

GCP로 보강된 연약지반의 해석적 거동분석

Analysis on the Analytical Behavior of Soft Ground Reinforced with Granular Compaction Piles

김민석¹, 나승주¹, 양열호¹, 김대현^{2*}

Min-Seok Kim¹, Seung-Ju Na¹, Yeol-Ho Yang¹, Daehyeon Kim^{2*}

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

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

ABSTRACT

Although many studies on the Granular Compaction Pile (GCP) have been done by many researchers, the GCP design has not been systematically done due to the absence of the rational design methodology. As the GCP design has been mostly done by engineers' own experiences, some failure cases have been reported to occur. For this reason, it is very difficult to confirm definite causes of the failure and establish the prevention plans for the failure. Therefore, this study aims to investigate the optimal mixing ratio of gravel and sand, the effects of the internal friction angle of the GCP on the stress concentration ratio and the vertical and horizontal settlements. In order to analyze the behavior of the soft ground reinforced with the GCP depending on the different design parameters such as the stress concentration ratio and the internal friction angle, a number of finite element (FE) analyses were performed. From the direct shear test, the optimal mixing ratio of gravel to sand was found to be 70:30. Based on the numerical analyses, as the internal friction angle increased, the stress concentration ratio increased and it converged to a constant value. In addition, the larger the internal friction angle, the smaller the settlements. Consequently, the use of the optimal mixing ratio of gravel and sand can lead to reducing both the lateral flow and the heaving phenomenon.

요 지

국내 GCP공법은 많은 선행연구가 진행되었으나, 설계자의 경험에 의해 의존하여 설계되고 있는 실정이므로 파괴사례가 종종 보고되고 있다. 이에 따라 명확한 파괴 원인규명 및 파괴예방대책 수립이 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 GCP공법의 합리적인 설계법의 제안을 위한 기초단계로써, GCP에 사용되는 최적배합비를 대형직접전단시험을 통해 결정하고, 내부마찰각의 변화에 따른 응력분담비의 변화 및 지반의 수직/수평 침하거동을 수치해석을 통하여 분석하였다. 직접전단 실험결과 해석과 모래의 최적배합비는 70:30으로 평가되었다. 수치해석결과 내부마찰각이 증가할수록 응력분담비가 증가하나 일정한 값으로 수렴하고 침하량이 감소하며, 최적배합비로 시공할 경우 측방유동 및 히빙현상의 감소를 유도할 것으로 판단된다.

Keywords : GCP design method, Soft ground, Stress concentration ratio, Prefabricated vertical drains, Internal friction angle

Received 7 July. 2016, Revised 26 July. 2016, Accepted 2 August. 2016

*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 지반의 지지력이 충분하지 못하거나 연약점토지반에서 침하가 과도하게 발생하는 경우에 쇄석을 이용하여 일정한 상대밀도로 압입하여 10~35%정도 치환된 복합지반을 형성함으로써, 지반의 지지력과 전단강도를 증가시키고 측방유동을 억제하여 압밀침하시간 및 침하량을 단축시키고 지반의 공학적 특성개선을 목적으로 한다. 또한 사질토 지반에서는 밀도를 증가시키고 액상화방지 및 수평지지력 증대를 목적으로 적용하는 공법이다.

국내에서는 1955년 일본에서 공법이 개발된 후 충격식 시공법을 도입하였고, 진동식 SCP(Sand Compaction Pile) 타설기의 개발에 따라 진동다짐(VCP, Vibro Compaction Pile)공법에 의하여 시공능률이 증대되었으며 해상시공이 가능하게 되어 최근 다수의 연구 및 시험시공을 통하여 연약지반 개량공법으로써 활발하게 적용되고 있다. 또한 연약지반 개량에 있어서 연약지반에 상부구조물의 하중재하시 문제가 되는 팽창파괴를 방지하기 위하여 GCP공법의 활용성이 급격히 증가하고 있다(Yoo et al., 2007).

현재 국내의 GCP 설계는 설계자의 경험에 의존하여 체계적이지 않게 이루어지고 있어 쉽게 강도를 상실하는 점토지반의 특성으로 인하여 시공의 불확실성 및 팽창파괴, 전단파괴 등 다양한 형태의 파괴가 발생하고 있으나 명확한 원인규명 및 파괴 예방대책 수립이 어려운 실정이다. 또한 국외에서 적용하는 GCP 설계법을 그대로 적용하여 지지력, 침하량 등이 실측값과 큰 차이가 나는 경우가 자주 있다.

Chun et al. (2005)은 퇴적에 의해 횡방향으로 배치된 자연적 복합지반은 공학적인 안정성이나 사용성에 있어 발생하는 문제점에 대해 그 해결방안이 제시되어있는 반면, 인위적으로 조성된 복합지반은 이러한 문제점에 대한 신뢰성 있는 이론들과 해결방안들이 아직은 일반화되어 있지 않다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 GCP공법의 합리적인 설계법 제안을 위한 기초단계로써, GCP에 사용되는 쇄석과 모래의 최적배합비를 직접전단시험을 통해 결정하고, 내부마찰각의 변화에 따른 응력분담비의 변화 및 지반의 수직/수평 침하거동을 수치해석을 통해 분석하였다. 본 연구에서는 실제 GCP공법이 적용된 복합지반의 현장의 데이터를 기반으로 2차원 압밀해석을 실시하여 과잉간극수압, 침하량의 거동특성을 분석하고자 하였다.

1.2 연구동향

GCP공법의 시초라고 할 수 있는 조립토 다짐말뚝공법은 1830년대에 프랑스의 기술자 Moreau 등에 의하여 모래다짐말뚝(SCP, Sand Compaction Pile)공법을 중심으로 개발되어 사용된 바 있으나, 그 이후로는 사용되지 않다가 1930년대에 접어들어 진동장비를 이용하여 재료를 다짐하면서 말뚝을 조성하는 진동다짐공법을 개발하는 과정에서 다시 사용된 공법이다.

여기서, 다짐말뚝공법과 관련된 공법의 명칭에 대하여 살펴보면 연약지반 내에서 상·하로 압입·인발방식에 의해 말뚝을 조성하는 시공방식이 같기 때문에 SCP공법과 GCP공법은 조립토 다짐말뚝공법으로 혼용하여 사용하고 있으나, 재료적 특성에 의한 배수특성, 강도특성, 입자의 거동특성 등이 다르기 때문에 두 공법이 같다고 할 수 없다. 또한 주로 유럽에서 사용하는 Stone Column 공법을 국내에서는 GCP공법이라고도 하나, 주로 Stone Column 공법은 지반 내에서 좌·우로 진동하며 말뚝을 형성하는 방식으로 시공과정에 차이가 있다. 따라서 국내에서 사용하는 다짐말뚝공법과 관련된 공법의 명칭에 대하여 명확히 정립할 필요가 있다.

GCP공법의 기본적인 이론은 1960년대에 접어들어 본격적으로 등가원주개념을 바탕으로한 SCP공법을 중심으로 연구가 시작되었으며 현장시험, 모형토조시험을 통한 실내시험 등의 경험에 의해 축적된 데이터를 근거로 시작하였다. 또한 국내에서는 1980년대에 일본에서 개발된 GCP공법을 국내에 도입하여 최초로 설계 및 시공하였고, 1990년대에 접어들어서 시험시공 및 연구결과들이 발표되었다.

국내에서는 GCP 설계 시 연약지반의 강도특성, GCP에 사용되는 재료의 특성, 현장의 여건 등을 세밀하게 고려하지 않고 일반적으로 설계자의 경험 및 타 현장 사례를 참고하여 응력분담비 3~7값을 관습적으로 적용하고 있어 예상치 못한 팽창파괴, 전단파괴, 과도한 침하 등이 종종 발생하여 재시공으로 인한 상당한 경제적 손실 등을 초래하고 있는 실정이다. 또한 국내의 GCP는 지반의 선단부에서부터 구근을 형성하며 조성되는 공법의 특성으로 인하여 설계에 맞게 조성되었는지 확인하기가 어렵고, 다짐도를 이용한 평가방법은 상부층의 다짐도를 측정하는 것이므로 한계가 있다.

실험적 및 이론적 접근은 유럽 및 미국을 중심으로 지난 40년간 진행되어 왔으며, Thornburn과 Macvicar (1968), Greenwood (1970), Madhav and Vitkar (1978), Hughes and Withers (1974), Alamgir et al. (1996) 등이 현장시공사례, 실내시험, 유한요소법 등을 통하여 지지력 산정식 및 이론 등을 제안하고 수정하였다. 그러나 대부분의 위의 연구가 단일말뚝에 대한 지지력만을

고려한 것이므로 지중응력변화에 의한 복합지반의 거동특성을 분석하는 것은 한계가 있다.

Yamaguchi와 Murakami (1977), Bae and Lee (2007)는 현장재하시험 및 수치해석연구를 실시하여 자유변형률로 인하여 말뚝에서의 침하는 감소하고 지반의 침하는 증가하며 일반적으로 $3 \sim 4 < m < 3.6 \sim 6.8$ 의 값을 갖는다고 하였다. 또한 치환율, 형상비, 상대밀도 증가에 따라 응력분담비가 증가하지만 일정한 지점에서는 수렴하고 고치환율 및 긴 말뚝에서는 상재하중의 증가에 따라 영향을 받는다고 하였다.

Do et al. (2009), Choi (2009), Park et al. (2011)은 클로깅 시험을 통하여 투수성을 분석한 결과, 모래가 20% 이상 혼합될 경우 투수능이 현저하게 감소한다고 하였다. 또한 클로깅 현상은 전체 면적의 10% 이내에서 발생하며, GCP의 30%에서 최대 지지력을 나타낸다고 하였으므로 실내실험을 통하여 검증할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Chun et al. (2005), Yoo et al. (2007)은 유한요소해석 및 클로깅 시험 등을 실시하였으나, 복합지반의 안정성이나 사용성에 대한 문제점의 신뢰성 있는 이론들과 해결방안들이 아직은 일반화 되어 있지 않고, 경험적 방법에 의한 것으로 지반개량효과에 대해서는 이론적으로 규명되지 않은 상태라고 하였다.

국내 현행설계기준을 보완하고 합리적인 설계법 제안을 위하여 GCP에 관한 선행연구를 정리하면 다음과 같다.

GCP공법에 관한 선행연구가 다수 진행되어 왔으나, 연구의 결과가 실제 설계 및 시공으로 적용되지 못하고 있는 실정이며 지지력에 관한 기준 제안식 및 선행연구들은 등가원주개념에 근거한 단일말뚝에 대한 지지력만을 고려하기 때문에 균말뚝 효과 및 GCP 사이의 지반을 고려하지 않기 때문에 GCP의 거동특성을 분석하는 것은 한계가 있다.

현재 GCP에 1개의 응력분담비 값을 적용하고 있으나, 응력분담비는 깊이, 연약점토지반 내에서 중앙부 또는 외곽부와 같이 위치에 따라 다르므로 지반의 응력거동특성에 따라 응력분담비를 고려할 필요가 있으며 그 값을 통하여 합리적인 설계법을 제안할 수 있다.

그동안의 선행연구는 주로 등가원주개념의 국부적인 GCP와 연약지반을 대상으로 하거나 간단히 GCP공법을 적용한 복합지반의 형태로 연구를 수행하였기 때문에 GCP공법이 적용된 지반의 전체적인 거동특성을 분석하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 GCP 시공현장의 데이터를 바탕으로 지반조건, 성토단계에 따른 성토·방치일, GCP의 시공형태 등의 조건을 적용하여 연약지반을 현장과 같이 상세히 모델링함으로써 지반의 전체적인 거동특성을 분석하여 GCP공법의 설계 및 시공에 관한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. GCP공법의 기본설계개념 및 설계정수

2.1 등가원주(Unit Cell)개념

GCP공법은 지반의 지지력증가, 침하량감소, 압밀축진 및 지반의 액상화 방지 등 주로 연약지반의 보강을 목적으로 사용하며 등가원주개념은 GCP의 지지력을 평가하는 다수의 설계기법과 보강된 지반의 침하거동특성을 분석하기 위해 개발된 해석법들은 등가원주이론을 기반으로 한 것이다. 또한 정삼각형 또는 정사각형 배열로 설치된 GCP에서 영향을 미치는 주변지반의 범위는 규칙적인 육각형 형태 또는 등가원의 형태로 표현할 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.

따라서 큰 강성을 가지는 GCP에 상재압보다 큰 응력이 재하된 후, 그 응력은 말뚝의 길이에 따라 균등분포를 가정한다. 여기서 응력분담비는 조성된 복합지반의 거동특성(침하, 지지력, 안정해석)의 해석에 매우 중요한 요소이다(Barksdale et al., 1983).

등가원주개념을 적용한 GCP에 대한 유효직경의 산정은 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

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

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

여기서, s 는 GCP의 간격이며 GCP가 적용된 지반에서 치환율(a_s)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_s = A_s / A \quad (3)$$

여기서, A_s 는 GCP의 면적, A 는 등가원주 내부의 총면적이고 치환율(a_s)은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$a_s = C_1 \left(\frac{D}{s} \right)^2 \quad (4)$$

Table 1. Mixing ratio of large direct shear tests

Granular:Sand 100:0		Granular:Sand 90:10		Granular:Sand 80:20		Granular:Sand 70:30		Granular:Sand 60:40		Granular:Sand 0:100	
G	S	G	S	G	S	G	S	G	S	G	S
16.4	0	14.76	1.64	13.12	3.28	11.48	4.92	9.84	6.56	0	16.4
Note		G-Granulat, S-Sand, Measure : kg									

Table 2. Geotechnical properties of jumunjin standard soil

Geotechnical properties	Void ratio		Dry density		Specific gravity (G_s)	Water content (w)	Particle size		Uniformity coefficient (C_u)	Curvature coefficient (C_g)
	(e_{max})	(e_{min})	(γ_{dmax})	(γ_{dmin})			(D_{50})	(D_{10})		
Jumunjin standard soil	0.92	0.60	1.65	1.38	2.65	0.30	0.60	0.44	1.40	0.91

여기서, GCP의 설치패턴에 따른 상수는 정삼각형 패턴은 $C_1 = \pi / (2 / \sqrt{3}) = 0.907$, 정사각형 패턴은 $C_1 = \pi / 4 = 0.785$ 이다.

2.2 응력분담비

GCP에 의해 보강된 지반에 상재하중이 작용할 경우, GCP가 주변지반보다 더 높은 지지력을 갖기 때문에 작용된 하중의 대부분이 GCP에 서로 다른 크기로 말뚝의 상부에 집중된다. 또한 점토의 압밀과 같이, 시간을 가진 응력집중은 주변지반 침하감소에서 GCP와 연약지반의 강성차이에 의한 추가적인 부미찰력으로 인하여 원지반에서 GCP에 응력이 집중된다.

등가원주개념을 적용한 GCP 내부의 수직응력의 분포는 응력분담비로 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$m = \sigma_s / \sigma_c \quad (5)$$

여기서, m 은 응력분담비, σ_s 는 GCP에 작용하는 응력, σ_c 는 말뚝주변 점성토지반에 작용하는 응력이며, 평균응력(σ)이 등가원주의 모든 영역에 작용하며, 등변형률 조건에서 평형을 유지한다면, 식 (6)과 같다.

$$\sigma = \sigma_s a_s + \sigma_c (1 - a_s) \quad (6)$$

3. 대형직접전단시험

3.1 개요

본 실험에서는 GCP공법의 압밀축진효과 및 지지력변화를 비교·분석하기 위하여 쇄석과 모래의 최적배합비 산정을 위한 대형직접전단을 실시하고자 하며, 산정된 배합비 및 설계정수

Table 3. Geotechnical properties of gravel soil

USCS	GW
Specific gravity(G_s)	2.63
Dry density(γ_d)	1.70
Internal friction angle(ϕ)	50.9

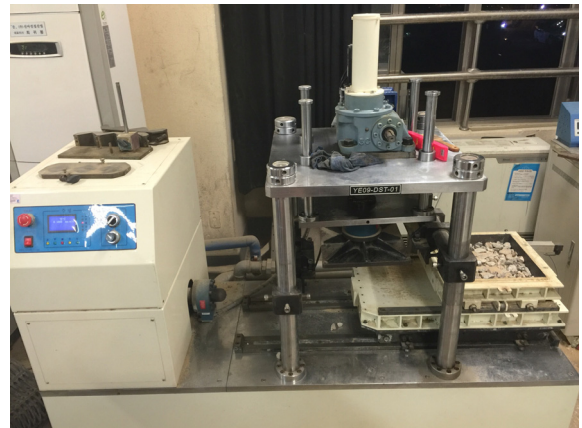


Fig. 1. View of the large direct shear test

를 이용하여 시간에 따른 거동특성을 분석하고자 한다.

최적배합비의 산정에 관한 선행연구조사 결과를 종합하여 쇄석과 모래의 배합비를 Table 1과 같이 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 0:100으로 선정하였다. 또한 실제 GCP 공법의 시공 시 사용되는 쇄석을 통하여 가장 많이 사용되는 입경인 25~40mm의 쇄석을 체가름하여 사용하였고 지반공학적 성질은 Table 2와 같으며, 모래는 주문진 표준사를 사용하였으며 모래의 공학적 특성은 Table 3과 같다.

시료는 (L)1800×(B)630×(H)1050mm 크기의 전단상자에 체가름을 통하여 쇄석입경이 25~40mm의 시료를 모래와 혼합하여 3층 다짐으로 시료를 셋팅하고 1mm/min의 하중재하속도, 수직하중 100, 200, 300kPa으로 시험하였다. 또한 Fig. 1은 대형직접전단시험기에 시료를 셋팅한 후, 시험을 시작하기 직전의 전경이다.

대형직접전단시험에 관한 명확한 시험법이 정립되어 있지는 않으나, 보통 직접전단시험을 기준으로 시험하고 있으며 본 시험에서는 직접전단시험(KS F 2343) 규정을 근거로 적용하여 시험하였으며, 한 종류의 배합비에 대하여 3회 반복실험 하였다.

3.2 대형직접전단 시험결과

본 시험에서는 GCP의 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 설계 정수인 내부마찰각을 산정하는 것이 시험의 주목적이며, Fig. 2와 같이 도출된 시험결과를 이용하여 내부마찰각을 산정하였다.

3회 반복시험결과, 배합비(쇄석:모래) 70:30에서 내부마찰각이 58.29°로 가장 큰 값을 나타내었으며 배합비 70:30을 기준으로 모래의 비율이 증가할수록 내부마찰각이 Table 4와 같이 감소하는 경향을 확인하였다. 따라서 배합비 70:30을 최적배합비로 선정하고 GCP에서 가장 큰 지지력을 나타낼 것으로 판단되어 이를 근거로 수치해석을 실시하고자 한다.

대형직접전단시험 및 GCP공법 시공 시 말뚝의 하부에 모래가 집중되는 현상을 우려할 수 있으나, GCP공법은 시공 시 50cm를 인발하면서 재료를 채우고 20cm를 다시 압입·다짐하여 30cm씩 말뚝을 조성하는 방식으로 시공되기 때문에 하단부에 모래가 집중되는 현상은 극히 미소한 것으로 판단된다. 또한 본 시험에서도 전단상자에 시료를 3층 다짐함으로써, 모래가 하

부에 집중되는 현상을 감소시켰다.

4. 수치해석

본 연구에서는 GCP공법의 합리적인 설계법의 제안을 위한 기초단계로서, GCP의 내부마찰각 변화에 따른 응력분담비의 변화 및 복합지반의 거동특성을 비교·분석하기 위하여 수치해석연구를 실시하였다.

GCP공법의 실제 설계·시공분야에서 많이 사용되고 있는 유한요소해석 프로그램인 MIDAS Soilworks Ver. 4.6.0을 이용하여 실제로 파괴가 발생된 GCP 시공현장의 데이터를 이용하여 지반에 조성된 GCP와 성토하중의 시공단계별 하중을 증분하여 2차원 압밀해석을 실시하였다. 또한 수치해석결과를 이용하여 과잉간극수압, 유효응력의 거동특성에 따른 응력분담비 및 침하량을 분석하였다.

4.1 해석물성치

지반과 같이 비선형 응력-변형거동을 나타내는 재료에 대한 유한요소 해석에서 가장 중요한 요소는 해석에 적합한 구성모델 선택과 이에 따른 매개변수의 결정이다.

Hwang et al. (2005)은 지반과 GCP의 수치해석을 수행할 경

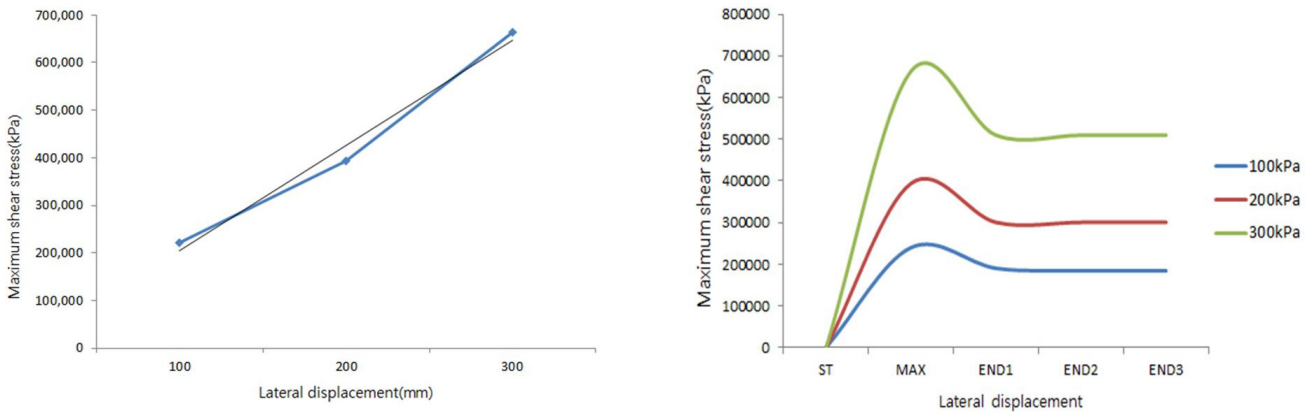


Fig. 2. Graph of mixing ratio (G:S=70:30)

Table 4. Result of large direct shear tests

Mixing ratio (G:S)		100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	0:100
Internal friction angle (ϕ)		50.9	51.43	52.78	58.29	54.30	39.18
		Maximum shear stress(kPa)					
Normal stress (kPa)	100	133,155	219,669	233,516	240,204	220,503	76,039
	200	245,382	334,809	344,341	394,139	351,019	147,119
	300	457,294	549,271	585,653	663,302	584,967	292,317
Note		G-Granular, S-Sand					

Table 5. Properties of soft ground

Properties	Clay layer1	Clay layer2	Clay layer3	Bank materials	Horizontal Drain Material	GCP section
γ_t (N/mm^3)	1.86×10^{-5}	1.93×10^{-5}	1.94×10^{-5}	1.8×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.9×10^{-5}
γ_{sat} (N/mm^3)	1.96×10^{-5}	2.03×10^{-5}	2.04×10^{-5}	1.9×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}
c (N/mm^2)	0.03	0.03	0.03	0.015	0.015	1×10^{-5}
ϕ ($^\circ$)	25	25	25	25	30	38
E (N/mm^2)	3	6.5	10	40	30	30
ν (N/mm^3)	0.4	0.35	0.32	0.32	0.35	0.35
α (N/mm^2)	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}
K_h (mm/sec)	$1,597 \times 10^{-5}$	$1,597 \times 10^{-5}$	$1,94 \times 10^{-5}$	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
K_v (mm/sec)	$2,396 \times 10^{-5}$	$2,396 \times 10^{-5}$	$2,04 \times 10^{-5}$	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
K_o	0.61	0.58	0.58	1	1	1
λ	0.15	0.16	0.16			
K	0.02	0.02	0.02			
e_o	1.12	0.89	1			
C_c	0.34	0.37	0.37			
C_r	0.05	0.05	0.05			
P_c (N/mm^2)	0.058	0.15	0.058			
OCR	1.3	1	1			

Table 6. Properties of embankment load

	step 1	step 2	step 3	step 4	step 5	step 6	step 7
Embankment height(m)	2	2	0.9	0.5	1.6	1	1
Embankment Period(day)	6	17	4	11	6	4	16
Leave Period(day)	28	55	102	66	56	11	9

우, 다양한 모델 중 Modified Cam-Clay 모델은 침하량 및 거동 특성이 매우 유사한 결과를 보였으며, Mohr-Coulomb 모델은 지반의 변형거동특성 등을 다소 과소평가한다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 점성토 지반의 응력-변형률 거동특성 분석 시 가장 많이 적용하는 Modified Cam-Clay 모델을 적용하였으며, GCP의 경우에는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 복합지반의 거동특성을 분석하고자 하였다. 또한 Table 5는 실제 GCP 시공 중 파괴가 발생한 현장의 지반 물성데이터를 적용한 것이다.

4.2 해석대상지반

지반의 모델링은 현장의 지반을 바탕으로 길이 100m, 지반 물성이 다른 점토층을 각각 분할하여 점토층 1은 5m, 점토층 2는 10m, 점토층 3은 2m로 모델링하였다. 시공단계에 따른 지반의 거동특성을 분석하기 위하여 연약지반을 GCP로 개량한 후, Table 6과 같은 성토체를 7단계의 증분하중으로 단계별 성토를 완료한 시점의 변형거동을 분석하였다.

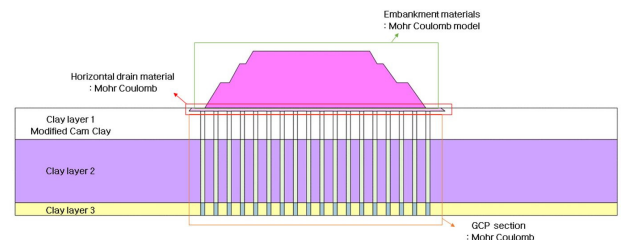


Fig. 3. Modeling of soft ground

해석방법은 평면변형률 조건으로 수행하였으며, Fig. 3과 같이 경계조건은 바닥면과 측면을 고정조건으로 적용하였고 측면은 수평방향 자유도를 적용하였다. 또한 지반은 압밀조건, 성토체는 비압밀조건을 적용하였고 배수조건은 상부일면배수조건을 적용하였다.

4.3 내부마찰각의 변화에 따른 과잉간극수압 거동특성 분석

GCP공법 시공 중에 파괴가 발생한 현장의 데이터(내부마찰

각 38°)를 바탕으로 지반을 모델링하고 대형직접전단시험결과에서 산정된 최적배합비(70:30)의 내부마찰각 58.29°를 이용하여 다른 설계정수는 동일하게 하고 내부마찰각만 5°씩 증가시키면서 내부마찰각의 증가에 따른 과잉간극수압의 거동특성을 성토 7단계 지점(392일)에서 분석하였다.

392일(7단계 성토완료) 이전 시점은 성토하중이 작용하는 상태이며, 이후부터 압밀이 시작되어 705일에 압밀완료시점이 된다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 단계성토 하중이 작용하는 392일 이전 시점에서 과잉간극수압은 최적배합비를 적용한 결과 값이 기존 설계 값보다 약 4배정도 작게 발생하고 압밀종료 시점은 약 50일정도 빠른 것을 확인하였다. 이는 내부마찰각이 증가함에 따라 GCP의 강성이 증가하여 말뚝이 분담하는 응력이 증가하여 과잉간극수압이 작게 발생하고 지반의 전체적인 침하량이 감소하는 것으로 판단된다.

GCP공법을 적용하는 경우 각 공법별로 차이가 있긴 하나, 성토완료 후 약 1년 이내에 압밀이 완료되는 것을 확인할 수 있으며, GCP공법 적용 시 단계별 성토과정에서 GCP를 통하여 원활한 배수가 진행되므로 지반 내 급격한 과잉간극수압은 발생하지 않는 것을 확인하였다.

또한 Chu (2013)의 연구에서 GCP에 모래를 혼합할 경우 통수능이 더 높은 것을 확인할 수 있으며, 쇄석 100% 말뚝의 경우 하중이 재하되면서 상대적으로 공극이 큰 쇄석에 점토가 지속적으로 침투하여 배수를 방해한다고 하였으므로 모래를 혼합한 GCP공법을 적용할 경우, 모래가 점토의 혼입을 방지하고 일정한 통수능을 확보하기 때문에 투수계수와 관계없이 과잉간극수압을 저감시키고 상당한 압밀축진효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 7은 내부마찰각이 5°씩 증가할 때의 과잉간극수압의

Table 7. Reduction rate of excess pore pressure

Internal friction angle(ϕ)	38°→43°	43°→48°	48°→53°	53°→58°
reduction rate(%)	26.05	28.50	27.16	25.18

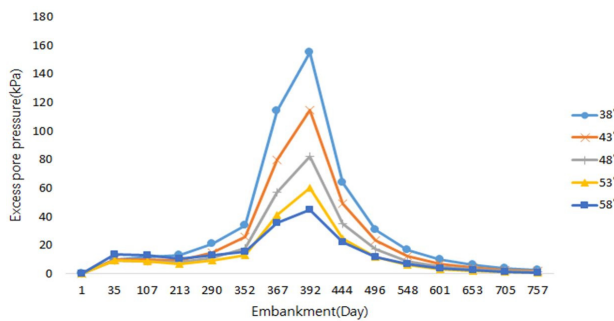
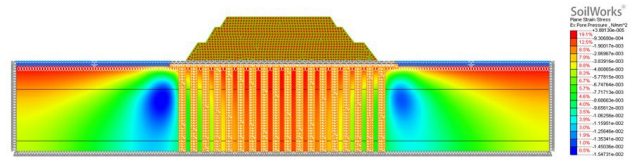
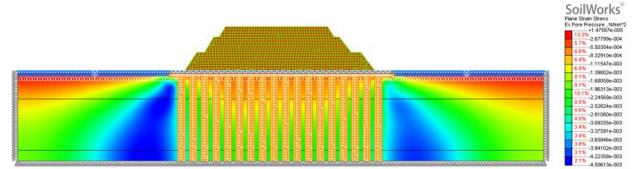


Fig. 4. Characteristic of excess pore pressure



(a) Design values (38°)



(b) Optimal mixing ratio (58°)

Fig. 5. Excess pore pressure distribution of soft ground

감소율을 표로 정리한 것이며, 내부마찰각이 5°씩 증가할수록 과잉간극수압은 약 25%가량 감소하는 것을 확인하였다. 현재 국내에서는 쇄석에 저회와 같은 대체재를 혼합하는 연구가 활발히 진행되고 있는데, 대체재를 혼합함으로써 내부마찰각을 증가시킬 경우, 큰 효과가 나타날 것으로 판단된다.

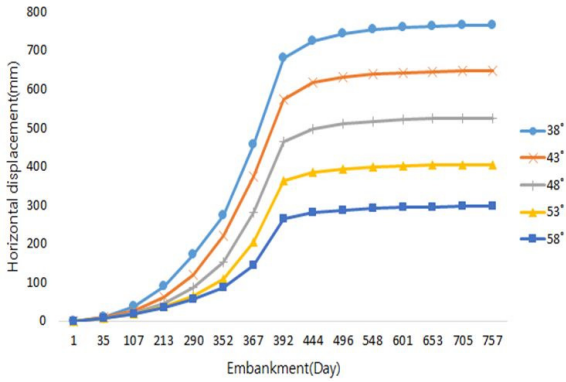
Fig. 5는 단계별 성토단계의 시공기간과 방치기간을 현장과 동일하게 적용한 후 성토 7단계 시점에서 2차원 압밀해석을 실시한 결과로써 연약점토지반 내의 과잉간극수압의 거동을 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 현장설계 값(38°)을 적용한 것이고 Fig. 5(b)는 최적배합비(58°)를 적용한 것이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 최적배합비를 적용한 경우에 현장 설계 값보다 과잉간극수압이 연약점토지반 내에서 전체적으로 약 10배정도 감소하는 것을 확인하였다.

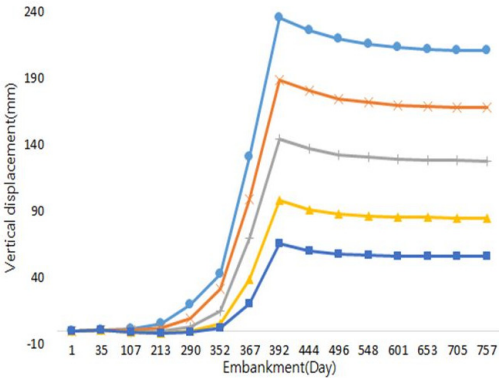
4.4 내부마찰각의 변화에 따른 수평·수직변위 거동특성 분석

GCP공법의 경우 연직배수효과도 우수하지만 GCP의 자체 강성이 매우 크기 때문에 내부마찰각이 증가할수록 말뚝이 분담하는 응력의 증가로 인한 총 침하량은 감소하는 것을 확인하였다. Fig. 6(a)은 연약점토지반 내의 중앙부에서 단계별 성토 시 발생하는 수평변위를 나타낸 것이며, Fig. 6(b)은 수직변위를 나타낸 것이다.

수평·수직변위 모두 7단계 성토지점에서 현장설계 값의 경우 최적배합비보다 약 2배 이상 변위가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 내부마찰각이 증가할수록 GCP의 강성이 증대되어 말뚝이 분담하는 응력이 증가하므로 과잉간극수압이 작게 발생할 뿐만 아니라 연약지반 내의 배수성이 증대되어 과잉간극수압이 빠르게 소산되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 GCP공법은 연직배수성이 우수하기 때문에 압밀축진효과로 인하여 최적배합



(a) Horizontal displacement



(b) Vertical displacement

Fig. 6. Displacement distribution of soft ground

Table 8. Reduction rate of horizontal displacement

Internal friction angle(ϕ)	38°→43°	43°→48°	48°→53°	53°→58°
reduction rate(%)	15.74	19.11	21.79	27.08

Table 9. Reduction rate of vertical displacement

Internal friction angle(ϕ)	38°→43°	43°→48°	48°→53°	53°→58°
reduction rate(%)	20.05	23.33	32.22	32.91

비의 경우 변위가 현저히 감소한 것으로 판단된다.

Table 8은 내부마찰각 증가에 따른 수평변위의 감소율을 정리한 것이며, Table 9는 수직변위의 감소율을 정리한 것이다. 이는 내부마찰각을 증가시킬 경우 GCP의 자체강성이 증가하기 때문에 수평변위는 최초 약 16%, 수직변위는 최초 약 20%부터 감소율의 증가폭이 증가하는 것을 확인하였다.

위와 같이 내부마찰각을 증가시키는 것은 GCP의 강성증가로 인한 지지력 증대 및 말뚝이 분담하는 응력이 증가하여 과잉 간극수압이 빠르게 소산되므로 압밀축진효과가 발생한다. 따라서 GCP공법을 시공할 경우 반드시 측방유동을 동반하게 되는데, 이는 측방유동 및 히빙현상의 효율적인 감소방안이 될 것으로 판단된다.

4.5 내부마찰각의 변화에 따른 지반깊이 별 응력분담비 분석

지반 깊이에 따른 응력분담비의 변화를 확인하고자 연약점토 지반의 지층별로 유효응력(SYY' 방향)을 분석하였다. 또한 내부마찰각 증가에 따른 응력분담비를 분석하고자 하였다. 동일한 위치에서 유효응력을 분석하고자 Soilworks 프로그램의 결과값 추출기능을 이용하여 동일한 절점에서 유효응력을 추출하였다.

Fig. 7과 같이 GCP 시공구간 중 연약점토지반의 중앙부를 A 지점, 외곽부를 B지점으로 나누어 응력분담비를 분석하였으며 분석시점은 7단계 성토가 완료된 시점에서의 유효응력을 분석하였다. 또한 응력분담비는 식 (7)에 의해 산정하였다.

$$m = \sigma_s / \sigma_c \quad (7)$$

여기서, m 은 응력분담비, σ_s 는 GCP에 작용하는 응력, σ_c 는 말뚝주변 점성토지반에 작용하는 응력이다.

Table 10은 A지점, Table 11은 B지점의 지반깊이에 따른 연약지반과 말뚝의 유효응력을 나타낸 것이며, 절점은 유효응력을 추출한 절점요소의 위치를 나타낸다. Table 8에서 보는 바와 같이 내부마찰각이 증가할수록 GCP가 분담하는 응력이 증가하는 것을 확인하였다.

Fig. 8(a)는 A지점, 8(b)는 B지점의 지층깊이에 따른 응력분담비의 거동특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 높이에서 중앙부의 응력분담비가 외곽부의 응력분담비보다 약 1.5배 큰 것을 확인하였다. 이는 단계성토에 대한 사면안정 평가를 실시할 경우, 중심부보다 외곽부의 복합지반의 강도를 약간 작게 가정해야 하는 것을 확인할 수 있으며, 위치에 따른 응력분담비에 관한 연구가 더 필요한 것으로 판단된다. 또한 지층의 깊이가 깊어질수록 응력거동에 따라 응력분담비가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 내부마찰각이 증가하여도 응력분담비는 감소하다가 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인하였다.

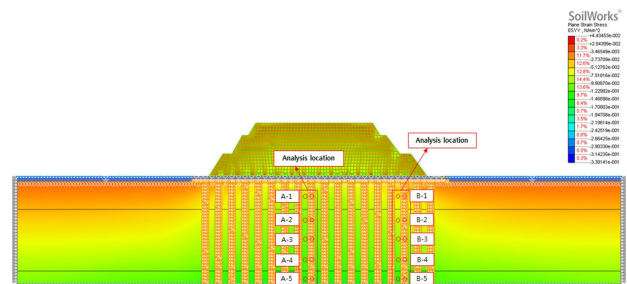


Fig. 7. Analysis location of stress concentration ratio

Table 10. The effective stress of point A

	A-1		A-2		A-3		A-4		A-5	
	Ground	Pile	Ground	Pile	Ground	Pile	Ground	Pile	Ground	Pile
Joints	3814	5178	3896	5171	3889	5164	3882	5157	5193	5152
38°	75	166	87	176	99	193	112	199	134	210
43°	72	190	83	204	95	216	111	219	141	235
48°	59	195	69	210	84	217	116	227	144	243
53°	48	195	59	210	82	219	119	234	146	250
58°	38	194	52	208	86	223	121	238	147	255
Note	Measure : kPa									

Table 11. The effective stress of point B

	B-1		B-2		B-3		B-4		B-5	
	Ground	Pile	Ground	Pile	Ground	Pile	Ground	Pile	Ground	Pile
Joints	1475	2040	1415	2032	1427	2026	1439	2020	1363	2014
38°	54	109	76	154	91	178	106	187	131	199
43°	46	94	68	157	83	167	104	178	130	190
48°	38	91	62	148	79	158	104	169	130	184
53°	32	94	57	138	79	151	104	164	129	181
58°	29	96	54	135	80	148	104	162	129	180
Note	Measure : kPa									

Table 12. Reduction rate of stress concentration ratio (point A)

Analysis location		A-1→A-2	A-2→A-3	A-3→A-4	A-4→A-5
reduction rate (%)	38°	8,6	3,2	8,6	12,4
	43°	6,2	7,5	14,1	15,5
	48°	7,7	15,0	23,8	14,2
	53°	12,9	25,1	26,3	12,7
	58°	21,2	34,6	23,9	12,4

Table 13. Reduction rate of stress concentration ratio (point B)

Analysis location		B-1→B-2	B-2→B-3	B-3→B-4	B-4→B-5
reduction rate (%)	38°	0,4	3,5	9,8	13,9
	43°	13,0	12,9	14,9	14,6
	48°	0,3	16,2	18,8	12,9
	53°	17,6	21,1	17,5	11,0
	58°	24,5	26,0	15,8	10,4

Bae and Lee (2007)는 침하특성은 자유변형률로 인하여 말뚝의 침하량이 감소하고, 최대 응력분담비의 발생위치는 지표면 쪽으로 상승하며 치환율과 형상비가 증가할 때 어느 한계이상에서는 최대 응력분담비가 수렴한다고 하였는데 이는 본 연구결과와 유사한 것을 확인하였다.

Table 12는 A지점, Table 13은 B지점에서 Fig. 8의 지층깊이에 따른 응력분담비의 감소율을 정리한 것이며 내부마찰각이 증가할수록 응력분담비도 증가하는 것을 확인하였다. 또한 응

력분담비의 감소율은 연약점토지반의 중앙부에서 가장 큰 것을 확인하였다.

Kim et al. (2008)은 상재하중증가 및 시간경과에 따라 응력분담비가 감소하고 이는 상재하중에 의한 연약지반의 압밀이 진행되고 지반강성이 증가하므로 GCP가 분담하는 응력이 감소하고 하중재하에 따른 GCP의 별징파괴로 인한 단면적이 증가하기 때문이라고 하였는데, 이는 본 연구결과와 유사한 것을 확인하였다.

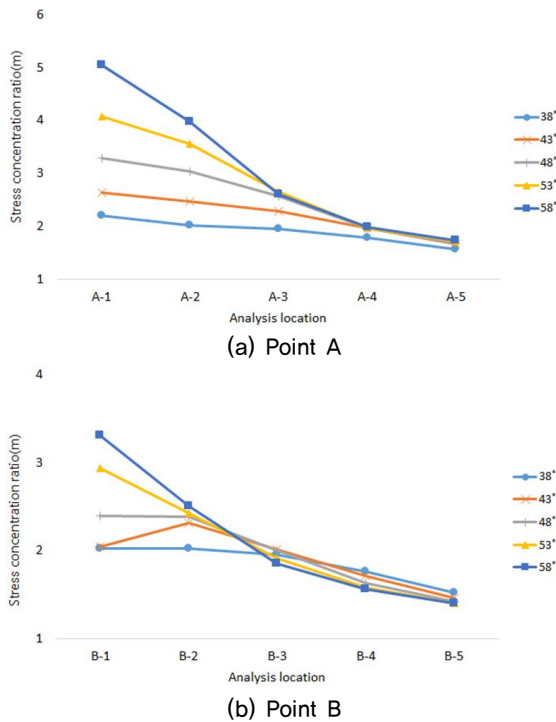


Fig. 8. Graph of stress concentration ratio

Yamaguchi and Murakami (1977)는 GCP공법으로 보강된 지반에서 주변점토지반의 조건에 따라 응력분담비는 하중이 증가함에 따라 $3 \sim 4 < m < 3.6 \sim 6.8$ 의 값을 나타낸다고 하였는데, 본 연구에서의 응력분담비는 $2 < m < 5$ 로 산정되어, 선행연구의 결과와 유사한 것을 확인하였다.

4. 결론

- (1) 대형직접전단시험 결과, 쇄석:모래(70:30)의 배합비에서 내부마찰각이 58.29°로 가장 큰 것을 확인하였다. 모래의 혼합비가 30% 이상일 경우 내부마찰각이 감소하기 때문에 GCP공법의 최적배합비는 70:30인 것을 확인하였다.
- (2) 단계별 성토 시 과잉간극수압은 최적배합비를 적용한 결과 값이 기존 설계 값보다 약 1.5배정도 작게 발생하고 압밀종료 시점은 약 50일정도 빠른 것을 확인하였다. 또한 성토완료 후 약 1년 이내에 압밀이 종료되는 것을 확인할 수 있으며, GCP공법 적용 시 단계별 성토단계에서 내부마찰각이 증가할수록 말뚝이 분담하는 응력이 증가하여 과잉간극수압이 작게 발생하고 GCP를 조성함으로써 연약지반 내의 배수성이 증가되므로 지반 내 급격한 과잉간극수압은 발생하지 않는 것을 확인하였다.
- (3) 2차원 압밀해석결과, GCP에 일정량의 모래를 혼합하여 내부마찰각을 증가시킴으로써 말뚝의 강성이 증가하여

수직·수평변위가 약 2~3배 이상 감소하는 것을 확인하였다. 또한 일정량의 모래를 혼합함으로써 GCP의 클로킹 현상을 방지하고 GCP의 배수성을 증가시키는 효과까지 고려한다면 그 효과는 상당할 것으로 판단된다.

- (4) 지층 깊이에 따른 응력분담비를 분석한 결과, 연약점토지반 중앙부가 외곽부에 비하여 응력분담비가 최대 37%가량 크고, 응력분담비의 감소율이 지반의 중간지층에서 가장 큰 것을 확인하였다. 또한 지층 깊이가 깊어질수록 내부마찰각이 증가하여도 지반이 분담하는 응력이 증가하므로 응력분담비가 감소하는 것을 확인하였으며, 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인하였다.

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. Alamgir, M., Miura, N., Poorooshasb, H. B. and Madhav, M. R. (1996), "Deformation Analysis of Soft Ground Reinforced by Columnar Inclusions", *Computers and Geotechnics*, Vol.18, No.4, pp.267-290.
2. Bae, K. T. and Lee, C. K. (2007), "The Behavior of Rammed Aggregate Piers (RAP) in Soft Ground(1)", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.23 No.4, pp.169-183.
3. Barksdale, R. C. and Bachus, R. C. (1983), "Design and Construction of Stone Columns", Vol.1, Report No. FHWA/RD-83/026, National Technical Information Service, Springfield, pp.35-48.
4. Choi, H. S. (2009), "Engineering properties of compaction pile mixed with crushed stone and sand", Hanyang 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. Chun, B.S, Kim, K.M. and Kim, J.H. (2005), "The Characteristics of Various Stress in Cohesionless Soil with the Rammed Aggregate Pier", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.25, pp.1108-1117.
7. Do, J. N., Lee, D. Y., Kim, B. Y. and Chum, B. S. (2009), "Clogging Characteristics of Rammed Aggregate and Sand Mixture Piers", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.2009, pp.253-257.
8. Greenwood, D. A. (1970), "Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface", Proc. Ground Engineering Conference, Institute of Civil Engineering, pp.9-20.

9. Hughes, J. M. O. and Withers, N. J. (1974), "Reinforcing Soft Cohesive Soil with Stone Columns" *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, pp.29-42.
10. Hwang, J. S., Kim, J. H., Lee, H. K., Kim, H. T. and Lee, S. K. (2005), "Field Load Test Results and Suggestion of Simple Settlement Estimation Method for Granular Compaction Piles", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.3, pp.159-168.
11. Kim, D. E., Park, H. L., Lee, S. R. and You, S. H. (2008), "Evaluation of Stress Distribution Ratio According to Clay Ground Condition and Stone Column Characteristics", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.11, pp.35-41.
12. Madhav, M. R. and Vitkar, R. P. (1978), "Strip Footing on Weak Clay Stabilized with Granular Trench of Pile", *J. of Canadian Geotechnical*, Vol.15, No.4, pp.605-609.
13. Park, M. C., Kwon, H. C., Shin, H. H., Jang, G. S. and Lee, S. (2011), "An Analysis of the Composite Discharge Capacity Effect with GCP Method", *J. of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.12, No.12, pp.37-46.
14. Thornburn, S. and Macvicar, R. S. L.(1968), "Soil stabilization employing surface and depth vibrators", *Structural Engineer*, Vol.46, No.10, pp.309-316.
15. Yamaguchi, H and Murakami, Y. (1977), "On stress distribution of composite ground", *The 11th Conference of Japanese Symposium of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 951-952.
16. Yoo, C. S., Kim, S. B., Song, A. R. and Lee, D. Y. (2007), "Finite Element Modeling of Geogrid- Encased Stone Column in Soft Ground", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.10, pp.133-150.