} \left( 5.3c + \gamma D_f + T \left( \frac{1}{r} + \frac{2 \sin \Theta}{b} \right) + \frac{4S_a R(1 - \cos \Theta)}{(b+d-D_f)} \right) \quad (2)$$

$$q_u = \frac{(b+d)}{b} \left( 5.3c + \frac{2T \sin \Theta}{b} \right) \quad (3)$$

여기서  $b$ 는 재하폭,  $d$ 는 복토의 두께,  $c$ 는 점착력,  $T$ 는 보강재의 인장력,  $\Theta$ 는 인장력 작용각을 나타낸다. 함수비 125%인 경우 배인 전단시험에 의한 비배수 전단강도는 약 1kPa이며, 그림 20에 의해  $\Theta$ 는 약 20~43°의 가진다. 여기서  $\Theta$ 의 편차가 크므로 각각 최대, 최소값을 사용하여 Yamanouchi의 방법에 의한 지지력의 범위를 산정하였다. Geotextile 및 대나무의 인장력은 함태규 등(2009)에서 제안된 값을 사용하였다. 다음 표 5는 Yamanouchi의 산정식에 이용된 계수의 값을 나타낸다.

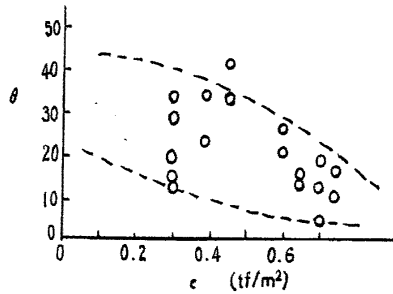


그림 20. 초연약지반 점착력과  $\Theta$ 의 관계(Nishibayashi, 1982)

표 5 Yamanouchi 산정식의 계수

Yamanouchi 계수	2B(재하폭, m)	d(복토두께, m)	c(kPa)	$\Theta(^{\circ})$	T(kN/m)
적용 값	1.6, 2, 2.4, 3	0.5, 1, 1.5, 2	0.8	20, 43	35.3(Geotextile)

그림 21에서 24는 본 논문에서 확인된 Geotextile로 보강된 함수비 125% 초연약지반에 대한 극한지지력과 Yamanouchi의 방법에 의한 극한지지력 비교를 나타낸다. 본 논문에 의한 극한 지지력과 Yamanouchi의 극한 지지력 모두 재하폭이 증가함에 따라 극한 지지력이 감소하는 경향을 보여준다.



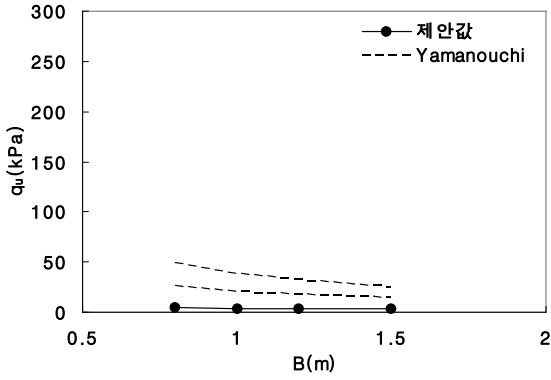


그림 21. 복토두께 0.5m의 극한지지력

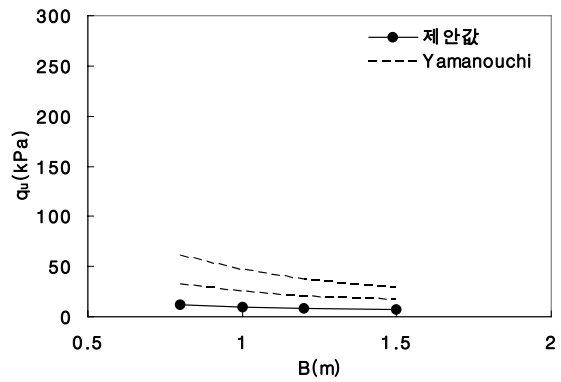


그림 22. 복토두께 1m의 극한지지력

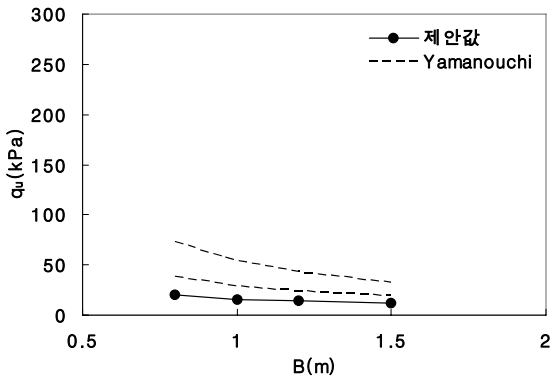


그림 23. 복토두께 1.5m의 극한지지력

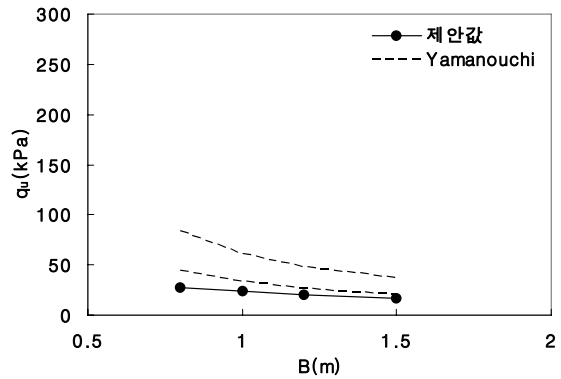


그림 24. 복토두께 2m의 극한지지력

## 6. 결론

본 논문에서는 수치해석 프로그램을 이용한 매개변수 해석을 통하여 표층처리된 초연약지반의 거동에 대하여 확인하였다. 특히 표층처리된 초연약지반의 구성요소에 의한 영향을 확인하였으며, 극한 지지력을 산정하고 표층처리공법의 설계도표를 제시하였다. 본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 현장과 유사한 표층처리된 초연약지반의 거동을 예측하기 위해 일반적인 현장 조건을 적용한 수치해석을 실시하였다. 그 결과 표층처리된 초연약지반의 거동은 복토의 두께에 의해 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다.
2. 극한 침하량을 이용한 극한 지지력을 확인하였다. 재하폭이 커질수록 극한 지지력은 증가하는 경향을 나타낸다. 다만 복토두께가 0.5m인 경우 재하폭에 의한 극한 지지력 변화가 미비한 것을 확인하였다.
3. 극한 지지력을 이용하여 표층처리공법의 설계도표를 제시하였다. 이를 이용하여 임의의 시공장비를 사용할 수 있게 하는 표층처리방법을 확인할 수 있다. 이는 표층처리공법의 설계지침으로 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 다만 현재 시험조건이 제한적이므로 다양한 실내시험 및 현장시험의 데이터를 축적하고, 추가적인 수치해석 및 관련 연구를 통하여 보다 명확한 표층처리공법 설계지침을 개발하는 것이 필요하다.
4. Yamanouchi의 제안식에 의한 극한 지지력을 계산하여 본 논문의 극한 지지력과 비교, 검토하였다. Yamanouchi의 제안식은 Geotextile로 보강된 경우 복토두께에 의한 영향을 적절히 표현하지 못한다. 본 논문의 극한 지지력은 Yamanouchi의 지지력과 유사한 정성적, 정량적 거동을 보이나 복토두께의 변화에 따라 극한 지지력의 변화가 뚜렷하다.

## 참고문헌

1. 강명찬, 양기석, 이송(2006), “대나무 망으로 보강된 준설매립지반의 지지력 특성”, 한국지반공학회 논문집, 제22권, 8호, pp.5~11
2. 권호진, 김동수, 박준범, 정성교(2001), 기초공학, 구미서관
3. 김대현, 야마모토 켄타로(2004), “점토층위의 모래지반에 위치한 얇은기초의 지지력에 대한 상한 한계해석”, 한국지반공학회논문집, 제20권, 3호, pp.85~96
4. 김영민(2003), “수치해석적 방법에 의한 층상 점토지반의 극한지지력 해석”, 한국지반공학회논문집, 제19권, 1호, pp.121~129
5. 박철원(2005), “대나무MAT 포설 지반의 지지력평가에 관한 연구“, 전남대학교 석사학위논문
6. 양기석, 강명찬, 김윤하(2004), “초연약지반의 표층처리를 위한 대나무망 공법”, 한국구조물학회지, 제 8권, 제2호, pp.46~52
7. 유승경, 이종선, 함태규, 양기석, 조삼덕, 최항석(2008), “표층처리공법으로 개량된 초연약지반의 침하 거동에 미치는 영향인자 분석”, 한국지반공학회논문집, 제24권, 제12호, pp.85~92
8. 한국지반공학회(2005), “지반공학시리즈 10 준설매립”, 구미서관
9. 함태규, 서세관, 조삼덕, 양기석, 유승경(2009), “실내모형실험을 통한 표면건조층이 표층처리된 초연약지반의 침하거동에 미치는 영향”, 한국토목섬유학회 봄 학술발표회 논문집
10. 함태규, 조삼덕, 양기석, 유승경(2008), “연약지반 표층보강재의 인장강도와 복토 두께의 지지력개선 효과에 관한 실험적 연구”, 한국토목섬유학회 봄 학술발표회 논문집, pp.77~90
11. E. C. Shin, B. M. Das, E. S. Lee and C. Atalar(2002), “Bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced sand”, Geotechnical and Geological Engineering, Vol.20, pp.169~180
12. K. H. Khing, B. M. Das, V. K. Puri, S. C. Yen and E. E. Cook (1994), “Foundation on Strong Sand Underlain by Weak Clay with Geogrid at the Interface”, Geotextile and Geomembrane, vol.13, pp.199~206
13. Krystyna Kazimierowicz-Frankowska(2007), “Influence of geosynthetic reinforcement on the load-settlement characteristics of two-layer subgrade”, Geotextile and Geomembrane, vol.25, pp.366~376
14. Yamanouchi. T, Keinosuke, G.(1979), A Propose Practical Formula of Bearing Capacity for Earthwork Method on Soft Clay Ground Using a Resinous Mesh, 九大工學集報. pp.201~207
15. Yamanouchi. T, Keinosuke. G and Tokuji. A(1979), “Calculation of Settlement of Resinous Mesh in It's Application to Earth Works by the Use of Slab Theory”, 九州大學工學週報, vol.52, No.4, pp.433~440
16. Yoshihara. W, Yohei. H(1986), “Model Test and Analysis on Geotextiles Used for Improvement of Very Soft Ground under Continuous Loading”, The Jananese Geotechnical Society, Vol.26, No4, pp.186~196