

표층처리된 초연약지반 거동에 대한 영향인자 분석

Analysis of the effect factors on behavior of the surface reinforced very soft ground

유승경¹⁾, Seung-Kyong You, 이종선²⁾, Jong-Sun Lee, 양기석³⁾, Kee-Sok Yang, 조삼덕⁴⁾, Sam-Deok Cho, 함태규⁵⁾, Tae-gew Ham, 최항석⁶⁾, Hangseok Choi

¹⁾ 명지전문대학 토목과 부교수, Associate Professor, Dept. of civil Eng, Myongji College

²⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept, of Civil, Environmental & Architectural, Korea Univ.

³⁾ 한국항만기술단 기술연구소장, Chief Researcher, Korea Port Eng.

⁴⁾ 한국건설기술연구원 토질 및 기초연구실 책임연구원, Chief Researcher, Geotechnical Eng. Division, Korea Institute of Construction Technology

⁵⁾ 한국건설기술연구원 토질 및 기초연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Eng. Division, Korea Institute of Construction Technology

⁶⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil, Environmental & Architectural, Korea Univ.

SYNOPSIS : It is necessary to develop a national design method for surface reinforcement of very soft ground because most current design works rely on crude empirical correlations. In this paper, the mechanical behavior of very soft ground that is surficially reinforced was investigated with the aid of a series of numerical analysis. Several material properties of each dredged soft ground, reinforcement and backfill sand mat have been exercised the numerical analysis in order to compare the result of numerical analysis with those of the laboratory model test. Through the matching process between the numerical and experimental result, it is possible to find the appropriate material properties of the dredged soft ground, reinforcements and backfill sand mat. These verified material properties permit to show the effect of the stiffness of reinforcement and the thickness of sand mat on the overall deformation

Key words : very soft ground, ground surface reinforcement method, numerical analysis, dredged soil, surface reinforcement

1. 서론

준설매립에 의해 조성된 초연약지반은 일반적으로 고풍수비, 고압축성의 특성을 가지므로 목적에 맞는 소정의 강도를 갖는 지반으로 개량하는 것이 필수적이다. 이를 위해 초연약지반의 심층개량이 요구되고 있으며 심층개량장비의 주행성을 얻기 위해 표층처리공법이 실시된다. 최근 국내에서는 준설매립에 의한 부지조성 공사가 활발히 이루어지고 있으며 이에 따라 표층처리에 대한 공법도 다양하게 발전되고 있다. 일반적으로 표층처리공법에는 geotextile을 이용한 시트공법이 주로 이용되고 있으나 이를 적용할 수 있는 명확한 설계지침이 없으며 Yamanouchi(1985)가 제안한 지반의 지지력공식을 참고하여 경험적인 설계가 이루어지고 있는 실정이다. Yamanouchi의 지반지지력 산정은 시트에 의해 보강된 초연약지반을 Terzaghi의 지지력 이론에 시트의 인장력 및 소성유동에 인한 근입효과를 도입한 것으로

입력정수의 판단이 어려워 적합한 설계기준으로 제시하기 어렵다. 이로 인해 현재 표층처리공법은 경험적인 설계가 주를 이루고 있고 그 연구 또한 미흡한 실정이므로 초연약지반에 작용하는 단기하중에 대한 역학적 거동 및 보강재의 보강효과를 적절히 반영할 수 있는 합리적인 설계법이 필요하다.

초연약지반의 거동 및 표층보강재에 의한 보강효과를 적절히 표현할 수 있는 수치해석방법의 개발은 합리적인 설계법의 기초를 세우고 표층보강재로 개량된 초연약지반의 거동을 예측하는데 있어 매우 중요하다. 현재 일반적인 수치해석 프로그램은 구조적인 해석을 바탕으로 지반 및 토질문제에 적용하여 발전하고 있는 단계이며, 초연약지반과 같은 저응력 상태에서 대변형이 발생하는 문제 및 인장에 의해 수직하중을 지지하는 표층보강재의 거동에 대한 문제를 적절히 표현하는데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 일반적인 수치해석방법으로 표현할 수 없는 초연약지반의 거동을 모사하기 위하여 적절한 수치해석 모델 및 물성치를 설정하고 실내모형실험의 결과와 비교·분석을 통하여 그 타당성을 확인하였다. 또한 다양한 경우에 대한 수치해석을 실시하여 초연약지반의 강도 및 보강재의 강성, 복토의 두께가 초연약지반의 거동에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 개요

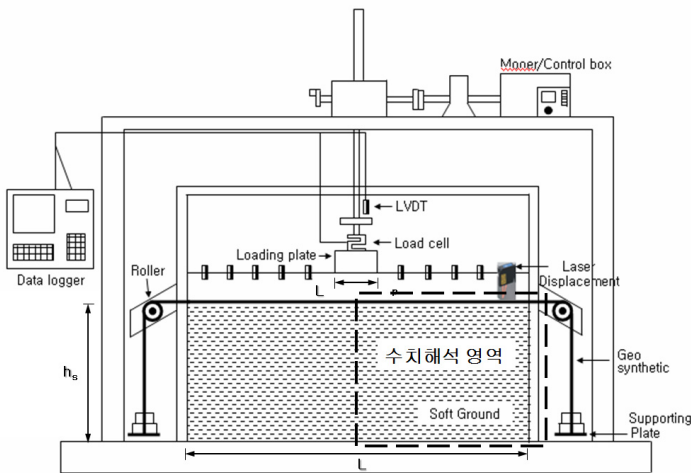


그림 1. 실내모형실험장치 및 수치해석 영역 (함태규, 2008)

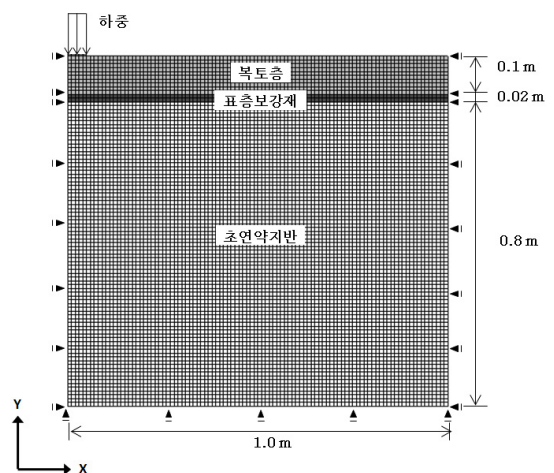


그림 2. 수치해석 모델

본 연구에서 수행한 수치해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 기존에 수행한 연약지반 표층보강재의 인장강도와 복토두께의 지지력개선효과에 관한 실험(함태규, 2008)의 결과를 이용하여 비교·평가하였다. 그림 1은 모형실험의 개요도를 나타내고 있다. 모형실험에서는 초연약지반을 광양항 준설점토를 사용하여 조성하였으며 무보강 및 표층보강에 대한 하중재하시험을 실시하였다. 표 1은 광양항 준설점토의 물리적 특성을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 유한요소해석 프로그램인 Midas GTS (ver 2.5.0)를 사용하였다. 본 수치해석에서는 초연약지반 및 표층보강재의 변형거동을 파악하기 위해 실내모형실험에 기초한 3단계의 수치해석을 실시하였다. 1단계는 무보강 실내모형실험을 통한 하중-변위 관계와 수치해석의 결과를 비교, 검토하여 초연약지반의 적합한 물성치를 결정하였다. 2단계는 표층보강재로 사용되는 geotextile에 의해 보강된 실내모형실험과 첫 번째 단계에서 얻어진 초연약지반의 물성치를 바탕으로 표층보강재의 물성치를 확인하였다. 3단계로 현장과 같이 복토 포설이 완료된 실내모형실험과 두 번째 단계에서 얻어진 입력정수들을 이용하여 복토에 대한 물성치를 확인하도록 하였다. 그림 2는 각 단계별 수치해석에 사용된 모델을 나타낸 것으로 실내모형실험의 반단면을 평면변형률조건에 의해 해석하도록 하였으며 각 단계에 따라 무보강 초연약지반 상부에 표층보강재 및 복토층을 설치하였다.

표 1. 광양항 준설 점토의 물리적 특성

| 시 료 | 비 중 | 단위중량 (kN/m^3) | 액성한계 (%) | 소성한계 (%) | 흙 분류 (통일분류법) | 초기 함수비 (%) |
|--------------|------|----------------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|
| 광양항 준설 점토 | 2.65 | 16.82 | 45.9 | 21.7 | CL | 126 |
| | | | | | | 95 |

2.2 해석재료의 모델화 및 검증

2.2.1 무보강 초연약지반

본 수치해석에서는 초연약지반의 비배수 상태에서의 단기 변형거동을 확인하기 위해 초연약지반을 탄소성체로 가정한 von-mises 모델을 사용하였다. 표 2는 무보강 초연약지반의 수치해석에 적용된 입력정수를 나타낸 것이다. 그림 3은 무보강 초연약지반의 수치해석 결과 및 실내시험결과를 나타낸 것이다. 2.5kPa 이내의 하중에서 실내모형실험에 의한 하중-침하량 관계와 유사함을 확인하였으며 하중이 증가할수록 급격한 침하가 이루어짐을 나타내고 있다. 이는 고함수비의 초연약지반의 특성을 잘 표현하고 있는 것으로 판단되며 수치해석에 적용한 초연약지반의 구성모델 및 물성치가 적합함을 확인할 수 있다.

표 2. 초연약지반에 대한 수치해석 조건 및 입력정수

| 해석 케이스 | 구성모델 | γ_t (kN/m^3) | E (kPa) | ν | w (%) |
|--------|-----------|-------------------------|---------|-------|-------|
| NR-95 | von-mises | 17 | 20 | 0.45 | 0.8 |
| NR-126 | | 17 | 11 | 0.45 | 0.75 |

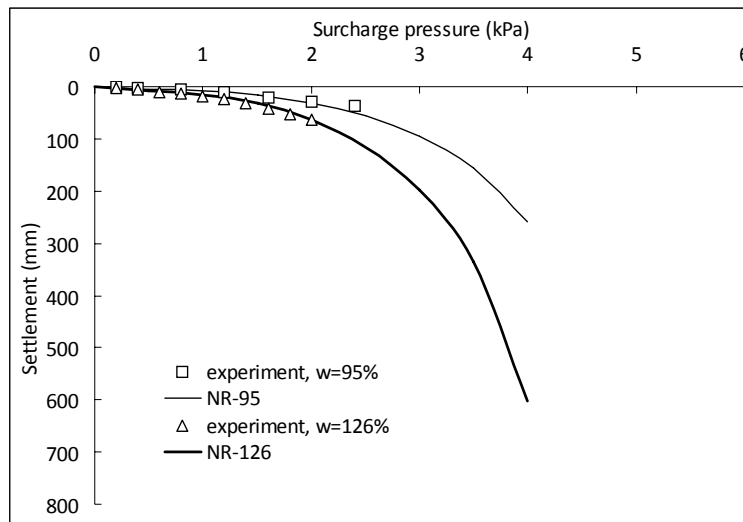


그림 3. 무보강 초연약지반의 상재하중에 따른 침하거동

2.2.2 표층보강된 초연약지반

표층보강재로 사용된 geotextile에 대한 해석모델은 일반적으로 geogrid 요소를 적용할 수 있다. 그러나 이러한 요소는 축강성을 가진 탄성체로 인장력을 계산할 수 있으나 연직하중에 의한 변형 및 응력 계산에 한계가 있으므로 본 연구에서는 표층보강재를 소정의 두께를 가진 지반요소로 가정하고 Strain-Softening 모델을 적용하였다. 이 모델은 재료가 파괴 후 잔류강도상태에 도달하는 연화거동을 나타내

리라 생각되는 표층보강재를 모사하기 적합하며 모델지반 전체 거동에 대한 하중-변형관계의 비선형성을 표현하기 용이하다. 실내모형실험에서 보강재의 양 단부를 고정시켜 실험한 것을 모사하여 보강재 우측면의 수직 및 수평 변위를 고정하였으며 좌측면은 수평 변위를 고정시켰다. 보강된 초연약지반의 거동은 표층보강재의 강성에 따라 다르므로 대나무를 모사한 강봉에 의해 보강된 초연약지반의 실내시험결과와 수치해석을 비교하였다. 표 3은 2단계 수치해석에 사용된 입력정수를 나타낸 것으로 SR-GT는 geotextile에 의해 보강된 수치해석 입력정수이며 SR-SB는 대나무를 모사한 강봉에 의해 보강된 수치해석 입력정수이다. 표층보강된 초연약지반의 실내실험은 함수비 126%인 시료를 사용하였으므로 기본적인 초연약지반의 물성치는 그에 따른 수치해석결과(NR-126)를 이용하였다.

그림 4는 표층보강된 초연약지반의 수치해석 및 실내시험결과를 나타낸 것이다. 수치해석 결과는 실내시험결과 범위 내에서 유사한 선형관계를 보이고 있으며 10kPa 이상의 하중에서 비선형 거동을 나타내고 있다. 또한 SR-BB도 실내시험결과를 잘 모사하고 있으며 적절한 하중-침하량 관계를 나타내고 있으므로 각 표층보강재의 물성치로 적절함을 확인할 수 있다.

표 3. 표층보강재에 대한 수치해석 조건 및 입력정수

| 해석 케이스 | 구성모델 | γ_t (kN/m^3) | E (kPa) | ν |
|--------|------------------|-------------------------|-----------------|-------|
| SR-GT | Strain-Softening | 17 | 8×10^4 | 0.1 |
| SR-SB | | 17 | 3×10^9 | 0.1 |

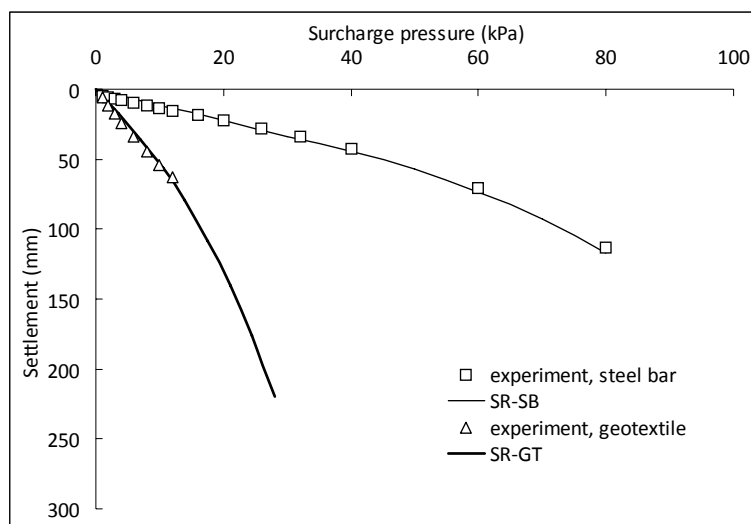


그림 4. 표층보강된 초연약지반의 상재하중에 따른 침하거동

2.2.3 복토보강 초연약지반

복토 보강된 초연약지반에서 복토재에 대한 모델링에서는 입상재료의 역학거동을 적절히 모사할 수 있는 Drucker-Prager모델을 사용하였다. 복토재는 보강재 상부에 두께 0.1m로 설치되도록 설정하였고 양측면의 수평 변위를 고정시켰다. 표 4는 3단계 수치해석에 사용된 입력정수를 나타낸 것이다. 초연약지반의 함수비 126%에 geotextile로 보강된 모형실험을 기초로 복토에 대한 실험을 실시하였으므로 초연약지반의 물성치는 NR-126, 표층보강재는 SR-GT에 의해 결정된 값을 사용하였다. 그림 5는 복토포설된 모델의 수치해석 및 실내모형실험의 결과를 나타낸 것이다. 3kPa 이상의 하중에서 하중-변위관계의 비선형성 거동을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 최종적으로 본 수치해석에 의해 보강재 및 복토로 보강이 완료된 실내모형실험의 변형거동을 적절히 모사하고 있으므로 각 단계별로 결정된 초연약지반 및 표층보강재, 복토재의 물성치가 합리적임을 확인할 수 있다.

표 4. 복토제에 대한 수치해석 조건 및 입력정수

| 해석 케이스 | 구성모델 | 복토두께 (cm) | γ_t (kN/m^3) | E (kPa) | ν | c (kPa) | ϕ ($^\circ$) |
|--------|----------------|-----------|-------------------------|-------------------|-------|---------|---------------------|
| ER-10 | Drucker-Prager | 10 | 17 | 2.5×10^4 | 0.3 | 0 | 30 |

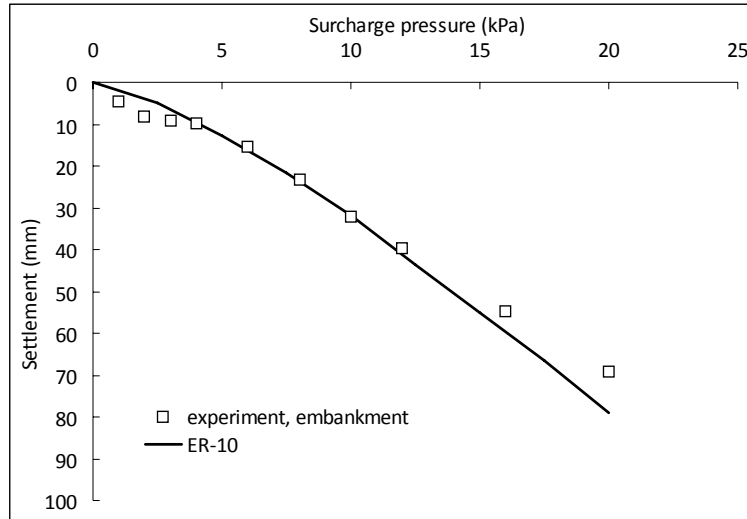
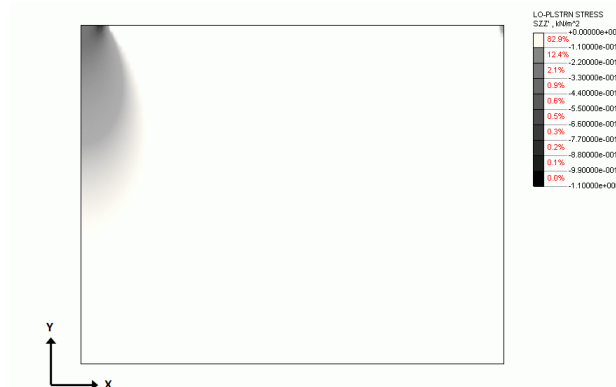


그림 5. 복토평설된 표층보강 초연약지반의 상재하중에 따른 침하거동

2.3 초연약지반의 응력분포 특성

상기 수치해석에 통해 표층보강된 초연약지반 및 복토평설된 표층보강 초연약지반의 적절한 물성치를 결정하였으며 이를 바탕으로 각 보강단계에 따른 응력 변화양상을 살펴보았다. 초연약지반은 NR-126, 표층보강 초연약지반은 SR-GT, 복토평설 표층보강 초연약지반은 ER-10의 수치해석 조건을 적용하였다. 그림 6은 각 모델의 수직응력을 나타낸 것으로 무보강 초연약지반은 1kPa 하중에 의한 응력분포를 확인하였으며 표층보강제 및 복토는 50kPa 하중에 의한 응력분포를 확인하였다. 무보강 초연약지반의 경우 하중 재하부에 응력집중이 발생함을 알 수 있으며 표층보강되었을 시에 연직응력이 초연약지반의 표층을 따라 수평으로 분산되는 것을 확인할 수 있다. 또한 복토를 포설하였을 때 초연약지반이 받는 응력이 가장 작음을 확인할 수 있다.



(a) 무보강 초연약지반

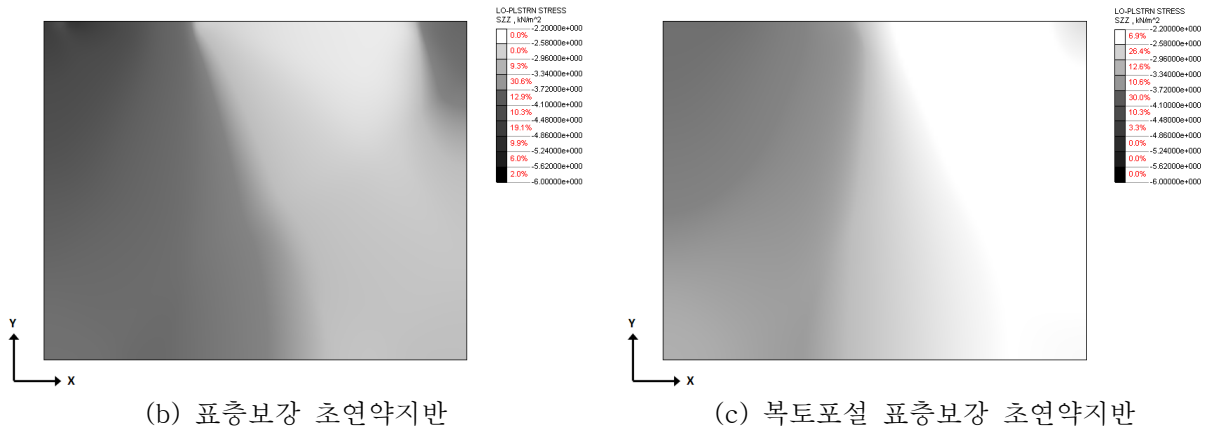


그림 6. 각 모델별 수직응력 분포

3. 초연약지반 거동에 대한 영향인자 분석

3.1 초연약지반 강도의 영향

그림 7은 광양항 점토의 함수비에 따른 비배수 전단강도를 나타내고 있다. 여기서 비배수 전단강도는 함수비를 변화시킨 점토시료에 대한 베인전단시험의 결과를 나타내고 있다. 그림으로부터 전단강도와 함수비의 관계를 도출하면 식 (1)과 같다.

$$Cu = 1925e^{-0.05w} \quad (1)$$

여기서 Cu 는 비배수 전단강도, w 는 함수비(%)를 나타낸다. 상기 수치해석에서 이용한 실내모형실험의 함수비를 식 (1)에 대입하여 얻은 비배수 전단강도와 수치해석에 의해 결정된 탄성계수의 관계를 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = 0.6Cu + 8.5 \quad (2)$$

식 (1), (2)를 이용하여 초연약지반의 탄성계수와 함수비의 관계를 나타내면 식 (3)과 같다.

$$E = 1155e^{-0.05w} + 8.5 \quad (3)$$

표 5는 위 식 (3)을 이용하여 초연약지반의 각 함수비에 따른 탄성계수를 산정한 것을 나타낸 것이며 이를 이용하여 함수비 변화에 따른 초연약지반의 침하거동양상을 살펴보았다. 그림 8은 함수비 변화에 따른 하중별 무보강 초연약지반의 침하거동을 나타낸 것이다. 초연약지반의 함수비가 감소함에 따라 침하량이 급격하게 감소함을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 초연약지반의 함수비에 따른 탄성계수를 파악하고, 이에 따른 침하량 관계를 확인할 수 있었으며 전단강도-함수비 관계 및 탄성계수-전단강도 관계에 대한 다양한 실험 및 수치해석을 실시하여 추후에 더욱 정확한 함수비-탄성계수 관계를 파악하는 것이 필요하다고 생각된다.

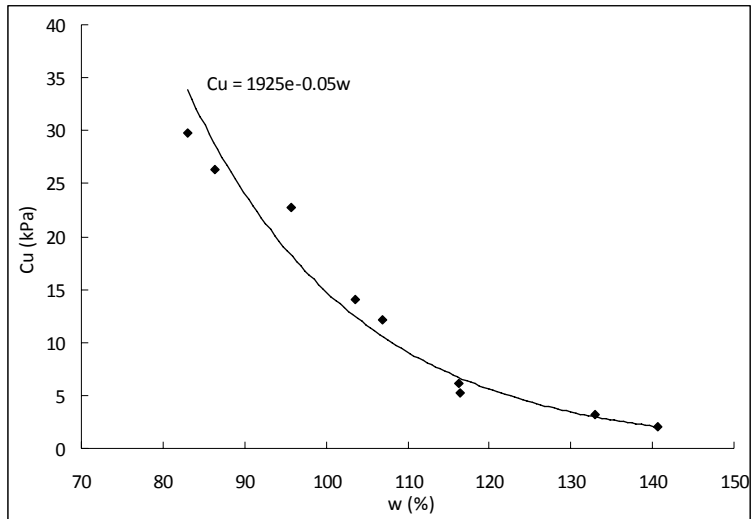


그림 7. 광양항 점토의 함수비에 따른 전단강도

표 5. 무보강 초연약지반 수치해석 조건

| 해석 케이스 | 구성모델 | γ_t (kN/m^3) | E (kPa) | ν | 함수비 (%) |
|--------|-----------|-------------------------|---------|-------|---------|
| NR-140 | von-mises | 17 | 10 | 0.45 | 140 |
| NR-126 | | 17 | 11 | 0.45 | 126 |
| NR-110 | | 17 | 14 | 0.45 | 110 |
| NR-95 | | 17 | 20 | 0.45 | 95 |
| NR-80 | | 17 | 32 | 0.45 | 80 |

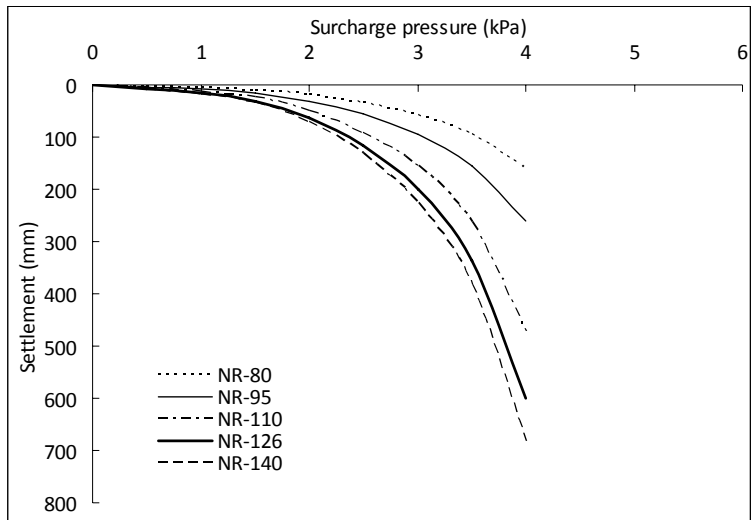


그림 8. 함수비 변화에 따른 하중별 무보강 초연약지반의 침하거동

3.2 표층보강재 강성의 영향

상기 수치해석에 의해 얻어진 표층보강재의 물성치를 바탕으로 다양한 강성을 지닌 표층보강재를 가정하여 수치해석을 실시하였다. 표 6은 수치해석에 사용한 표층보강재의 물성치를 나타낸 것이다. 기본적인 초연약지반의 물성치는 NR-126을 사용하였다. 그림 9는 표층보강재 강성에 따른 하중별 표층보강 초연약지반의 침하거동을 나타낸 것이다. 각 케이스의 하중에 따른 침하량은 강성 증가에 따라 적절한 비선형성을 나타내고

있다. 표층보강재의 강성이 증가함에 따라 침하량이 감소하며 강성이 약 600MPa 이하일 경우 침하량이 급격히 증가함을 알 수 있다.

표 6. 표층보강 초연약지반 수치해석 조건

| 해석 케이스 | 구성모델 | γ_t (kN/m^3) | E (kPa) | ν |
|--------|------------------|-------------------------|-------------------|-------|
| SR-GT | Strain-Softening | 17 | 8×10^4 | 0.1 |
| SR-SB | | 17 | 3×10^9 | 0.1 |
| SR-1 | | 17 | 2.2×10^6 | 0.1 |
| SR-2 | | 17 | 1.4×10^6 | 0.1 |
| SR-3 | | 17 | 6×10^5 | 0.1 |

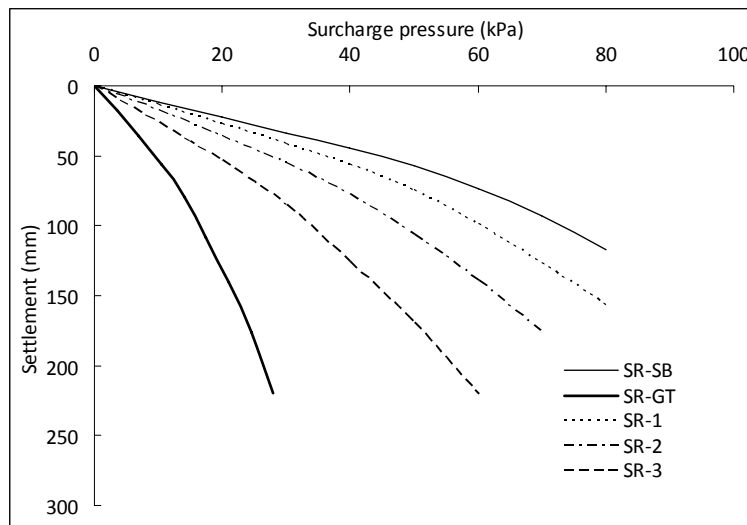


그림 9. 표층보강재 강성에 따른 하중별 표층보강 초연약지반의 침하거동

3.3 복토 두께의 영향

상기 수치해석에 의해 결정된 복토재의 물성치를 이용하여 복토 두께의 변화에 따른 표층보강된 초연약지반의 거동을 살펴보았다. 표 7은 수치해석에 적용한 복토의 두께를 나타낸 것이다. 기본적인 초연약지반 및 표층보강재의 물성치는 각각 NR-126, SR-GT를 사용하였다. 그림 10은 복토 두께에 따른 하중별 복토보강 초연약지반의 거동을 나타낸 것이며 복토 두께가 두꺼워질수록 침하량이 감소하며 복토 두께-침하량 관계는 대체로 비례적인 것을 확인할 수 있다.

표 7. 수치해석 조건

| 해석 케이스 | 구성모델 | 복토두께 (cm) | γ_t (kN/m^3) | E (kPa) | ν | c (kPa) | ϕ (°) |
|---------|----------------|-----------|-------------------------|-------------------|-------|---------|------------|
| ER-10 | Drucker-Prager | 10 | 17 | 2.5×10^4 | 0.3 | 0 | 30 |
| ER-5 | | 5 | | | | | |
| ER-7.5 | | 7.5 | | | | | |
| ER-12.5 | | 12.5 | | | | | |
| ER-15 | | 15 | | | | | |

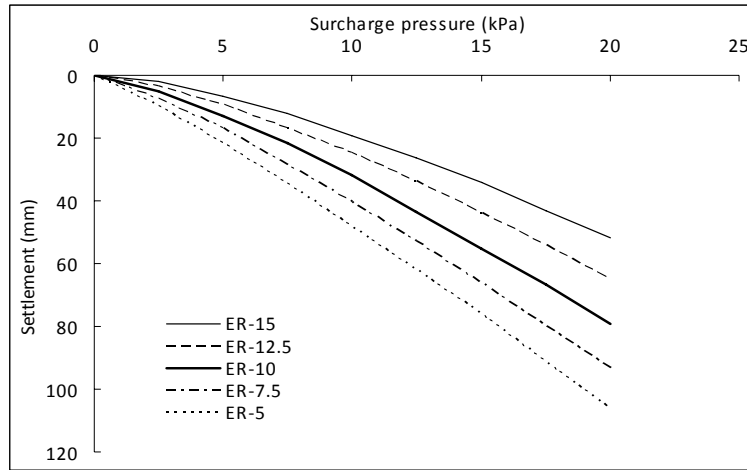


그림 10. 복토 두께에 따른 하중별 복토보강 초연약지반의 침하거동

4. 결론

본 논문에서는 광양항 준설점토를 이용한 실내모형실험 결과를 근거로 하여 표층처리공법에 적용할 수 있는 초연약지반 및 표층보강재와 복토재료에 대한 수치해석적 모델 및 공학적 물성치를 결정하고 표층보강에 의한 초연약지반의 거동을 확인하였으며 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구를 통해 초연약지반 함수비에 따른 비배수 전단강도를 이용하여 탄성계수-함수비 관계를 확인할 수 있었다. 향후 다양한 실험 및 수치해석방법을 통하여 보다 정량적인 탄성계수-함수비 관계를 파악한다면 표층처리공법의 합리적 설계법 확립에 기여할 수 있으리라 판단된다.

2) 본 수치해석방법에 의해 초연약지반의 강도가 감소할수록 침하량 변화는 하중증가에 따라 비선형적으로 증가하고 표층보강재의 강성이 증가할수록 표층보강된 초연약지반의 침하량은 하중증가에 따라 비선형적으로 감소함을 정성적으로 확인할 수 있었다. 또한 복토의 두께증가에 따라 침하량은 비례적으로 감소함을 확인하였다.

3) 표층보강된 초연약지반의 거동을 모사하기 위하여 본 논문의 수치해석에서 적용한 구성모델 및 물성치가 타당함을 확인할 수 있었으며 본 연구결과로부터 얻은 표층보강재의 강성 및 복토의 두께에 따른 초연약지반의 거동특성을 이용하여 초연약지반 표층처리 공법의 합리적 설계법 확립을 기대할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 양기석, 강명찬, 김윤하, 초연약지반의 표층처리를 위한 대나무망 공법, 한국 구조물진단학회지, 제8권 제2호 pp. 46~52, 2004.4
2. 토목공학연구회, 지반개량공법, 창우출판, 1998
3. 함태규, 조삼덕, 양기석, 유승경, 연약지반 표층보강재의 인장강도와 복토 두께의 지지력개선효과에 관한 실험적 연구, 한국 토목섬유학회 학술발표회, 2008.4.18
4. 한국지반공학회, 지반공학시리즈 10, 준설매립과 환경매립, 구미서관, 1997
5. Midas Information Technology, Midas GTS manual
6. Tanabashi. Y, Hirao. K and YAsuhara. K, Numerical analysis for bearing capacity improvement of soft reinforced with geotextile, proceeding of IS-Kyushu, 1992
7. Yamanouchi, Proc. Experimental study on the improvement of the bearing capacity of soft ground by laying a resinous net, Symp. Foundations on Interbedded Sands, Div. Applied Geomech., CSIRO, and Westem Group, Aus. Geomech. Soc, 1970