한국지반공학회논문집 제32권 9호 2016년 9월 pp. 37 ~ 50
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.32, No.9, September 2016 pp. 37 ~ 50

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2016.32.9.37

GCP의 쇄석과 모래의 배합비 별 응력분담비

Stress Concentration Ratio of GCP Depending on the Mixing Ratio of Crushed Stone and Sand

나 승 주[1] Na, Seung-Ju 김 민 석[1] Kim, Min-Seok
박 경 호[2] Park, Kyung-Ho 김 대 현[3] Kim, Daehyeon

Abstract

Gravel compaction pile (GCP) is widely used as it increases the bearing capacity of soft ground and reduces the consolidation settlement. Stress concentration ratio for GCP design is dependent on the area replacement, surcharge pressure and depth. However, a range of stress concentration ratio obtained through field, laboratory experiments and numerical analysis is large. Little study has been done on the stress concentration ratio for the mixing ratio of gravel and sand. The main objective of the study is to evaluate the stress concentration ratio for both area replacement ratio and mixing ratio through literature review and numerical analysis. Numerical analysis using the finite element program ABAQUS 6.12-4 has been performed for the composite ground with GCP. The excess pore water pressure and stress concentration ratio of composite ground have been analyzed for both the area replacement ratio and the mixing ratio. Based on the previous research results, a range of stress concentration ratio obtained from the field tests, laboratory tests, numerical analysis on the GCP studies is found to be 1.7-3.2, 2.0-7.5 and 2.0-6.5, respectively. Based on the numerical analysis results, as the area replacement ratio increases, the stress concentration ratio increases up to 30% and then decreases at 40%. Also, the stress concentration ratio tends to increase up to 70:30 and then to decrease after 60:40.

요 지

쇄석다짐말뚝(GCP)은 연약지반의 지지력 증가와 침하량의 감소를 실현할 수 있어 연약지반 개량에 활발하게 사용되고 있다. GCP 설계에 필요한 응력분담비는 치환율, 상재하중, 깊이 등에 따라 달라진다. 많은 연구자들이 현장실험, 실내실험, 수치해석 연구를 통해 쇄석으로 이루어진 GCP에 대해 치환율에 따른 응력분담비를 제시하였으나, 쇄석과 모래의 배합비에 따른 응력분담비에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 선행연구 분석과 수치해석을 통해 배합비와 치환율에 따른 응력분담비를 명확히 규명하고자 하였다. 이를 위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.12-4를 사용하여 GCP가 시공된 복합지반을 모델링하여 배합비와 치환율에 따라 복합지반의 과잉간극수압과 응력분담비를 분석하였다. 선행연구 분석결과, GCP 복합지반의 응력분담비에 관한 연구에서 일반적으로 현장에서 정재하시험, 실내시험, 수치해석을 통해 얻은 응력분담비는 각각 1.7～3, 2～7.5, 2～6.5 범위로 나타났으며, 쇄석과 모래의 배합비에 관한 연구에서는 일반적으로 클로깅현상을 저감시키기 위해 실내실험 한 결과로 쇄석과 모래의 최적배합비가

1 비회원, 조선대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chosun Univ.)
2 정회원, 조선대학교 토목공학과 박사 (Member, Ph.D, Dept. of Civil Engrg., Chosun Univ.)
3 정회원, 조선대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chosun Univ., Tel: +82-62-456-7860, Fax: +82-62-220-2687, dkimgeo@chosun.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2016 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

70:30으로 나타났다. 수치해석결과, 일반적인 GCP 복합지반의 치환율이 증가함에 따라 응력분담비가 치환율 30%까지는 증가하다가 40%에서는 다시 감소하는 경향이 나타났으며, 쇄석과 모래의 배합비에 따른 응력분담비는 일반적으로 모래의 함유량이 증가함에 따라 쇄석과 모래의 배합비가 70:30까지는 증가하다가 60:40 이후에 다시 감소하는 경향이 나타났다.

Keywords : Area replacement ratio, Excess pore water pressure, GCP method, Mixing ratio, Stress concentration ratio

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

국가의 지속적인 경제성장으로 인해 산업용지 및 생활용지의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 부득이 지반개량이 필요한 연약지반에서의 토목공사가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 연약지반에서는 지지력 부족이나 과도한 침하 등의 지반 공학적 문제점들이 발생할 수 있으므로 연약지반개량 공사 시 주의가 필요하다.

연약지반개량공법 중 개량목적에 따라 여러 가지 공법들이 있다. 그 중 GCP 공법은 점토지반에서 원지반과 GCP를 10~40% 가량 치환된 복합지반을 형성함으로 지반의 지지력과 전단강도를 증가시켜 측방유동을 억제하거나 압밀침하 시간 단축, 압밀침하량 저감 등의 공학적 특성개선을 목적으로 시공한다. 또한 GCP 복합지반에서 모래지반인 경우에는 밀도를 증가시키고 액상화 방지와 수평지지력 증대를 목적으로 적용하는 공법이다.

현재 국내 GCP 설계는 모래다짐말뚝(SCP) 설계법을 그대로 적용하고 있으며, 응력분담비를 적용할 때 설계자의 경험에 의존하기 때문에 시공의 불확실성으로 인한 파괴가 빈번히 발생되고 있으나, 명확한 원인 규명과 파괴예방 대책 수립을 하지 않고 있다.

또한 GCP의 문제점 중 하나인 클로깅현상을 저감시키기 위해 쇄석에 모래를 혼입하여 최적배합비를 규명하고자하는 연구들이 진행되었으나, 배합비에 따른 응력분담비에 관한 연구는 전무하다.

따라서 본 연구에서는 GCP 공법의 합리적인 설계법 제안을 위한 기초연구로써, 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.12-4(Dassault System, 2012)를 이용하여 GCP로 보강된 연약지반을 모델링하여 치환율과 GCP 말뚝의 쇄석과 모래의 배합비의 변화에 따라 GCP 복합지반의 과잉간극수압과 응력분담비에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하고자 하였다.

1.2 연구동향

조립토 다짐말뚝공법은 1830년대에 프랑스 기술자인 Moreau등에 의해 모래다짐말뚝공법(SCP, Sand Compaction Pile)을 중심으로 개발되어 사용되었으나, 1930년대부터 진동 장비를 이용하여 재료를 다져 말뚝을 조성하여 진동다짐공법을 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.

복합지반의 거동분석과 설계를 위해서는 쇄석과 점토의 응력거동 특성, 치환율에 대한 응력분담비를 정확히 파악해야 한다. 그러나 GCP 설계 시 연약지반의 강도특성, GCP에 사용되는 재료특성, 현장 여건 등을 고려하지 않고, 설계자의 경험과 기존의 현장 사례를 참고하여 응력분담비를 적용하고 있어 예상치 못한 벌징 파괴와 전단파괴 등이 종종 발생하고 있는 실정이다. 응력분담비에 대한 선행연구를 살펴보면 다음과 같다.

Bae와 Lee(2007)는 현장재하시험과 수치해석연구를 수행한 결과, 자유변형률로 인하여 말뚝에서 침하는 감소하고 지반의 침하는 증가하며 일반적으로 3.1 < 응력분담비(m) < 7.5의 값을 나타냈다. 또한 치환율, 형상비, 상대밀도 증가에 따라 응력분담비가 증가하지만, 일정한 지점에서는 수렴하고 고치환율(일반적으로 치환율 50%이상)이나 긴 말뚝에서는 상재하중의 증가에 따라 응력분담비가 영향을 받는다고 하였다.

Lee et al.(2003), Lee(2004)는 직경 70cm의 쇄석말뚝에 대하여 치환율 20, 30, 40%인 GCP를 20.7m 깊이까지 시험 시공한 후 쇄석과 지반의 응력분담비를 분석하기 위해 정재하시험을 수행하였다. 실험결과, 쇄석 및 지반의 응력분담비를 측정하기 위하여 로드셀을 설치

했으나, 분석에서는 지반에 설치한 로드셀의 측정값을 사용할 수 없어서 총 재하하중에서 쇄석이 받은 하중을 감한 값을 지반응력으로 환산하여 적용하였다. 또한 쇄석의 치환율이 증가할수록 지반의 보강 효과가 증가하여 복합지반의 변형계수가 증가한다는 것을 확인하였으며, 치환율에 대해서 응력분담비는 1.7～3.0의 값을 가진다고 하였으며, 치환율이 증가할수록 응력분담비가 증가한다고 하였다.

Kim et al.(2004)은 SAGE CRISP 프로그램을 이용하여 SCP 복합지반을 압밀시간 경과에 따른 과잉간극수압, 응력전이, 응력분담비의 특성을 분석하였다. 분석결과, 하중이 재하 되는 동안 응력분담비는 모래말뚝이 우선 저항하기 때문에 응력분담비가 증가하지만 압밀이 진행되면서 점토지반에서 유효응력이 증가하여 응력분담비가 감소하는 경향을 나타내었다. 복합지반에서 응력분담비는 일정한 값이 아니라 압밀시간, 복합지반의 깊이에 따라 각각 다른 값을 가진다고 확인하였다. 또한 저치환율(일반적으로 치환율 50% 미만)에서는 응력분담비가 2.5～6의 값을, 고치환율에서는 2.5～4.2의 값을 가진다고 하였다.

Lee et al.(2005)은 치환율에 따른 GCP 복합지반을 PENTAGON 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, 저치환율에 비하여 고치환율의 경우 치환율 증가에 따른 침하량 감소율이 높지 않은 것으로 나타나 적정 치환율은 40%로 확인하였다.

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.

선행연구 분석결과, 일반적으로 현장실험을 통해 측정된 응력분담비는 1.7～3, 실내실험을 통해 얻은 응력분담비는 2～7.5, 수치해석을 통해 측정된 응력분담비는 2～6.5 범위에 있는 것으로 나타났다. 국내에서는 설계자들이 참고로 하는 도로설계편람(2012)과 도로설계요령(2009)에서는 응력분담비 3을 권고하고 있어 일반적으로 3을 적용한다.

이처럼 조립토 다짐말뚝공법에 대한 많은 연구가 지속적으로 연구되어 왔으나, 현장실험, 실내실험, 수치해석 연구를 통해 제시된 응력분담비의 범위는 연구자에 따라 상이하다. Table 1과 같이 상재하중이 증가될수록 응력분담비가 증가하는 경우, 일정하게 유지되는 경우, 감소하는 경우, 증가했다가 감소하는 경우 등 치환율이나 깊이에 따른 응력분담비가 각각 다른 경향이 나타났다.

쇄석과 모래의 배합비에 대한 선행연구를 살펴보면 다음과 같다.

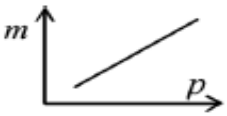
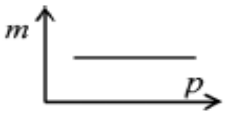
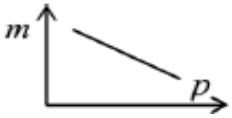
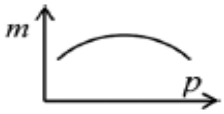
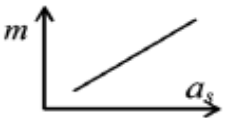
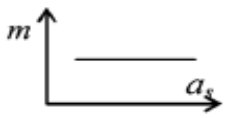
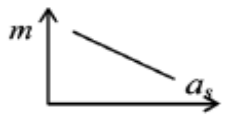
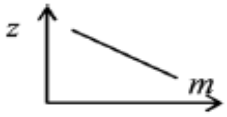
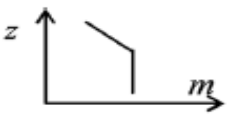
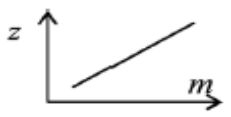
Choi(2009)는 GCP의 공극을 모래로 채움으로 말뚝체로부터 발생하는 클로깅현상을 억제하기 위한 시공방법을 제시하고자 하였다. 쇄석과 모래의 혼합비를 변화시키며 다짐시험, 대형직접전단시험, 클로깅시험을 수행한 결과, 밀도는 쇄석과 모래의 배합비가 80:20에서 크게 나타났으며, 강도는 배합비 85:15에서 크게 나타났다. 또한 모래 배합비가 20%이상 되면 클로깅시험 시 투수성이 현저하게 감소하는 것으로 나타났다.

반면, Chu(2013)는 대형직접전단시험 결과, 쇄석과 모래의 배합비 70:30일 경우에 내부마찰각이 가장 크게 나타났으며, 지지력도 배합비 70:30일 경우가 가장 클 것이라 판단하였다. 또한 쇄석에 모래를 혼합함으로 폐색현상의 저감효과가 나타나 쇄석과 모래의 최적 배합비를 70:30으로 판단하였다.

Jeong et al.(2013)은 PFC3D를 활용한 개별요소법과 MIDAS GTS 프로그램을 이용하여 지반의 지름이 98cm인 반원으로 하여 중앙부에 지름 21cm의 다짐말뚝을 모델링하였다. 배합비별 시간에 따른 침하거동과 과잉간극수압을 분석한 결과, GCP에 소정의 모래를 혼입함으로 지지력 확보와 클로깅현상을 저감할 수 있을 것으로 판단하였고, 간극수를 빨리 배출하여 연약지반을 더 빨리 안정화할 수 있을 것으로 판단하였다.

이처럼 클로깅현상을 저감시키기 위해 쇄석에 소정의 모래를 혼입, 저회 등을 혼입하여 최적배합비를 규명하고자 하는 연구들이 진행되었다. 그러나 치환율에 따

Table 1. Various results for the stress concentration ratio (Shin, 2005)

(a) Surcharge pressure, p			
			
Aboshi et al. (1970), Matsuoka et al. (1972), Ichimoto (1981)	Ichmoto (1981), Kim (2001)	Yamaguchi and Hukumoto (1982), Hong (2003), You (2003), Kim and Ahn(2012)	Takeda and Nogawa (1982)
(b) Area replacement ratio, a_s			
			
Jung (1999), Hong (2003), You (2003), Kim (2003), Lee et al. (2003), Bae and Lee (2007), Kim (2009), Song et al. (2011), Kim and Ahn (2012)	Cho (1999), Park et al. (2000).	Yoshikuni (1979), Hong (2003), Lee et al. (2005), Choi et al. (2013)	Kim (2001), Heo et al. (2006)
(c) Depth, z			
			
Lee (2000), Hong (2002), Lee et al. (2005), Kim et al. (2012)	Kim (2003)	Jung (1999)	

른 응력분담비는 많은 연구가 되어왔지만 배합비별 치환율에 따른 응력분담비에 관한 연구는 전무하다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 GCP가 시공된 복합지반을 모델링하여 복합지반의 배합비별 치환율에 따른 응력분담비와 과잉간극수압을 분석하여 선행연구 분석과 수치해석을 통해 배합비별 치환율에 따른 응력분담비에 대한 범위를 명확히 규명하고자 하였다.

2. GCP공법의 기본설계개념

2.1 등가원주(Unit Cell)개념

조립토 다짐말뚝공법은 지반의 지지력증가, 침하량 감소, 압밀촉진, 지반의 액상화 방지 등의 연약지반 보강 목적으로 사용되고 있으며, 복합지반에 등분포 상재하중이 작용하면 복합지반내 말뚝에 의한 영향면적을 등가원주로 고려하여 복합지반 전체에 대한 해석이 이루어져야 한다.

등가원주 주변의 전단응력은 0이고, 등가원주는 말뚝 주위에 대칭으로 위치하여 마찰이 없는 강성 외벽을 가진 원주모양으로 모형화할 수 있다.

등가원주개념의 기본 가정 사항을 정리하면 다음과 같다.

(1) 연약지반과 말뚝은 함께 침하한다.
(2) 원주의 윤변에서 수평변위는 구속되고, 연직변위만 발생한다.
(3) 원주의 저면은 강성지반에 정착되어 있다.

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)와 같다.

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

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

여기서, s는 GCP의 간격이다.

2.2 치환율과 응력분담비

GCP 공법으로 개량한 복합지반은 Fig. 1과 같이 GCP와 주변 연약지반으로 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 표현되며, 복합지반에 하중이 재하 시 GCP와 점토지반은 강성과 변형특성에 의해서 말뚝과 지반은 서로 다른 응력을 분담하게 된다. 이처럼 GCP와 점토지반의 응력비를 응력분담비(Stress Concentration Ratio, m)라고 하며, 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 이러한 응력의 분담개념은 복합지반 거동(지지력, 안정해석, 침하)에 매우 중요한 요소이다.

$$a_s = \frac{A_s}{A_s + A_c} \tag{3}$$

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \tag{4}$$

여기서, A_s= GCP의 면적, A_c= 주변 점토지반의 면적, σ_s= GCP에 전달되는 응력, σ_c= 점토에 전달되는 응력이다.

3. 지중응력을 고려한 GCP 복합지반의 분석을 위한 수치해석 및 설계정수

3.1 수치해석 조건

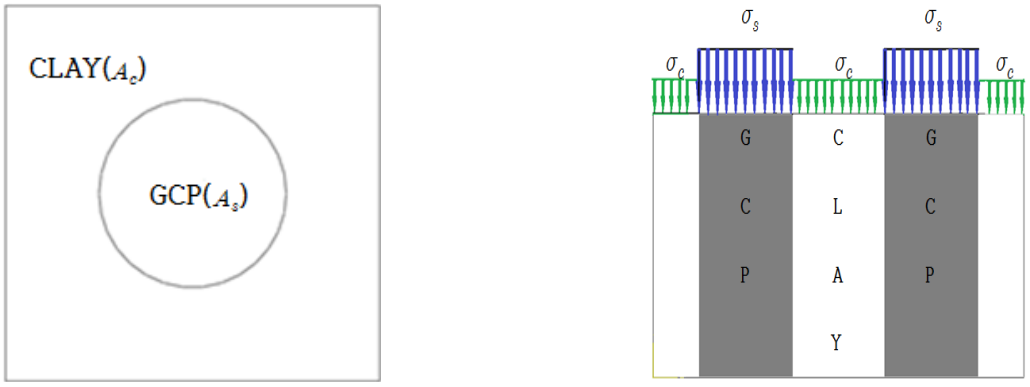
GCP로 개량된 복합지반은 GCP 자체의 강도 변화뿐만 아니라 각 GCP를 중심으로 3차원적인 배수가 유발되며, 이와 같은 배수특성으로 인하여 3차원적인 배수와 거동특성을 정확히 분석하기 위해서는 실제 복합지반을 3D로 모델링하여 해석할 필요가 있으나, 해석하기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 ABAQUS를 사용하여 해석단면은 Fig. 2(a)와 같이 단일말뚝 GCP로 개량된 복합지반을 1/4로 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.

요소는 CAX4P(4-node biquadratic displacement, bilinear pore pressure element)를 사용하였으며, 요소의 크기는 0.1m×0.1m로 하여 분석하였다.

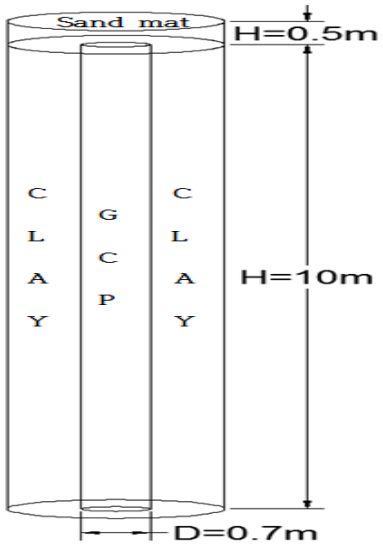
GCP 말뚝 직경을 고정하고 지반의 크기를 변화시킨 이유는 현장에서 다짐말뚝의 직경을 달리하여 치환율을 변화시키는 것은 시공 여건상 힘들기 때문에 말뚝 직경을 0.7m로 고정하였고, 지반을 변화시켜 치환율을 변화시켰다. 치환율도 40% 이상으로 현장 여건상 치환하기 어렵기 때문에 40%까지만 분석하였다. 또한 각각의 치환율(10, 20, 30, 40%)에 대해서 쇄석:모래 배합비(100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 0:100) 별로 총 24가지의 경우를 분석하였다.

GCP 복합지반을 Fig. 2(b)와 같이 축대칭 유한요소망

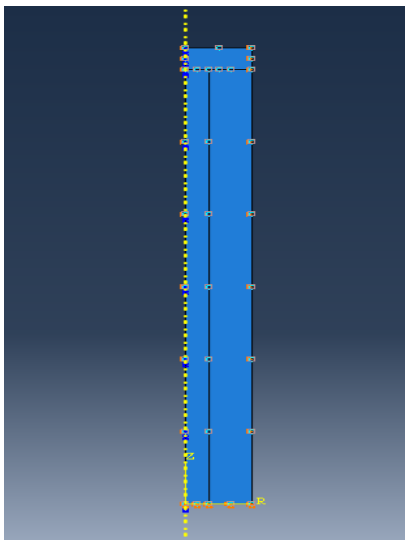


(a) Area of composite soil (b) Stress of composite soil

Fig. 1. Composite soil with GCP



(a) GCP composite modeling



(b) Axisymmetric finite element mesh

Fig. 2. The modeling for the numerical analysis

을 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 적용하였으며, 초기 간극수압도 0으로 적용하여 분석하였다.

또한 지하수위는 샌드 매트 상부까지 존재한다고 가정하였으며, 복합지반의 지중응력을 고려하여 분석하였다. 또한 상재하중은 1일 동안 200kPa가 샌드 매트 상부에 작용하는 것으로 하였으며, 후에 수치해석을 통해 복합지반의 완전히 압밀이 되는 100일 동안의 방치기간을 가정하여 분석하였다.

지반과 같이 비선형 응력-변형 거동을 나타내는 재료에 대한 유한요소해석에서 가장 중요한 요소는 해석에 적합한 구성모델 선택과 이에 따른 매개변수의 결정이다. 본 연구에서는 점토지반은 거동을 잘 모사할 수 있는 Cam-Clay 탄·소성모델을 적용하였고, GCP는 Mohr-Coulomb 탄·소성모델을 적용하였으며, 샌드 매트는 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다.

3.2 수치해석에 사용된 설계정수

본 연구에서 사용된 설계정수는 Table 2와 같이 부산신

Table 2. Properties of materials

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)	Ref. Table 3
		ν	0.3
		c	0
		ϕ	Ref. Table 3
		$\gamma\ (kN/m^3)$	19
		k_x (m/day)	86.4
		k_y (m/day)	86.4
Sand mat	Elastic	E (kPa)	14000
		ν	0.2
		$\gamma\ (kN/m^3)$	20
		k_x (m/day)	0.864
		k_y (m/day)	0.864

Table 3. Internal friction angle and elastic modulus by mixing ratio

Mixing ratio	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	0:100
ϕ (°)	50.90	51.43	52.78	58.29	54.3	39.18
E (kPa)	23200	24700	26100	26700	28900	13700

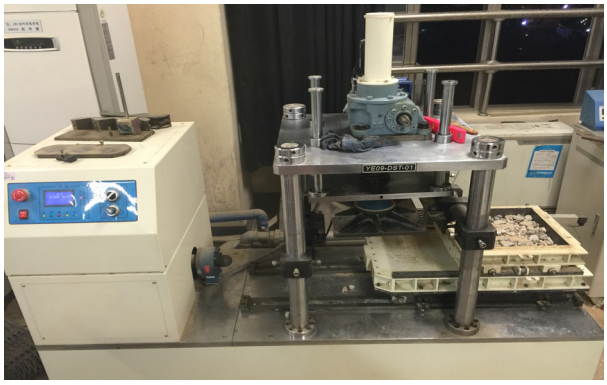
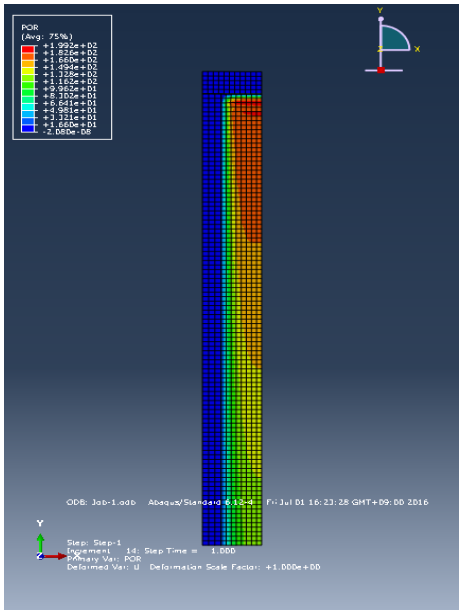


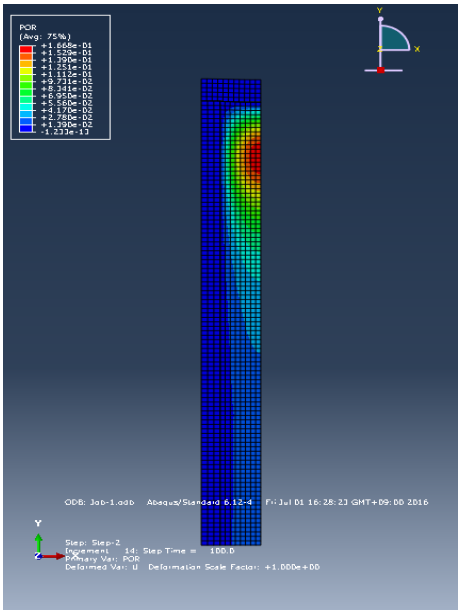
Fig. 3. View of the large direct shear test

항의 SCP 복합지반 설계 시 적용된 값(Busan New Port Corp., 1999)을 참조하여 사용하였으며, Table 3과 같이 쇄석과 모래의 배합비(100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 0:100)에 따라 본 연구를 위하여 실시한 대형직접전단시험을 통해 얻은 내부마찰각과 탄성계수를 사용하였고, 대형직접전단시험은 쇄석 입경이 25~45mm의 시료를 대상으로 다짐을 실시한 후 급속시험을 실시하였다. Fig. 3은 대형직접전단시험의 장비구성이다.

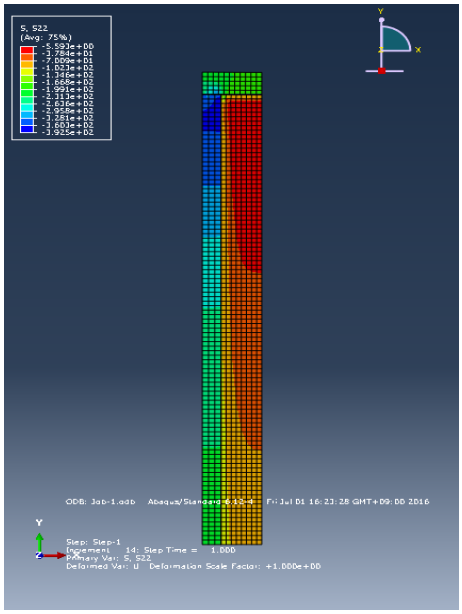
실내실험 결과, 쇄석과 모래의 배합비 70:30에서 가장 높은 58.29°의 내부마찰각을 얻었으며, 30%이상의



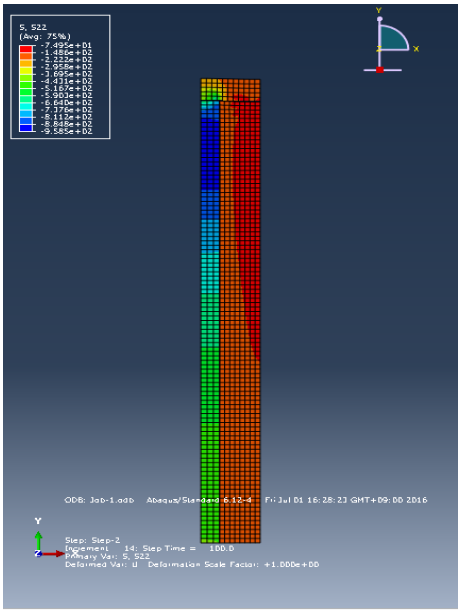
(a) Excess pore water pressure T = 1 day



(b) Excess pore water pressure T = 101 days



(c) Vertical effective stress T = 1 day



(d) Vertical effective stress T = 101 days

Fig. 4. The contours for excess pore water pressure and vertical effective stress with a_s=10% and mixing ratio=100:0

모래 배합비가 증가할수록 내부마찰각은 감소하는 경향을 나타내었다.

또한 대형직접전단시험을 통해 전단탄성계수(G)를 구해 식 (5)에 대입하여 탄성계수(E)를 구하여 해석에 사용하였다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{5}$$

여기서, ν는 포아송비이다.

배합비에 따라 투수계수나 간극비 등이 달라지지만 동일한 조건으로 가정하였고, 실내실험을 통해 얻은 내부마찰각과 탄성계수를 적용하여 수치해석을 수행하였다. 추후에 배합비에 따라 투수계수뿐만 아니라 간극비, 점착력 등 정확한 데이터를 확보하여 분석해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.1 GCP 복합지반의 과잉간극수압 분석

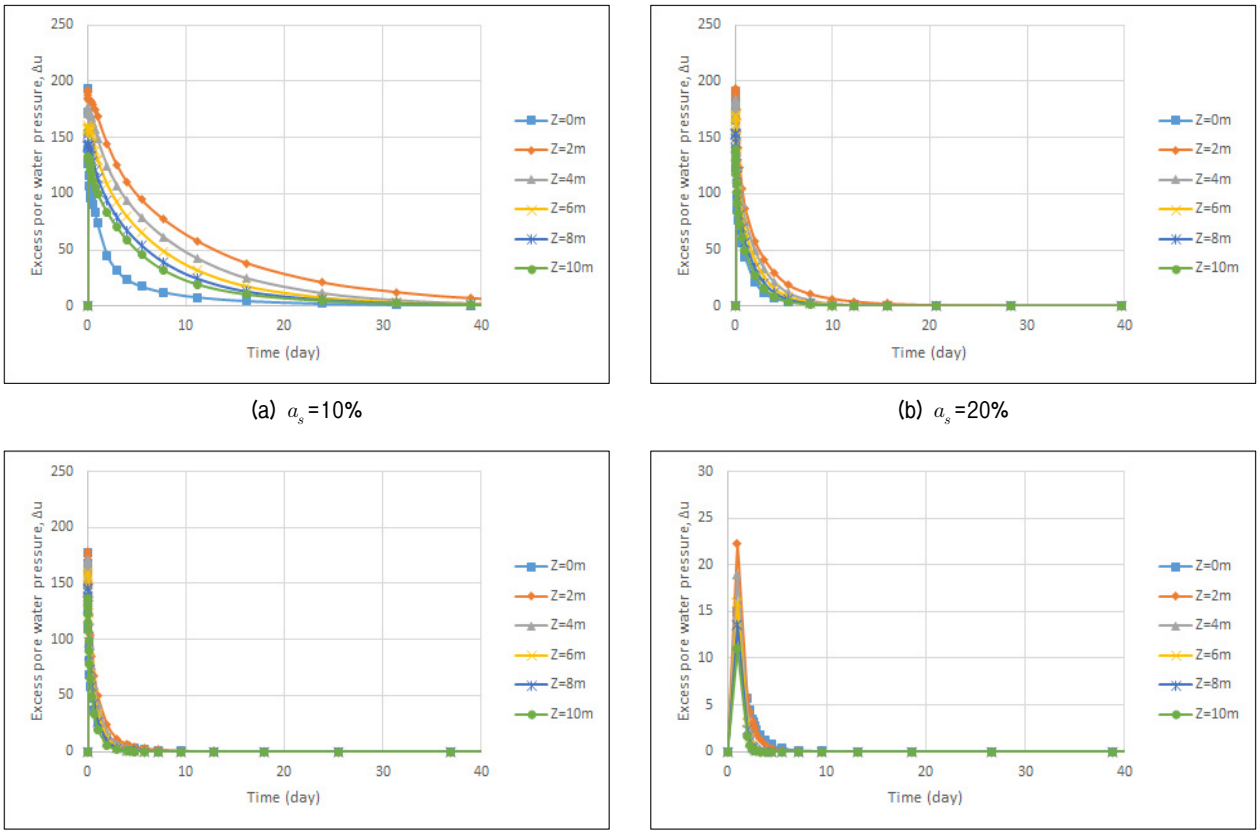
Fig. 4와 같이 GCP 복합지반에 상재하중을 재하하면 전응력이 증가한다. 증가한 전응력에 의해서 복합지반에서는 Fig. 3(a)처럼 과잉간극수압이 생기게 되고, Fig. 3(b)처럼 과잉간극수압은 시간이 지나면서 점차 소산하게 된다.

복합지반에서는 상재하중에 의해서 GCP와 점토지반 모두에서 전응력이 증가하지만, GCP에서는 큰 투수계수로 인하여 과잉간극수압이 거의 발생하지 않고 즉시 유효응력이 증가하게 된다. 점토지반에서는 상재하중이 재하 되면 과잉간극수압이 발생하게 되는데 과잉간극수압은 시간에 지남에 따라 소산하게 되어 Fig. 3(c), (d)처럼 유효응력으로 전이가 발생하게 된다.

3.1.1 시간경과에 따른 과잉간극수압 분석결과

(1) 깊이, 치환율별 시간경과에 따른 과잉간극수압 분석결과

치환율(10%, 20%, 30%, 40%)과 배합비(100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 0:100) 중 대표적으로 치환율에 따른 쇄석과 모래의 배합비 100:0에 대한 결과를 Fig. 5와 같이 나타냈다. 분석결과, 깊이가 0m 부근에서는 지표면까지 배수 거리가 짧기 때문에 과잉간극수압은 가장 작게 나타



(a) a_s=10%　(b) a_s=20%

(c) a_s=30%　(d) a_s=40%

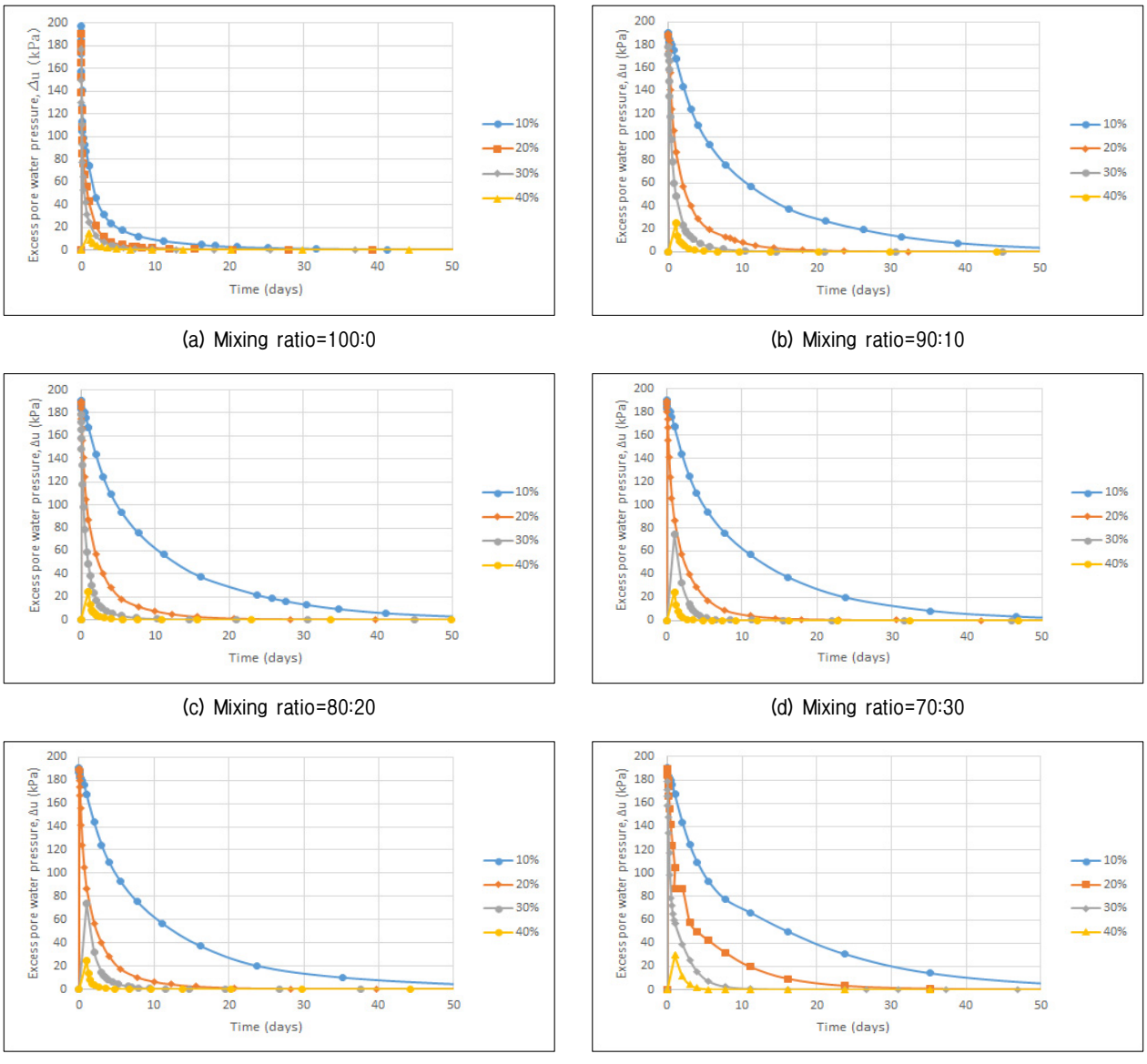
Fig. 5. Time history of the excess pore water pressure with depths of mixing ratio=100:0 for T=101days

나며, 상재하중에 의한 영향이 하부 연약지반의 깊이가 깊어짐에 따라 상재하중에 의한 영향이 감소하기 때문에 2m 부근에서 과잉간극수압이 가장 크게 나타났다가 깊이가 깊어질수록 과잉간극수압은 감소하는 경향을 확인하였다. 또한 배합비 90:10, 80:20, 70:30. 60:40, 0:100에 대한 결과도 Fig. 5와 유사한 경향이 나타남을 확인하였으며, 상재하중 재하 후 치환율이 10%일 경우 30일, 20%일 경우 10일, 30%일 경우 5일, 40%일 경우에는 3일안에 과잉간극수압이 대부분 소산됨을 확인할 수 있다.

(2) 치환율, 배합비별 시간경과에 따른 과잉간극수압 분석결과

Fig. 6은 과잉간극수압이 가장 크게 발생되는 깊이 2m 지점에서의 치환율에 따른 쇄석과 모래의 배합비 100:0에 대한 과잉간극수압 분석결과이다. 분석결과, 치환율이 커질수록 과잉간극수압은 감소하는데 치환율이 10%일 경우에는 과잉간극수압의 크기가 매우 크게 나타났으며, 치환율이 40%일 경우에는 과잉간극수압이 매우 작게 발생하였다.

이는 치환율이 높은 연약지반에서의 과잉간극수압의 배수 거리가 매우 짧아서 전응력이 단시간에 유효응력으로 전이되기 때문이다. 또한 모래의 배합비가 증가할수록 과잉간극수압이 소산되는 기간이 길어짐을 확인할 수 있으며, 배합비 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 0:100에 대한 결과는 유사한 경향이 나타남을 확인하였다.



(a) Mixing ratio=100:0 (b) Mixing ratio=90:10

(c) Mixing ratio=80:20 (d) Mixing ratio=70:30

(e) Mixing ratio=60:40 (f) Mixing ratio=0:100

Fig. 6. Time history of the excess pore water pressure with area replacement ratio

3.1.2 지반정수에 따른 과잉간극수압 분석결과

Fig. 7은 치환율 10%에 대해 과잉간극수압이 가장 크게 작용하는 깊이 2m 지점에서의 내부마찰각, 탄성계수와 투수계수의 변화에 따른 과잉간극수압을 분석하였다. 내부마찰각과 탄성계수는 Table 3의 실내실험결과를 사용하였으며, 투수계수는 모래의 배합비 만큼 투수계수를 낮추어 적용하였다. Table 4는 지반정수에 따른 과잉간극수압을 분석하기 위해 적용한 내부마찰각, 탄성계수와 투수계수를 나타내었다.

Fig. 7(a)는 Table 3의 실내실험결과를 통해 배합비에 따른 투수계수는 자갈지반에 사용되는 86.4m/day를 적용하여 과잉간극수압을 분석한 결과이다. 분석결과, 내부마찰각과 탄성계수의 변화가 지반의 과잉간극수압에 미치는 영향은 미미하였다.

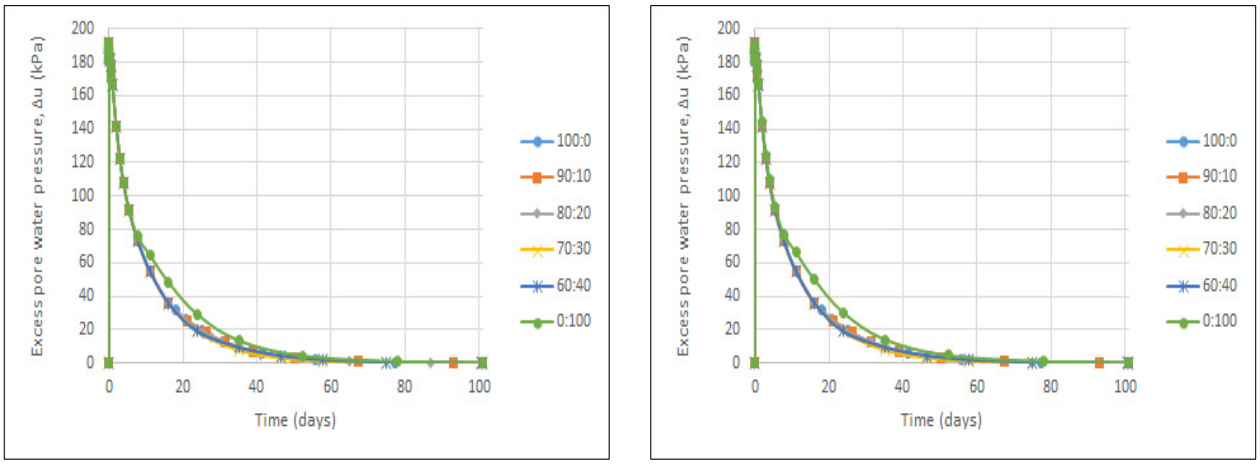
Fig. 7(b)는 실내실험결과를 통해 배합비에 따른 배합비율로 투수계수를 86.4, 77.7, 69.1, 60.5, 51.8, 0.864 m/day로 적용하여 분석한 결과, Fig. 7(a)와 유사하게 과잉간극수압의 변화는 미미하였다.

Chu(2013)의 연구결과에서와 같이 모래의 함유량이 커짐에 따라 통수능이 크게 나타났으나, GCP 복합지반에서는 투수계수가 충분히 크기 때문에 통수능에는 영향을 미치지만 과잉간극수압에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

3.2 GCP 복합지반의 응력분담비 분석

상재하중이 재하 되기 전에 초기 유효응력은 깊이에 따라 증가하다가 상재하중이 재하 되면 연직하중의 증가로 인해 GCP의 상부에서 응력이 증가하게 되고, 과잉간극수압 소산으로 유효응력은 더욱 증가하게 된다.

Fig. 8(a)는 치환율 10%와 쇄석과 모래의 배합비 100:0인 GCP와 점토지반에서 시간에 따라 유효응력을 나타내었다. Fig. 8(b)는 GCP로만 구성된 지반으로 모델링하여 유효응력을 GCP 복합지반과 비교하고자 하였다. 분석결과, Fig. 8(a)에서는 지반의 강성 차이로 인해 GCP의 유효응력이 깊이 2m 구간에서 약 780kPa로 가장 높은 유효응력을 나타내었으며, 주변 점토지반의 유효응력보다 상대적으로 크게 나타났다. Fig. 8(b)에서는 GCP 지반으로만 이루어진 경우에는 깊이 4m 구간에서 약 210kPa의 유효응력을 확인하였다.

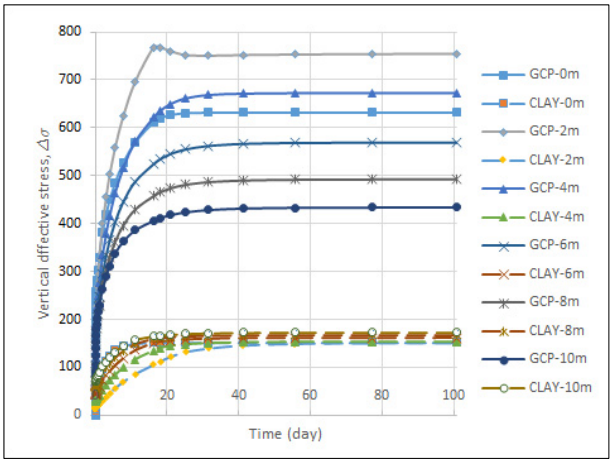


(a) Changing internal friction angle and elastic modulus (b) Changing permeability, internal friction angle and elastic modulus

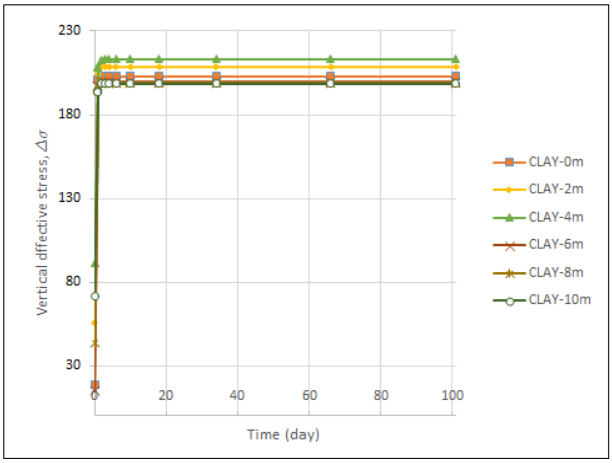
Fig. 7. Time history of the excess pore water pressure with a_s=10%

Table 4. Applied ground constants for numerical analysis

		Mixing ratio					
		100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	0:100
Fig. 6(a)	ϕ (°)	50.90	51.43	52.78	58.29	54.30	39.18
	E (kPa)	23200	24700	26100	26700	28900	13700
	k (m/day)	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4
Fig. 6(b)	ϕ (°)	50.90	51.43	52.78	58.29	54.30	39.18
	E (kPa)	23200	24700	26100	26700	28900	13700
	k (m/day)	86.4	77.7	69.1	60.5	51.8	0.864

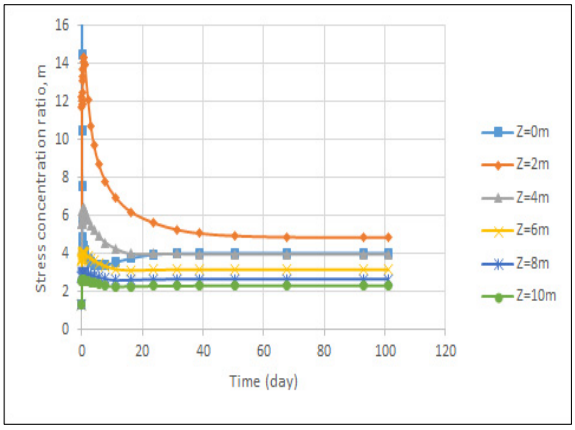


(a) Vertical effective stress for GCP and clay

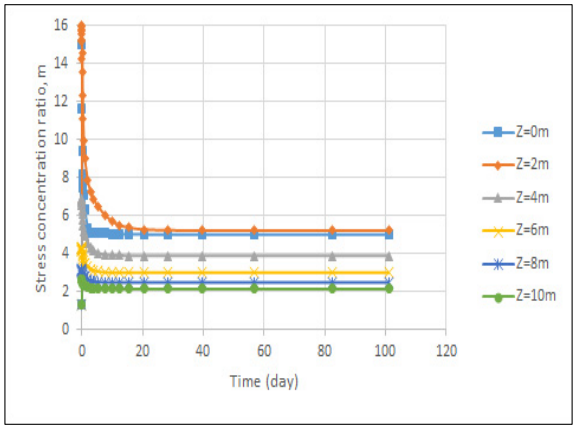


(b) Vertical effective stress for GCP

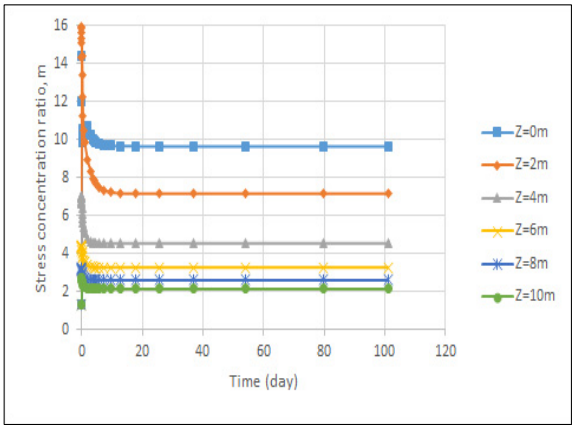
Fig. 8. Time history of the vertical effective stress with a_s=10% and mixing ratio=100:0



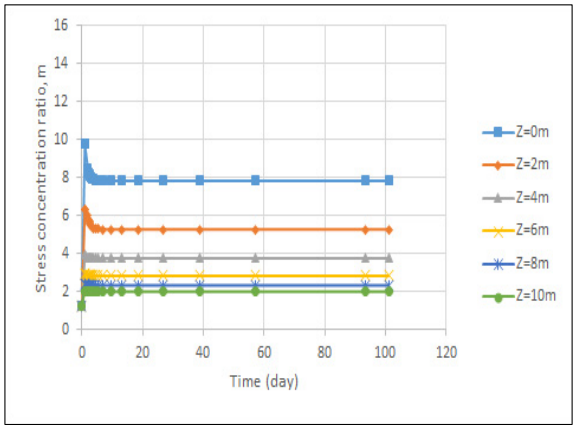
(a) a_s =10%



(b) a_s =20%



(c) a_s =30%



(d) a_s =40%

Fig. 9. Time history of stress concentration ratio with depths and mixing ratio=100:0

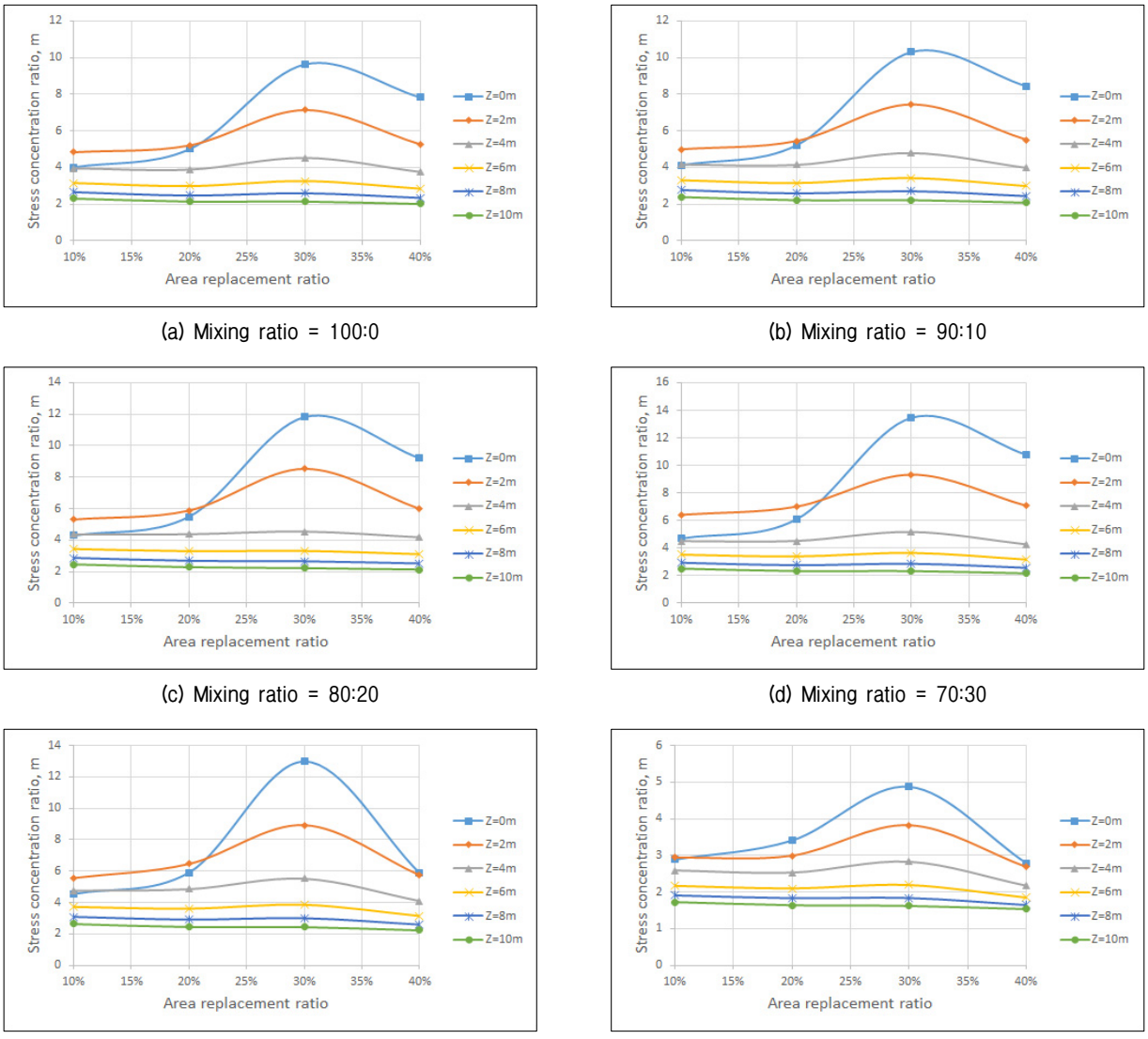
3.2.1 깊이, 치환율별 시간경과에 따른 응력분담비 분석결과

Fig. 9는 대표적으로 쇄석과 모래의 배합비 100:0에서 치환율(10%, 20%, 30%, 40%)에 대하여 깊이 별로 시간경과에 따라 나타내었다. 깊이에 따라 0m, 2m에서 크게 변화하고, 4m이하로는 큰 응력분담비의 차이를 나타내지 않았다. 이는 깊이가 깊어질수록 상재하중의 영향이 감소하기 때문이다.

3.2.2 배합비별 치환율에 따른 응력분담비 분석결과

Fig. 10은 쇄석과 모래의 배합비 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 0:100에 대해 깊이별 101일 동안 압밀시킨 후 치환율에 따른 응력분담비를 나타내었다. 응력분담비는 깊이에 따라 각각 다른 값을 가진다. 배합비 별 치환율에 따른 응력분담비는 치환율이 증가하면서 30%일 때 가장 크게 나타났다가 40%일 때 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 응력분담비에 대한 기존 연구와 비교해 볼 때 Kim(2001), Heo et al.(2006)의 연구결과와 유사한 경향을 보였다.

또한 배합비에서 모래의 함유량이 증가하여 70:30일 때 응력분담비가 가장 크게 나타났다가 이후에 다시 감



(a) Mixing ratio = 100:0

(b) Mixing ratio = 90:10

(c) Mixing ratio = 80:20

(d) Mixing ratio = 70:30

(e) Mixing ratio = 60:40

(f) Mixing ratio = 0:100

Fig. 10. Stress concentration ratio of depths

Table 5. Stress concentration ratio depending on mixing ratio and area replacement ratio with depth

Mixing ratio \ a_s (%)	10%	20%	30%	40%
100:0	2.31~4.83	2.14~5.20	2.13~9.63	2.01~7.83
90:10	2.38~4.99	2.21~5.44	2.27~10.30	2.07~8.43
80:20	2.46~5.31	2.28~5.88	2.22~11.81	2.14~9.20
70:30	2.51~6.42	2.33~7.01	2.33~13.46	2.16~10.76
60:40	2.62~5.55	2.43~6.45	3.00~12.98	2.22~5.87
0:100	1.72~2.93	1.64~3.40	1.62~4.87	1.53~2.78

소하는 경향을 보였다.

배합비와 치환율에 따른 응력분담비 분석 결과, 배합비별 치환율에 따른 응력분담비는 1.53～13.46 범위의 값이 나타났다.

Table 5는 완전히 압밀이 된(101일) 후 수렴한 응력분담비 값을 깊이별 배합비와 치환율에 따라 나타낸 것이다.

4. 결 론

GCP를 타설하여 연약지반을 개량할 때 GCP가 타설된 지반은 GCP와 점토로 된 복합지반을 형성하므로 상재하중에 의해 시간에 따라 과잉간극수압과 응력변화 등이 나타난다. 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 과잉간극수압과 응력분담비를 치환율, 배합비, 깊이에 따라 분석하였다. 분석한 내용은 실제현장 조건을 그대로 구현한 조건이 아니라 수치해석을 위해 가정을 한 것으로 본 연구에서 수치해석 가정 사항과 실제 현장의 일반적인 것은 아니며, 수치해석 수행결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선행연구 분석결과, 일반적으로 현장재하시험을 통해 측정된 응력분담비의 범위는 1.7～3, 실내실험을 통해 얻은 응력분담비의 범위는 2～7.5, 수치해석을 통해 측정된 응력분담비의 범위는 2～6.5에 있다.

(2) 과잉간극수압은 깊이가 0m 부근에서는 지표면까지 배수 거리가 짧기 때문에 과잉간극수압은 가장 작게 나타나며, 깊이가 깊어짐에 따라 상재하중의 영향이 감소하기 때문에 2m 부근에서 과잉간극수압이 가장 크게 나타났다가 깊이가 깊어질수록 과잉간극수압은 감소한다.

(3) 치환율이 높은 연약지반에서의 과잉간극수압은 배수 거리가 매우 짧기 때문에 전응력이 단시간에 유효응력으로 전이되어 치환율이 커질수록 과잉간극수압은 감소하는 경향이 나타났다. 또한 쇄석과 모래의 배합비에 따라 과잉간극수압을 분석한 결과, 배합비는 과잉간극수압에 미치는 영향은 미미하였다.

(4) 배합비 별 치환율이 증가하여 30%일 때까지 증가하였다가 치환율 40%에서는 다시 감소하며, 모래의 함유량이 증가하여 배합비 70:30일 때까지는 증가하였다가 배합비 60:40부터는 다시 감소하는 경향이 나타났다. 또한 배합비별 치환율에 따른 응력분담비는 1.53～13.46 범위의 값이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 기본연구지원사업(NRF-2015R1D1A1A01059122)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Aboshi, H., Yoshikuni, H., and Harada, K. (1970), "K_0-consolidation of Clay with Large Sand Pile", *5th Conference of JSSMFE,* pp. 379-440.
2. Bae, K.T. and Lee, C.K. (2007), "The Behavior of Rammed Aggregate Piers (RAP) in Soft Gmund(1)", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.4, pp.169-183.
3. Busan New Port Corp. (1999), *Report of North Container Terminal*, pp.6.50-6.59.
4. Cho, S.H. (1999), *FEM Analysis of Sand Compaction-Pile-Treated Ground*, Myunggi University, Master Thesis.
5. Chu, I.C. (2013), *A Experimental Study on The Optimum Mixing Ratio of Sand-Mixed Granular Compaction Pile*, Hanyang University, Master Thesis.
6. Choi, H.S. (2009), *Engineering Properties of Compaction Pile Mixed with Crushed Stone and Sand*, Hanyang University, Master Thesis.
7. 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", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.1, pp.109-120.
8. Dassault Systemes (2008), *Abaqus Version 6.12 Documentation.* Providence, RI: Dassault Systemes.
9. Heo, Y., Zheng, Z.D., Lee, C.K., and Ahn, K.G. (2006), "Centrifuge Modeling on Displacement Shapes of Composite Ground Improved by SCP and GCP", *J. of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 7, No.5, pp.57-66.
10. Hong, E.J. (2002), *Analysis of Sand Compaction Piles Under Flexible Surcharge Loadings*, Yonsei University, Master Thesis.
11. Hong, Y.K. (2003), *A Study on Characteristics of Bearing Capacity and Stress Concentration of Clay Ground Improved With Sand Compaction Piles*, Kangwon National University, Ph.D. Thesis.
12. Ichmoto, E. (1981), "Result of Design and Construction of Sand Compaction Pile Method", 36*th JSSMFE Conference* 51-55.
13. Jung, J.B. (1999), *Study on Consolidation Behavior of Clay Ground Improved by Partly Penetrated Sand Compaction Piles*, Hirosima University, Ph. D. Thesis.
14. Jeong, J.W., Lee, S.J., Park, N.W., and Chun, B.S. (2013), "A Numerical Study on the Prevention of Clogging in Granular Compaction Pile", *J. of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.14, No.1, pp.43-51.
15. Kim, T.W. (2001), *Numerical Analysis of The Behavior of Sand Compaction Pile in Clay*, Dankook University, Master Thesis.
16. Kim, J.K. (2003), *Load Transfer Characteristics of Sand Compaction Piles in Soft Ground*, Yonsei University, Ph. D. dissertation.
17. Kim, Y.T., Park, H.I., Lee, H.J., and Kim, S.K. (2004), "Analysis of Stress Transfer Mechanism of Composite Ground Reinforced by SCP under Quaywall", *J. of Korean Geotechnical Society*,

Vol.2004, No.2004, pp.227-234.
18. Kim, J.H. (2009), *(The) Experimental Study on Composite Ground Behavior and Aspect of Clay Gone Through Compaction Pile of Recycled Aggregate Compaction Piles*, Hongik University, Master Thesis.
19. Kim, Y.T. and Ahn, J.H. (2012), "Consolidation Behavior and Stress Concentration Ratio of SCP Composite Ground", *Marine georesources & geotechnology*, Vol.30, No.1, pp.1064-119X.
20. Kim, B.I., Yoo, W.K., Kim, Y.U., and Moon, I.J. (2013), "An Experimental Study on the Behavior of Composite Ground Improved by SCP and GCP with Low Replacement Ratio", *J. of the Korea Academia-Industrial*, Vol.14, No.2, pp.936-942.
21. Lee, K.S. (2000), *Finite-Element Modeling of the Stone Column With Varying Cross Section*, Myunggi University, Master Thesis.
22. Lee, M.H., Choi, Y.G., Im, J.C., and Hawng, G.B. (2003), "A Study on the Stress Concentration of Crushed-stone Compaction Piles through Field Loading Test", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.6, pp.107-114.
23. Lee, M.H. (2004), *A Study on the Load Support Mechanism and Stress Distribution Characteristic of Crushed-Stone Compaction Piles*, Busan University, Master Thesis.
24. Lee, C.H., Lim, H.D., and Lee, W.J. (2005), "Finite Element Analysis of GCP Ground with Replacement Ratio", *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol.2005, No.10, pp.5459-5462.
25. Matsuoka, M., Kiga, S., and Harada, K. (1972), "On Characteristics of Settlement of Ground by Improved Vibro-Compozer Method", *7th JSSMFE Conference*, pp.391-394.
26. Park, Y.W., Kim, B.I., Yoon, G.L., Lee, S.I., Moon, D.J., and Kwon, O.S. (2000), "Behavior Characteristics of a Sand Compaction Pile with Varying Area Replacement Ratio", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.4, pp.117-128.
27. 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", *J. of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.12, No.6, pp.5-15.
28. 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.
29. Shin, H.Y., Han, S.J., Kim, S.S., and Kim, J.K. (2005), "Behavior of Composite Ground Improved by SCP with Low Replacement Ratio", *J. of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.25, No.6C, pp.369-378.
30. Takeda, N. and Nogawa, H. (1982), "Compressibility of Clay-Containing and Compaction Piles", *JSSMFE, Tsuchi-to-Kiso* 30(2), pp.47-54.
31. Yoshikuni, H. (1979), "Design and Construction Management of Vertical Drain Method", *Soils and Found Series*, Gihoudou, Tokyo.
32. Yamaauchi, K. and Hukumoto, K. (1982), "Stress Ratio of a Sand Pile and Cohesive Soil in Composite Ground", 17*th JSSMFE Conference*, pp.391-394.
33. You, S.K. (2003), "Stress Shearing Behavior and its Mechanism during Consolidation Process of Composition Ground Improved by Sand Compaction Piles with Low Replacement Area Ratio", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.5, pp.301-310.

Received : July 19th, 2016
Revised : August 19th, 2016
Accepted : August 25th, 2016