

# SCP 및 GCP 개량 점성토지반의 실내재하시험에 대한 극한지지력 산정 방법 개발

## Estimation of Ultimate Bearing Capacity of SCP and GCP Reinforced Clay for Laboratory Load Test Data

봉 태 호<sup>1</sup> Bong, Tae-Ho

김 병 일<sup>2</sup> Kim, Byoung-II

한 진 태<sup>3</sup> Han, Jin-Tae

### Abstract

In this study, 34 laboratory load test data were collected, and analyzed to propose the equations for predicting ultimate bearing capacity of sand compaction pile (SCP) and gravel compaction pile (GCP) reinforced clay. The collected data were compared with the ultimate bearing capacity estimated by existing theoretical equations, and the prediction accuracy of the existing theoretical equations was identified. Also, multiple regression analysis was performed to predict the ultimate bearing capacity, and the most efficient number and type of input variables were selected through error evaluation by leave-one-out cross validation. Finally, the multiple regression equations for estimating the ultimate bearing capacity of laboratory load test for SCP and GCP were proposed, and their performance was evaluated.

### 요 지

본 연구에서는 모래다짐말뚝(sand compaction pile, SCP)과 자갈다짐말뚝(gravel compaction pile, GCP)으로 보강된 지반의 극한지지력을 예측할 수 있는 식을 제안하고자 34개의 국내외 실내재하시험 데이터를 수집하고 이를 분석하였다. 수집된 자료를 기존의 이론식에 의한 극한지지력 산정 값과 비교하여 기존 이론식의 예측 정도를 파악하였다. 또한 극한 지지력 예측식을 제안하고자 다중회귀분석을 수행하였으며, 단일잔류 교차검증에 따른 예측오차평가를 통하여 가장 효율적인 입력변수의 수 및 조합을 선정하였다. 최종적으로 SCP와 GCP의 실내재하시험에 대한 극한 지지력을 예측하기 위한 다중회귀식을 제안하였으며 그 성능을 평가하였다.

**Keywords :** Sand compaction pile, Gravel compaction pile, Laboratory load test, Bearing capacity, Multiple regression analysis

1 비회원, 오레곤 주립대학교 토목건설공학과 박사후 연구원 (Post Doctoral Researcher, School of Civil and Construction Engrg., Oregon State Univ.)

2 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Myongji Univ., Tel: +82-31-330-6415, Fax: +82-31-336-9705, bikim@mju.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지진안전연구센터 연구위원 (Member, Research Fellow, Earthquake Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engrg. & Building Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

모래다짐말뚝(sand compaction pile, SCP) 공법 및 자갈다짐말뚝(gravel compaction pile, SCP) 공법은 연약한 점성토지반이나 느슨한 사질토 지반을 개량하기 위해 진동 혹은 충격하중을 가하여 모래 또는 자갈을 지반에 다지면서 조성하는 공법을 말한다(Kitazume, 2005; Kim et al., 2015). 1930년대 개발되어 유럽과 미국을 중심으로 주로 사용되어 온 암석기둥공법(stone column method), 자갈피어공법(aggregate pier method) 등은 모두 GCP 공법과 유사한 공법이며, 1950년대부터 일본을 중심으로 사용된 SCP 공법과도 재료만 차이가 있을 뿐 공법 원리와 목적 등은 유사하다고 할 수 있다(Kitazume, 2005; Kim et al., 2004). SCP 및 GCP 공법은 점성토지반에서는 전단강도 및 지지력 증대, 압밀침하 저감을 위해 주로 사용하고 있으며, 사질토지반에서는 밀도 증대와 액상화 방지, 수평저항력 증가 등을 목적으로 사용된다. 우리나라에서는 1990년대 이후 항만공사를 중심으로 SCP 공법이 많이 적용되었는데 모래자원의 부족 및 단가상승 등의 문제가 야기되자 대체공법의 하나로 GCP 공법에 대한 연구가 많이 진행되었다.

SCP 및 GCP 공법의 설계에서 중요한 점 중의 하나는 SCP 및 GCP가 설치된 지반의 극한지지력과 침하량을 예측하는 일이다. 이 중 극한지지력에 관해서는 전통적인 소성이론(Greenwood, 1970)부터 원통형 공동팽창(Vesic, 1972; Hughes et al., 1975; Hansbo, 1994), 수치해석 방법(e.g., Brauns, 1978; Balaam et al., 1978; Mitchell and Huber, 1985), 경험적 방법(e.g., Mitchell, 1981; Bergado and Lam, 1987) 등이 있다. 또한 최근에는 Stuedlein and Holtz(2013)가 점성토 지반에서 여러 가지 조건에 따라 시공된 자갈피어에 대한 재하시험 결과 중 신뢰성 있는 데이터 30개를 선정하여 기존 지지력공식과 관측된 극한지지력을 비교, 검토하고 수정된 극한 지지력공식을 제안하였으며, Najjar(2013)는 모래다짐말뚝 및 암석기둥 공법에 대한 그동안의 연구 성과를 정리하여 발표하였다.

한편, 국내에서도 Kim et al.(2004)는 외말뚝 형태의 모형시험을 통해 SCP와 GCP의 극한지지력을 연구한 바 있으며, Kim and Lee(2005)는 무리말뚝 형태의 모형시험을 통해 SCP와 GCP의 극한지지력을 연구한 바 있다. 또한 Kang and Kim(2004)과 Kim and Kang(2004)은 외말뚝과 무리말뚝 형태의 1g 실내모형시험을 수행하

여 GCP의 극한지지력을 측정하는 바 있으며, Choi(2007)는 실제 크기의 쇄석말뚝을 조성하여 정재하시험을 통해 극한지지력 측정 연구를 진행하였다. 최근, Kim et al.(2016)은 GCP에 대하여 내부마찰각의 변화에 따른 응력분담비의 변화 및 지반의 수직/수평 침하거동을 수치해석을 통하여 분석하였으며, Na et al.(2017)는 쇄석다짐말뚝에 대한 선행연구를 분석하고 수치해석을 통하여 치환율과 지반강도에 따른 응력 및 침하거동을 분석한 바 있다. 그러나 이러한 연구에도 불구하고 SCP 및 GCP 개량지반의 극한지지력을 산정하는 대부분의 공식들은 원 점성토 지반의 전단강도와 다짐말뚝 재료의 전단저항각에 의해서만 지지력을 산정하고 있으며, 예측된 극한 지지력은 실제 극한 지지력과 비교하여 큰 오차 및 예측 변동성을 보임에 따라 실제 설계에 활용하기에는 부적합한 것으로 나타났다. 따라서 다양한 지반 조건 및 말뚝조건에 따른 SCP 및 GCP의 공학적 특성을 분석하고자하는 연구가 꾸준히 이루어지고 있으며 시간적, 경제적 등의 이유로 실내재하시험을 통하여 침하 및 지지력에 대한 분석이 이루어지고 있다. 하지만 실내 모형시험의 경우 실제 말뚝에 비하여 상당히 작은 크기로 축소되어 수행함에 따라 크기영향(size effect) 및 실험장비에 따른 경계영향(boundary effect) 등을 받게 되며 실제 현장의 극한 지지력과는 다른 공학적 특성을 나타낼 수 있다. 따라서 현장재하시험과 실내재하시험에 따른 차이 및 기존 지지력 공식의 적용성 등을 평가할 필요가 있으며, 실내재하시험에서 극한 지지력에 영향을 주는 인자구명하고 이에 따른 합리적인 극한 지지력 예측식의 산정에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 실내재하시험 결과에 대한 극한 지지력을 예측하기 위하여 국내외에서 수행된 34개의 SCP와 GCP에 대한 실내재하시험 결과를 수집하고 시험조건 및 결과를 정리하였으며, 기존에 제안된 극한 지지력 이론식 및 다중선형회귀식(multiple linear regression, MLR)을 적용하여 오차 및 적용성을 평가하였다. 또한, 실내재하시험에 대한 합리적인 극한 지지력 예측식을 제안하기 위하여 수집된 34개의 실내재하시험 데이터 베이스를 바탕으로 다양한 입력변수의 조합 및 수를 고려하여 다중선형회귀분석을 수행하였으며, 독립된 자료에 대한 예측 정확성을 평가할 수 있도록 단일잔류(leave one out) 교차검증을 수행하여 가장 합리적인 다중회귀식을 산정하였다. 최종적으로 제안된 다중회귀식을 통하여 극한 지지력을 산정하고 관측 극한 지지력과의

비교·분석을 통하여 제안된 예측식의 적용성을 평가하였다.

## 2. SCP 및 GCP 개량지반의 파괴형태와 극한지지력

### 2.1 SCP 및 GCP 개량지반의 파괴형태

SCP 및 GCP 개량지반에서 모래말뚝 및 자갈말뚝의 파괴형태는 Fig. 1과 같이 팽창파괴(bulging failure), 전단파괴(shear failure), 펀칭파괴(punching failure) 등 3가지가 있다. 말뚝 길이가 충분히 긴 경우에는 말뚝지름의 2~3배 깊이 내에서 팽창파괴가 발생하는데 대부분의 모래말뚝 또는 자갈말뚝에서는 팽창파괴가 발생한다. 말뚝 길이가 상대적으로 짧고 선단이 지지된 경우에는 전단파괴가 발생하며, 말뚝 선단이 단단한 지층에 지지되지 않은 짧은 말뚝의 경우에는 관입파괴가 발생한다.

### 2.2 SCP 및 GCP 개량지반의 극한지지력

지금까지 SCP 및 GCP로 개량된 지반의 극한지지력을 산정하기 위해 많은 노력이 이루어져 왔으며 전통적인 소성이론, 원통형 공동팽창이론, 수치해석 방법, 경험적 방법 등 많은 방법이 개발되어 실무에 적용되었다. SCP 및 GCP가 설치된 기초의 극한지지력을 산정하는 방법들을 간단히 정리하면 Table 1과 같다.

하지만 기존 이론식들에 의한 극한 지지력의 예측은 여전히 실제 관측된 극한 지지력과 비교하여 큰 오차를

갖는 것으로 나타났으며, 그 편차 또한 높게 나타나 예측모델의 불확실성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 또한, 말뚝의 세장비와 같은 형상과 관련된 값들도 극한 지지력 산정에 많은 영향을 미침에도 불구하고 아직까지 이를 효과적으로 고려하지 못하였다. Stuedlein and Holtz(2013)는 역계산(back-calculation)을 통하여 점토의 비배수전단강도에 대한 말뚝의 지지력 계수( $N_p$ ) 및 공동팽창계수( $k_p$ )와의 상관관계를 규명하고 기존 이론식을 보완한 수정된 극한 지지력 공식을 제안하였다. 수정된 Mitchell(1981)의 극한 지지력 산정 방법은 식 (1)과 같으며,

$$q_{ult} = N_p \cdot s_u \cdot a_s + N_c \cdot s_u \cdot (1 - a_s) \quad (1)$$

수정된 Hughes et al.(1975)의 극한 지지력 산정 방법은 식 (2)와 같다.

$$q_{ult} = [\sigma_{r0} + k_p \cdot s_u] \cdot \frac{1 + \sin \phi_p}{1 - \sin \phi_p} \cdot a_s + N_c \cdot s_u \cdot (1 - a_s) \quad (2)$$

여기서  $s_u$ 는 원 지반의 비배수 전단강도(kPa),  $a_s$ 는 GCP 치환율,  $\sigma_{r0}$ 는 현장의 방사방향응력(kPa),  $\phi_p$ 는 자갈의 최대 전단저항각(°),  $N_c$ 는 점토지반의 지지력 계수로 보편적으로 5.14의 값이 사용된다. 또한, Stuedlein and Holtz(2013)는 동일한 현장재하시험 데이터에 대한 다중선형회귀분석을 통하여 GCP의 극한 지지력에 대한 다중회귀식을 다음과 같이 제안하였다.

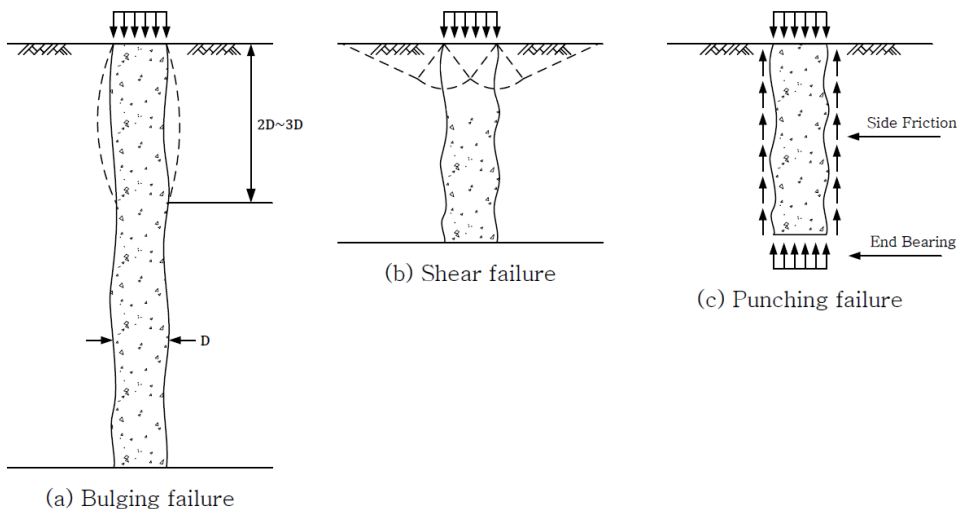


Fig. 1. Failure modes of stone column (Barkdale and Bachus, 1983)

Table 1. Ultimate bearing capacity formulas for SCP & GCP

Reference	Suggested formula	Pile type
Greenwood (1970)	$q_{ult} = (\gamma_c \cdot z \cdot K_{pc} + 2 \cdot s_u \cdot \sqrt{K_{pc}}) \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right)$	Single pile
Vesic(1972)	$q_{ult} = (s_u F'_c + q F'_q) \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right)$	
Hughes et al. (1975)	$q_{ult} = (4s_u + \sigma_{ro}') \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right)$	
Mitchell (1981)	$q_{ult} = s_u \cdot N_q$	Group pile
Barkdale and Bachus (1983)	$q_{ult} = \sigma_3 \cdot \tan^2(45^\circ + \frac{\phi_{avg}}{2}) + 2 \cdot s_{u,avg} \cdot \tan(45^\circ + \frac{\phi_{avg}}{2})$ $\phi_{avg} = \tan^{-1} \left[ \frac{n \cdot a_s}{1 + (n-1) \cdot a_s} \cdot \tan \phi_p \right]$ $s_{u,avg} = (1 - a_s) \cdot s_u$	
Madhav and Vitkar (1978)	$q_{ult} = s_u N_c + \frac{1}{2} \gamma_c B N_\gamma + D_f \gamma_c N_q$	

$q_{ult}$ : ultimate bearing capacity (kPa),  $\gamma_c$ : unit weight of clay (kN/m<sup>3</sup>),  $z$ : depth (m),  $s_u$ : undrained shear strength of clay (kPa),  $K_{pc}$ : passive earth pressure coefficient of cohesive soil,  $\phi_s$ : internal friction angle of sand pile (°),  $q$ : average stress for equivalent failure depth (kPa),  $F'_c$ ,  $F'_q$ : coefficient of cavity expansion for sand pile,  $\sigma'_{ro}$ : initial lateral stress (kPa),  $n$ : stress concentration ratio,  $\phi_{avg}$ : average internal friction angle (°),  $\phi_p$ : internal friction angle of gravel pile (°),  $s_{u,avg}$ : average undrained shear strength (kPa),  $a_s$ : replacement area ratio,  $B$ : width of foundation (m),  $D_f$ : depth of foundation (m),  $N_c, N_\gamma, N_q$ : bearing capacity factor

$$\ln(q_{ult}) = 4.756 + 0.013S_{rp} + 1.914a_s + 0.07d_f S_{rp} - 13.71\tau_{mp}^{-1} + 0.005\tau_{mp} \quad (3)$$

여기서,  $S_{rp}$ 는 말뚝의 세장비로 말뚝의 지름에 대한 길이의 비( $L_p/d_p$ )이며,  $a_s$ 는 GCP 치환율,  $d_f$ 는 근입깊이 (m),  $\tau_{mp}$ 는 GCP 치환율에 대한 비배수전단강도(kPa)의 비( $s_u/a_s$ )이다. 비록 제안된 회귀식은 기존 이론식에 비하여 현장재하시험에 대한 극한 지지력을 보다 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났지만, 다중회귀식을 구성하는 매개변수들에 대한 다양한 고려 및 평가는 이루어지지 않았으며 모델의 검증은 오직 1개의 독립적인 결과만을 통하여 이루어졌다. Bong and Kim(2017)은 다중회귀식의 올바른 검증을 위해서는 교차검증의 수행을 통하여 독립적인 데이터에 대한 오차를 평가할 필요가 있음을 강조하고, 보다 합리적인 다중회귀식 산정을 위하여 다양한 매개변수의 형태를 고려한 교차검증을 수행하였으며 식 (4)와 같이 수정된 극한 지지력 예측식을 제안하였다.

$$q_{ult} = -230.5 + 130.3 \sqrt{s_u} - 0.087s_u^2 + 12.55s_u a_s - 557.7 \frac{d_p}{L_p} \quad (4)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실내재하시험 데이터

본 연구에서는 실내재하시험에 따른 극한 지지력의 특성을 규명하기 위하여 기존 문헌으로부터 국내외에서 수행된 SCP 및 GCP 재하시험 34개(SCP 10개, GCP 24개)의 결과를 수집하고 시험조건 및 극한 지지력 결과를 분석하였으며 Table 2에 정리하였다.

#### 3.2 기존 이론식을 통한 극한 지지력 예측

기존 이론식을 통한 극한 지지력을 예측하기 위하여 외 말뚝의 경우 Stuedlein and Holtz(2013)에 의한 기존 이론식 평가를 바탕으로 가장 낮은 오차를 나타낸 Mitchell (1981) 방법( $N_p=20$ )을 사용하였으며, 무리말뚝의 경우 Barkdale and Bachus(1983) 방법( $n=3$ )을 사용하여 극한 지지력을 산정하였다. 또한, Stuedlein and Holtz(2013)에 의하여 제안된 수정된 Mitchell(1981) 방법 및 수정된 Hughes et al.(1975) 방법을 말뚝 타임을 구분하지 않고 모든 재하시험조건에 적용하여 극한 지지력을 산정하였다. 기존 이론식에 의한 극한 지지력과 관측된 극한

Table 2. Summary of load test database for laboratory load test

Load test designation	Pier	Footing shape	$B$ (cm)	$s_u$ (kPa)	$a_s$ (%)	$d_p$ (cm)	$L_p$ (cm)	Bearing capacity (kPa)	Reference
SS30	SCP	Circular	10.95	15.6	30	10.95	24	310	Kim et al. (2004)
SS40	SCP	Circular	12.65	15.7	40	12.65	24	480	
SS50	SCP	Circular	14.14	17.5	50	14.14	24	520	
SS60	SCP	Circular	15.49	17.5	60	15.49	24	550	
SS70	SCP	Circular	16.73	17.9	70	16.73	24	560	
GS30	GCP	Circular	10.95	15.3	30	10.95	24	410	
GS40	GCP	Circular	12.65	16.5	40	12.65	24	510	
GS50	GCP	Circular	14.14	17.1	50	14.14	24	750	
GS60	GCP	Circular	15.49	17.6	60	15.49	24	800	
GS70	GCP	Circular	16.73	17.5	70	16.73	24	830	
SG30	SCP	Square	6	18.1	30	2.2	15	60	Kim and Lee (2005)
SG40	SCP	Square	6	20.7	40	2.2	15	120	
SG50	SCP	Square	6	21.7	50	2.2	15	135	
GG30	GCP	Square	6	13.6	30	2.2	15	130	
GG40	GCP	Square	6	14.8	40	2.2	15	155	
GG50	GCP	Square	6	16.6	50	2.2	15	210	
GS8.7	GCP	Square	15	30	8.7	5	30	94.6	Kang and Kim (2004)
GS3.1	GCP	Square	25	30	3.1	5	30	101.5	
GS1.6	GCP	Square	35	30	1.6	5	30	111.3	
GS11.1	GCP	Circular	9	30	11.1	3	30	40.9	Kim and Kang (2004)
GS6.3	GCP	Circular	12	30	6.3	3	30	36.3	
GS4.0	GCP	Circular	15	30	4.0	3	30	34	
GG8.7	GCP	Square	27	30	8.7	3	30	35.5	
GG8.7	GCP	Square	27	30	8.7	3	30	30.2	
CS1	GCP	Circular	7.2	6	17.4	3	28	30.1	Malarvizhi and Ilamparuth (2004)
CS2	GCP	Circular	7.2	6	17.4	3	22.5	21.4	
CS3	GCP	Circular	7.2	6	17.4	3	15	19	
FSC3	GCP	Square	25	15.3	0.094	5	30	76.4	Fattah et al. (2017)
FSC4	GCP	Square	25	12.5	0.126	5	30	71.9	
FSC5	GCP	Square	37.5	13.5	0.07	5	30	58.4	
FSC6	GCP	Rectangular	25×37.5	15.5	0.126	5	30	69.8	
FSC2	GCP	Rectangular	12.5×25	17	0.126	5	30	81.4	
SC15	SCP	Circular	10	8	0.81	9	15	56.4	George and Hari (2016)
SC30	SCP	Circular	10	8	0.81	9	30	112	

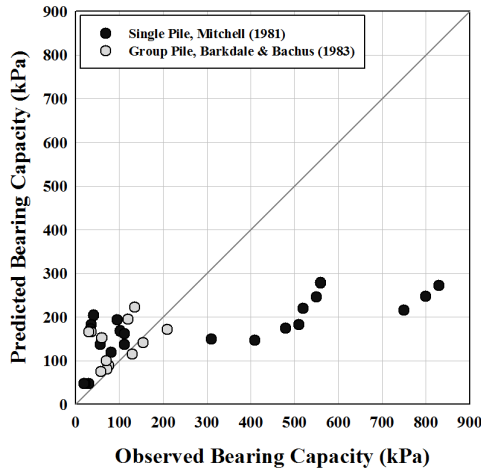
지지력의 비교는 Fig. 2에 나타내었으며, 이에 대한 오차평가 결과를 Table 3에 정리하였다.

기존 이론식을 통하여 극한 지지력을 산정한 경우, SCP는 200kPa 이상의 평균절대값오차(mean absolute error, MAE)를 갖으며 예측 변동성 또한 높게 나타났다. GCP의 경우 MAE는 약 55kPa로 SCP의 극한 지지력 예측에 비해서는 낮은 오차를 나타내었지만 이것은 관측된 무리말뚝의 극한 지지력 범위가 낮기 때문이며, 편향은 1.966으로 더 큰 편차를 갖는 것으로 나타내었다. Stuedlein and Holtz(2013)에 의하여 수정된 기존 이론식을 적용한 경

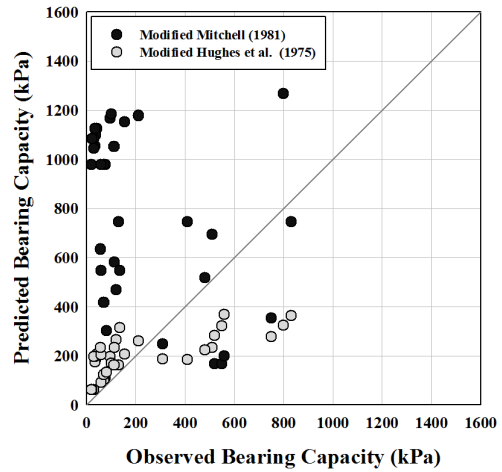
우, 수정된 Mitchell(1981) 방법에 의한 예측은 655kPa의 매우 큰 MAE를 갖으며 평균적인 예측 극한 지지력은 13배 정도 크게 산정되는 것으로 나타났다. 또한, 결정계수 및 예측 변동성은 0.16과 113%로 예측된 극한 지지력과 관측된 극한 지지력 사이에는 유의미한 상관관계가 없으며 매우 큰 예측 변동성을 갖는 것으로 나타났다. 수정된 Hughes et al.(1975) 방법은 수정된 Mitchell(1981) 방법에 비해서는 낮은 MAE 및 편향을 갖는 것으로 나타났지만 여전히 높은 오차 및 예측 변동성을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 기존 이론식을 통하여 실

Table 3. Error evaluation of theoretical models

Method	Pile	MAE (kPa)	$R^2$	Bias, $\lambda$	
				Mean	COV (%)
Mitchell (1981), Barkdale and Bachus (1983)	SCP	202.9	0.52	1.606	98.0
	GCP	54.7	0.11	1.966	78.5
	SCP+GCP	150.6	0.46	1.733	89.4
Modified Mitchell	SCP+GCP	655.4	0.16	12.974	113.1
Modified Hughes	SCP+GCP	152.2	0.52	2.104	80.9



(a) Existing theoretical models



(b) Modified theoretical models

Fig. 2. Comparison of predicted and observed ultimate bearing capacity by theoretical models

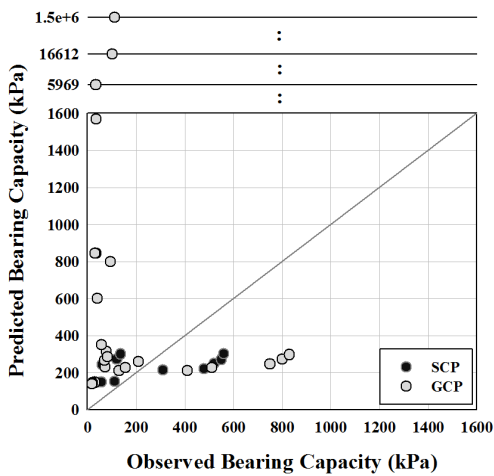
내재하시험에 대한 극한 지지력을 예측하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 기존 다중선형회귀식을 통한 극한 지지력 예측

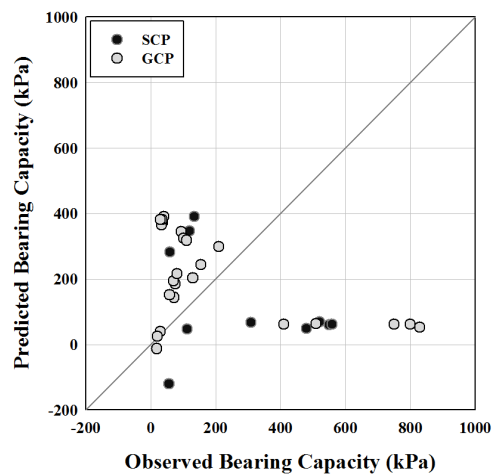
실내재하시험 조건에 대하여 Stuedlein and Holtz(2013)와 Bong and Kim(2017)에 의해 제안된 현장재하시험

기반의 다중선형회귀식을 적용하여 극한 지지력을 예측하였다. 각 회귀식에 따라 예측된 극한 지지력과 관측된 극한 지지력과의 비교는 Fig. 3에 나타내었으며, 이에 따른 오차를 Table 4에 정리하였다.

제안된 두 회귀식에 의하여 산정된 극한 지지력은 SCP와 GCP에 관계없이 관측된 극한 지지력과 매우 큰 차이를 갖으며, 결정계수( $R^2$ ) 값은 매우 작아 유의미한 상관



(a) Stuedlein and Holtz (2013)



(b) Bong and Kim (2017)

Fig. 3. Comparison of predicted and observed ultimate bearing capacity by previously proposed regression equations

Table 4. Error evaluation of previously proposed MLRs

Method	Pile	MAE (kPa)	$R^2$	Bias, $\lambda$	
				Mean	COV (%)
Stuedlein and Holtz (2013)	SCP	179.6	0.17	1.513	81.2
	GCP	64481.1	0.00	588.91	471.8
	SCP+GCP	45568.9	0.01	416.2	561.2
Bong and Kim (2017)	SCP	306.0	0.12	0.942	208.6
	GCP	259.0	0.24	3.454	116.8
	SCP+GCP	272.8	0.22	2.72	136.6

관계가 없는 것으로 나타났다. 특히, Stuedlein and Holtz (2013)에 의하여 제안된 회귀식의 경우 특정 GCP 시험 조건들에 대한 예측 지지력은 매우 큰 값이 발생하는 것으로 나타났다. 실내재하시험의 경우 현장조건에 비하여 매우 작은 크기로 축소하여 수행되기 때문에 크기 영향을 갖게 되며, 실험장비에 따라 경계구속에 따른 경계 영향을 갖게 된다. 따라서 실내재하시험의 시험조건에 따른 극한 지지력 특성은 현장재하시험과는 다른 경향을 보일 것으로 판단되며, 실제 현장재하시험을 기반으로 제안된 다중선형회귀식을 통해서도 실내재하시험에 따른 극한 지지력의 예측이 불가능한 것으로 나타났다.

### 3.4 다중회귀분석을 통한 극한 지지력 예측

실내재하시험에 대한 극한 지지력의 다중회귀식을 산정하기 위하여 Table 2에 정리된 데이터베이스를 기초로 Bong and Kim(2017)에 의하여 수행된 방법과 동일하게 다양한 입력변수의 형태를 고려한 다중회귀분석을 수행하였으며, 23개 입력변수의 형태는 Table 5에 정리하였다.

다중회귀식의 입력변수의 수는 3, 4, 5개로 설정하였으며, 이에 따른 23개 입력변수들에 대한 입력변수의 조합은 각각 1,771개( ${}_{23}C_3$ ), 8,855개( ${}_{23}C_4$ ), 33,649개( ${}_{23}C_5$ )이다. 여기서 다중회귀분석에 사용된 각 입력변수의 단위는  $s_u$  (kPa),  $a_s$  (ratio),  $d_p$  (cm),  $L_p$  (cm) 이다. 앞에서 언급한 바와 같이, SCP와 GCP는 재료적 차이가 있을 뿐 공법의 원리는 동일하므로 두 재하시험결과를 구분하

지 않고 모두 고려하여 다중회귀분석을 수행한 경우와 SCP와 GCP를 나누어 각각 다중회귀분석을 수행한 경우를 모두 고려하였다.

#### 3.4.1 SCP와 GCP에 대한 극한 지지력 예측

SCP와 GCP에 대한 실내재하시험결과 34개를 모두 고려하여 다중회귀분석을 수행하였으며, 단일잔류(leave one out) 교차검증 수행을 통하여 예측오차를 평가하였다. 단일잔류 교차검증은 1개의 샘플을 제외한 나머지 데이터를 통하여 예측식을 생성한 뒤, 제외된 1개의 샘플을 적용하여 오차를 평가하는 기법(Stone, 1974)으로 모든 데이터에 대하여 동일한 방법으로 독립적인 오차를 추정할 수 있음에 따라 보다 신뢰도 있는 예측오차 평가가 가능하다. 교차검증을 고려한 최적의 입력변수 조합을 선정하기 위하여 입력변수의 수에 따른 모든 경우의 수에 대한 입력변수 조합을 생성하고 이에 대한 다중회귀식의 교차검증을 수행하였다. 합리적인 예측식의 선정은 MAE와 같은 척도를 통하여 평균적인 오차를 최소화할 수 있는 예측식을 선정할 수 있다. 하지만 MAE만을 고려하여 예측식을 선정할 경우 오차의 평균적인 크기만을 고려하게 되므로 낮은 값을 갖는 예측결과에 대해서는 정확도가 다소 떨어질 수 있다. 따라서 보다 합리적인 예측식을 선정하기 위하여 우선적으로 가장 작은 MAE를 보이는 입력변수 조합을 선정하고 관측값에 대한 예측값의 비율(편향,  $\lambda$ )과 이에 따른 변동계수(coefficient of variation, COV)를 추가적으로 고려하여 예측식을 선정하였다. 입력변수의 수에 따라 선

Table 5. Types of input variables for MLR

Variable	$s_u$	$a_s$	$s_u a_s$	Other condition
Input parameter	$s_u, s_u^2, \frac{1}{s_u}, \sqrt{s_u}, \ln(s_u)$	$a_s, a_s^2, \frac{1}{a_s}, \sqrt{a_s}, \ln(a_s), \exp(a_s)$	$s_u a_s, \frac{1}{s_u a_s}, \frac{s_u}{a_s}, \frac{a_s}{s_u}$	$d_p, d_p^2, \sqrt{d_p}, L_p, L_p^2, \sqrt{L_p}, L_p/d_p, d_p/L_p$

정된 입력변수의 조합에 대한 단일잔류 교차검증 오차 평가 결과는 Table 6에 정리하였으며, 이에 따라 관측된 극한 지지력과 교차검증에 따라 예측된 극한 지지력의 비교를 Fig. 4에 나타내었다.

분석결과 입력변수의 수를 증가함에 따라 MAE는 감소하며 편향은 1에 가까운 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 일부 재하시험에 대해서는 다소 큰 오차를 갖는 것으로 나타났으며, 5개의 입력변수를 활용하더라도 약 170kPa까지 큰 오차가 발생하였다. 이는 비

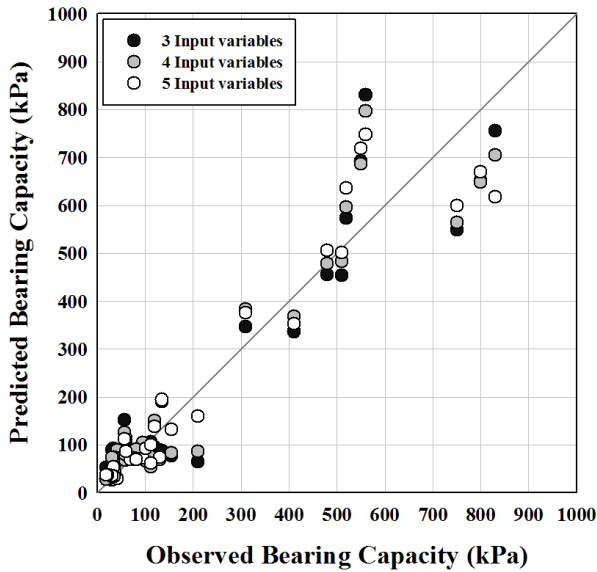


Fig. 4. Comparison of predicted and observed ultimate bearing capacity in cross validation for SCP+GCP

Table 6. Error evaluation according to input variables through cross validation for SCP+GCP

Number of input variable	Input variables	MAE (kPa)	$R^2$	Bias, $\lambda$	
				Mean	COV (%)
3	$\frac{a_s}{s_u}, d_p, \sqrt{d_p}$	59.4	0.88	0.990	57.6
4	$a_s^2, s_u a_s, d_p, \sqrt{d_p}$	55.5	0.90	1.017	47.5
5	$a_s, a_s^2, \exp(a_s), d_p, \sqrt{d_p}$	47.9	0.91	1.007	31.3

Table 7. Error evaluation according to input variables through cross validation for SCP

Number of input variable	Input variables	MAE (kPa)	$R^2$	Bias, $\lambda$	
				Mean	COV (%)
3	$\sqrt{s_u}, \frac{L_p}{d_p}, \sqrt{d_p}$	26.2	0.97	0.983	14.7
4	$\frac{1}{s_u a_s}, \exp(a_s), \frac{L_p}{d_p}, \sqrt{d_p}$	16.2	0.99	1.052	15.1
5	$\frac{1}{a_s}, s_u^2, \frac{a_s}{s_u}, d_p, L_p$	7.0	1.00	1.011	6.8

록 SCP와 GCP가 같은 원리에 의한 공법이지만 재료의 강도특성이 다르기 때문인 것으로 판단되며, 일반적으로 동일한 시험조건에 대해서 SCP에 비해 GCP에 의하여 개량된 지반이 더 낮은 침하량 및 높은 극한 지지력을 갖는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2004, 2013; Kim and Lee, 2005). 따라서 보다 합리적인 극한 지지력 예측식 산정을 위해서는 두 공법을 구분하여 각각의 예측식을 산정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 3.4.2 SCP에 대한 극한 지지력 예측

SCP에 대한 10개의 실내재하시험 결과를 통한 단일 잔류 교차검증 결과는 Table 7에 정리하였다. Table 7에서 보는 것처럼 단일잔류 교차검증에 따른 다중회귀식에 대한 MAE는 입력변수의 수가 증가함에 따라 효과적으로 감소하였으며, 5개의 입력변수를 사용할 경우 가장 낮은 MAE를 보였으며, 편향에 대한 통계량 또한 가장 좋은 결과를 나타내었다. 이에 따라 SCP로 보강된 지반의 극한 지지력 예측을 위한 다중회귀식은 최종적으로 선정된 5개의 입력변수를 고려하였으며, 10개의 SCP 재하시험 데이터를 활용한 최종적인 다중회귀식( $q_{ult, SCP}$ , kPa)을 다음과 같이 산정하였다.

$$q_{ult, SCP} = 1523.8 - 1.39s_u^2 - 267.8\frac{1}{a_s} - 12238\frac{a_s}{s_u} + 15.1d_p + 3.7L_p \quad (5)$$



식 (5)를 이용하여 SCP 재하시험에 대한 단일잔류 교차검증 결과 및 최종 다중회귀식을 통하여 산정된 극한 지지력과 관측된 극한 지지력의 비교는 Fig. 5와 같다.

최종적인 다중회귀식을 통한 MAE는 2.9kPa로 매우 작은 오차를 나타내었으며, 편향은 1.000(COV=3.0%)이며, 매우 높은 예측 정확도를 갖는 것으로 나타났다.

### 3.4.3 GCP에 대한 극한 지지력 예측

GCP에 대한 24개의 실내재하시험 결과를 통한 단일 잔류 교차검증 결과는 Table 8에 정리하였다.

단일잔류 교차검증에 따른 다중회귀식에 대한 MAE는 입력변수의 수가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 입력변수 4개와 5개에 따른 MAE 및 편향은 거의 차이가 발생하지 않았으며 4개의 동일한 입력변수를 포함하였다. 따라서 효율적인 극한 지지력 예측식 선정을 위하여 4개의 입력변수를 고려하였으며, 24개의 GCP 재하시험 데이터를 활용한 최종적인 다중

회귀식( $q_{ult, GCP}$ , kPa)을 다음과 같이 산정하였다.

$$q_{ult, GCP} = 11.4 - 2414 \frac{1}{s_u} + 12814 \frac{a_s}{s_u} - 174.3 \sqrt{a_s} + 38.4d_p \quad (6)$$

식 (6)에 의해 GCP 재하시험에 대한 단일잔류 교차검증 결과 및 최종 다중회귀식을 통하여 산정된 극한 지지력과 관측된 극한 지지력의 비교는 Fig. 6과 같다.

최종적인 다중회귀식을 통한 MAE는 16.0kPa로 교차검증에 따른 결과와 비교하여 4.8kPa 낮은 오차를 나타내었으며, 편향 및 편향의 변동계수는 0.995과 14.4%로 낮은 변동성을 갖는 것으로 나타나 극한 지지력을 효과적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

결론적으로 실내재하시험에 대한 극한 지지력을 예측하기 위하여 SCP와 GCP에 대한 다중선형회귀식을 각각 산정하였으며, 이에 따른 단일잔류 교차검증 결과 및 최종적인 극한 지지력 예측식의 성능을 Table 9에

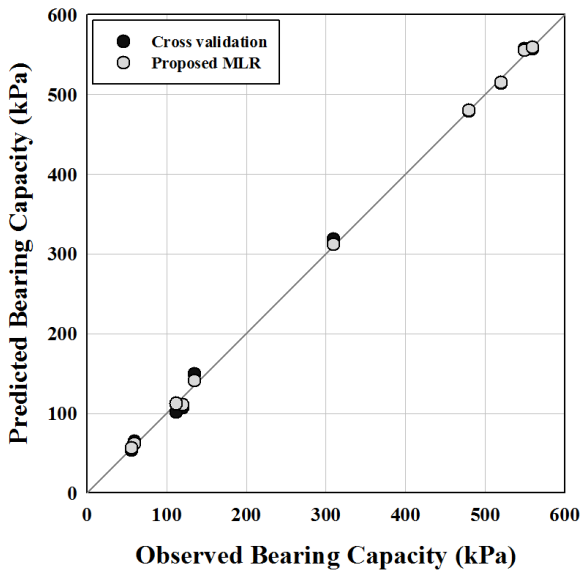


Fig. 5. Comparison of predicted and observed ultimate bearing capacity for SCP

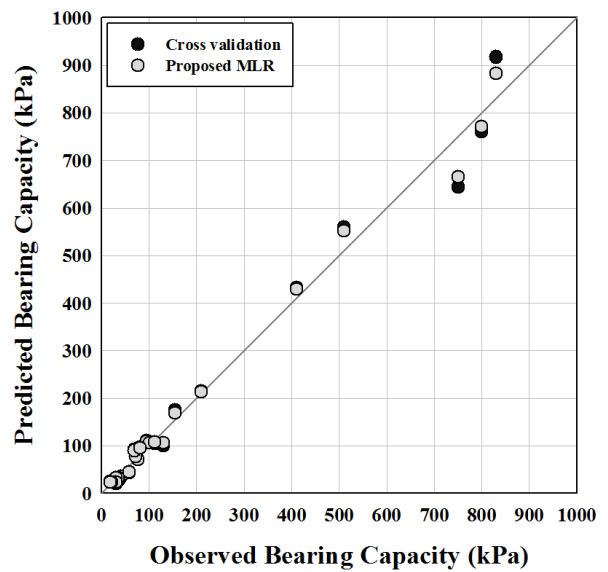


Fig. 6. Comparison of predicted and observed ultimate bearing capacity for GCP

Table 8. Error evaluation according to input variables through cross validation for GCP

Number of input variable	Input variables	MAE (kPa)	$R^2$	Bias, $\lambda$	
				Mean	COV (%)
3	$s_u, a_s, d_p$	24.4	0.98	1.077	37.0
4	$\frac{1}{s_u}, \frac{a_s}{s_u}, \sqrt{a_s}, d_p$	20.8	0.98	1.040	19.0
5	$\frac{1}{s_u}, \frac{a_s}{s_u}, \sqrt{a_s}, d_p, \sqrt{d_p}$	20.5	0.98	1.041	18.9

Table 9. Performance evaluation of Proposed MLR

Pier method	Data	MAE (kPa)	$R^2$	Bias, $\lambda$	
				Mean	COV (%)
Sand Compaction Pile	Leave-one-out Cross validation	7.0	1.00	1.011	6.8
	All load test data	2.9	1.00	1.000	3.0
Gravel Compaction Pile	Leave-one-out Cross validation	20.8	0.98	1.040	19.0
	All load test data	16.0	0.99	0.995	14.4

정리하였다.

본 연구를 통하여 제안된 두 다중회귀식 모두 교차검증 결과에 따라 독립된 데이터에 대한 예측성능도 높게 나타나 극한 지지력을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 회귀분석의 특성 상 임의의 실내재하시험조건이 본 연구에서 사용된 재하시험데이터(Table 2)의 조건 범위에 있지 않는 경우 재하시험에 대한 회귀식의 적용은 주의가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 실내재하시험에 따른 극한 지지력을 분석하고자 국내외에서 수행된 34개의 실내재하시험 결과를 수집하고, 기존에 제안된 이론식 및 다중회귀식을 적용하여 오차 및 적용성을 평가하였다. 또한, SCP 또는 GCP 공법이 적용된 지반의 극한 지지력을 예측하기 위하여 단일잔류 교차검증을 수행하였으며 최종적으로 SCP와 GCP에 대한 실내재하시험에 따른 극한 지지력을 합리적으로 고려할 수 있는 다중회귀식을 산정하였다. 이에 따른 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실내재하시험의 시험조건에 대해 기존 이론식 및 현장재하시험 기반으로 제안된 다중회귀식을 적용하여 극한 지지력을 예측한 결과, 관측된 극한 지지력과 매우 큰 차이가 발생하였으며 두 극한 지지력 사이에 유의미한 상관관계를 보이지 않는 것으로 나타났다. 따라서 실내재하시험의 극한 지지력 예측에 대한 기존 이론식 및 다중회귀식의 적용은 불가능한 것으로 나타났으며, 이는 실내재하시험 경우 크기영향 및 경계영향 등을 가짐에 따라 현장재하시험과는 다른 특성을 갖기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) SCP와 GCP에 대한 실내재하시험의 극한 지지력 예측식을 선정하기 위해 고려된 입력변수의 수는 3,

4, 5개이며, 효율적인 입력변수 형태를 선정하기 위하여 4가지 시험조건 ( $s_u, a_s, d_p, L_p$ )에 대한 23개의 입력변수 형태를 고려하였다. 각 입력변수의 조합에 따른 오차는 단일잔류 교차검증을 통하여 평가하였으며 이에 따라 가장 합리적인 입력변수의 조합을 선정하였다.

- (3) SCP와 GCP를 구분하지 않고 모두 고려하여 교차검증을 수행한 결과, 5개의 입력변수를 고려하더라도 MAE는 약 48kPa로 다소 높게 나타났으며, 특히 높은 극한 지지력 범위에서는 170kPa까지 큰 오차가 발생하였다. 따라서 보다 합리적인 극한 지지력 예측식을 산정하기 위해서는 두 공법을 구분하여 각각의 예측식을 산정할 필요가 있는 것으로 나타났다.
- (4) 단일잔류 교차검증 결과, SCP와 GCP에 대한 다중회귀식의 입력변수의 수는 각각 5개( $1/a_s, s_u^2, a_s/s_u, d_p, L_p$ )와 4개( $1/s_u, a_s/s_u, \sqrt{a_s}, d_p$ )의 입력변수를 사용할 경우 합리적인 극한 지지력의 예측이 가능한 것으로 나타났으며, 이에 따른 최종적인 다중회귀식을 제안하였다. SCP에 대한 다중회귀식의 MAE 및 평균편향은 각각 2.9kPa와 1.000로 정확한 극한 지지력 예측이 가능한 것으로 나타났으며, GCP에 대한 다중회귀식의 MAE 및 평균편향은 각각 16.0kPa와 0.995로 나타나 극한 지지력을 효과적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.
- (5) 임의의 실내재하시험에 대하여 시험조건이 본 연구에서 사용된 재하시험데이터 범위 안에 있을 경우 신뢰성 있는 예측결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 향후 실내재하시험 데이터의 추가를 통하여 다중회귀식의 적용범위를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업 “Tech-lead형 액상화 피해 예측 가시화 시스템 및 고효율·저비용 액상화 보강공법 개발” 과제의 지원으로 작성되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Balaam, N. P., Poulos, H. G., and Brown, P. T. (1978), “Settlement Analysis of Soft Clays Reinforced with Granular Piles”, *Proc., 5th Asian Conf. on Soil Engineering*, Bangkok, Thailand, pp.81-92.
2. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983), Design and construction of stone columns, Rep. No. FHWA/RD 83/026, Federal Highway Administration, Washington, DC.
3. Bergado, D. T. and Lam, F. L. (1987), “Full Scale Load Test of Granular Piles with Different Densities and Different Proportions of Gravel and Sand in the Soft Bangkok Clay”, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.1, pp.86-93.
4. Bong, T. H. and Kim, B. I. (2017), “Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Soft Soils Reinforced by Gravel Compaction Pile Using Multiple Regression Analysis and Artificial Neural Network”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.6, pp.27-36.
5. Brauns, J. (1978), “Initial Bearing Capacity of Stone Columns and Sand Piles”, Vol. I, *Proc. Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practice*, New South Wales Institute of Technology, Sydney, Australia, pp.497-512.
6. Choi, Y. K. (2007), “A Study of Field Test on Bearing Capacity Increase Effect of Single Stone Column”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.12, pp.5-11.
7. Fattah, M. Y., Al-Neami, M. A., and Al-Suhaily, A. S. (2017), “Estimation of Bearing Capacity of Floating Group of Stone Columns”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol.20, pp.1166-1172.
8. George, T. and Hari, G. (2016), “Bearing Capacity Effect of Soft Clay with Sand Compaction Piles”, *International Journal of Science and Research*, Vol.5, No.4, pp.1132-1135.
9. Greenwood, D. A. (1970), “Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface”, *Proc. Ground Engineering Conference*, Institute of Civil Engineering, pp.9-20.
10. Hansbo, S. (1994), *Foundation Engineering, Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier Press, Vol.95, pp.450-455.
11. Hughes, J. M. O., Withers, N. J., and Greenwood, D. A. (1975), “A Field Trial of the Reinforcing Effect of a Stone Column in Soil”, *Geotechnique*, Vol.25, No.1, pp.31-44.
12. Kang, Y. and Kim, H. T. (2004), “Analysis of Bearing Capacity Characteristics on Granular Compaction Pile – focusing on the Model Test Results”, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.5, No.2, pp.51-62.
13. Kim, B. I. and Lee, S. H. (2005), “Comparison of Bearing Capacity Characteristics of Sand and Gravel Compaction Pile Treated Ground”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.9, No.3, pp.197-203.
14. Kim, B. I., Cho, S. M., Kim, J. H., and Kim, S. R. (2015), *Soft Ground Improvement Method*, CIR Publishing Co. pp.239-283.
15. Kim, B. I., Lee, S. W., Kim, B. S., and Lyu, W. K. (2004), “Comparison of Bearing Capacity between SCP and GCP by Unit Cell Model Tests”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.8, pp.41-48.
16. Kim, B. I., Yoo, W. K., Kim, K. U., and Moon, I. J. (2013), “An Experimental Study on the Behavior of Composite Ground Improved by SCP and GCP with Low Replacement Ratio”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.14, No.2, pp.936-942.
17. Kim, H. T. and Kang, Y. (2004), “Analysis of Load-Settlement Behavior Characteristics of Granular Compaction Pile from the Model Tests”, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.5, No.4, pp.33-45.
18. Kim, M. S., Na, S. J., Yang, Y. H., and Kim, D. (2016), “Analysis on the Analytical Behavior of Soft Ground Reinforced with Granular Compaction Piles”, *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.15, No.3, pp.37-50.
19. Kitazume, M. (2005), *The Sand Compaction Pile Method*, Balkema, pp.1-7.
20. Madhav, M. R. and Vitkar, P. P. (1978), “Strip Footing on Weak Clay Stabilized with a Granular Trench or Pile”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.4, pp.605-609.
21. Malarvizhi, S. N. and Ilamparuthi, K. (2004), “Load Versus Settlement of Claybed Stabilized with Stone & Reinforced Stone Columns”, *Proc. 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*, GEOASIA, Seoul, pp.322-329.
22. Mitchell, J. K. (1981), “Soil Improvement – State-of-the-art Report”, *Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Session 12, Int. Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol.4, pp.506-565.
23. Mitchell, J. K. and Huber, T. R. (1985), “Performance of a Stone Column Foundation”, *J. Geotech. Engrg.*, Vol.111, No.2, pp.205-223.
24. Na, S. J., Kim, D., and Kim, G. E. (2017), “The Behavior on Stress and Settlement of GCP Composite Ground with Different Shear Strength of Soil”, *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.16, No.3, pp.63-74.
25. Najjar, S. S. (2013), “A State-of-the-Art Review of Stone/Sand-Column Reinforced Clay System”, *Geotechnical and Geological Engineering An International Journal*, Vol.31, No.2, pp.355-386.
26. Stone, M. (1974), “Cross-validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions”, *J. Roy. Statist. Soc. Ser. B*, Vol.36, pp.111-147.
27. Stuedlein, A. W. and Holtz, R. D. (2013), “Bearing Capacity of Spread Footings on Aggregate Pier Reinforced Clay”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.139, No.1, pp.49-58.
28. Vesic, A. S. (1972), “Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass”, *J. Soil Mech. and Found. Div.*, Vol.98, No.3, pp.265-290.

Received : April 19<sup>th</sup>, 2018

Revised : May 19<sup>th</sup>, 2018

Accepted : May 31<sup>st</sup>, 2018