

하중 및 기초조건에 따른 GCP 복합지반의 거동분석

Analysis of Behavior on GCP Composite Ground Considering Loading and Foundation Conditions

김경업¹, 박경호², 김대현^{3*}

Gyeong-Eop Kim¹, Kyung-Ho Park², Dae-Hyeon Kim^{3*}

¹Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea

²Member, Head of Research Center, SOIL-ROCK E&C Co., Ltd., 39-5 Us-samyegil, Samlyeub, Wanju 55340, Republic of Korea

³Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea

ABSTRACT

Gravel Compaction Pile (hereinafter referred to as GCP) is a ground improvement technique by packing crushed stones on fragile clay ground, pressing it, and forming stakes on the foundation. Although many researchers have analyzed stress behavior of GCP composite ground on domestic GCP technique using laboratory experiment and field experiment, analyses of stress behavior according to the difference of stiffness of mat foundation loaded on the upper foundation of GCP composite ground have not been done actively. Therefore, this study aimed to identify the stress concentration ratio in accordance with the difference of basis stiffness by interpreting figures. To perform this, replacement ratio was changed and modelled using ABAQUS, software for finite element analysis and analyzed the stress concentration ratio, amounts of settlement, and maximum amounts of horizontal displacement of composite ground in accordance with the difference of stiffness. An analysis showed that the stress concentration ratio of rigid foundation was highly assessed than unloading of flexible foundation in case of unloading, while amounts of settlement under flexible unloading condition were slightly higher than under rigid condition. This indicates that the characteristic of stress behavior on the different stiffness of upper foundation needs to be clarified. In addition, the maximum horizontal displacement was generated in a constant level regardless of the difference of stiffness.

요 지

쇄석다짐말뚝(Gravel Compaction Pile, 이하 GCP)는 느슨한 사질토지반이나 연약한 점토지반에 쇄석을 다지고 압입하여 원지반에 말뚝을 조성함으로써 지반을 개량하는 공법이다. 국내 GCP공법은 많은 연구자들이 실내실험, 현장실험 등을 이용해 GCP 복합지반의 응력거동을 분석하였으나, GCP 복합지반의 상부에 재하되는 매트기초의 강성 차이에 따른 거동분석은 다소 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통해 기초의 강성 차이에 따라 응력분담비를 규명하고자 하였다. 이를 위해 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 치환율을 변화시켜 모델링하고, 강성 차이에 따라 복합지반의 응력분담비와, 침하량 및 최대 수평변위량을 분석하였다. 분석 결과, 강성기초의 하중재하시 응력분담비는 연성기초의 하중재하보다 높게 평가되었으며, 연성하중재하조건에서의 침하량은 강성조건에서 보다 다소 높은 경향이 나타났다. 이는 상부기초의 강성 차이에 대한 응력거동 특성을 명확히 규명해야 할 필요성이 있다고 판단된다. 또한, 최대 수평변위는 강성의 차이에 상관없이 일정한 위치에서 최대 변위가 발생하였다.

Keywords : GCP, Area replacement ratio, Loading condition, Stress concentration ratio, Lateral displacement, Settlement

Received 2 Mar. 2018, Revised 22 Mar. 2018, Accepted 22 Mar. 2018

*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

GCP공법은 연약한 점토지반이나 느슨한 사질토지반에 쇄석 또는 자갈을 적절한 상대밀도로 다지고 압입하여 원지반에 말뚝기초를 형성하는 공법이다. 또한 쇄석의 횡방향 응력을 증가시켜 주변지반의 전단강도를 증진시키고 배수를 용이하게 함으로써, 압밀침하시간과 침하량 단축 등 지반의 공학적 특성개선을 목적으로 한다. 그러나 연약지반에서는 지지력 부족이나 과도한 압밀침하 등 문제점이 빈번히 발생하고 있다.

연약지반 위에 건설공사가 진행되면 지반을 개량하게 되는데, 이와 같이 GCP로 개량된 지반을 복합지반이라 하며, 치환율과 내부마찰각, 주변지반의 강도에 의해 설계된다. GCP공법의 핵심은 지반개량 목표에 부합되는 적절한 치환율을 결정하는 데 있으나, 신뢰성 있는 설계지침이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 또한 국내 GCP 공법은 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile, 이하 SCP) 설계법을 도입하여 GCP와 점토지반이 받는 응력비인 응력분담비 산정시 설계자의 경험에 의존하여 시공의 불확실성으로 전단 및 팽창파괴 등이 빈번히 발생하고 있다. 별징파괴를 해결하기 위해 지오그리드로 감싼 GCP(Yoo et al., 2007) 등 새로운 공법들이 제시되고 있으나, 명확한 원인규명 및 파괴 예방 대책이 미흡한 실정이다.

일반적으로 응력거동과 침하해석을 위해 연약지반 위에 위치하는 구조물은 주로 성토체이므로 비교적 하중이 작은 구조물, 성토제방을 위한 연성기초 등, 연성하중의 재하로 설계하는 것이 대부분이나 콘크리트 슬래브, 유류탱크 등 강성기초와의 차이에 따른 응력거동, 침하 및 횡변위량에 대한 연구는 다소 미미한 실정이다. 실제로 강성이 약한 연약지반을 개량하는 GCP 설계시 복합지반의 지반강도 및 강성변화만 고려할 뿐, 기초의 강성차이에 의한 변화는 고려하지 않아 과오를 범할 수 있다(Yoon, 2007).

따라서 본 연구에서는 하중재하조건 차이에 따른 응력거동을 분석하기 위해 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 GCP 복합지반을 모델링하였고, 실제 강성기초를 모델링하기 위하여 복합지반 위에 콘크리트 기초를 형성하였고, 연성기초에는 샌드매트로 모델링하였다. 이에 따라 기초의 강성에 변화를 주고 저치환율(10~30%)과 고치환율(40~60%)에 대한 수치해석을 수행하였고,

점토지반의 침하량 및 횡방향 변위량과 GCP와 점토지반의 응력분담비를 분석하였다.

1.2 연구동향

조립토 다짐말뚝공법은 1830년대에 무기고 기초를 설계하는데 사용되었으나, 1930년대부터 진동다짐공법으로 재료를 다져 말뚝을 조성하여 진동다짐공법을 개발하는데 다시 사용되었다.

1960년대 이르러 등가원주개념을 바탕으로 SCP 공법 연구가 시작되었으며 현장시험, 실내시험 등을 통한 경험적 데이터를 근거로 개발이 시작되었다. 국내에서는 모래의 단가 상승으로 인해 1980년대에 일본에서의 GCP 공법을 토대로 최초의 설계와 시공이 이루어졌고, 1990년대에 들어서서 활발한 연구가 진행되었다. 그러나 현재 국내 지반에 GCP 공법에 대한 적합한 설계기준이 부족하고, GCP에 대한 정확한 예측이 어려워 아직까지도 전단 및 팽창파괴와 같은 손실이 발생하고 있다.

1.2.1 응력분담비에 관한 연구

응력분담비는 GCP 설계 및 시공에서 가장 중요한 부분이다. GCP가 받는 응력과 지반이 받는 응력의 비로 표현되는 응력분담비는 선행연구 중 가장 많이 수행되어지고 있다. Kim(2005)은 짧은 쇄석다짐말뚝(RAP)으로 구성된 복합지반의 실내 모형실험을 통해 모형지반의 상대밀도, 말뚝의 직경 및 길이에 따른 응력집중비 및 지중응력의 변화 특성을 분석하였다. 분석결과, 말뚝의 직경이 클수록 수평토압 증가로 인해 모형지반의 강성이 증대되고 응력집중비가 감소하는 것을 확인하였고, 말뚝의 길이가 증가할수록 응력집중비가 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 모형지반의 상대밀도가 증가할수록 응력집중비가 증가하는 것을 파악하였고, 말뚝 중심에서 1.0D 떨어진 곳에서 깊이 별 수평토압을 측정된 결과, 2.0~2.5D에서 별징파괴 특성을 예측하였다.

You(2003)와 Kim(2005)은 실내 모형실험을 수행하여 말뚝의 직경이 클수록 수평토압 증가로 인해 모형지반의 강성이 증대되고 응력집중비가 감소하는 것을 확인하였다. 또한 상대밀도가 증가할수록 응력집중비가 증가하는 것을 파악하였고, 복합지반의 압밀초기에서는 재하단계가 높을수록 응력분담비가 크지만 압밀이 진행될수록 그 차이가 감소하여 종료 시점에는 오히려 재하단계가 낮은 경

우 응력분담비가 크게 된다고 하였다. 또한 Goughnour and Bayuk (1979)은 단일 조립토 다짐말뚝에 등가원주(Unit-cell)의 개념을 적용하여 해석을 수행하였고, 그 결과를 이용하여 조립토 다짐말뚝과 연약점토지반의 강성차이에 의한 응력분담비를 제안하였다.

Heo et al.(2006)과 Lee(2004)는 실내모형실험과 유한요소해석을 수행하여 고치환율의 경우 치환율 증가에 따른 침하량 감소율이 저치환율에 비해 그리 크지 않은 것을 확인하여, 적정 치환율을 40%로 판단하였다. 또한 GCP의 평균응력분담비는 2.01~2.58로 나타나는 것을 확인하였다.

Choi(2013)는 지오그리드로 감싼 GCP의 응력거동 특성을 파악하기 위해 축소모형실험을 수행하였다. 분석결과, 지오그리드로 감싼 GCP의 응력분담비는 치환율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 파악하였고, 이는 작은 재하하중이 작용할 때 치환율의 증가로 인해 GCP가 지지할 수 있는 하중은 증가하였지만 단면적이 증가하여 GCP의 응력이 감소되었기 때문이라고 판단하였다.

이처럼 많은 연구자들에 의해 GCP공법이 다양하게 연구가 진행되었으나 현장재하시험, 실내모형실험, 수치해석 등을 통해 제시된 응력분담비는 연구자에 따라 상이한 결과가 나타나고, 이러한 연구결과는 실제 설계에 반영되지 못하고 있는 실정이다.

1.2.2 침하량에 관한 연구

설계와 시공에 있어 큰 영향을 미치는 요인 중 하나인 침하량에 대해 국외에서는 현장시험, 실내시험 등을 통해 응력-변형률에 관하여 분석을 실시하고 응력거동으로부터 발생하는 침하를 분석하여 다양한 침하예측기법을 제안하였다(Aboshi et al., 1979; Greenwood, 1970; Priebe, 1976). 또한 Chun et al.(2000)은 실내모형시험을 통하여 GCP공법을 적용한 지반의 최종 침하량은 SCP 공법을 적용한 지반보다 침하량이 약 20% 크게 발생하는 것을 확인하였다.

Moon et al.(2012)은 단일말뚝을 저치환율로 개량된 지반에 대하여 1g모형시험을 실시한 결과, 압밀압력이 증가할수록 침하량은 증가 하였으나, 침하량 증가폭은 점차 감소하는 경향을 보였다. 증가폭은 SCP로 개량된 복합지반보다 GCP로 개량된 복합지반에서 현저하게 감소한 것으로 확인하였다. 즉, 동일한 조건으로 시험한 결과, GCP로 개량된 복합지반에서 침하저감 효과가 큰 것으로 확인하였다.

Kim(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·수평변위가 약 2~3배 이상 감소함을 확인하였으며, 소정의 모래를 혼합함으로써 GCP의 클로킹 현상을 방지하고 GCP의 배수성을 증가시키는 효과를 확인하였다.

현재 기존의 이론적 침하해석에 대해 국내 지반조건에 적용하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 침하량은 치환율, 말뚝의 직경, 말뚝의 거리, 지반의 강도 등의 요인에 의해 각각 침하저감효과의 차이가 나타나고 있으며, 이러한 침하해석은 GCP공법의 설계 및 시공에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다.

1.2.3 재하하중조건에 관한 연구

현재 진행되고 있는 많은 연구들은 복합지반의 지지력, 침하에 관한 분석이 대부분이고 말뚝과 지반의 복합지반에 관한 연구 또한 강성기초에 설치된 말뚝과 지반의 일정 변형률 상태에 대하여 한정되고 있는 실정이다(Bac, 2007).

Nagahara et al.(2004)은 고속도로 건설을 위해 시공된 성토에 대해 20년간의 추적연구를 통해 성토체의 강성이 하부 연약지반의 장기침하에도 영향을 미치고 있다고 지적하였으며, Jeong et al.(2005)은 원심모형실험을 통해 응력분담비에 대한 분석 결과, 변위제어 조건과 응력제어 조건에 따라 서로 다른 값을 보인다고 주장하고 복합지반에서 응력분담비의 변화는 상대적으로 강성이 큰 모래의 응력-변형 거동에 지배된다고 제시하였다.

Song et al.(2011)은 말뚝의 종류(GCP, SCP)와 하중재하조건, 치환율을 변화시켜 원심모형실험을 수행하여 강성재하 조건에서의 평균 응력분담비는 GCP로 개량한 경우가 SCP에 비해 2~9% 정도 큰 것을 확인하였으며, Yoon(2004)은 강성기초와 연성기초판으로 현장재하시험을 수행한 결과, 강성기초의 경우 연성기초보다 10%의 침하저감효과가 나타났고, 최대 횡방향 변형지점은 연성기초에서 더 깊은 곳에 발생한다고 판단하였다.

이와 같이 GCP 공법에 대한 많은 연구가 진행되고 있지만, 최근 국내 연구자에 따라 다소 상이한 결과가 나타나고, 강성 차이에 대한 연구는 미흡한 실정으로 하중조건

에 따른 역학적 거동은 아직 명확하게 제시되지 않았다. 따라서, 합리적인 GCP 설계법 제안을 위하여 유류탱크나 콘크리트 슬래브와 같은 강성기초와 성토체와 같은 연성기초의 차이에 대한 응력분담비, 치환율, 횡방향 변위를 분석하고자 하였다.

2. GCP 공법의 기본설계개념

2.1 등가원주(Unit Cell)개념

GCP 공법은 지반의 지지력 증가, 침하량 감소, 압밀촉진, 지반의 액상화 방지 등의 연약지반 보강 목적으로 사용하며 등가원주개념은 GCP 복합지반을 평가하는 설계기법과 침하거동특성을 분석하기 위해 개발되었다. 또한 정삼각형 또는 정사각형 배열로 설치된 GCP에서 영향을 미치는 주변지반의 범위는 육각형 형태 또는 등가원의 형태로 표현한다.

등가원주 주변의 전단응력은 0이고, 등가원주는 말뚝주위에 대칭으로 위치하여 마찰이 없는 강성 외벽을 가진 원주모양으로 모형화 할 수 있다.

등가원주개념의 기본 가정 사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 원지반과 GCP는 함께 침하한다.
- (2) 원주 외측면의 수평변위는 구속되고, 연직방향 변위만 발생한다.
- (3) 원주 저면은 강성지반에 정착되어 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 간격이며, 치환율(Area Replacement Ratio, a_s)은 식 (3)과 같이 GCP 복합지반에서 전체면적에 대한 GCP 면적의 비로 나타낼 수 있다.

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

여기서, A_s : GCP의 면적

A_c : 주변 점토지반의 면적

2.2 응력분담비

GCP 공법으로 개량한 복합지반은 GCP와 주변 점토지반으로 구성된 복합지반(Composite Soil)을 형성한다. 복합지반에 하중 재하시 GCP와 점토지반은 강성과 변형특성에 의해 말뚝과 지반은 서로 다른 응력을 분담하게 되며, 점토지반의 압밀시간을 가진 응력집중은 주변지반 침하감소에서 GCP와 연약지반의 강성차이에 의한 추가적인 부마찰력으로 인하여 원지반에서 GCP에 응력이 집중된다. 이처럼 GCP와 점토지반에 작용하는 응력의 비를 응력분담비(Stress concentration ratio, m)라고 하며, 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, σ_s : GCP에 전달되는 응력

σ_c : 점토지반에 전달되는 응력

3. GCP 복합지반 분석을 위한 수치해석 및 설계정수

3.1 수치해석 조건

ABAQUS를 사용하여 Fig. 1과 같이 단일말뚝 GCP로 보강한 복합지반을 2D-축대칭으로 모델링하였다. 현장여건 상 말뚝의 직경(Diameter, D)을 변화시키기는 어려워 GCP의 직경을 0.7m로 고정하고 지반의 크기를 치환율 10, 20, 30, 40, 50, 60%에 맞게 변화시켰으며, 재하하중은 성토 2~3m를 고려하여 50kPa를 적용하였다.

Fig. 1(a)와 같이 강성하중재하를 형상화 한 콘크리트기초와 Fig. 1(b)와 같이 연성하중재하를 형상화한 샌드매트 높이는 0.5m, 지반의 높이는 10m로 모델링하였다.

또한 GCP 복합지반을 Fig. 1(d)와 같이 축대칭 유한요소망을 사용하였으며, 복합지반의 측면은 X방향의 변위를 구속하였고, 등가원주개념의 기본 가정 사항 중 원주의 저면은 강성지반에 정착되어 있는 것을 가정하기 위해 하단면은 선단지지층까지 GCP가 관입되었음을 가정을 하여

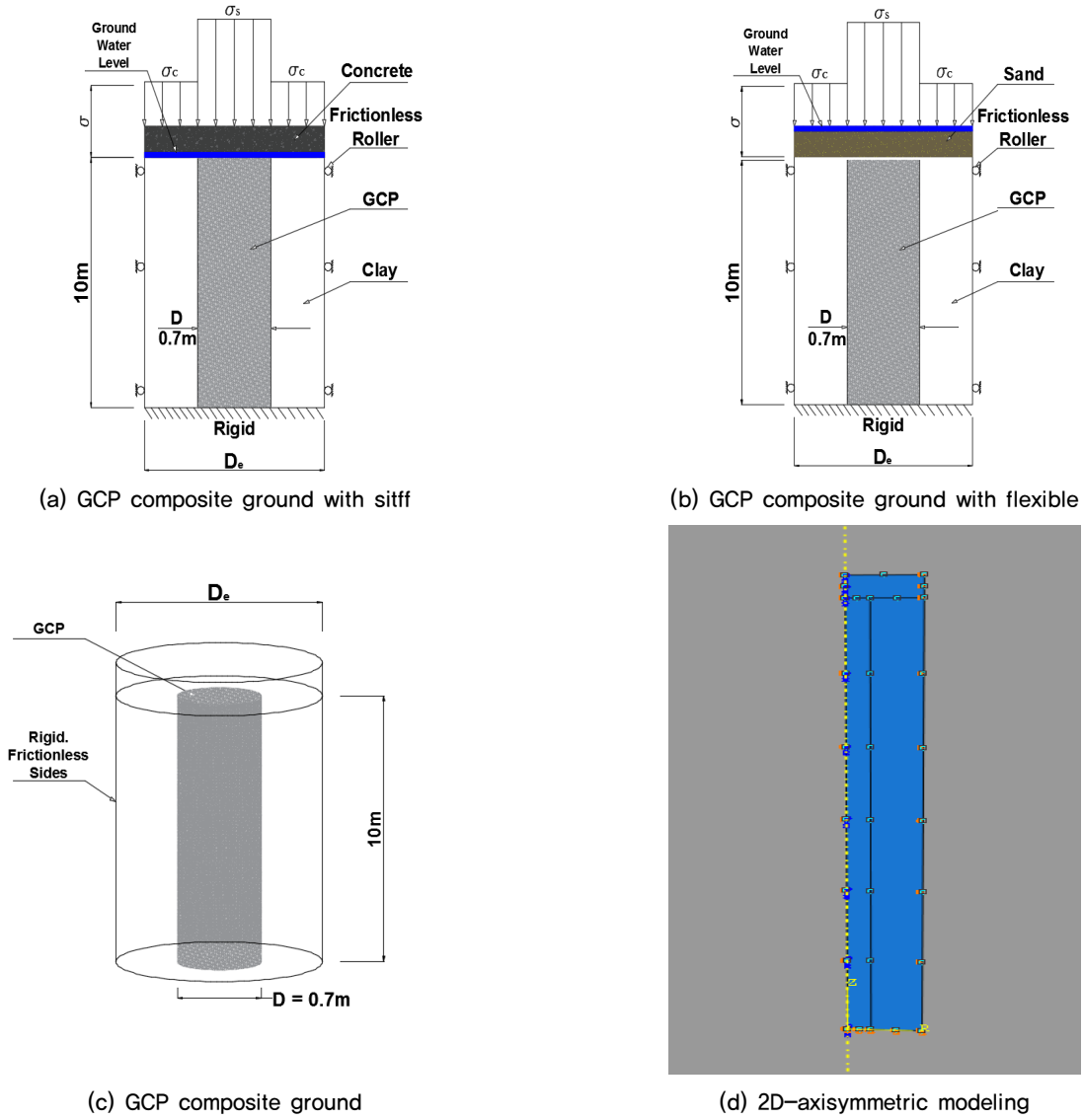


Fig. 1. Composite ground modeling for finite element analysis

X, Y방향의 변위를 구속하였다.

시공과정 모델링에서 재하하중은 1일 동안 적용 및 방치한 후 과잉간극수압이 완전히 소산하기까지 100일의 압밀기간을 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.

GCP, 점토지반과 상부기초 사이의 경계조건은 각각 경계면에 대해 Tie 조건을 적용하고 초기 간극수압은 0으로 분석하였으며, 지하수위는 콘크리트 기초는 하부까지, 샌드 매트는 상부까지 존재한다고 가정하고 복합지반의 응력거동을 분석하였다. 또한, 응력분담비, 침하량과 횡변위량에 대한 측정위치는 복합지반의 깊이/전체길이(z/H)로 파악하였고, 정밀한 분석을 위해 z/H는 0.2 간격으로 분석하였다.

3.2 수치해석에 사용된 설계정수

비선형 유한요소해석에서는 적합한 구성모델과 매개변수의 결정이 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서는 점토지반의 거동을 잘 표현할 수 있는 Cam-clay 탄·소성 모델을 적용하고, GCP는 Mohr-coulomb, 상부기초는 탄성모델로 적용하였다.

Table 1, 2와 같이 부산신항의 SCP 복합지반 설계시 적용되었던 값에서 점토지반의 물성치를 참조하여 GCP 복합지반에 사용하였으며(Busan New Port Corp., 1999), 강성인 콘크리트 기초와 연성인 샌드매트의 물성치는 선형 연구에서 구한 값을 적용하였다(Yoon et al., 2008). 또한 GCP의 물성치는 쇄석과 모래의 비율이 GCP는 100:0 비율의 대형직접전단시험을 통하여 구한 물성치를 사용하였

Table 1. Properties of Composit Ground

Material	Model	Parameter	Value
Clay	Cam-Clay Model	κ	0.04
		λ	0.265
		e	1.6
		M	1.02
		ν	0.2
		$\gamma (kN/m^3)$	17
		$k_x (m/day)$	$6.26e^{-5}$
		$k_y (m/day)$	$2.72e^{-5}$
GCP	Mohr-Coulomb Model	$E_0 (kPa)$	23200
		ν	0.3
		$c (kN/m^2)$	0.1
		ϕ	50.9
		$\gamma (kN/m^3)$	19
		$k_x (m/day)$	86.4
		$k_y (m/day)$	86.4

Table 2. Properties of Loading Materials

Material	Model	Parameter	Value
Sand mat	Elastic	$E (kPa)$	14000
		ν	0.2
		$\gamma (kN/m^3)$	20
		$k_x (m/day)$	0.864
		$k_y (m/day)$	0.864
Concrete foundation	Elastic	$E (kPa)$	26000000
		ν	0.18
		$\gamma (kN/m^3)$	24
		$k_x (m/day)$	$0.864e^{-6}$
		$k_y (m/day)$	$0.864e^{-6}$

다. GCP의 점착력은 실내실험결과 0으로 나타났으나 본 연구에서 사용된 ABAQUS 프로그램에서 점착력을 0으로 입력하게 되면 해석오류가 발생하기 때문에 0에 가까운 값에 대한 거동을 살피기 위해 0.1로 고정하여 해석을 수행하였다(Table 1 참조).

4. GCP로 개량된 복합지반의 응력거동

4.1 하중재하조건에 따른 GCP 복합지반의 응력분담비

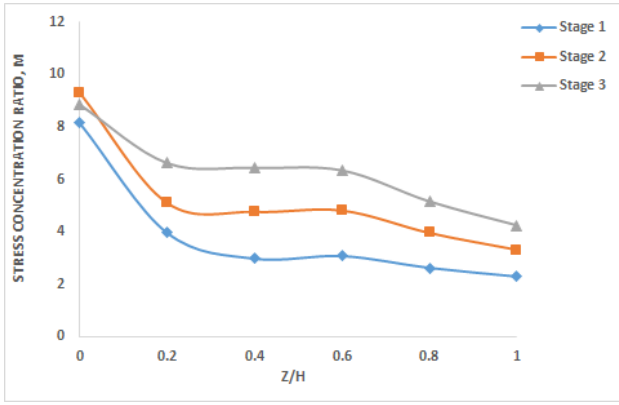
복합지반의 초기 유효응력은 깊이에 따라 증가하지만 상재하중이 재하된 후 말뚝의 연직응력과 지반의 과잉간극수압에 의해 재하압력에 지지하며, 압밀이 진행됨에 따라 과잉간극수압이 소산되므로 응력집중현상이 발생되어 GCP로 유효응력의 증가가 이루어진다.

본 연구에서는 응력집중현상을 파악하기 위해 하중재

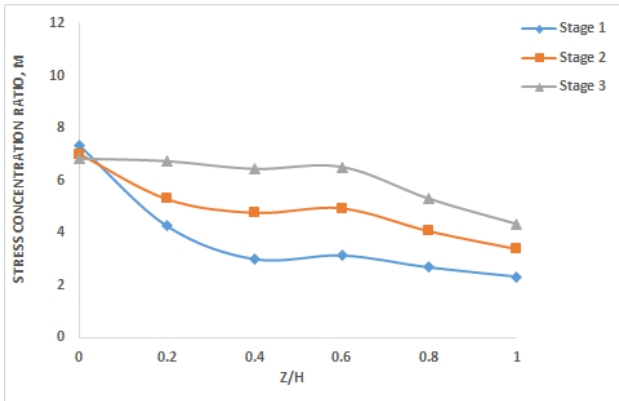
하방법, 치환율에 따른 응력분담비를 수치해석으로 분석하였다.

4.2.1 성토단계에 따른 응력분담비 분석결과

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 치환율 40%에서 강성, 연성하중에 대한 성토 1~3단계 별 응력분담비의 그림이다. 강성조건으로 하중재하시 복합지반 상부의 응력분담비가 연성조건보다 다소 높은 경향을 보였다. 강성조건에 따른 치환율에서도 마찬가지로 상부에서 응력분담비가 크게 나타났다가 하부로 갈수록 감소하는 경향이 나타났으며, 저치환율에서 고치환율로 변화할수록 상부와 하부의 격차가 크게 나타났다. 이는 강성조건과 연성조건에 대한 강성차이로 인해 하중재하 시작과 동시에 강성조건에서 말뚝이 받는 유효응력이 증가하고, 복합지반 내 GCP 차지비율과 면적이 증가함에 따라 GCP에 작용하는 응력집중현상이 감소하므로 이러한 경향이 나타난다. 또한 강성 및 연성하중 재하



(a) Stiff Loadings, $a_s = 40\%$



(b) Flexible Loadings, $a_s = 40\%$

Fig. 2. Stress concentration ratio of depths with stage, Stiffness and Area replacement ratio

시 성토단계가 진행될수록 복합지반 내의 응력분담비는 증가하는 경향이 나타났다.

강성 재하조건에서는 지반 상부의 응력분담비가 성토 단계에 따라 증가하다 3단계에서는 약간 감소하는 경향이 나타났고, 하부에서의 응력분담비는 점차 증가하는 경향을 보였다. 연성 재하조건에서는 상부에서의 응력분담비는 점차 감소하는 경향이 나타났고, 하부에서의 응력분담비는 강성조건과 마찬가지로 점차 증가하였다. 이는 성토 하중이 증가함에 따라 상부의 응력이 하부로 전이되어 상부에서의 응력분담은 감소하게 되고, 하부에서의 응력분담은 점차 증가한 것으로 판단된다.

4.2.2 하중재하조건에 따른 치환율별 응력분담비 분석 결과

Fig. 3은 성토재하 3단계에서의 강성 차이와 치환율에 따른 평균 응력분담비를 분석한 그래프이다. 강성조건인 경우 응력분담비가 5.4~9.2의 범위, 연성조건인 경우 응

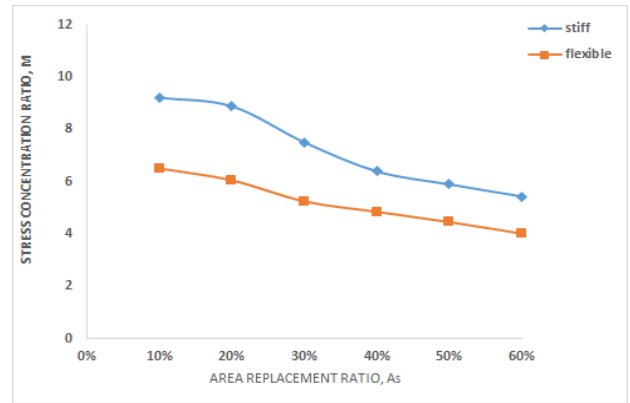


Fig. 3. Average stress concentration ratio with stiff and flexible

력분담비가 4~6.5 범위의 값으로 분석되었다.

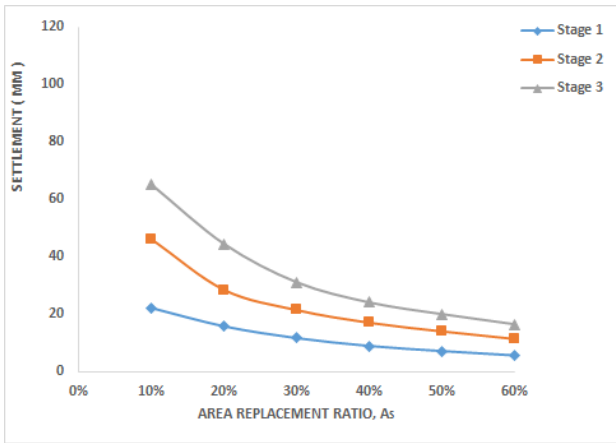
Yoon(2007)은 강성기초 조건에서 침하는 기초하부의 전체에서 동일하게 일어나지만 복합지반 중앙부의 접지압이 크고 주변부로 갈수록 접지압이 작게 발생하는 경향을 나타내어 주변지반보다 강성이 큰 조립토 다짐말뚝으로 응력집중현상이 발생하는 것으로 판단하였다. 본 연구에서도 다소 차이는 있지만 이러한 연구결과와 유사한 거동을 나타내었다.

또한 치환율이 10%에서 강성조건 of 응력분담비는 연성조건 보다 약 2.7 정도 높게 나타났고, 치환율이 증가할수록 강성조건과 연성조건 of 응력분담비의 차이는 점차 감소하여 치환율 60%에서는 약 1.4로 감소하였다. 이는 치환율이 증가할수록 복합지반에서 점토지반의 강도가 증가하여 기초의 강성 차이가 응력분담에 미치는 영향이 감소하는 것으로 판단된다.

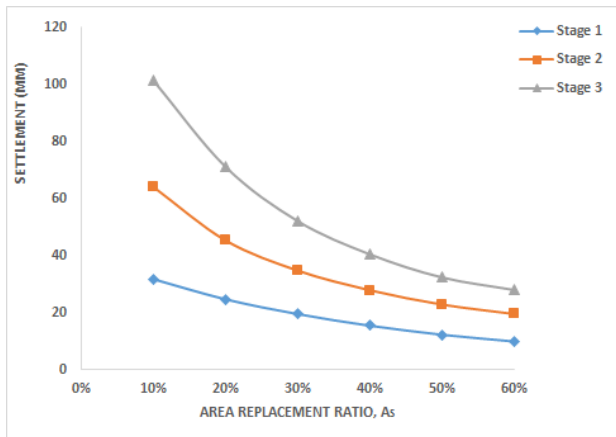
4.3 하중재하조건에 따른 GCP 복합지반의 침하량 분석

상부기초의 하중재하조건에 따라 복합지반의 침하특성을 파악하기 위해 강성기초와 연성기초를 구별하여 성토 하중 3단계 적용하고 분석하였다.

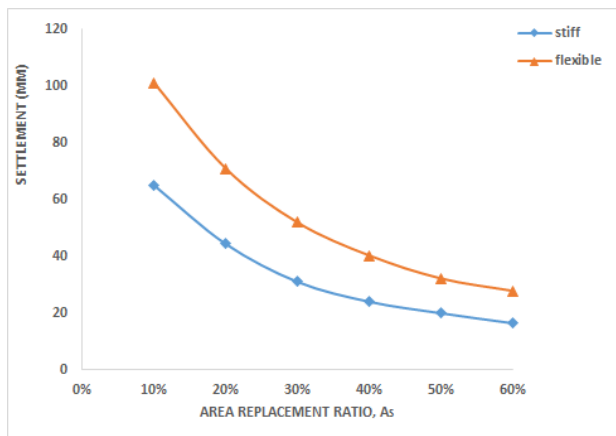
침하해석을 위해 Fig. 4(a)는 성토단계, Fig. 4(b)는 치환율, Fig. 4(c)는 강성에 따른 침하량을 나타낸 그림이다. 강성기초와 연성기초일 때 모두 치환율이 증가할수록 침하량은 감소하는 경향이 나타났다. Lee(2005)는 치환율이 증가함에 따라 상대침하량은 감소한다고 하였으며, 치환율 70%의 경우 쇄석부와 원지반부의 침하량 차이는 거의



(a) Area replacemetnt ratio and Stage, Stiff



(b) Area replacemetnt ratio and Stage, Flexible



(c) Area replacement ratio, stiff and flexible

Fig. 4. Settlement with Stage, area replacemetn ratio and stiffness

나타나지 않는다고 판단하였다. 이러한 연구결과는 본 연구에서도 유사한 경향이 나타나 치환율에 따라 침하량이 감소하였으며, 고치환율에서 침하량이 현저하게 감소한 것으로 판단된다.

치환율에 따른 최대 침하량 분석 결과, 강성조건에서 치

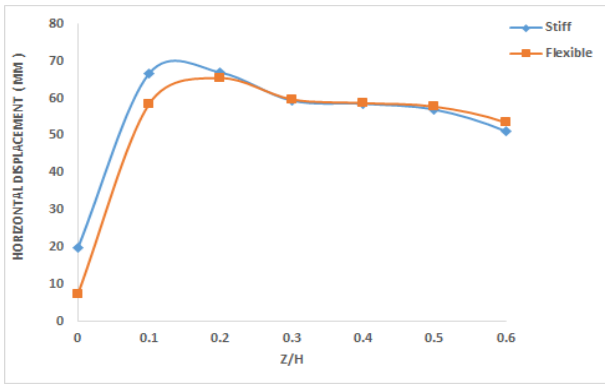
환율 10% 경우 65.1mm로 나타났고, 치환율이 증가할수록 감소하여 치환율 60%에서 16.5mm로 나타나 48.6mm 감소하였다. 연성조건에서는 치환율 10%의 경우 101.3mm로 나타났고, 강성조건과 마찬가지로 치환율이 증가할수록 감소하여 치환율 60%에서 27.9mm로 나타나 73.4mm 감소하였다. 또한 연성조건 일 때의 최대 침하량이 강성조건 일 때 보다 치환율 10%에서 36.1mm, 치환율 60%에서 11.4mm가 더 크게 발생하였다. 강성조건 일 때 보다 연성조건 일 때의 지반 침하량이 상당히 증가하기 때문에 실제 연약지반에 축조되는 성토제방, 도로 및 철도 등을 설계시 복합지반의 침하특성을 더욱 신중히 고려해야할 것으로 판단된다.

4.4 하중재하조건에 따른 다짐말뚝의 수평방향 변위 분석

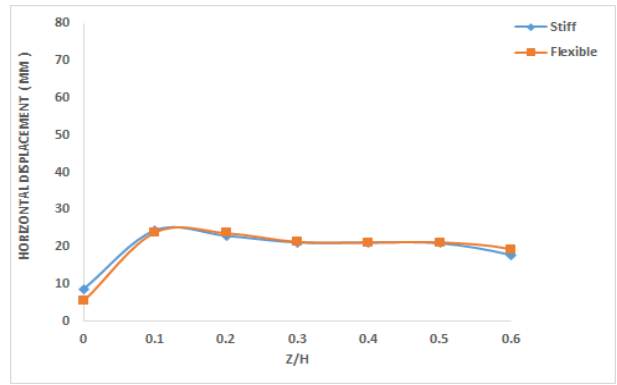
Barksdale and Bachus(1983)은 점토지반인 경우 지반의 전단강도가 최소가 되는 지점에서 팽창파괴가 발생하는 것을 파악하였다. 또한 말뚝길이와 말뚝 직경의 2~3배 이상의 길이가 긴 GCP에서는 팽창파괴가 발생한다고 하였다. 따라서 본 연구의 GCP 모델링은 말뚝 직경이 0.7m, 말뚝길이 10m이므로 팽창파괴가 발생할 가능성이 있을 것으로 판단하여, GCP의 각 깊이마다 수평방향 변위를 분석하였다.

Fig. 5(a)~Fig. 5(f)는 GCP의 치환율에 따른 깊이별 수평방향 변위를 분석한 그림이다. 저치환율(10, 20, 30%)에서는 1m~2m 지점에서 최대 수평방향 변위가 발생하였고, 고치환율(40, 50, 60%)에서는 수평방향 변위가 일정하게 발생하였다.

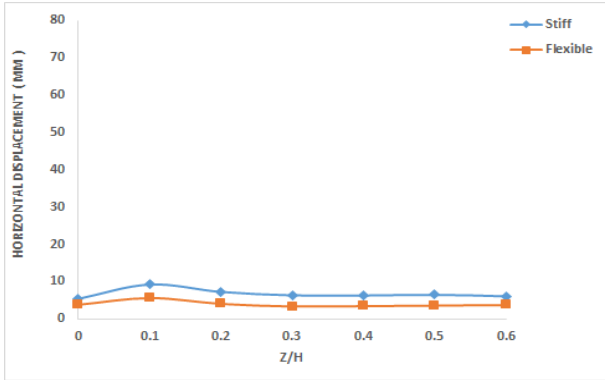
저치환율에서의 최대 수평방향변위를 살펴보면 10%일 때 2D~3D 사이에서 최대 70mm 까지 발생하였고, 30%에서 2D~3D사이에 최대 10mm 까지 수평변위가 발생하였다. 고치환율에서의 최대 수평방향 변위를 살펴보면 40~60%에서 유사한 변위량이 나타났고, 최대 2.6mm 까지 발생하였다. GCP로 개량된 복합지반에서는 기초 강성의 차이와 상관없이 유사한 지점에서 최대 수평방향 변위가 발생하였으며, 기초 강성의 차이에 예민하지 않는 것으로 판단된다. 추후 연약지반의 강도 차이에 의한 최대 수평방향 변위와 지지력에 대한 연구를 진행하여 별징파괴에 대한 명확한 규명이 필요할 것으로 판단된다.



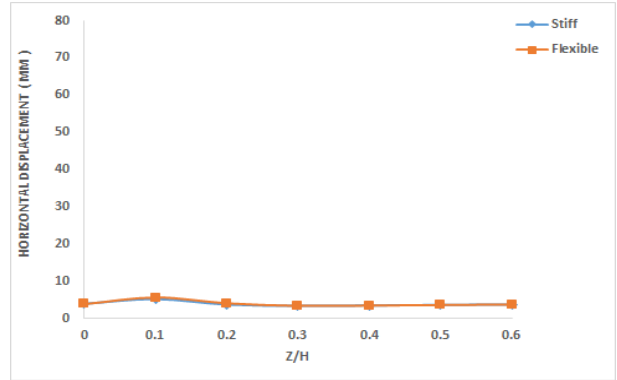
(a) $a_s=10\%$



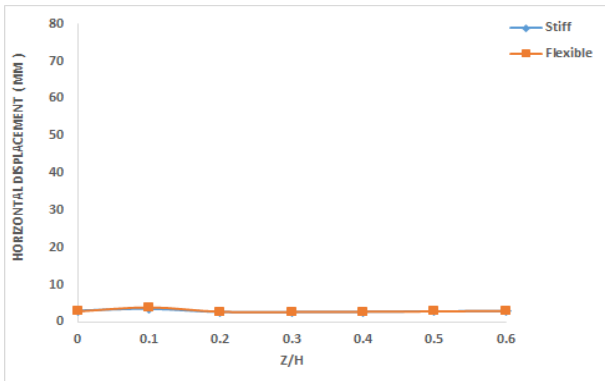
(b) $a_s=20\%$



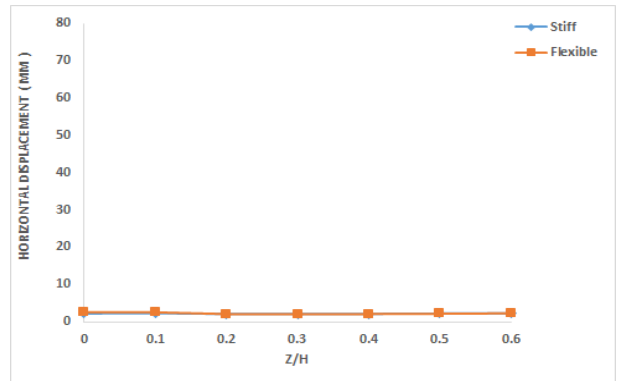
(c) $a_s=30\%$



(d) $a_s=40\%$



(e) $a_s=50\%$



(f) $a_s=60\%$

Fig. 5. Horizontal displacement of depths with Stiffness, GCP

5. 결론

GCP로 개량된 연약지반은 GCP와 점토지반의 응력거동 변화에 따라 응력분담현상이 나타나고 침하량 및 수평방향 변위의 변화가 나타난다. 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 치환율을 다르게 설정하고, 하중재하조건에 따라 응력분담비, 치환율, 최대 수평방향 변위를 분석하였다. 이러한 분석결과는 단일말뚝에 대해서만 수치해석을 진행한 연구이므로 추후 다양한 연약지반에 대한 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

- (1) 응력분담비는 연성기초의 하중재하 조건 보다 강성기초의 재하하중 조건 인 경우 상부에서의 응력분담비가 약 1.7~3.2정도 크게 평가되었다. 또한, 성토단계가 진행될수록 응력분담비는 전반적으로 증가하는 경향이 나타났다. 상부에서의 응력분담비는 강성재하 조건에서는 점차 증가하다 3단계에서는 감소하는 경향을 보였으며, 연성재하 조건에서는 성토단계에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 하부에서의 응력분담비는 모두 점차적으로 증가하였다.
- (2) 전반적인 평균응력분담비 분석결과, 강성기초의 하중재하 조건에서는 5.4~9.2, 연성기초의 하중재하조건

에서는 4~6.5로 나타났으며, 치환율 10%일 때, 응력 분담비의 차이는 약 2.7정도로 높게 나타났다. 또한 치환율이 증가할수록 강성조건과 연성조건에 응력분담비 차이는 약 1.4정도로 감소하였다. 이는 치환율이 증가함에 따라 점토지반의 강도가 증가하여 원지반의 강성 차이가 응력분담비에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

- (3) 하중재하조건에 상관없이 치환율이 증가할수록 침하량은 감소하는 경향이 나타나고, 최종침하량을 비교한 결과, 강성에서는 48.6mm, 연성에서는 73.4mm 감소하였다. 또한, 강성재하조건에서 최대 침하량이 65mm인 반면 연성재하조건에서의 최대 침하량은 101mm로 나타났다. 이는 연약지반에 축조되는 성토제방, 도로 및 철도 등을 설계시 복합지반의 침하특성을 더욱 신중이 고려해야 할 것으로 판단된다.
- (4) 복합지반에서 GCP의 최대 수평방향 변위를 분석한 결과, 강성의 차이와 상관없이 유사한 지점인 2D~3D 위치에서 고치환율 60%에서는 약 2.6mm로 나타났고 저치환율 10%에서는 약 70mm로 나타나 고치환율보다 저치환율에서의 최대 수평방향 변위가 더욱 뚜렷하게 발생하는 것을 확인하였다. 또한 하중재하조건에 따른 수평변위의 차이는 다소 미미하여 강성의 차이는 수평변위에 예민하지 않는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 단일말뚝의 경우, 하나의 복합지반에 대해 분석한 결과로 추후 다양한 점토지반에서 상부기초의 강성차이에 대한 응력거동 분석을 파악하여 강성의 차이에 대한 응력거동특성을 명확히 파악하여 국내 연약지반 개량에 적용해야 할 것으로 사료된다.

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. Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M. and Harada, K. (1979), "The Composer, a Method to Improve Characteristics of Soft

- Clays by Inclusion of Large Diameter Sand Columns", *Proceeding of International Conference on Soil Reinforcement, Paris, France*, Vol.1, pp.211-216.
2. Bae, W. S., Kim, J. W. and Kwon, Y. C. (2007), "Finite Element Analysis for The Effects on The Stiffness of The Embankment and Sandmat on The Deformation Property and The Safety of Road Embankment", *International journal of safety*. Vol.22, pp.57-65.
3. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983), "Design and Construction of Stone Column", *Georgia Institute of Technology, Atlanta*, Vol.1.
4. Busan New Port Corp. (1999), *Report of North Container Terminal*, pp.6.50-6.59.
5. Choi, J. W. (2013), "Characteristics of Geogrid-encased Stone Column", Sungkyunkwan University, Master Thesis.
6. Chun, B. S., Choi, H. S. and Lee, Y. H. (2000), "A Study on Bearing Capacity Characteristics of Gravel Piles", *Journal of The Civil Engineering Conference Contents*, Vol. 2000, pp.493-496.
7. Dassault Systemes. (2008), *Abaqus Version 6.12 Documentation*. Providence, RI: Dassault Systemes.
8. 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.Greenwood, D. A. (1970), "Mechanical Improvement of Soil below Ground Surface", *Proceeding of Ground Engineering Conference, Institute of Civil Engineers*, pp.9-20.
9. Greenwood, D. A. (1970), "Mechanical Improvement of Soil below Ground Surface", *Proceeding of Ground Engineering Conference, Institute of Civil Engineers*, pp.9-20.
10. Heo, Y., Zheong, Z., Lee, C. K. and Ahn, K. G. (2006), "Centrifuge Modeling on Displacement Shapes of Composite Ground Improved by SCP and GCP", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.7, No.5, pp.57-66.
11. Jeong, G. S., Park, B. S., Lee, J. H. and Yoo, N. J. (2005), "Centrifuge Model Experiments of Footing Behavior on Layered Sandy Soil", *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No.1, pp.27-34.
12. Kim, K. M. (2005), *The Characteristics of Bearing Capacity of Rammed Aggregate Pier in Cohesionless Soils*, Hanyang University, Ph. D. Thesis.
13. Kim, M. S. (2016), *The Behavior of Soft Ground Reinforced with Granular Compaction Pile*, Chosun University, Master Thesis.
14. Lee, C. H., Lim, H. D. and Lee, W. J. (2005), "Finite Element Analysis of GCP Ground with Replacement Ratio", *Korean Society of Civil Engineers*.
15. 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.
16. 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 Replacement Ratio by 1g Model Tests", *Journal of The Civil Engineering Conference Contents*, Vol. 2012, No.10, pp.1187-1190.
 17. Nagahara, H., Fujiyama, T., Ishiguro, T. and Ohta, H. (2004), "FEM Analysis of High Airport Embankment with Horizontal Drains", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.22, pp.49-62.
 18. Priebe, H. (1976), "Estimating Settlements in a Gravel Column Consolidated Soil", *Die Bautechnik* 53, pp.160-162.
 19. Shin, H. M. and Lee, J. H. (2007), *Reinforced Concrete*, *Dongmyeongsa*, pp.15-18.
 20. Song, M. G., Bae, W. S. and Ahn, H. Y. (2011), "Centrifugal Model Test on Stress Concentration Behaviors of Composition Ground under Flexible/Stiff Surcharge Loading", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.12, No.6, pp.5-15.
 21. 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.
 22. Yoon, I. S., Lee, J. Y., Cho, B. Y. and Kim, Y. G. (2008), "Time Evolution of Water Permeability Coefficient of Carbonated Concrete", *Journal of The Annual Research Conference in Fall 2008 Contents*.
 23. Yoon, J. S. (2007), *Evaluation of Behavior Characteristics on Granular Compaction Piles with Foundation Stiffness*, Hongik University, Ph. D. Thesis.
 24. You, S. G. (2003), "Experimental Study on Stress Behavior of Composition Ground Improved by Sand Compaction Piles with Low Replacement Area Ratio", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.5, pp.253-261.