

GCP로 개량된 복합지반의 관통률에 따른 응력분담비

Stress Concentration Ratio According to Penetration Rate of Composite Ground Reinforced with GCP

나승주¹, 김대현^{2*}, 이익효³, 이강일⁴
Seung-Ju Na¹, Daehyeon Kim^{2*}, Ik-Hyo Lee³, Kang-Il Lee⁴

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

²Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, 61452, Republic of Korea

³Member, Professor, Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National Univ., 50, Daehak-ro, Yeosu-si, Jeollanam-do, 59626, Republic of Korea

⁴Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Daejin Univ., 1007, Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 11159, Republic of Korea

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 design is dependent on the area replacement, surcharge pressure, depth and penetration rate. However, a range of stress concentration ratio obtained through field, laboratory experiments and numerical analysis is large. But since the main objective of the study is to evaluate the stress concentration ratio and settlement for both area replacement ratio and penetration rate through numerical analysis. Numerical analysis using the finite element program ABAQUS 6.12-4 has been performed for the composite ground with GCP. As a result, the stress concentration ratio at the points except for the point of top is in the range of 1.21-5.36, 1.19-5.45, 2.16-5.60 for 60%, 80% and 100% penetration, respectively. In general, as the penetration rate and area replacement ratio increases, the stress concentration ratio tends to increase.

요 지

쇄석다짐말뚝(GCP)은 연약지반의 지지력 증가와 침하량 감소를 실현할 수 있어 연약지반 개량에 활발하게 사용되고 있다. 그리고 GCP 설계에 필요한 응력분담비는 치환율, 상재하중, 깊이, 관통률 등에 따라 달라진다. 그동안 많은 연구자들이 현장·실내 실험, 수치해석 연구를 통해 GCP로 개량된 복합지반의 응력분담비를 제안하였지만 명확하게 제시되지 못한 실정이다. 본 연구에서는 GCP공법의 합리적인 설계법 제안을 위한 기초연구로써, 유한요소해석프로그램인 ABAQUS 6.12-4를 이용하여 GCP로 개량된 복합지반을 모델링하여 치환율과 관통률에 따른 침하량과 응력분담비를 분석하고자 하였다. 그 결과, 최상부 지점을 제외한 다른 지점에서의 응력분담비의 값은 관통률 60%일 때 1.21~5.36, 관통률 80%일 때 1.19~5.45, 관통률 100%일 때 2.16~5.60 이었다. 이는 관통률과 치환율이 증가할수록 응력분담비의 값은 크게 증가함을 알 수 있다.

Keywords : GCP method, Stress concentration ratio, Area replacement ratio, Penetration, Settlement

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

쇄석다짐말뚝(GCP) 공법은 1830년대에 프랑스에서 지반개량을 목적으로 개발되었으며, 주로 연약한 점토지반

Received 2 May. 2017, Revised 1 Jun. 2017, Accepted 10 Jun. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-62-456-7860; Fax: +82-62-220-2687

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

또는 느슨한 사질토 지반에도 가능한 공법이다.

GCP 공법은 점토지반에서 원지반과 GCP를 이용하여 치환된 복합지반을 치환율(a_s) 10~40% 가량으로 형성함으로써 지반의 지지력과 전단강도를 증가시켜 측방유동을 억제, 압밀침하 시간단축과 압밀침하량저감 등의 공학적 특성을 개선하고자 사용되고 있다. 또한 GCP 복합지반에서 주변지반이 모래지반인 경우에는 밀도증가, 액상화 방지와 수평지지력 증대를 목적으로 사용하기도 한다.

GCP 공법의 핵심은 지반개량 목표에 부합되는 적절한 치환율을 결정하는데 있으나, 현재의 기술수준은 아직 치환율에 대한 신뢰성 있는 설계지침이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 또한 GCP 설계는 모래다짐말뚝(SCP) 설계법을 그대로 적용하고 있고, 쇄석다짐말뚝과 점토지반의 응력비인 응력분담비(m)를 적용할 때 설계자의 경험에만 의존하기 때문에 시공의 불확실성으로 인한 파괴가 빈번히 발생되고 있다. 파괴 중에서도 말뚝의 선단부가 부풀어 오르는 별징파괴가 빈번히 발생하는데 이를 해결하기 위하여 별징파괴의 발생여부 및 위치에 관한 연구도 진행되고, 별징파괴를 해결하기 위한 지오그리드를 감싼 GCP와 변단면 GCP 등 새로운 공법들이 제시되고 있으나, 명확한 파괴원인과 파괴예방에 대한 대책이 미흡한 실정이다.

일반적으로 GCP 공법은 개량하고자 하는 점토층의 하부지반 전체를 관통하여 지반을 개량하고 있으나, 개량 대상지반의 연약점토층 밑에 존재하는 지지층까지 GCP를 관통시키지 않고 미관통 상태로 지중에 조성하여 모두 미관통으로, 관통과 미관통을 교차로, 부분적으로 미관통으로 타설하는 등 다양한 형식으로 지반을 개량할 수 있다. 그러나 이러한 다양한 형식의 지지층까지 GCP의 타설 심도(관통률)에 대한 연구는 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 GCP 공법의 합리적인 설계법 제안을 위한 기초연구로써, 유한요소해석프로그램인 ABAQUS 6.12-4(Dassault System, 2008)를 이용하여 GCP로 개량된 복합지반을 모델링함으로 치환율, 관통률과 깊이에 따른 압밀침하 거동을 분석 하였으며, 이를 위해 복합지반 모델을 대상으로 관통률과 치환율을 달리하여 수치해석을 실시하였고, GCP와 점토지반의 침하량과 응력분담비 특성변화도 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 다져서 말뚝을 조성하는 진동다짐공법을 개발하는 과정에서 다시 사용되었다.

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

그 후 1980년대 일본에서 SCP 공법을 도입하여 사용하였으나, 모래의 단가 상승으로 인하여 국내에서는 1990년대 이후에는 GCP 공법의 시험시공과 연구가 활발히 진행되었다.

복합지반의 거동분석과 설계를 위해서는 쇄석과 점토의 응력거동특성, 치환율에 대한 응력분담비를 정확히 파악해야 한다. 그러나 GCP 설계 시 연약지반의 강도특성, GCP에 사용되는 재료특성, 현장여건 등을 고려하지 않고, 설계자의 경험과 기존의 현장사례를 참고하여 응력분담비를 적용하고 있기 때문에 예상치 못한 별징파괴와 전단파괴 등이 종종 발생되고 있는 실정이다. 별징파괴 등을 해결하기 위하여 지오그리드를 감싼 GCP, 변단면 GCP 등 새로운 공법들을 제시하고 있으나 아직은 파괴원인 및 파괴예방에 대한 대책이 미흡한 실정이다.

Kang(1998), Park et al.(2000)은 국내 응력분담 및 침하저감 등 복합지반에 관한 기초적인 연구를 수행하였으며, Kim(2003)은 수치해석을 통하여 미관통 SCP의 응력분담비가 1.8~4.0의 범위를 보이는 것으로 제안하였다.

Ju(2004)는 FEM해석을 통하여 관통 SCP지반과 가장 유사한 설계가 치환율 30%에서 관통율 75%인 경우라고 주장하였으며, Shin(2005)는 저치환율 복합지반에 대한 연구를 통하여 치환율에 따른 응력집중 효과와 응력전달 메카니즘에 대해 검토하였다.

Kolekar(2011)은 PLAXIS를 사용하여 GCP 복합지반에서 관통률(55, 61, 67, 78, 89, 100%)에 따른 GCP 거동을 확립하고자 하였다. 연구결과, GCP 복합지반 크기의 1.75배 되는 길이의 미관통된 말뚝 사용은 완전히 관통된 GCP의 경우와 같은 거동을 보였으며, 관통률 60% 이상에서는 침하량이 거의 비슷하게 나타났다. 따라서 연약지반을 개량함에 있어 부분으로 관통된 GCP를 사용하여 쇄석을 절감할 수 있다고 판단하였다.

Jeong et al.(2012)는 부분적, 전체적으로 관통된 SCP에 의해 개량된 복합지반의 파괴거동을 규명하고 관통률과 치환율의 효과를 비교하기 위해 원심모형실험을 수행하였다. 실험결과, 전체 관통된 복합지반의 침하 감소비는 부

분 관통된 복합지반의 침하감소비보다 더 크게 나타났으며, 표층변위는 관통률의 증가에 따라 감소하였다.

Lee et al.(2012)는 저치환율의 경우 압밀도에 따라 관통률이 다른 복합지반의 압밀침하 거동을 수치해석으로 비교하여 미관통된 SCP복합지반의 침하특성은 압밀도가 감소하고 관통률이 감소할수록 상부점토지반의 침하량이 많이 증가하였고, 미관통된 SCP 하단부에서는 응력집중 효과가 발휘되지 않았고 응력분담비는 압밀도에 관계없이 일정한 경향이 보였다.

Mohamed(2016)은 PLAXIS 3D를 GCP로 개량된 연약지반에서 말뚝간 거리, 말뚝직경, 말뚝길이를 변화시키며 말뚝의 거동을 수치적으로 분석하고자 하였다. 또한 지지력, 침하제어, 말뚝의 휨모멘트에 미치는 요인의 영향을 분석하고자하였다. 연구결과, 지지력 및 침하량을 위한 개선은 치환율 증가, 말뚝길이 증가 및 말뚝간격 비율의 감소에 따라 증가하며, 말뚝길이 비가 0.75의 말뚝을 이용하는 것이 연약지반 개선 성능과 경제성 측면에서 경제적이다 판단하였다.

Goughnour and Bayuk(1979)는 단일 조립토 다짐말뚝에 등가원주(Unit-cell)의 개념을 적용하여 해석을 수행하였고, 그 결과를 이용하여 조립토 다짐말뚝과 연약점토지반의 강성차이에 의한 응력분담비를 제안하였다.

Bae and Lee(2007)는 현장재하시험과 수치해석연구를 수행하였으며, 자유변형률로 인하여 말뚝에서 침하는 감소하고 지반의 침하는 증가하고, 일반적으로 응력분담비 값은 3.1~7.5의 값을 나타냈다. 또한 치환율, 형상비, 상대밀도 증가에 따라 응력분담비가 증가하였으나, 일정한 지점에서는 수렴하고, 고치환율(일반적으로 치환율 50% 이상)이나 긴 말뚝에서는 상재하중의 증가에 따라 응력분담비가 영향을 받았다.

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 나타냈으며, 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)와 Song et al.(2011)은 조립질 다짐말뚝으로

개량된 점토지반의 응력변화와 응력분담비의 변화를 파악하기 위해 말뚝의 재료(쇄석, 모래)와 하중재하조건, 치환율을 변화시켜가며 실내실험을 수행하였다. 실험결과, 동일한 치환율에서는 점토지반의 연직응력은 유사하게 나타났으나, 말뚝 상부에서의 연직응력은 GCP로 개량한 경우가 SCP로 개량한 경우보다 크게 나타났으며, GCP의 응력분담비의 범위는 치환율에 따라 4.4~7.5로 나타났다.

선행연구 분석결과, GCP 설치에 의한 영향분석, 즉 말뚝의 관통률에 대한 실험적 연구가 매우 부족한 상황이며, 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)와 도로설계요령(2009)에서는 응력분담비를 3으로 권고하고 있어 일반적으로 3을 적용한다.

이처럼 쇄석다짐말뚝공법에 대한 많은 연구가 지속적으로 연구되고 있지만, 미관통된 쇄석다짐말뚝에 대한 연구는 미흡한 실정으로 이 공법에 의한 개량효과 및 역학적 거동은 아직 상세하게 명시되어있지 않고, 기술자의 경험적인 예측에 의존하고 있다. 하지만, 본 기술의 적용 이유는 시공기계의 시공심도 제약성과 경제성, 다짐말뚝으로 지하수의 유입을 방지하기 위하여 적용하고 있다, 또한 현장실험, 실내실험과 수치해석 연구를 통해 제시된 응력분담비의 범위는 연구자에 따라 상이하다. 상재하중이 증가할수록 응력분담비가 증가하는 경우, 일정하게 유지되는 경우, 감소하는 경우, 증가했다가 감소하는 경우 등 치환율, 관통률, 상재하중과 깊이 등에 따른 응력분담비가 각각 다른 경향이 나타났다.

2. GCP 공법의 기본설계개념 및 관통률에 따른 GCP 공법

2.1 등가원주(Unit Cell)개념

GCP 공법은 지반의 지지력 증가, 침하량감소, 압밀축진과 지반의 액상화방지 등의 연약지반 보강을 목적으로 사용되며, GCP 복합지반에 등분포 상재하중이 재하되면 복합지반 내 GCP에 의한 영향면적을 등가원주로 고려하여 복합지반 전체에 대한 해석이 이루어져야 한다.

등가원주 주변의 전단응력은 0이며, 등가원주는 GCP 주위에 대칭으로 위치하여 마찰이 없는 강성 외벽을 가진

원주모양으로 모형화할 수 있다.

등가원주개념의 기본적인 가정사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 연약지반과 말뚝은 함께 침하한다는 가정
- (2) 원주의 윤변에서 수평변위는 구속되며, 연직변위만 발생한다는 가정
- (3) 원주의 저면은 강성지반에 정착되어 있어야 한다는 가정

정삼각형과 정사각형 배열로 설치된 GCP에서 영향이 미치는 주변지반의 범위는 규칙적인 육각형과 등가원의 형태로 나타낼 수 있다.

GCP 등가원의 유효직경은 다음 식 (1), 식 (2)로 나타낼 수 있다.

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

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

여기서, s : GCP의 간격이다.

2.2 치환율과 응력분담비

GCP 공법으로 개량한 복합지반은 Fig. 1과 같이 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 응력분담비(Stress concentration Ratio, m)라고 하며, 식 (4)와 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 응력이다.

2.3 관통률에 따른 GCP 공법

미관통 GCP 공법은 연약점성토 지반에 시공할 때 기술적·경제적 제약 등의 이유로 인해 개량 대상지반인 연약점토층 밑에 존재하는 지지층까지 GCP를 관통시키지 않고 관통되지 않은 상태 그대로 GCP를 지반 중간에 조성하는 공법이며, 미관통 GCP를 조성하는 방법은 다양하다. 예를 들어, Fig. 2와 같이 모든 지반을 미관통 GCP로 조성하는 경우, 관통 GCP와 미관통 GCP를 교차하면서 타설하는 경우, 미관통 GCP를 부분적으로 타설하는 경우 등이 있다.

3. 지중응력을 고려한 GCP 복합지반 분석을 위한 수치해석 조건

3.1 수치해석 조건

ABAQUS를 사용하여 Fig. 3과 같이 단일말뚝 GCP로

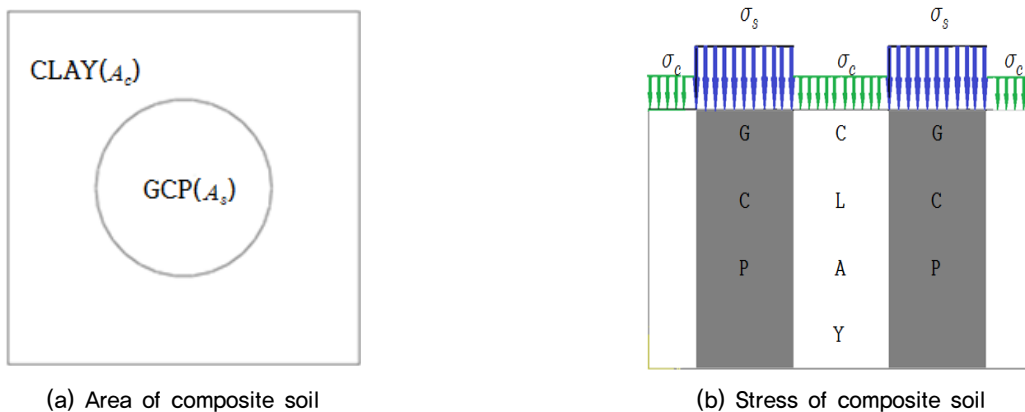


Fig. 1. Composite soil with GCP (Na et al, 2016)

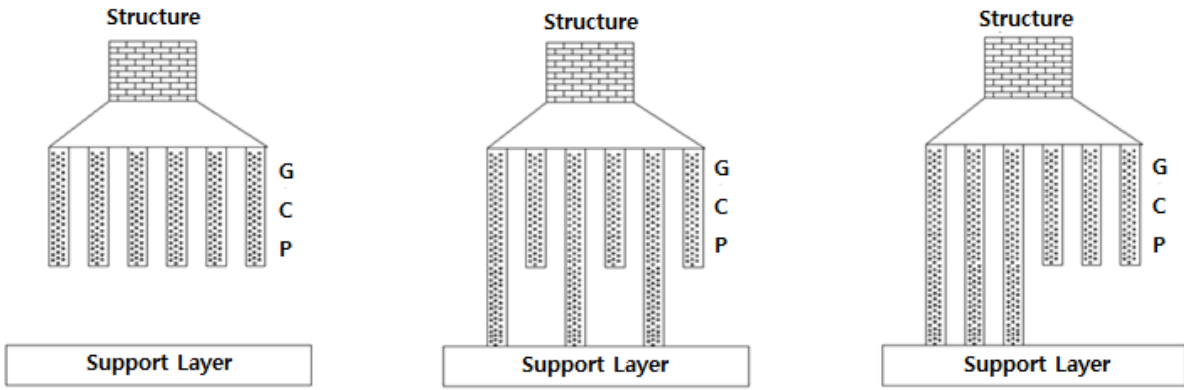
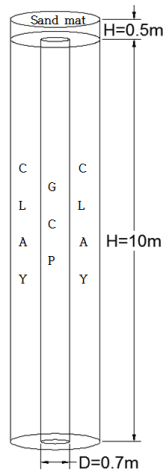
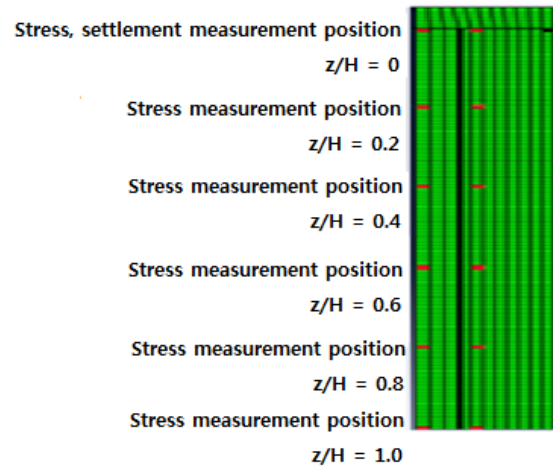


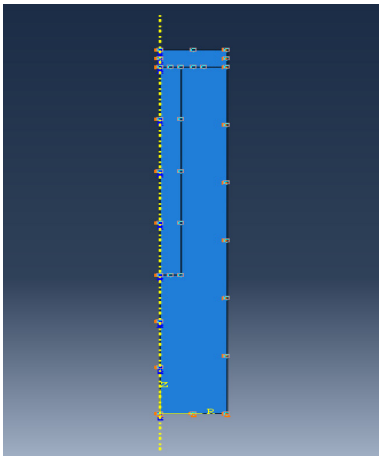
Fig. 2. Example of application with partly penetrated GCP method



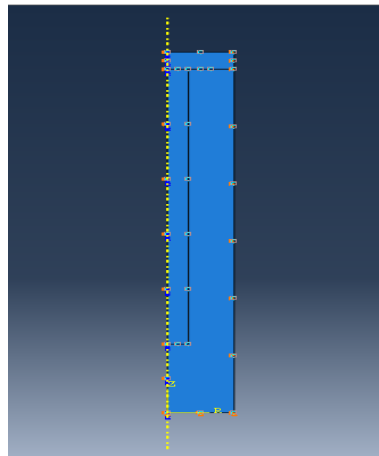
(a) GCP composite modeling



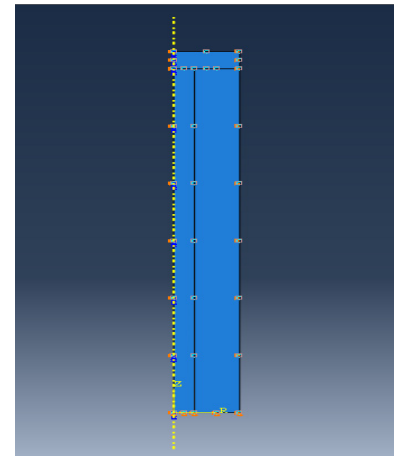
(b) Axisymmetric finite element mesh



(c) Penetration rate=60%



(d) Penetration rate=80%



(e) Penetration rate=100%

Fig. 3. The modeling for the numerical analysis

개량된 복합지반을 치환율(10, 20, 30, 40%)에 대해 GCP의 말뚝 직경을 0.7m로 고정하고 지반의 크기를 치환율 맞게 변화시켰다. Fig. 3(a)와 같이 샌드매트 높이는 0.5m, 지반의 높이는 10m로 하였으며, Fig. 3(b)는 GCP 복합지

반 분석을 위해 측정 위치들을 나타낸 것으로, 본 연구에서는 깊이/전체길이(z/H)로 표시하였다. 또한 Fig. 3(c), (d), (e)과 같이 GCP를 지반의 높이에 대해 관통률(60, 80, 100%)로 모델링하였다.

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

GCP 말뚝 직경을 고정하고 지반의 크기를 변화시킨 이 유는 현장에서 다짐말뚝의 직경을 달리하여 치환율을 변화시키는 것은 시공 여건상 힘들기 때문에 말뚝직경을 0.7m로 고정하고, 지반의 크기를 달리하여 치환율을 변화시켰다. 치환율이 40% 이상으로는 현장 여건상 치환하기 어렵기 때문에 40%까지 분석하였다.

관통률에 따른 GCP 복합지반은 축대칭 유한요소망을 사용하였으며, 복합지반의 측면은 X방향의 변위를 구속하고, 지반의 저면은 X, Y방향의 변위를 구속하였다.

GCP, 점토지반과 샌드매트 사이의 인터페이스 조건은 각각의 경계면에 대해서 Tie조건으로, 초기간극수압은 0으로, 지하수위는 샌드매트 상부까지 존재, 복합지반은 지중응력을 고려하여 적용하였다.

상재하중은 성토되는 것을 가정하기 위해 3단계로 10일 동안 등분포하중 50kPa를 적용하였으며, 후에 200일 동안의 방치기간을 적용하여 점토지반의 과잉간극수압이 완전히 소산되게 하였다. 지반과 같이 비선형 응력-변형 거동을 나타내는 재료에 대한 유한요소해석에서 가장 중요한 요소는 해석에 적합한 구성모델 선택과 이에 따른 매개변수 결정이다. 본 연구에서는 점토지반의 거동을 잘 나타낼 수 있는 수정된 Cam-Clay 탄·소성모델, GCP는 Mohr-Coulomb 탄·소성모델, 샌드매트는 탄성거동을 하는 것으로 가정하여 분석하였다.

Table 1은 본 연구를 위해 분석한 케이스들이다.

3.2 수치해석에 사용된 설계정수

본 연구에서 사용된 설계정수는 Table 2와 같이 부산신항의 SCP 복합지반 설계 시 적용된 값(Busan New Port Corp., 1999)을 참조하여 사용하였다.

쇄석입경이 25~45mm의 시료를 대상으로 다짐을 실시한 후 대형직접전단시험을 실시하였으며, 대형직접전단시험 종류로 급속시험과 완속시험 중 전응력 해석이라고도 하며, 압밀효과에 따른 지반의 강도증가 계산에 적용되는 급속시험을 적용하였다. 따라서 대형직접전단시험을 통하여 구한 지반의 강도정수인 탄성계수, 내부마찰각과 점착력을 수치해석에 적용하여 분석하였다.

4. 지중응력을 고려한 관통된 GCP 복합지반의 분석

4.1 관통률에 따른 GCP 복합지반의 과잉간극수압 및 침하량 분석결과

GCP 복합지반에 성토하중을 재하하면 전응력이 증가한다. 증가한 전응력에 의해서 복합지반에서는 과잉간극수압이 발생하게 되고, 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 재하되면 과잉간극수압이 발생하게 되는데 과잉간극수압은 시간이 지나면서 소산하게 되어 유효응력으로 전이가 발생하게 된다.

Table 1. Cases studied

	Area replacement ratio (%)	Embank stage	Penetration rate (%)
GCP composite	10	1 stage	60
		2 stage	80
		3 stage	100
	20	1 stage	60
		2 stage	80
		3 stage	100
	30	1 stage	60
		2 stage	80
		3 stage	100
	40	1 stage	60
		2 stage	80
		3 stage	100

Table 2. Properties of materials

Material	Model	Parameter	Value
Clay	Modified Cam-Clay Model	κ	0,04
		λ	0,265
		e	1,6
		M	1,02
		ν	0,2
		γ (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	0,1
		ϕ	50,9
		γ (kN/m ³)	19
		k_x (m/day)	86,4
Sand mat	Elastic	k_y (m/day)	86,4
		E (kPa)	14000
		ν	0,2
		γ (kN/m ³)	20
		k_x (m/day)	0,864
		k_y (m/day)	0,864

Fig. 4는 깊이별 성토단계에 따른 과잉간극수압을 (a)는 관통률 60%, (b)는 관통률 80%, (c)는 관통률 100%에 대해 분석한 그림이다. Fig. 4(a), (b), (c)에서와 같이 관통률이 증가함에 따라 깊이별 과잉간극수압이 점점 감소하는 경향을 보였으며, Fig. 4(b), (c)의 성토1단계에서 (-)의 과잉간극수압이 발생하는데, 이는 복합지반의 하부지반에 작용한 지중응력 영향이 재하 한 성토하중보다 커서 발생한 것으로 판단된다.

침하량 분석에 있어 침하해석 지점은 Fig. 3(b)에서 표시한 것과 같이 GCP와 점토지반 상부지점의 침하량이며, Fig. 5는 (a) 성토단계, (b) 치환율과 (c) 관통률에 따른 침하량을 나타낸 것이다. 관통률과 치환율이 증가할수록 침하량이 선형적으로 감소하지만 GCP의 침하량은 큰 차이가 없었다. 이러한 연구경향은 관통률에 따른 침하량의 기존 연구와 비교해 볼 때 Kolekar(2011)의 연구결과와 유사한 경향을 보였다. 이처럼 관통률이 증가할수록 침하량이 감소하는 이유는 GCP 복합지반의 치환율과 관통률이 증가함에 따라 달라지는 응력분담비와 관통되지 않은 점토지반의 하부침하량의 차이 때문인 것으로 판단된다.

Table 3은 GCP로 개량된 점토지반의 침하량을 치환율 40%, 관통률 100%인 경우를 기준으로 상대침하율로 나타낸 것이다. 예를 들어 (치환율40%, 관통률80%의 침하량 - 치환율40%, 관통률100%의 침하량) / (치환율40%, 관통률100%의 침하량) × 100% = (443.3 - 22.59) / (22.59) × 100%

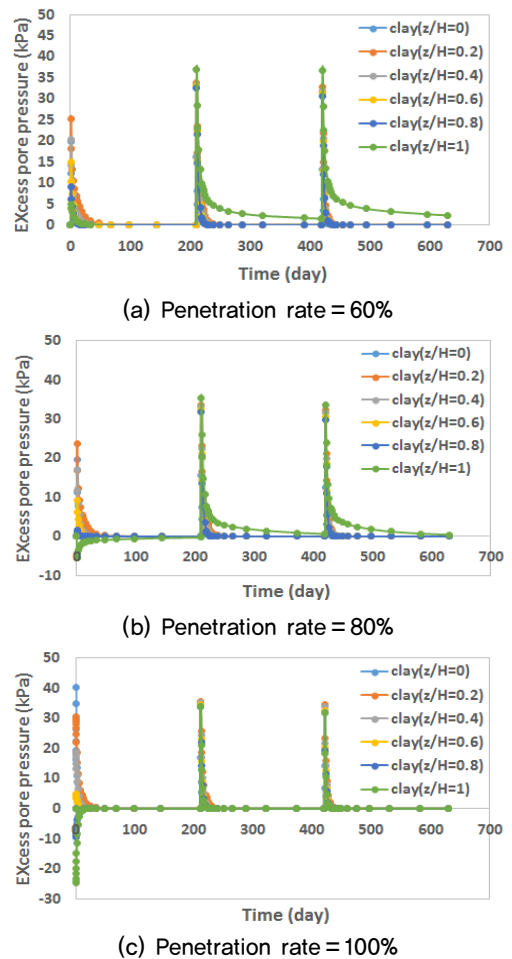
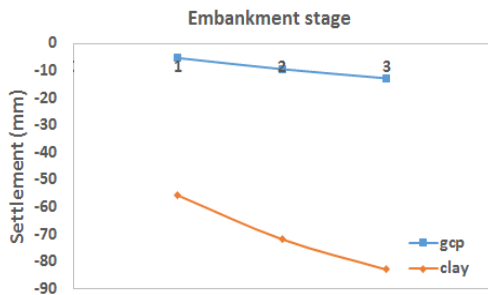
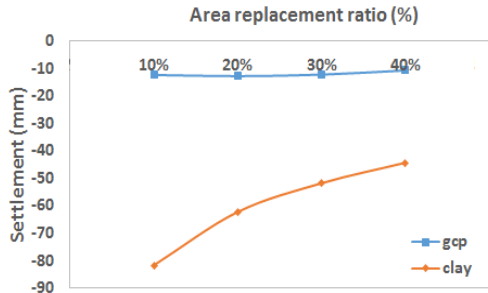


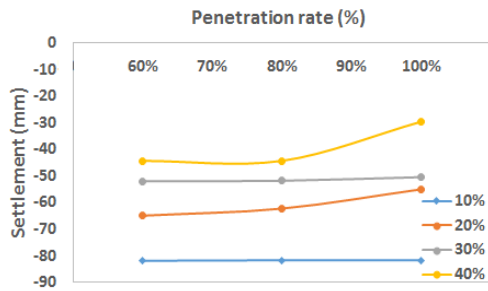
Fig. 4. Time history of the excess pore water pressure with depths and $a_s = 20\%$



(a) Embankment stage



(b) Area replacement ratio



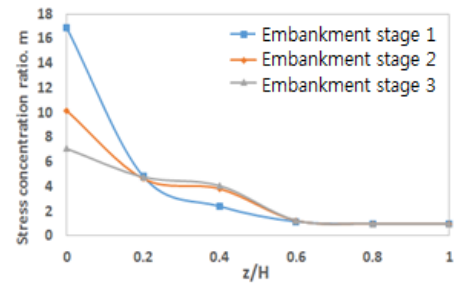
(c) Penetration rate

Fig. 5. Settlement with embankment stage, area replacement ratio and penetration rate

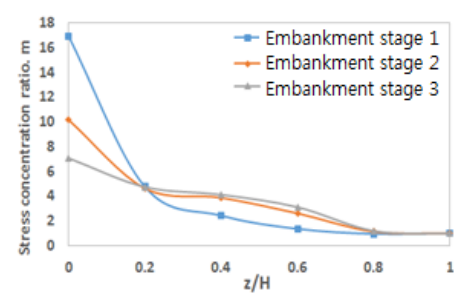
= 49%로 나타났으며, 나머지도 이와 같이 구했다. 표에서도 전반적으로 치환율과 관통률이 증가함에 따라 침하량이 감소함을 볼 수 있으며, 관통률 보다는 치환율에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4.2 관통률에 따른 GCP 복합지반의 응력분담비 분석

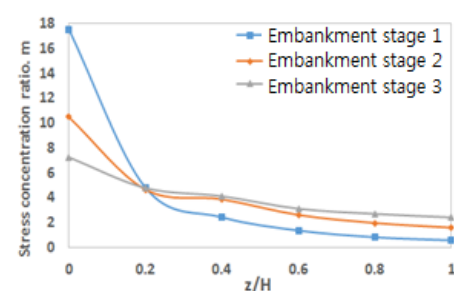
성토하중이 재하되기 전에 초기 유효응력은 성토하중



(a) Penetration rate = 60%



(b) Penetration rate = 80%



(c) Penetration rate = 100%

Fig. 6. Stress concentration ratio of depths with embankment stage, penetration rate and $\alpha_s = 30\%$

이 재하되면 깊이가 깊어질수록 연직하중의 증가로 인해 GCP의 상부에서 응력이 증가하게 되고, 과잉간극수압 소산으로 인해 유효응력은 증가하게 된다.

4.2.1 성토하중에 따른 응력분담비 분석결과

Fig. 6(a), (b), (c)는 치환율 30% 경우, 관통률 60, 80, 100%에 대해서 성토단계별 깊이에 따른 응력분담비를 분석한 그림이다. 성토 1단계에서는 지반 상부의 응력분담

Table 3. Relative settlement rate of GCP composite ground

Area replacement ratio (%)	Relative settlement rate (%)		
	Penetration rate=60%	Penetration rate=80%	Penetration rate=100%
10	176	175	175
20	119	110	85
30	75	75	70
40	49	49	0

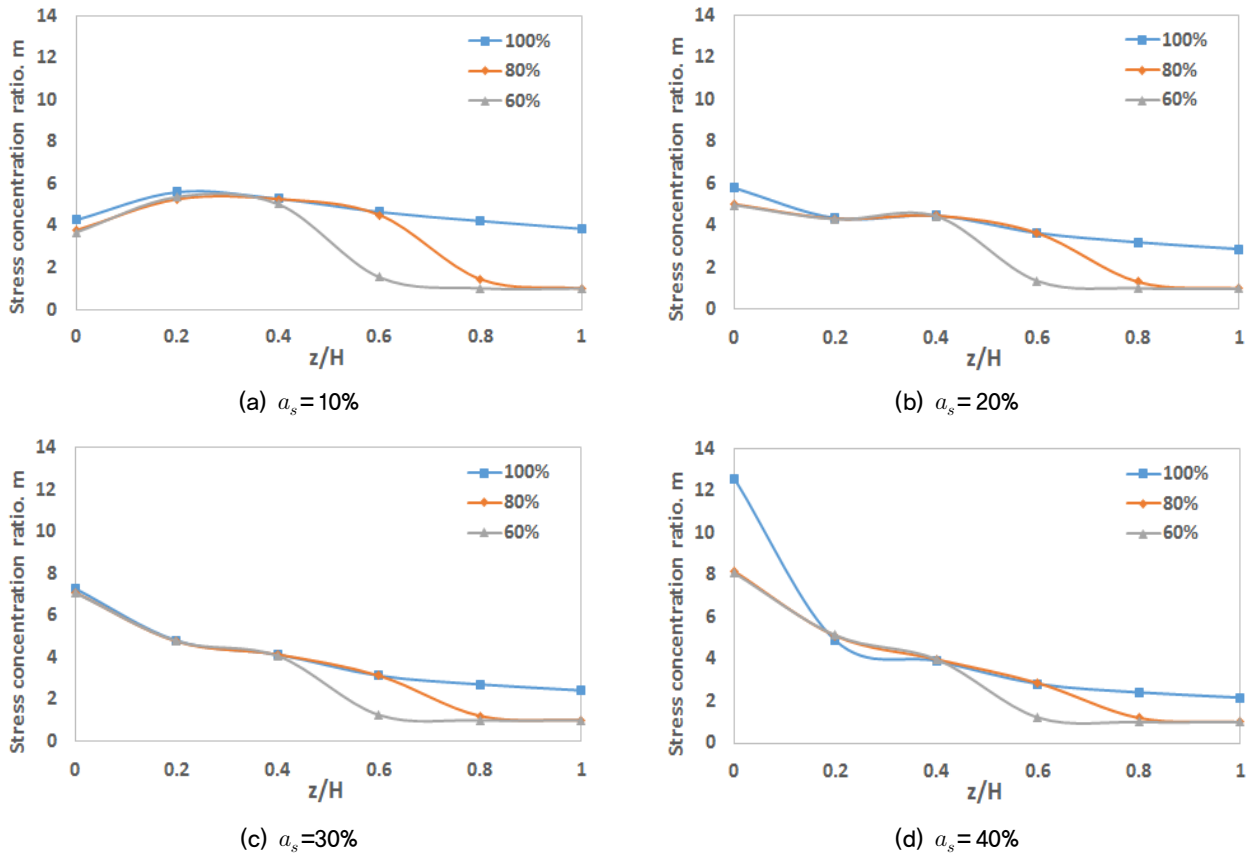


Fig. 7. Stress concentration ratio of depths with penetration rate and embankment 3 stage

비가 크게 나타나고, 지반 하부의 응력분담비는 적게 나타났다가 성토단계가 진행될수록 전 단계에 비해 지반 상부의 응력분담비는 감소, 지반 하부의 응력분담비는 약간 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 6(b), (c)에서 z/H 가 0.6~0.8, 0.8~1인 구간에서는 미관통으로 인해 측정지점이 같은 연약지반으로 인해 응력분담비가 약 1로 분석되었다.

4.2.2 치환율별 관통률에 따른 응력분담비 분석결과

Fig. 7은 성토단계 3단계에서의 치환율과 관통률별 깊이 따른 응력분담비를 분석한 그림이다.

Fig. 7(a),(b),(c),(d)와 같이 응력분담비가 지반 상부에서는 치환율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였지만 지반 하부에서는 감소하는 경향을 보였다. 또한 치환율이 10%일 경우에는 깊이가 깊어질수록 응력분담비가 증가했다 감소하였지만, 치환율 20, 30, 40%인 경우에는 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향으로만 나타났다.

도로설계편람(국토해양부, 2012), 도로설계요령(한국도로공사, 2009)에 의하면 응력분담비를 3을 권고하고 있고,

Lee et al.(2005)는 재하하중 단계별 응력분담을 분석하기 위해 수치해석 하여 응력분담비를 3.6~3.85의 범위에 있는 것으로 연구된 바 있으며, Kim (2009)와 Song et al.(2011)은 하중재하조건, 치환율을 변화시켜가며 복합지반의 응력분담비를 분석하기 위해 실내시험을 수행하여 치환율에 따라 응력분담비가 4.4~7.5의 범위에 있는 것으로 연구되었다. 본 연구에서도 다소 차이는 있지만 이러한 연구결과와 유사한 거동을 보였으며, 전반적으로 관통률과 치환율이 클수록 응력분담비가 크게 발생되었다.

Table 4는 치환율, 관통률, 깊이별 응력분담비를 나타낸 것이다. $z/H=0$ 인 지점에서는 성토하중의 영향을 바로 받아 응력분담비의 값이 크게 나타났으나, 이외의 지점에서는 응력분담 값이 관통률 100%일 때 2.16~5.60 범위의 값, 관통률 80%일 때 1.19~5.45 범위의 값, 관통률 60%일 때 1.21~5.36 범위의 값이 분석되었으며, 전반적으로 관통률과 치환율이 높은 GCP 복합지반일수록 응력분담비가 크게 나타났다. 또한 수치해석결과, 응력분담비는 관통률보다 치환율에 더 영향을 많이 받는 것으로 분석되었다.

Table 4. Stress concentration ratio with z/H, area replacement ratio and penetration rate

Depth (z/H)	a_s (%)	Penetration rate (%)		
		100	80	60
0	10	4.27	3.78	3.68
	20	5.79	5.01	4.97
	30	7.27	7.08	7.07
	40	12.56	8.16	8.08
0.2	10	5.60	5.45	5.36
	20	4.35	4.32	4.30
	30	4.80	4.76	4.76
	40	5.12	5.11	5.11
0.4	10	5.28	5.27	5.02
	20	4.46	4.46	4.43
	30	4.13	4.13	4.06
	40	3.98	3.97	3.97
0.6	10	4.64	4.50	1.53
	20	3.64	3.63	1.36
	30	3.12	3.12	1.24
	40	2.84	2.84	1.21
0.8	10	4.22	1.43	1
	20	3.20	1.31	1
	30	2.71	1.20	1
	40	2.41	1.19	1
1	10	3.85	1	1
	20	2.88	1	1
	30	2.42	1	1
	40	2.16	1	1

5. 결론

GCP를 타설하여 연약지반을 개량할 때 GCP가 타설된 지반은 GCP와 점토로 된 복합지반을 형성하므로 상재하중에 의해 시간에 따라 과잉간극수압과 응력변화 등이 나타나면서 치환율과 관통률에 따라 침하량과 응력분담비에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 침하량과 응력분담비를 치환율, 관통률, 깊이에 따라 분석하였다. 분석한 내용은 실제 현장 조건을 그대로 구현한 조건이 아니라 수치해석을 위해 가정한 것으로 본 연구에서 수치해석 가정 사항과 실제 현장의 일반적인 것은 아니며, 수치해석 수행결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 침하량은 관통률 및 치환율이 증가할수록 침하량은 선형적으로 감소하고 있다. 이는 GCP 복합지반의 응력분담비 및 관통되지 않은 점토지반의 하부 침하량

의 차이, 점토지반과 GCP에 작용하는 응력분담비가 관통률 및 치환율이 증가함에 따라 달라지기 때문이라고 판단된다.

- (2) 성토 1단계에서 지반 상부에서는 응력분담비가 크게 나타나고, 지반 하부에서의 응력분담비는 작게 나타났다. 성토단계가 진행됨에 따라 전 단계에 비해 지반 상부의 응력분담비는 감소하고, 지반 하부의 응력분담비는 약간 증가하는 경향을 보였다.
- (3) z/H=0인 지점에서는 성토하중의 영향을 바로 받아 응력분담비의 값이 크게 나타났지만, 이외의 지점에서는 응력분담의 값이 관통률 100%일 때 2.16~5.60 범위의 값, 관통률 80%일 때 1.19~5.45 범위의 값, 관통률 60%일 때 1.21~5.36 범위의 값이 분석되었으며, 전반적으로 관통률과 치환율이 클수록 응력분담비가 크게 발생하였다. 또한 응력분담비는 관통률보다 치환율에 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였다.
- (4) 본 연구에서는 한가지 지반의 경우에 대해서만 분석

하여 응력분담비가 관통률 보다 치환율에 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였으나, 다양한 지반강도에 대하여 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 GCP 공법의 합리적인 설계법 제안을 위한 기초연구로써, 수치해석 프로그램을 이용하여 GCP로 개량된 복합지반을 모델링하여 치환율과 관통률에 대해 분석하였다. 향후에 다양한 지반조건의 경우에 대해서 추가적인 수치해석과 모형시험을 통해 비교·분석하는 연구가 진행된다면 합리적인 설계법에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

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. Bae, K.T. and Lee, C.K. (2007), "The Behavior of Rammed Aggregate Piers (RAP) in Soft Ground (1)", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.4, pp.169-183.
2. Busan New Port Corp. (1999), *Report of North Container Terminal*, pp.6.50-6.59.
3. Dassault Systemes. (2008), *Abaqus Version 6.12 Documentation*. Providence, RI: Dassault Systemes.
4. Goughnour, R.R. and Bayuk, A. A.(1979), "Analysis of stone column-soil matrix interaction under vertical load", *Colloque International sur le reinforcement des sols*, Paris, France, Vol.1, pp.271-277.
5. Jeong, G. C., Heo, Y., and Bae, W. S. (2012), Behavior of Soft Ground Improved with Fully-Partly Penetrated Sand Compaction Piles, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.13, No.9, pp.91-99.
6. Ju, K. W. (2004), *Consolidation Analysis of Soils Improved by Partly Penetrated SCP with Low Replacement Ratio*, Master's Thesis, University of Daejin, pp.1-95.
7. Kang, J. G. (1998), *Study on the Determination Methods of the Stress Concentration Ratio in SCP Method*, Master's Thesis, University of Myungji, pp.1-57.
8. 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.
9. Kim, Y. N. (2003), *Study on the Consolidation Behavior of Cohesive Soils Improved by Penetrated and Partly Penetrated Sand Compaction Piles*, Master's Thesis, University of Suwon, pp.1-109.
10. Kolekar, Y. A. and Murty, D. (2011), Numerical Simulation of Behavior of Partially Penetration Stone Columns, *Pan-Am CGS Geotechnical*, pp.107-112.
11. 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.
12. Lee, K. I., Lee, J. W., Im, E. S., and Ju, K. W. (2012), Consolidation Analysis of Soils Improved by Partly Penetrated SCP with Degree of Consolidation and Replacement Ratio, *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.11, No.2, pp.11-20.
13. Lee, M. H., Choi, Y. G., Im, J. C., and Hwang, G. B. (2003), "A Study on the Stress Concentration of Crushed-stone Compaction Piles through Field Loading Test", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.6, pp.107-114.
14. Lee, M. H. (2004), *A Study on the Load Support Mechanism and Stress Distribution Characteristic of Crushed-Stone Compaction Piles*, Busan University, Master Thesis.
15. 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.
16. 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 the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.9, pp.37-50.
17. Park, Y. W., Yoon, G. L., Moon, D. J., Kim, B. I., Lee, S. I., and Kwon, O. S. (2000), Behavior characteristics of Sand Compaction Pile with Varying Area Replacement Ratio, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.4, pp.117-128.
18. Shin, H. Y. (2005), *Analysis on the Behavior of Composite Ground Reinforced by Sand Compaction Pile with Low Area Replacement Ratio*, Ph. D Dissertation, University of Chungang, pp.1-241.
19. Song, M. G., Bae, W. S., Ahn, S. R., and Heo, Y. (2011), "Centrifugal Model Test on Stress Concentration Behaviors of Composite Ground under Flexible/Stiff Surcharge Loadings", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.12, No. 6, pp.5-15.
20. The Korea Expressway Corporation. (2009), *Road Design Procedure*, Part 2 Earthwork and Drainage.
21. Transport and Maritime Affairs. (2012), *Handbook of Road Design*, Part 3 Earthwork and Drainage.