

GCP로 개량된 복합지반의 지반강도 별 응력 및 침하거동

The Behavior on Stress and Settlement of GCP Composite Ground with Different Shear Strength of Soil

나승주¹, 김대현^{2*}, 김경업³

Seung-Ju Na¹, Daehyeon Kim^{2*}, Gyeong-Eop Kim³

¹Member, Graduate Student, Dept. of civil Engineering, College of Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, 61452, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of civil Engineering, College of Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, 61452, Republic of Korea

³Member, Graduate Student, Dept. of civil Engineering, College of Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, 61452, Republic of Korea

ABSTRACT

Although the Granular Compaction Pile (GCP) has been used for many decades, several failures still occur such as bulging, shear failure and other phenomena, indicating that more refined study is needed. The main objective of the study is to evaluate the stress concentration ratio for both area replacement ratio and shear strength of soil through literature review and numerical analysis. Numerical analysis using the finite element program ABAQUS has been performed for the composite ground with GCP. The behavior stress and settlement of composite ground have been analyzed for both the area replacement ratio (10~40%) and shear strength of soil (25~75 kPa). As a result of numerical analysis, as the soil strength and area replacement ratio increased, the average stress related coefficient and stress concentration ratio for depth tended to decrease, and stress related coefficient of upper layer tend to decrease equally, but the stress concentration ratio decreased. Therefore, tendency that the value in the upper layer differs from the value in other depths was displayed. Care should be taken because it is possible to make mistakes in designing the entire composite ground with the values measured in the upper layer. Also, the settlement reduction factor was compared with the existing equation and numerical analysis. And the value obtained from the existing equation and numerical analysis are similar.

요 지

쇄석다짐말뚝(GCP)은 수십 년 동안 사용되어 왔지만, 팽창, 전단파괴와 기타 현상과 같은 파괴가 여전히 발생하여 보다 정교한 연구가 필요할 실정이다. 본 연구에서는 선행연구 분석과 수치해석을 통해 치환율과 지반강도에 따른 응력 및 침하거동을 분석하고자 하였다. 이를 위해 유한요소해석 프로그램 ABAQUS를 사용하여 GCP로 개량된 복합지반을 모델링하여 지반강도와 치환율에 따라 복합지반의 응력과 침하를 분석하였다. GCP로 개량된 복합지반에 대하여 유한요소법을 이용한 수치해석을 실시하였으며, 치환율과 지반강도에 따른 복합지반의 응력관련계수와 침하저감계수의 관계를 분석하였다. 분석결과, 지반강도와 치환율이 증가할수록 깊이 별 평균 응력관련계수와 응력분담비는 증가하는 경향이 나타났다. 상부에서의 응력관련계수는 동일하게 증가하는 경향이 나타났지만, 응력분담비는 감소하였다. 따라서 상부층에서의 값은 다른 깊이에서의 값들과 다른 경향이 나타나므로 상부층에서의 측정된 값으로 복합지반 설계 시 과오를 범할 수 있으니 주의가 필요하다. 또한 기존 침하저감계수식과 수치해석을 통한 침하저감계수와 비교·분석하였는데, 기존 식과 수치해석을 통하여 구한 값은 유사하게 나타났다.

Keywords : GCP method, Vertical effective stress, Area replacement ratio. Shear strength of soil, Settlement reduction factor

Received 28 Jun. 2017, Revised 18 Aug. 2017, Accepted 26 Sep. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-62-230-7607; Fax: +82-62-220-2687

E-mail address: dkimgeo@chosun.ac.kr (D. H. Kim)

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

쇄석다짐말뚝(GCP)공법은 지지력이 충분하지 못한 지반이나 연약점토지반에서 과도한 침하가 발생하는 경우 쇄석 또는 자갈을 일정한 상대밀도로 압입하여 10~40% 정도로 치환된 복합지반을 형성함으로써 지반의 지지력과 전단강도를 증가, 측방유동을 억제하여 압밀침하시간과 침하량 단축 등 지반의 공학적 특성개선을 목적으로 한다. 또한 사질토 지반에서는 밀도 증가, 액상화방지 및 수평지 지지력 증대를 목적으로 적용하는 공법이다.

하지만 GCP의 파괴형태와 원인이 명확하게 제시되어 있지 않아서 파괴에 대한 방지대책을 수립할 수 없으며, 시공 후 파괴되었을 경우 파괴원인에 대한 규명이 명확하지 않은 실정이다. 또한 현재 정량적인 설계법이 제시되어 있지 않기 때문에 경험적인 방법으로 시공, 설계되고 있어 팽창파괴, 전단파괴와 국부파괴 형태의 파괴가 발생하고 있으나 파괴원인에 대한 규명 및 파괴예방에 대해 명확하게 수립이 어렵다. 또한 시공 장비와 재료특성이 다름에도 불구하고 해외에서 적용하고 있는 공법을 그대로 사용하기 때문에 응력분담비, 침하량과 지지력 등에서 실측값과의 차이가 크게 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서는 GCP 공법의 합리적인 설계법 제안을 위한 기초연구로써, 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.12-4(Dassault System, 2008)를 이용하여 GCP로 개량된 복합지반을 모델링하여 치환율과 지반강도에 따른 GCP 복합지반의 응력과 침하거동을 분석하고자 하였다.

1.2 연구동향

조립토 다짐말뚝공법은 1830년대에 프랑스 기술자인 Moreau 등에 의해 모래다짐말뚝공법(SCP, Sand Compaction Pile)을 중심으로 개발되어 사용되었으나, 1930년대부터 진동 장비를 이용하여 재료를 다져 말뚝을 조성하여 진동다짐 공법을 개발하는 과정에서 다시 사용되었다.

1960년대에 본격적으로 SCP에 대한 연구가 시작되었으며 현장, 실내실험 등을 통해 데이터를 축적해왔다.

1980년대 일본에서 SCP 공법을 도입하여 사용하였으나, 모래의 단가 상승으로 인해 국내에서는 1990년대에 접어들어서 GCP 공법의 시험시공과 연구가 활발히 진행되었다.

Lee et al.(2005)은 치환율에 따른 GCP 복합지반을 PEN-TAGON 3D 프로그램을 이용하여 20~70%에 대해서 재하하중 단계별로 GCP 복합지반의 거동을 분석하기 위해 수치해석을 수행하였다. 분석결과, 응력분담비는 3.6~3.85의 값을 나타내었고, 재하하중이 클수록, 복합지반의 치환율이 낮을수록 쇄석기둥의 횡방향 변위는 증가하였다. 또한 Lee(2004)는 수치해석을 통해 치환율이 고려된 응력분담비 공식을 제안하였으며, 지지환율에 비하여 고치환율의 경우 치환율 증가에 따른 침하량 감소율이 높지 않은 것으로 나타나 적정 치환율은 40%로 확인하였다.

Yoo et al.(2007)은 지오그리드 감싼 쇄석다짐말뚝(GESC) 공법이 시공되는 지반조건을 ABAQUS를 사용하여 3차원 유한요소해석을 실시하였으며, 3D-등가원주, 3D-제방전체, 2D-축대칭으로 모델링하여 점토지반의 압밀, 응력 및 간극수압을 비교·분석하였다. 분석결과, 3D-제방전체 해석은 제방사면하부 측방유동에 대한 취약부와 지오그리드의 깊이에 따른 인장력의 변화와 같은 전체거동의 포괄적인 파악을 위하여 단위셀 모델링보다는 제방 전체거동을 평가할 수 있도록 제방 반단면 1열 모델링 기법이 효율적인 것으로 나타났으며, 연구에서 적용된 Modified Cam-Clay 모델이 연약지반의 압밀 및 침하특성을 잘 반영하고 있는 것으로 분석되었다. 또한 3D와 2D 모델링의 응력분담비 모두 유사하게 나타났다.

Kim(2009)과 Song et al.(2011)은 조립질 말뚝으로 개량된 점토지반의 응력변화와 응력분담비의 변화를 파악하기 위해 말뚝의 재료(쇄석, 모래)와 하중재하조건, 치환율을 변화시키면서 실내실험을 수행하였다. 실험결과, 동일 치환율에서는 점토지반의 연직응력은 유사하게 나타났으나, 말뚝 상부에서의 연직응력은 GCP로 보강한 경우가 크게 나타나 SCP 보다 더 큰 응력을 부담한다고 하였다. 또한 평균 응력분담비는 GCP로 개량한 경우가 SCP로 개량한 경우에 비해 크게 나타난다고 하였으며, GCP의 응력분담비의 범위는 치환율에 따라 4.4~7.5으로 나타났다.

Choi et al.(2013)은 토목섬유 감싼 쇄석말뚝의 침하량, 응력분담비, 지오그리드 변형률의 변화특성을 비교·분석하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 분석결과, 치환율이 증가함에 따라 쇄석말뚝이 지지할 수 있는 하중은 증가하였지만 단면적의 증가로 인하여 쇄석의 응력이 감소되었기 때문에 응력분담비는 감소하였다고 하였다. 또한 토목섬유 감싼 쇄석말뚝의 최대 인장변형률의 발생 위치는 치환율에 따라 말뚝 상단부로부터 1.2D와 2.0D로 나타났다.

Na et al.(2016)은 ABAQUS 프로그램을 이용하여 치환율(10~40%)과 쇄석과 모래의 배합비(100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 0:100)에 따른 GCP 복합지반에 대하여 과잉간극수압과 응력분담비를 분석하였다. 분석결과, 치환율이 커질수록 과잉간극수압은 감소하였으나, 배합비에 따른 과잉간극수압 변화는 미미하였다. 또한 치환율 30%, 쇄석과 모래의 배합비 70:30일 경우에 응력분담비가 가장 크게 나타났으며, 치환율과 배합비에 따른 응력분담비의 범위를 나타내었다.

Pribe(1976)은 GCP를 등가원주(Unit-Cell) 개념을 적용하여 지반의 응력거동으로부터 발생하는 침하를 분석하여 말뚝 간격에 대한 침하감소비를 제안하였다.

Chow(1996)는 간편법과 평형법 사이의 관계를 확립하고 간편법의 정확도를 증명하기 위해 Balaam and Booker(1981)의 해결책과 비교하고자 하였다. Balaam and Booker가 제안한 해결책은 4개의 변수(a/b , E_s/E_c , ν_s , ν_c)에 의존하지만 간편법은 2개의 변수(a_s , m)에 의존한다. 간편법은 적은 매개변수에 의존하지만 합리적인 해결책을 주었으며, 합리적인 침하량 식을 제안하였다.

Chun and Yeoh(2001)은 실내모형시험을 통하여 배수 효과에 관한 연구를 하였다. 실내모형시험결과, GCP공법을 적용한 지반의 최종 침하량은 모래다짐말뚝을 적용한 지반보다 20% 크게 발생하는 것을 확인하였다.

Shin(2005)은 등가원주(Unit-Cell) 시험과 대형토조시험을 통하여 차이를 분석하였다. GCP로 개량된 복합지반의 침하특성을 분석하여 지반 압축특성으로 응력분담비를 제안하는 식을 제시하였으며, 기존의 침하량 예측기법에 대해 적용성을 검토하고 변형률과 압축지수 개념을 이용한 새로운 침하량 예측기법을 제안하였다.

Zahmatkesh and Choobasti(2010)은 유한요소해석인 Plaxis software를 이용하여 스톤컬럼(Stone column)으로 개량된 연약지반의 침하를 평가·조사하여 침하저감비(SRR)를 산출하고 기존의 이론들과 비교하고자 하였다. 분석결과, 치환율이 증가할수록 마찰재의 사용으로 인하여 침하가 상당히 감소되며, 본 연구에서 얻은 SRR의 값은 실제 SRR의 값에 가깝게 나타난 것으로 확인하였다.

Moon et al.(2012)은 단일말뚝을 저치환율로 개량된 지반에 대하여 1g모형시험을 실시한 결과, 압밀압력이 증가할수록 침하량은 증가하며, 침하량 증가폭은 점차 감소하는 경향을 보였다. 증가폭의 감소는 모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반보다 GCP로 개량된 복합지반에서 더 현저

하게 나타난 것으로 확인하였다. 즉, 동일한 조건으로 시험한 결과, GCP로 개량된 복합지반에서 침하저감 효과가 더 큰 것으로 판단하였다.

Kim(2016), Kim et al.(2016)은 대형직접전단시험을 통하여 쇄석과 모래의 최적배합비를 찾고, 유한요소프로그램 MIDAS Soilworks를 이용하여 내부마찰각의 변화에 따른 침하거동을 분석하였다. 대형직접전단시험 결과, 쇄석과 모래의 배합비(70:30)에서 내부마찰각이 가장 크게 나타났으며, 최적배합비는 70:30으로 확인하였다. 또한 유한요소해석 결과, 내부마찰각이 증가함에 따라 수직·수평 변위가 약 2~3배 이상 감소함을 확인하였으며, 소정의 모래를 혼합함으로써 GCP의 클로킹 현상을 방지하고 GCP의 배수성을 증가시키는 효과를 확인하였다.

Mohamed and Basuony(2016)은 PLAXIS 유한요소프로그램을 사용하여 GCP로 개량된 복합지반에서 말뚝 간거리, 말뚝 직경, 말뚝 길이 등을 변화시키고, 말뚝의 거동을 수치적으로 분석하고자 하였으며, 지지력, 침하저감효과, 말뚝의 휨모멘트에 미치는 요인들에 대한 영향을 분석하였다. 그 결과, 치환율, 말뚝 길이의 증가와 말뚝 간격 비율의 감소에 따라 지지력과 침하저감 효과는 크게 나타났다. 또한 말뚝 길이 비가 0.75의 말뚝을 이용하는 것이 지지력과 침하저감효과 개선에 효과적이며, 경제성 측면에서도 경제적이라 판단하였다.

선행연구 분석결과, 이처럼 GCP 공법에 대한 많은 연구가 지속적으로 연구되어 왔으나, 현장실험, 실내실험, 수치해석 연구를 통해 제시된 응력분담비의 범위는 연구자에 따라 상이하며, 복합지반의 침하에 대하여 침하를 저감시키고자하는 연구가 많이 진행되어 왔지만, 응력분담비와 침하저감계수 등 지반강도 변화에 따른 연구는 미흡한 실정이다.

2. GCP 공법의 기본설계개념

2.1 등가원주(Unit Cell)개념

GCP 공법은 지반의 지지력증가, 침하량 감소, 압밀축진, 지반의 액상화 방지 등의 연약지반 보강 목적으로 사용되고 있으며, 복합지반에 등분포 상재하중이 작용하면 복합지반 내 말뚝에 의한 영향면적을 등가원주로 고려하여 복합지반 전체에 대한 해석이 이루어져야 한다.

등가원주 주변의 전단응력은 0이고, 등가원주는 말뚝주

위에 대칭으로 위치하여 마찰이 없는 강성 외벽을 가진 원주모양으로 모형화 할 수 있다.

등가원주개념의 기본 가정 사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 원지반과 GCP는 함께 침하.
- (2) 원주 외측면의 수평방향 변위는 구속, 연직방향으로만 변위가 발생.
- (3) 원주의 저면은 강성지반에 정착.

또한 정삼각형, 정사각형 배열로 설치된 GCP에서 영향을 미치는 주변지반의 범위는 규칙적인 육각형, 등가원의 형태로 표현할 수 있다.

GCP 등가원의 유효직경은 다음 식 (1), 식 (2)과 같다.

$$D_e = 1.05s \text{ (삼각형 배열)} \quad (1)$$

$$D_e = 1.13s \text{ (사각형 배열)} \quad (2)$$

여기서, s : GCP의 간격이다.

2.2 치환율과 응력분담비

GCP 공법으로 개량한 복합지반은 GCP와 주변 점토지반으로 구성된 복합지반(Composite Soil)을 형성한다. 치환율(Area Replacement Ratio, a_s)은 식 (3)과 같이 GCP 개량 복합지반에서 전체면적에 대한 GCP 면적의 비로 나타내며, 복합지반에 하중이 재하되면 GCP와 점토지반은 강성과 변형특성에 의해 말뚝과 지반은 서로 다른 응력을 분담하게 된다. 이처럼 GCP와 점토지반의 응력비를 응력

분담비(Stress concentration Ratio, m)라고 하며, 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다. 응력분담비는 복합지반 거동(지지력, 안정해석, 침하)에 매우 중요한 요소이다.

$$a_s = \frac{A_s}{A_s + A_c} \quad (3)$$

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (4)$$

여기서, A_s : GCP의 면적

A_c : 주변 점토지반의 면적

σ_s : GCP에 전달되는 응력

σ_c : 점토지반에 전달되는 응력

2.3 복합지반

GCP로 개량된 점토지반은 재료적 특성이 우수한 GCP와 주변지반의 복합적인 거동에 의하여 지지력이 증대되는 효과가 있다. 이와 같은 복합지반의 거동을 예로 다음 Fig. 1과 같다.

GCP에 작용하는 응력상태는 지표면에 작용하중으로 인한 연직유효응력과 지반의 수평응력에 의한 방사방향 유효응력으로 표현되는 삼축상태와 비교 되어질 수 있다. 응력-침하 관계에서와 같이 GCP 설치로 인한 효과는 주로 배수축진과 더불어 치환재료에 의한 지반강도 증대로 구분할 수 있다. 이것은 지반특성 및 시공 상황과 관련한 복잡한 특성에 의해 지지력 메카니즘과 원지반의 응력분담비가 고려된 거동특성, 개량지반의 장기침하량 및 잔류침하

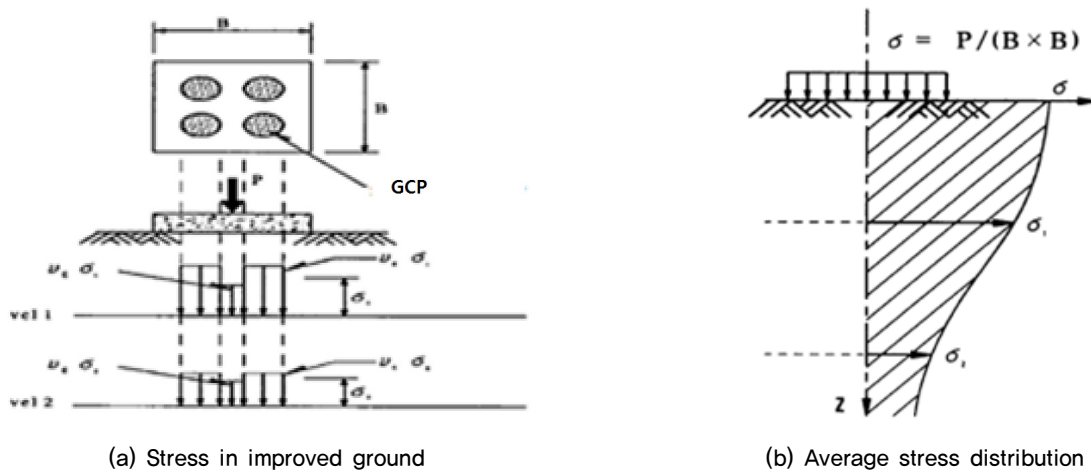


Fig. 1. Composite ground effect in GCP installation (Chun and Yeoh, 2001)

량과의 관계, 복합지반 중에서 과잉간극수압의 발생 및 소산 확인의 고려가 요구된다(Chun and Yeoh, 2001).

2.4 GCP의 침하량

현재 침하량 산정을 위하여 사용되는 방법들은 일반적으로 사용되는 수많은 가정에 따라 단순화하여 만든 근사 계산법들과 탄성, 소성이론을 기본으로 하는 FEM해석법으로 분류된다. 침하량을 추정하기 위한 방법들은 GCP의 간격과 직경이 같은 것으로 보강되고 재하면적이 무한히 넓다고 가정한다. 이런 조건에 대하여 확장된 등가원주 개념은 이론적으로 유효하며, Aboshi et al.(1979), Goughnour(1979) 등과 같은 학자들이 예상침하량에 대한 이론적인 해를 발견하기 위하여 유한요소법에 사용하였다.

2.4.1 평형법(Equilibrium Method)

Aboshi et al.(1979)과 Barksdale(1981) 등에 의한 평형법은 모래다짐말뚝의 침하량 예측을 위하여 주로 이용되는 방법이며, 매우 단순하고 GCP로 개량된 지반의 침하값소를 평가하기 위한 현실적인 공학적 접근방법이다. 간단한 접근법을 적용하는 경우 경험이나 현장시험결과를 이용하여 응력분담비를 구해야 한다.

정규압밀점토지반 무처리 점토지반에 대한 복합지반의 침하량의 비는 다음 식 (5)과 같으며, $\bar{\sigma}_o$ 이 매우 크며(GCP가 긴 경우), 상재압(σ)이 작은 경우 침하비는 다음 식 (6)과 같다. 또한 지반개량효과 예측에 있어 안전한 평가를 할 수 있도록 사용된다.

$$S_f/S = \frac{\log_{10}\left(\frac{\bar{\sigma}_o + \mu_c \sigma}{\bar{\sigma}_o}\right)}{\log_{10}\left(\frac{\bar{\sigma}_o + \sigma}{\bar{\sigma}_o}\right)} \quad (5)$$

$$S_f/S = 1/[1 + (m - 1)a_s] = \mu_c \quad (6)$$

여기서, S : 무처리 지반의 최종침하량

S_f : GCP로 개량된 지반의 침하량

$\bar{\sigma}_o$: 점토층의 평균초기응력

σ : 상재압

m : 응력분담비

μ_c : 응력감소계수

2.4.2 β 법(체적변형계수에 의한 방법)

개량되지 않은 점토지반에 대한 침하량과 응력저감효과를 고려한 개량된 복합지반의 침하량의 비 침하저감계수 β 는 식 (7)과 같다.

$$\beta = \frac{m_v \mu_c \Delta \sigma H}{m_v \Delta \sigma H} = \mu_c = \frac{1}{1 + (m - 1)a_s} \quad (7)$$

여기서, β : 침하저감계수

m_v : 원지반의 체적압축계수

$\Delta \sigma$: 성토하중에 대한 유효증가응력

m : 응력분담비

3. GCP 복합지반 분석을 위한 수치해석 및 설계정수

3.1 수치해석 조건

GCP로 개량된 복합지반은 GCP 자체의 강도 변화뿐만 아니라 각 GCP를 중심으로 3차원적인 배수가 유발되며, 이와 같은 배수특성으로 인하여 3차원적인 배수와 거동특성을 정확히 분석하기 위해서는 실제 복합지반을 3D로 모델링하여 해석할 필요가 있다. 하지만 선행연구(유충식 et al, 2007)를 통해 3D와 2D모델의 결과 값이 유사한 것으로 보아 2D 해석만으로도 충분하다 판단되어 2D 축대칭 모델링으로 분석하였다.

따라서 본 연구에서는 ABAQUS를 사용하여 해석단면은 Fig. 2(a)와 같이 단일말뚝 GCP로 개량된 복합지반을 2D-축대칭으로 하여 치환율(10, 20, 30, 40%)에 대해 GCP의 말뚝 직경을 0.7m로 고정하고 지반의 크기를 치환율에 맞게 변화시켰으며, 샌드 매트 높이는 0.5m, 지반의 높이는 10m로 모델링하였다.

GCP 직경을 고정하고 지반의 크기를 변화시킨 이유는 현장에서 다짐말뚝의 직경을 달리하여 치환율을 변화시키는 것은 시공 여건상 힘들기 때문에 말뚝 직경을 0.7m로 고정하였고, 지반을 변화시켜 치환율을 변화시켰다. 치환율도 40% 이상으로 현장 여건상 치환하기 어렵기 때문에 40%까지만 분석하였다.

하중은 성토(50kPa) + 압밀을 1 단계로 단계를 반복하여 성토 5단계까지 적용하였다. 여기서 성토하중은 성토고 2~3m의 하중으로 50kPa을 적용하였으며, 각각의 점

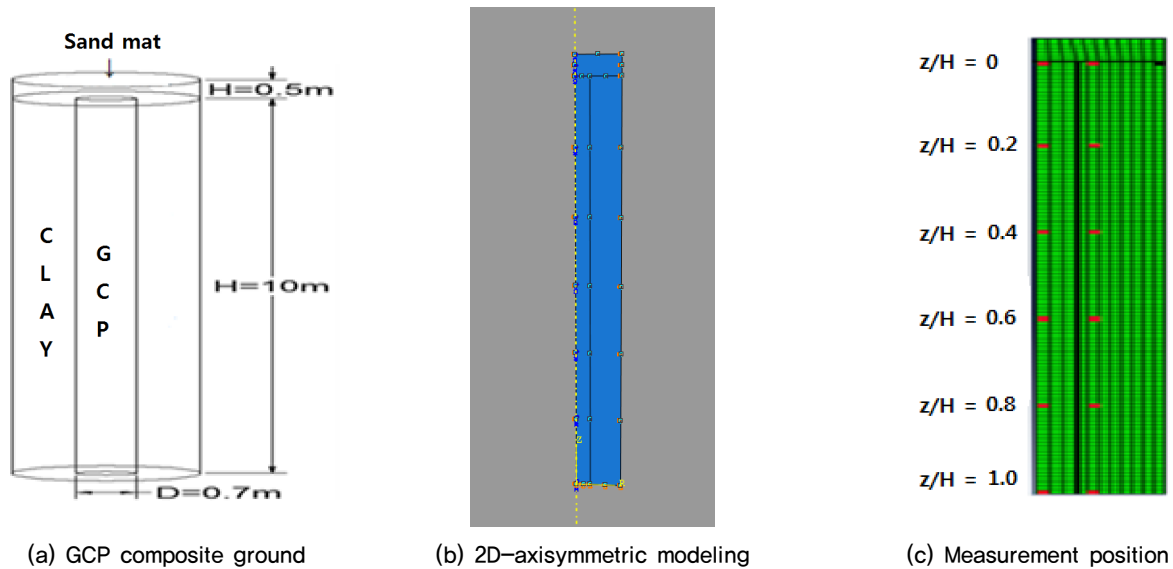


Fig. 2. The finite element mesh and geological configuration used for the analysis

토지반 4곳에 대해서 치환율(10, 20, 30, 40%)와 지반강도 (25, 50, 75kPa) 별 총 48가지의 경우를 분석하였다.

GCP 복합지반을 Fig. 2(b)와 같이 축대칭 유한요소망을 사용하였으며, 복합지반의 측면은 X방향의 변위를 구속하고, 등가원주개념의 기본 가정 사항 중 원주의 저면은 강성지반에 정착되어 있는 것을 가정하기 위해 하단면은 선단지지층까지 GCP가 관입되었음을 가정을 하여 X, Y방향의 변위를 구속하였다.

GCP, 점토지반과 Sand mat 사이의 인터페이스 조건은 각각의 경계면에 대해서 Tie 조건을 적용하고 초기 간극수압도 0으로 적용하여 분석하였으며, 지하수위는 샌드 매트 상부까지 존재한다고 가정하고 복합지반의 지중응력을 고려하여 분석하였다.

시공과정 모델링에서 재하하중은 1일 동안 재하하고 방치한 후 과잉간극수압이 완전히 소산될 수 있도록 압밀기간 100일 동안 주었다. 또한 요소는 축대칭 4절점 응력-간극수압 연계요소 CAX4P(4-node biquadratic displacement, bilinear pore pressure element)를 사용하였으며, 요소의 크기는 0.1×0.1m로 하여 모델을 분석하였다.

Fig. 2(c)는 유한요소해석 분석 시 유효연직응력, 과잉간극수압과 침하량의 측정 위치를 나타낸 것이며, 측정위치(z/H)는 깊이/전체길이를 표현하였다.

3.2 수치해석에 사용된 설계정수

지반과 같이 비선형 응력-변형 거동을 나타내는 재료에

대한 유한요소해석에서 가장 중요한 요소는 해석에 적합한 구성모델 선택과 이에 따른 매개변수의 결정이다. 본 연구에서는 점토지반을 Modified Cam-Clay 탄·소성모델을 적용하여 압밀시 연약점토지반의 침하특성이 모사되도록 하였으며, GCP를 Mohr-Coulomb 탄·소성모델, Sand mat를 탄성모델로 적용하여 GCP로 개량된 복합지반의 거동특성을 분석하였다.

Table 1, 2는 본 연구에서 사용된 설계정수이다. 점토지반 1은 부산 신항의 SCP 복합지반 설계 시 적용된 값을 사용하였으며(Busan New Port Corp, 1999), 점토지반 2, 3, 4는 선행연구에 적용된 값을 사용하였다(Han et al., 2013; Seong, 2003; Kim, 2003). 다양한 점토지반에 대해서 침하, 응력 등을 비교·분석하기 위해 추가로 점토지반 2, 3, 4에 대해서도 분석하였다.

점토지반의 지반강도를 25kPa(연약한 지반), 50kPa(보통지반), 75kPa(단단한 지반)로 변화시키고, 지반강도 변화에 따라 Modified Cam-Clay 이론에 맞게 간극비도 변화시켜 분석하였다. 여기서 지반강도는 일축압축강도를 통한 점토분류로부터 근거하여 연약한 지반, 보통지반, 단단한 지반으로 적용하였다.

4. GCP 복합지반의 분석

4.1 GCP 복합지반의 연직유효응력 분석

GCP 복합지반에 상재하중을 재하하면 전응력이 증가

Table 1. Design parameter of GCP and sand mat for finite element analysis

Material	Model	Parameter	Value
GCP	Mohr-Coulomb Model	E_0 (kPa)	23200
		ν	0.3
		c	0.1
		ϕ	50.9
		γ (kN/m ³)	19
		k_x (m/day)	86.4
		k_y (m/day)	86.4
Sand mat	Elastic	E (kPa)	14000
		ν	0.2
		γ (kN/m ³)	20
		k_x (m/day)	0.864
		k_y (m/day)	0.864

Table 2. Design parameter of clay for finite element analysis

Material and Model	Parameter	Value			
		Clay ground 1	Clay ground 2	Clay ground 3	Clay ground 4
Clay and Modified Cam-Clay Model	κ	0.04	0.0521	0.07	0.05
	λ	0.265	0.356	0.34	0.4
	a_0 (kPa)	25			
		50			
		75			
	ϵ_0	1.6	2.801	2.798	2.749
	M	1.02	0.772	0.9	1.1
	ν	0.2	0.33	0	0.3
	γ (kN/m ³)	17	15.29	14.57	17.57
	k_x (m/day)	6.26e-5	2.11e-4	5.69e-4	1.037e-3
k_y (m/day)	2.72e-5	8.10e-4	5.69e-4	1.037e-3	

한다. 증가한 전응력에 의해서 복합지반에서는 과잉간극수압이 생기게 되고, 과잉간극수압은 시간이 지나면서 점차 소산하게 된다.

상재하중이 재하되기 전 초기유효응력은 깊이에 따라 증가하다가 상재하중이 재하 된 후 연직하중의 증가로 인하여 GCP 상부에서 응력이 증가하게 되며, 과잉간극수압 소산으로 인하여 지반의 유효응력은 증가하게 된다. 또한 GCP에서는 큰 투수계수로 인하여 과잉간극수압이 발생하지 않고 즉시 유효응력으로 전이된다.

다음 Fig. 3은 지반강도와 치환율에 대하여 시간에 따른 연직유효응력을 나타낸 것이다. 분석한 결과, 점토지반의 연직유효응력보다 GCP의 연직유효응력이 상대적으로 크게 나타나는데, 이는 지반의 강성 차이로 인하여 GCP의 연직유효응력이 크게 나타났다.

지반강도 25kPa인 경우, 치환율 10%의 GCP는 1610.76kPa, 점토지반은 188.46kPa, 20%의 GCP는 1123.58kPa, 점토지반은 133.68kPa, 30%의 GCP는 837.76kPa, 점토지반은 114.73kPa, 40%의 경우 GCP는 662.49kPa, 점토지반은 107.70kPa로 나타났다. 또한 GCP는 z/H=0.8, 점토지반은 z/H=1에서 최대연직유효응력이 나타났으며, 치환율이 증가함에 따라 GCP와 점토지반의 연직유효응력은 감소하는 것으로 나타났다.

치환율 30%인 경우, 지반강도 25kPa의 GCP는 837.76kPa, 점토지반은 114.73kPa, 50kPa의 GCP는 751.27kPa, 점토지반은 138.43kPa, 75kPa의 GCP는 657.09kPa. 점토지반은 183.81kPa로 나타났다. 또한 GCP는 z/H=0.8, 점토지반은 z/H=1에서 최대연직유효응력이 나타났으며, 지반강도가 증가함에 따라 GCP의 연직유효응력은 증가하나, 점

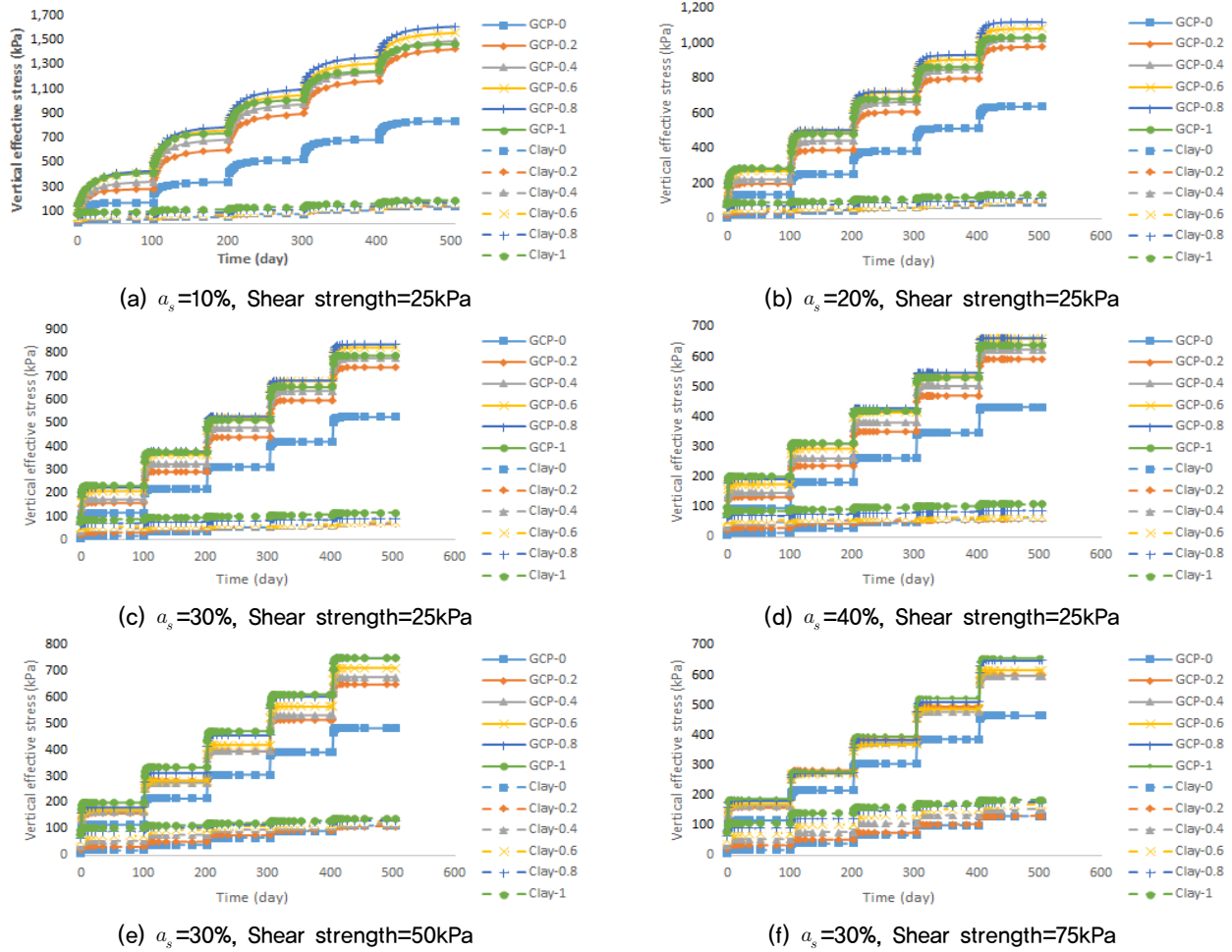


Fig. 3. Time history of the vertical effective stress with a_s and shear strength

Table 3. Vertical effective stress with a_s

Shear strength (kPa)	Area replacement ratio (%)	Vertical effective stress	
		GCP (kPa)	Clay (kPa)
25	10	1610.76	188.46
	20	1123.58	133.68
	30	837.76	114.73
	40	662.49	107.70

Table 4. Vertical effective stress with shear strength

Area replacement ratio (%)	Shear strength (kPa)	Vertical effective stress	
		GCP (kPa)	Clay (kPa)
30	25	837.76	114.73
	50	751.27	138.43
	70	657.09	183.81

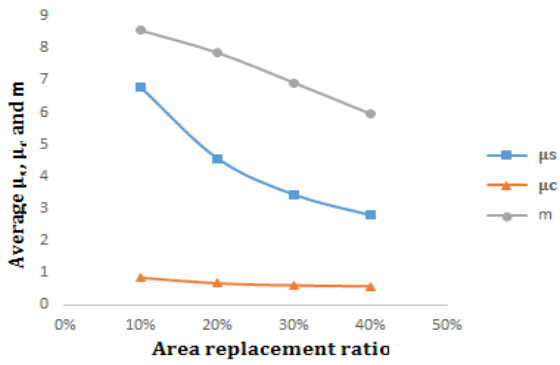
토지반에서는 감소하는 경향을 보였다. 이를 다음 Table 3, 4와 같이 정리하였다.

4.2 치환율, 지반강도와 응력관련계수(μ_s , μ_c , m)의 관계

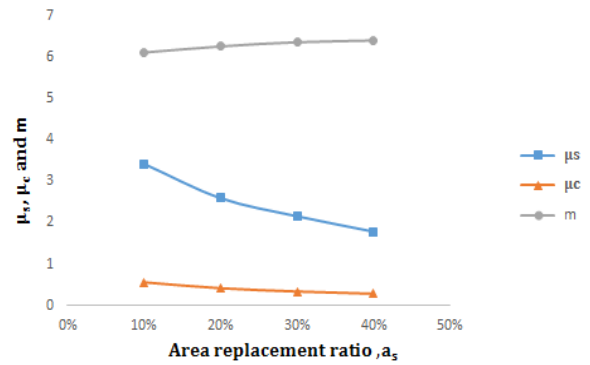
GCP로 개량된 복합지반 설계에 있어 설계요인인자인 치환율(a_s), 지반강도와 응력관련계수인 응력집중계수(μ_s),

응력감소계수(μ_c), 응력분담비(m)의 관계를 파악해보고자 하였다.

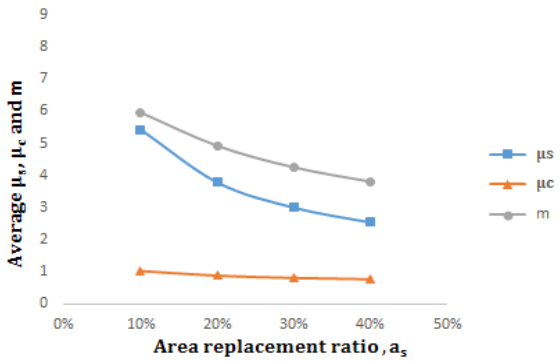
다음 Fig. 4는 점토지반 1에 대해서 치환율의 증가에 따른 응력전이 요소깊이 별 평균과 상부층에서의 변화를 비교한 것으로, Fig. 4(a)~(c)와 같이 깊이 별 평균값에 대해서 치환율의 증가는 점토지반의 응력저감계수(μ_c)의 감소



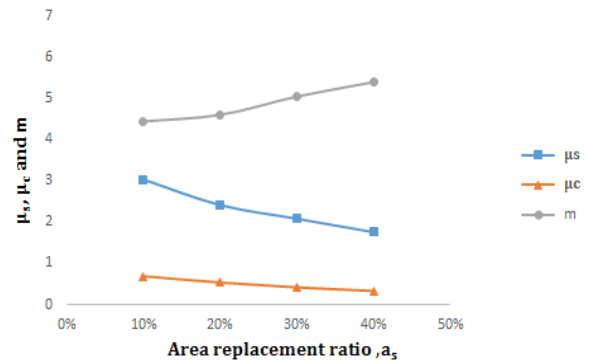
(a) Shear strength=25kPa, Average by depth



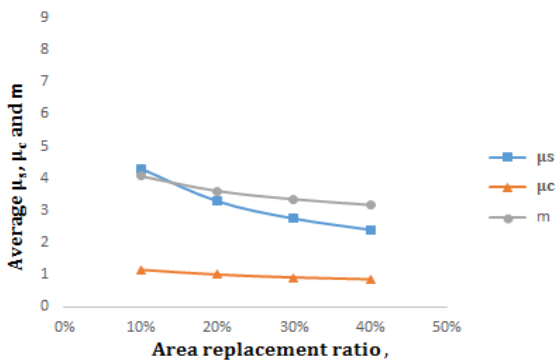
(d) Shear strength=25kPa, Upper layer



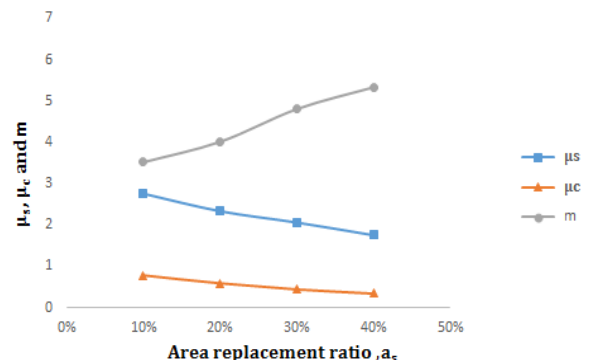
(b) Shear strength=50kPa, Average by depth



(e) Shear strength=50kPa, Upper layer



(c) Shear strength=75kPa, Average by depth



(f) Shear strength=75kPa, Upper layer

Fig. 4. Average μ_s , μ_c , m with shear strength and depth

보다는 GCP의 응력집중계수(μ_s)의 감소를 더 크게 유발하고, 그로 인해 응력분담비(m)의 감소가 발생함을 알 수 있었다. 또한 점토 2, 3, 4의 경우에서도 점토 1의 값과 근소한 차이는 있었지만 유사한 값을 가졌으며, 치환율의 증가에 따라 응력관련계수는 감소하는 경향으로 동일하게 나타났다. Choi et al.(2013)도 중간층에서의 응력분담비가 감소하는 것으로 일치하게 나타났다.

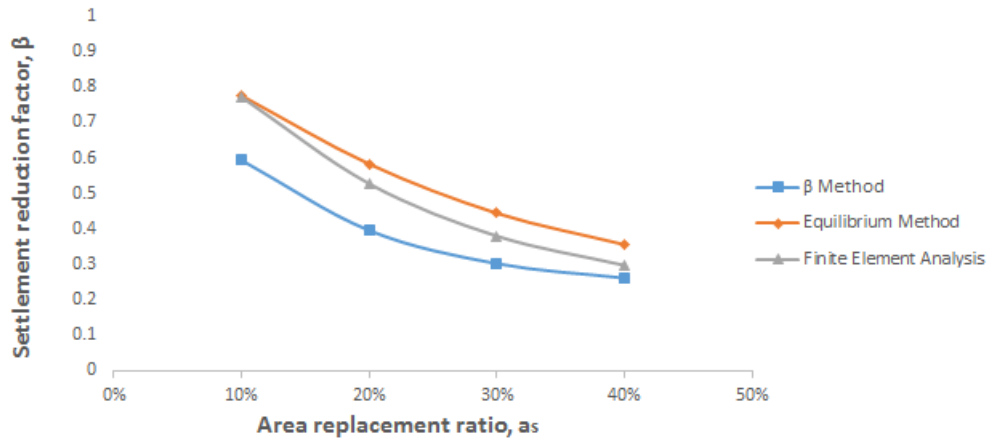
Fig. 4(d)~(f)와 같이 상부층 값에 대해서는 복합지반의 깊이 별 평균값과는 다르게 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 치환율이 증가함에 따라 응력집중계수와 응력감소계수의 감소하는 경향은 유사하게 나타났으나, 두 값의

감소폭이 상이하여 응력분담비(m)는 반대로 증가하는 경향이 나타났다.

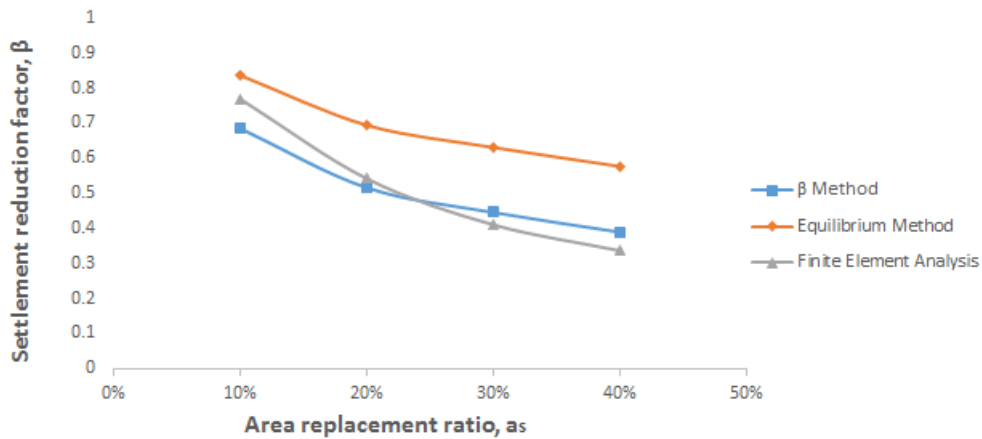
따라서 복합지반의 상부층에서 측정된 응력 값을 기준으로 전체 깊이의 응력분담비를 산정한다면 과소·과대평가 등과 같은 과오를 범할 수 있으므로 복합지반 설계 시 응력분담비 산정에 주의가 필요할 것으로 판단된다.

4.3 치환율, 지반강도와 침하저감계수(β)의 관계

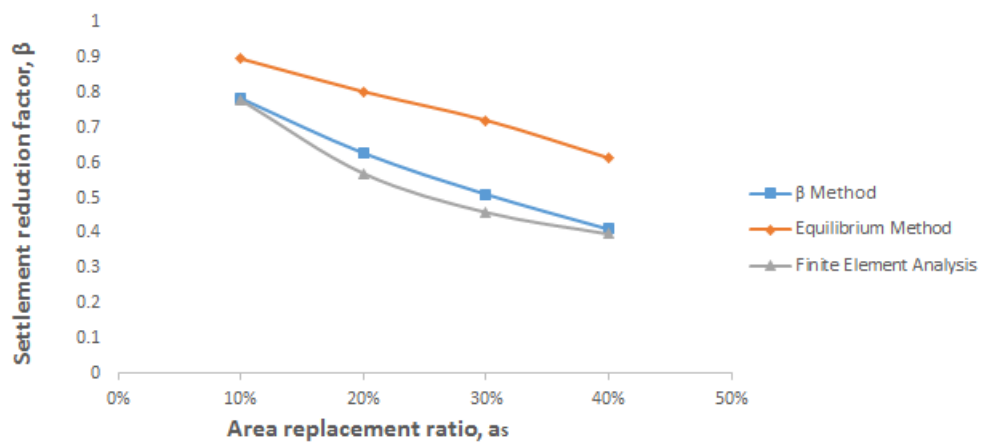
GCP의 치환율이 증가할수록 침하감소 효과는 크게 나타나며, 이러한 침하저감 효과는 원지반 침하량과, GCP로



(a) Shear strength=25kPa



(b) Shear strength=50kPa



(c) Shear strength=75kPa

Fig. 5. Comparison of settlement reduction factor

개량된 복합지반 침하량의 비로 산정되는 침하저감계수 (β)로 나타낼 수 있다. Fig. 5에서는 기존의 침하저감계수 식을 이용하여 구한 값과 유한요소해석을 통해 구한 값을 치환율과 지반강도에 따라 비교한 것이다.

치환율과 지반강도 별 평형법(Equilibrium method), β 법(체적변형계수에 의한 방법)과 유한요소해석을 통해 구

한 성토 5단계의 침하저감계수를 분석한 결과, Zahmatkesh and Choobbasti (2010)는 치환율이 증가함에 따라 침하저감계수는 감소하는 것으로 나타났는데, 본 연구에서도 치환율이 증가할수록 침하저감계수가 감소하는 경향이 나타났다. 하지만 지반강도가 증가함에 따라 침하저감계수는 증가하는데, 증가량은 미미하였다.

유한요소해석을 통하여 구한 침하저감계수는 지반강도가 작고 치환율이 낮은 경우에는 평형법에 가깝게 나타났으나, 치환율과 지반강도가 큰 경우에는 β 법과 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 즉, 연약한 지반의 경우 평형법은 유한요소해석결과에 비하여 과대평가되고, β 법은 다소 과소평가됨을 알 수 있었으며, 복합지반의 침하저감 효과는 복합지반의 치환율 및 지반강도, 재하하중에 영향을 받을 수 있다.

5. 결론

최근 연약지반에 GCP로 복합지반을 개량하는 GCP 공법을 적용하는 사례가 증가하고 있으나, 명확한 설계기준이 없을 뿐만 아니라 경험적인 방법에 의존하고 있으며, 파괴원인과 예방대책에 대한 명확한 기준도 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 GCP 공법의 합리적이고 안전한 설계법을 위한 기초단계로써, 유한요소해석을 수행하여 하중 작용시 치환율과 지반강도 변화에 따른 응력과 침하거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 치환율과 지반강도에 따른 연직유효응력을 분석한 결과, 치환율과 지반강도가 증가함에 따라 연직유효응력이 GCP에서는 증가하고 점토지반에서는 감소한다. 이는 치환율이 증가함에 따라 GCP로의 응력집중은 감소하게 되며, 지반강도가 증가함에 따라 지반이 버틸 수 있는 강도가 커지게 되기 때문이다.
- (2) 치환율, 지반강도와 응력관련계수를 분석한 결과, 치환율과 지반강도가 증가함에 따라 깊이 별 평균화한 응력관련계수가 감소하는 경향이 나타났고, 상부층에서도 응력감소계수와 응력증가계수는 유사하게 감소하였지만, 응력분담비는 두 값의 감소폭이 상이하어 반대로 증가하는 경향이 나타났다.
- (3) 상부층에서 측정된 값으로 복합지반 전체를 응력분담비를 산정한다면 과소·과대평가 등과 같은 과오를 범할 수 있으며, 복합지반 설계 시 응력분담비 산정에 있어 각별한 주의가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 치환율과 지반강도 별 평형법, β 법과 유한요소해석을 통하여 구한 침하저감계수를 비교·분석한 결과, 유한요소해석을 통하여 구한 값은 치환율과 지반강도가 낮은 경우에는 평형법에 가깝게 나타났으나, 치환율과 지반강도가 높은 경우에는 β 법에 가깝게 나타났다.

즉, 연약한 지반의 경우 평형법은 유한요소해석 결과에 비하여 과대평가되고, β 법은 다소 과소평가되었다. 추후 다양한 점토지반에 대하여 지반강도를 세분화하여 침하저감계수 식을 제안하고, 현장시험, 시공을 통한 침하예측을 통한 검증이 된다면 합리적이고 안전한 설계법을 제안함에 있어 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning(NRF-NRF-2015R1D1A1A01059122).

References

1. A. Zahmatkesh and A. J. Choobasti (2010), "Settlement Evaluation of Soft Clay Reinforced by stone Columns, Considering the Effect of Soil Compaction", *Department of Civil Engineering, Babol University of Technology Babol, Irna*.
2. Aboshi, H. Ichinotom E., Enoki, M. and Harada, K. (1979), "The Compozer - a Method to Improved Characteristics of Soft Clays by Inclusion of Larger Diameter Sand Column", *Proc. of Int. Conf. on Soil Reinforcement, Paris*, pp.211-216.
3. Balaam, N. P. and Poulos, H. G. (1983), "The Behavior of Foundations Supported by Clay Stabilised by Stone Columns", *Proceedings, 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering : Improvement of Ground, Helsinki, Vol.1*, pp.199-204.
4. Barksdale, R. D. (1981), "Site Improvement in Japan Using Sand Compaction Piles", *Georgia Institute of Technology, Atlanta*.
5. Busan New Port Corp. (1999), *Report of North Container Terminal*, pp.6.50-6.59.
6. Choi, J. W., Lee, D. Y. and Yoo, C. S. (2013), "Undrained Characteristics of Geogrid-Encased Stone Column under Cyclic Load Using Reduced-Scale Model Tests", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.1, pp.109-120.
7. Chow, Y. K. (1996), "Settlement Analysis of Sand Compaction Pile", *Soils and Foundation, Volume 36 - n°1, Japanese Geotechnical Society*, pp.111-113.
8. Chun, B. S and Yeoh, Y. H. (2001), "Composite Ground Effects on Small Area Replacement Ratio of Sand Piles", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.2, No.3, pp.57-69.
9. Dassault Systemes. (2008), *Abaqus Version 6.12 Documentation*. Providence, RI: Dassault Systemes.

10. Goughnour R. R. and Bayuk A.A (1979), "A Field Study of Long-Term Settlement of Loads Supported by Stone Columns in Soft Ground", *Proceedings, International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques*, Vol.1 Paris: 279-286.
11. Han, S. J., Yoo, H. K., Kim, B. I. and Kim, S. S. (2013), "Settlement Characteristics fo Soft Ground Applying the Suction Drain Method", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.3, pp.15-27.
12. Kim, I. G. (2003), *Finite element Analysis for the behavior Lateral Displacement due to Embank on Soft Ground*, Chosun University, Master Thesis.
13. Kim, J. H. (2009), *Experimental Study on Composite Ground Behavior and Aspect of Clay Gone Through Compaction Pile of Recycled Aggregate Compaction Piles*, Hongik University, Master Thesis.
14. Kim, M. S. (2016), *The Behavior of Soft Ground Reinforced with Granular Compaction Pile*, Chosun University, Master Thesis.
15. Kim, M. S., Na, S. J., Yang, Y. H. and Kim, D. H. (2016), "Analysis on the Analytical Behavior of Soft Ground Reinforced with Granular Compaction Piles", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.15, No.3, pp.27-37.
16. Lee, C. H., Lim, H. D. and Lee, W. J. (2005), "Finite Element Analysis of GCP Ground with Replacement Ratio", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.2005, No.10, pp. 5459-5462.
17. Lee, M. H. (2004), *A Study on the Load Support Mechanism and Stress Distribution Characteristic of Crushed-Stone Compaction Piles*, Busan University, Ph. D. Thesis.
18. Mohamed, E. and Basuony, E. G.(2016), "Behavior of Raft Foundation Resting on Improved Soft Soil with Conventional Granular Piles", *Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol.3, No.4, pp.428-434.
19. Moon, I. J., Yoo, W. K. and Kim, B. I. (2012), "A Study on the Settlement and Bearing Capacity of the SCP, GCP Method with Low Raplacement Ratio by 1g Model Tests", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.2012, No.10, pp.1187-1190.
20. Na, S. J., Kim, M. S., Park, K. H. and Kim, D. H. (2016), "Stress Concentration Ratio of GCP Depending on the Mixing Ratio of Crushed Stone and Sand", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.9, pp.37-50.
21. Priebe, H.(1976), "Estimating Settlements in a Gravel column Consolidation Soil", *Die Bautechnik 53, German*, pp.160-162.
22. Seong, K. H. (2003), *(A) Study on the Behavior aspect of Soft Ground under a Embankment Loading*, Chosun University, Master Thesis.
23. Shin, H. Y. (2005), *Analysis on the Behavior of Composite Ground Reinforced by Sand Compaction Pile with Low Area Replacement Ratio*, Chungang University, Ph. D. Thesis.
24. Song, M. G., Bae, W. S., Ahn, S. R. and Heo, Y. (2011), "Centrifugal Model Test on Stress Concentration Behaviors of Composition Ground under Flexible/Stiff Surcharge Loadings", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.12, No.6, pp.5-15.
25. Yoo, C. S., Song, A. R., Kim, S. B. and Lee, D. Y. (2007), "Finite Element Modeling of Geogrid-Encased Stone Column in Soft Ground", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.10, pp.133-150.
26. Zahmatkesh, A. and Choobbasti, A. J. (2010), "Settlement evaluation of soft clay reinforced by stone columns, considering the effect of soil compaction", *International Journal of Recent Research and Applied Studies*, Vol.3, No.2, pp.159-166.