

변위억제형 Sheet pile 설치에 따른 SCP복합지반의 지지력 특성

박 병 수*

* 강원대학교 토목공학과

Characteristics of Bearing Capacity for SCP Composite Ground reinforced by the Sheet piles Restraining Deformation

Byung-Soo Park*

*Kangwon National University, Kangwon 200-701, Korea

요 약 : 본 연구는 변위억제형 Sheet pile 이 설치된 SCP복합지반의 지지력 특성에 대한 연구로서 원심모형실험과 수치해석을 통하여 SCP 복합지반의 하중-침하 관계, 응력분담특성, 최종함수비 등의 변화에 대해 알아보았다. SCP를 기초폭의 2배로 개량한 조건과 Sheet pile를 기초 한쪽 모서리에 설치한 경우, Sheet pile를 기초 양쪽 모서리에 설치한 경우 3가지에 대하여 연직하중재하 실험을 실시하였다. 한편, 원심모형실험 결과를 모사하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 CRISP을 이용하였으며 수치해석시 모래다짐말뚝은 탄소성모델로 점토지반은 한계평형 상태에 기초한 수정 Cam-clay 모델을 사용하였다. 원심모형실험결과 Sheet pile이 기초과피활동을 억지하여 항복하중강도가 증가하였으며 Sheet pile 설치에 따른 응력분담비는 2~4의 값을 나타내었다. 또한 수치해석결과 Sheet pile설치에 따라 지반용기량이 20~30%감소하였고 수평변위는 28~43% 감소효과를 나타내었다.

핵심용어 : 변위억제형 Sheet pile, SCP 복합지반, 원심모형실험, 하중-침하관계, 응력분담비

Abstract : A series of geotechnical centrifuge model tests and numerical modelling have been performed to study engineering characteristics of the composite ground reinforced by both the Sand Compaction Piles (SCPs) and the deformation-reducing sheet piles. The research has covered several key issues such as the load-settlement relation, the stress concentration ratio and the final water content of the ground. Totally three centrifuge tests have been conducted by changing configuration of the sheet piles, i.e., a test without the sheet pile, a test with the sheet pile at a single side and a test with the sheet piles at the both sides. In the model tests, a vertical load was applied in-flight on the ground surface. On the other hand, class-C type numerical modelling has been performed by using the SAGE-CRISP to compare the centrifuge test results using an elasto-plastic model for SCPs and the Modified Cam Clay model for the soft clay. It has been found that the sheet piles can restraint failure of foundation, thereby increasing yield stress of the ground. The stress concentration ratio was in the range of 2~4. In addition, numerical analysis results showed reductions both in the ground heave (20~30%) and in the horizontal movement (28~43%), demonstrating the deformation-reducing effect of the sheet piles.

Key words : Sheet pile restraining deformation, SCPs composite ground, Centrifuge model test, Load-settlement relation, Stress concentration ratio

1. 서 론

최근 지진시 관성력, 파도에 의한 파압, 지진시 관성력, 토압 등 큰 수평력을 받는 항만구조물을 축조하기 위해 연약지반을 SCP공법(Sand Compaction Pile)으로 개량하려는 설계 및 시공이 활발하게 진행되고 있다.

이러한 SCP공법은 바이브로 햄머로 케이싱 파일을 지중에 관입하여 케이싱 파일을 통하여 모래를 공급하므로써 큰 지름을 가진 다짐 모래말뚝을 지중에 조성하여 지반을 개량하는 공법이다.

우리나라는 경제성장과 국토개발로 인하여 제한된 가용면적의 확대에 따라 개량대상지역으로 점차 연약지반이 증가하는 추세에 있고 항만 인프라가 대규모화됨에 따라 항만구조물

이 중량화하여 점성토의 강도증가, 시공기간의 단축화 등을 위한 개량공법이 요구되며 이에 따라 SCP 공법의 적용범위도 확대되고 있다. 그러나 최근 SCP에 사용되는 양질의 모래부족과 모래값의 상승으로 인하여 SCP공법 적용시 모래 대체재료 및 대체공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

SCP공법은 일본을 중심으로 다양한 연구가 수행되어 오고 있으며 일본의 Murayama(1957)가 SCP란 용어를 처음 사용한 이래 SCP로 개량된 복합지반의 특성에 대한 이론적 연구와 실험을 통한 연구 및 해석적 연구 등 많은 성과가 발표되고 있다.

Masaki와 Kiyoharu(1993)는 SCP개량 지반의 변형, 파괴거동 및 거동에 영향을 미치는 개량폭, Sheet pile wall의 강성 등의 영향에 관한 실내 원심모형실험을 실시하여 수평하중을

* 대표저자 : 박병수(정회원), geo-group@hanmail.net, 011-477-7214

받는 모래말뚝은 전체적으로 변형은 발생하나 전단파괴는 발생하지 않았다는 연구 결과를 발표하였다. 또한, Yagi 등(1983)은 수평저항에 관하여 전단시험을 수행하여 수평저항에 관하여 전단파괴거동을 검토하였고, Yabushita 등(1976)은 2차원 해석의 대상지반의 거동을 토층실험을 통하여 토압식을 제안하였다. 국내에서도 SCP공법에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔으나 최근에 김병일 등(2000)은 수치해석을 통하여 치환율에 따른 응력분담비의 변화를 알아보았다. 김재권 등(2002)은 실내모형실험을 통하여 치환율에 따라 응력분담비가 증가하는 것을 규명하였으며 홍의준 등(2003)은 복합지반에 대한 3차원 수치해석을 통하여 치환율이 증가함에 따라 응력분담비가 증가하고 침하량은 감소하는 것을 발표하였다. 또한 유남재 등(2005)은 개량폭비를 변화시킨 원심모형실험을 통하여 개량폭비가 2일때 최대개량효과를 얻을 수 있다고 발표하였다.

한편, 대부분 종래의 실험방법은 축소된 소규모 모형을 제작하여 실내실험을 수행하고 그 결과를 분석하는 방법이 주로 이용되어 왔다. 그러나, 이와 같은 축소된 모형실험에서는 토립자의 자중에 의한 응력(Body force)의 효과가 무시되거나 상사법칙(Similarity rule)이 고려되지 않는 상태에서 실험이 수행되기 때문에 그 결과의 신뢰도 또는 실물 구조물에 대한 적용성에 대하여 의문이 제기되고 있다. 이것은 근본적으로 흙의 역학적 거동이 응력수준(Stress level)에 의하여 지배되기 때문에 현장 구조물에서 발생하는 큰 초기 응력 상태와 실험실 내에서 소규모 모형에서 발휘하는 작은 응력 상태의 차이에 기인한다. 원심모형실험 방법에서는 실내에서 축소된 모형을 사용하여 인위적으로 모형을 가속시킴에 따라 토립자의 자중을 증가시킴으로써 현장상태의 응력을 재현시키고, 축척감소에 따른 압밀 시간을 단축시킬 수 있는 경제적으로 실험을 수행할 수 있는 효율적인 시험기법으로 알려져 있으며 현재 국외에서는 대부분의 모형실험이 원심모형실험 내지는 현장원형실험을 수행하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 해안구조물 축조를 위하여 변위억제형 Sheet pile을 SCP복합지반에 설치한 원심모형실험을 실시하여 하중-침하 관계, 토압 및 응력분담특성, 최종합수비 분포 등 Sheet pile 설치에 따른 SCP복합지반의 거동에 대해 알아보하고자 하였다.

2. 원심모형시험기의 원리

2.1 기본원리

원심모형실험의 기본원리는 축소된 모형을 인위적으로 증가시킨 자중효과로 상쇄시킴으로써 힘의 평형관계를 유지하는데 있다. Fig. 1에 보인 바와 같이 2차원 평면변형상태의 임의의 요소에 작용하는 힘의 평형식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0 \quad (2)$$

여기서, X, Y는 X, Y방향의 자중이다.

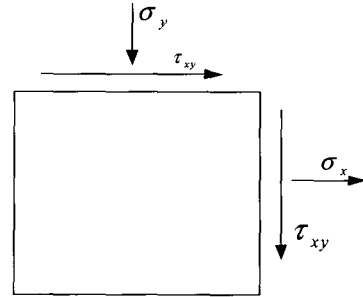


Fig. 1 A force equilibrium diagram

이와 같은 평형식에서 원심모형실험에서는 1/N의 축소된 모형을 사용하고 흙의 자중을 N배 가속시킴으로서 평형관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial (y/N)} + N \cdot X = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial (y/N)} + N \cdot Y = 0 \quad (4)$$

위와 같은 관계식에서 N값은 서로 상쇄되어 일반적인 힘의 평형방정식과 동일하게 된다. 따라서, 원심모형실험에서는 축소된 모형으로 흙의 자중을 인위적으로 증가시키어 현장 원형 구조물의 초기 응력 상태를 재현시키고 어떠한 형태의 경계조건에서 응력이 가하여져도 기본적인 힘의 평형 관계식을 만족시킴으로써 원심모형실험에서 현장과 동일한 재질의 시료를 사용하여 시험을 수행하면 현장 구조물과 같은 응력-변형 거동을 원심모형실험에서 재현시킬 수 있다.

Fig. 2에 중력수준의 증가에 따라 흙의 자중을 인위적으로 증가시키는 원심모형실험의 원리를 나타내었다.

2.2 원심모형시험기의 구성

본 연구에 사용된 원심모형시험기는 강원대학교에 설치된 시험기로 Fig. 3과 Table 1에 나타난 바와 같이 용량은 20g·ton이며 시험가능한 모형 토조의 크기는 500×500×600mm이고, 원심모형기의 중심축으로부터 Hinge까지의 거리가 1m, Swing basket의 저면까지 거리는 1.35m이다.

원심모형시험기의 내·외부 사이의 전기적 신호를 상호 연결시키기 위하여 Slip ring을 사용하였고 Slip ring은 총 40개의 Channel로 구성되어 있으며 Conditioner의 구동 및 Video camera의 전원을 공급하는 Slip ring을 분리 설치하였으며, 2개의 유압식 Slip ring은 원심모형시험기의 하단에 설치하였다. 또한 실험과정 통제 및 기록을 위하여 실험과정중 외부에서 Zoom기능과 위치조절기능을 갖춘 폐쇄회로(CCTV)와 35mm

SLR camera가 원심모형시험기의 중심 축 좌우에 설치되어 45° 각도로 설치된 반사경을 통해 실험과정을 Monitoring할 수 있으며, CCTV의 경우 Slip ring을 통해 외부에 비치된 VTR과 TV와 연결되어 있어 실험과정을 녹화할 수 있다.

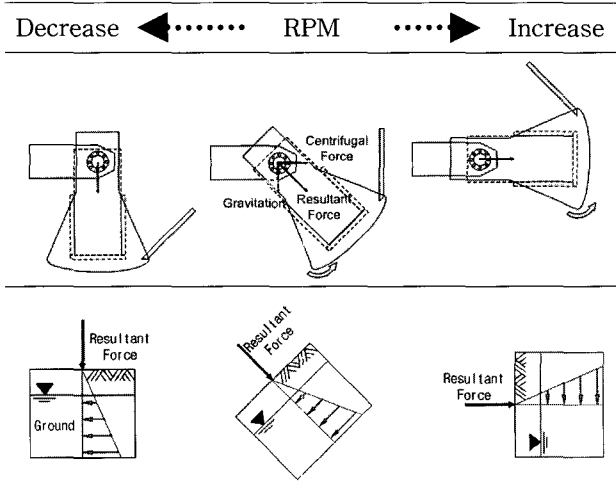


Fig. 2 Principle of geotechnical centrifuge model test

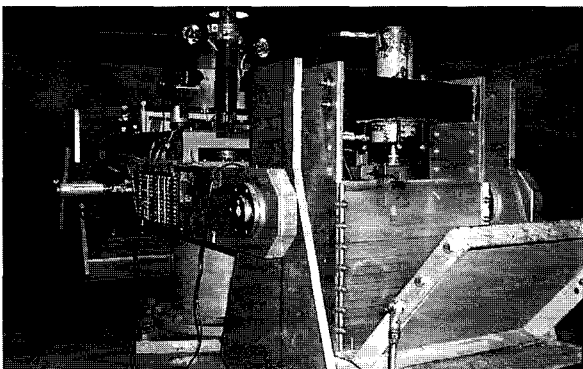


Fig. 3 Geotechnical centrifuge(KNU)

Table 1 Major specification of geotechnical centrifuge

G-Range	1 to 100-200g at 1,000mm
Driving system	5.5kw
Working radius	1,000mm ⇒ Center to basket hinge 1,350mm ⇒ Center to basket floor
RPM range	0~500 RPM
Payload capacity	15~20 g.ton
Test package size	500mm × 500mm × 600mm
Electrical pick - UPS	40 Slip rings
Fluid transfer	2 Hydraulic slip rings
Test recording	CCTV 35mm SLR camera

2.3 응력분담비

SCP공법은 연약지반에 모래다짐말뚝을 타설하여 원지반과

모래말뚝의 복합작용에 의한 지반의 지지력증대, 침하의 감소를 기대하는 공법으로서 복합지반에서 상재하중이 재하되는 경우 모래말뚝과 원지반의 변형특성으로 모래말뚝 사이에 아칭(Arching)현상이 발생하게 된다. 즉, 변형이 작은 모래말뚝에 원지반보다 큰 응력이 집중하게 되고, 연약층이 그 나머지를 분담하게되며 이 응력의 비를 응력분담비(n)라 한다.

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (5)$$

여기서, σ_s = 상재하중에 의해 모래말뚝에 발생하는 연직응력, σ_c = 상재하중에 의해 점토에 발생하는 연직응력.

복합지반은 하중재하시 전단응력과 압축응력이 작용하게 되고, 전단변형과 압밀변형으로 인한 응력집중이 복합하여 연약층의 압밀이 진행됨에 따라 응력분담이 달라지며, 응력분담에 미치는 영향 인자가 불명확하게 된다. 따라서 현재 SCP설계시 응력분담비는 현장 경험에 의존하여 2~6(보통 3)범위 안에서 결정하고 있는 실정이다.

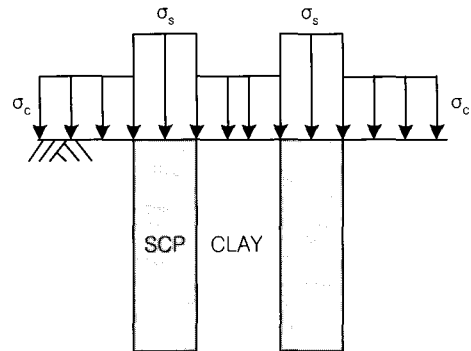


Fig. 4 Stress concentration ratio

3. Sheet pile 원심모형실험

3.1 원지반 성형

모형지반에 사용된 시료는 부산인근에서 채취한 해성점토로서 기본물성은 Table 2에 나타난 바와 같고, 시료를 액성한계 2배의 함수비로 교반시켜 압밀토조(폭 20mm, 길이 450mm, 높이 400mm)에 투기한 후, 압밀토조 상부에 0.05, 0.1, 0.2 kgf/cm²의 공기압력을 단계적으로 가하여 7일 정도 예비압밀을 실시하였다. 또한 예비압밀이 종료된 원지반을 탈착하여 원심모형토조에 부착한 후 50g의 원심력장에서 자중압밀을 실시하여 실물규모 10m에 상당하는 높이 약 20cm의 정규압밀 점토지반을 제작하였으며 이때, 점토층 중심부에 간극수압계를 매설하여 과잉간극수압의 소산을 확인하였다.

자중압밀 종료 후 1g상태에서 SCP를 타설한 후, 하중재하시 기초 및 지반에 발생하는 연직변위량 및 수평 변위량을 측정하기 위하여 변위계를 설치하였고, SCP와 점토지반의 응력분담비를 알아보기 위하여 SCP와 점토지반의 표면에 직경

6.5mm의 토압계를 매설하였다. 본 연구는 Sheet pile의 설치에 따른 SCP복합지반의 지지력 특성을 알아보기 위한 것으로 계측기를 설치한 후 SCP설치에 따른 압밀효과가 발생하기 전에 하중재하장치를 이용하여 2mm/min.으로 하중을 재하하였다.

3.2 모형토조 및 말뚝타설 방법

SCP는 원통형 관(내경 2cm)에 일정한 함수비의 주문진 표준사를 투입하여 진동대위에서 90%의 상대밀도를 갖도록 한 후 물로 포화시켜 동결하였다. 한편, SCP의 세립분 함유량은 200번체를 통과한 실리카 세립분을 이용하여 조절하였다.

연직하중의 재하는 Fig. 5에 도시한 바와 같이 연직하중 계측용 로드셀(Load cell)을 매개체로 하여 하중재하 장치 로드 에 강결하여 재하중위 재하판의 회전 및 수평변위를 구속하고 있는 하중재하장치를 사용하였다. 하중재하판은 70×200mm에서 저면을 거칠게 만들고 개랑지역 중앙의 3열의 모래말뚝을 재하하는 위치에 설치하였다.

한편, 중력수준 50g상태에서 자중압밀을 실시한 점토시료에 모형말뚝을 설치하기 위하여 Fig. 5와 같은 천공장비를 이용하였다. Fig. 6에서 보는바와 같이 2개의 유압실린더의 이동속도를 조절하여 Trimming tube를 관입한 다음 튜브에 진공압을 가해 점토를 추출한 다음 튜브를 제거하고 동결시킨 모형말뚝을 관입하였다.

Table 2 Basic physical properties

Test		Sand	Clay
Specific gravity (Gs)		2.60	2.72
Results of consistency test	LL, %	NP	43.0
	PL, %	NP	23.6
	PI, %	NP	20.6
Grain size distribution	C _u	1.2	12.5
	C _c	1.0	3.6
	USCS	SP	CL

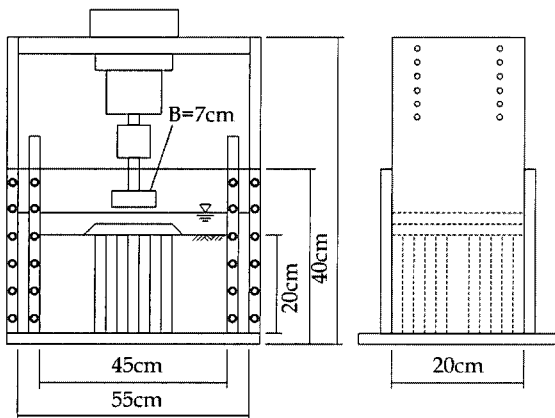


Fig. 5 Dimension of centrifuge model box

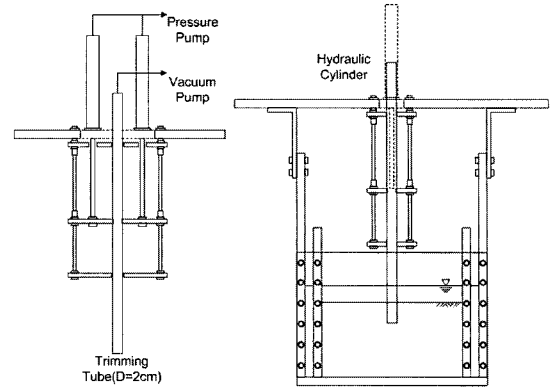
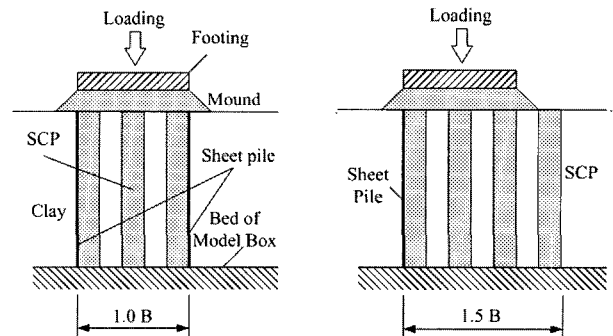


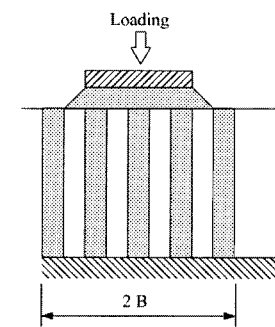
Fig. 6 Punching Equipment

3.3 Sheet pile 모형시험

SCP에 의한 지반개랑시 개랑폭을 축소하고 대체 재료로서 Sheet pile을 타입하여 변위억제와 강도증가여부를 구명하고자 Sheet pile의 설치위치를 변화시키면서 연직재하실험을 실시하였다. Fig. 7(a)에서와 같이 Sheet pile을 양쪽에 설치한 경우(Sheet pile 설치지역의 SCP 개랑 제거), Sheet pile을 한쪽에 설치한 경우(Sheet pile 설치부분만 SCP개랑 제거), Sheet pile을 설치하지 않은 경우(마운드 양쪽에 SCP로 개랑) 등 Sheet pile 설치위치에 따라 모두 3가지 조건으로 실험을 수행하였다. 이 때 SCP의 상대밀도는 90%, 직경 2cm로 하였으며 Sheet pile은 실험조건에 따라 기초 좌측 또는 양측에 SCP대신 1mm 두께의 함석판을 이용하여 Sheet pile을 모사하였다.



(a) Case-1(2-Sheet Pile) (b) Case-2(1-Sheet Pile)



(c) Case-3(No Sheet Pile)

Fig. 7 A layout of sheet pile tests

4. 수치해석

Sheet pile 이 설치된 SCP복합지반의 거동을 규명하고 원심 모형실험결과를 비교 분석하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 범용 지반해석 프로그램인 SAGE CRISP 프로그램을 이용하여 실시하였다.

복합지반에 대한 수치해석은 총 4개의 수행단계로 나누어 실시하였다. 먼저 1단계는 해석대상지반의 범위를 설정하고 일정 영역의 경계조건 및 해석에 따른 불응성과 지하수위 위치 등을 설정하여 초기지반을 구현하였다. 2단계는 치환율에 따른 SCP를 설치하였고 3단계에서는 하중을 재하하여 4단계에서 점토와 모래말뚝에 발생하는 응력과 하중-침하 관계등을 정리하였다.

SCP로 사용된 주문진 표준사와 슬래그의 구성모델은 Original Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 압밀배수(CD)의 삼축압축시험을 실시하여 이 모델의 매개변수인 탄성계수(E)와 포아송비(ν), 내부마찰각, 점착력등의 값을 구하였다. 탄성계수 값은 초기지반의 응력상태, $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 에 상응하는 값을 구하여 사용하였다.

해석에 사용된 SCP의 매개변수들을 Table 3에 나타내었다. 한편, 연약점토지반은 Roscoe와 Burland(1968)등이 제안한 수정 Cam-Clay 모델을 사용하였다. 표준압밀시험의 압축지수와 팽창지수로 부터 $\lambda = c_c/2.3$, $\kappa = c_s/2.3$ 를 구하였고, 압밀비배수(CU)의 삼축압축시험을 실시하여 $q-p'$ 의 기울기로부터 M을 하였으며 해석에 사용된 모델의 변수값은 Table 4에 나타내었다.

Fig. 8에 수치해석에 사용된 대표적인 유한요소 격자와 변위측정 절점을 나타내었다. 유한요소격자망은 358절점 320요소로서 모형지반의 좌,우측은 수평변위를 구속하였으며 바닥면은 연직변위를 구속하였다. 또한, 지반의 지표면에 수위가 위치하는 것으로 하였고 양면배수조건으로 해석을 수행하였다. 그림에서 보는바와 같이 연직재하에 의한 지반변위를 분석하기 위하여 주변지반 응기의 경우 상부층 절점을 이용하였으며, 수평변위는 기초 양끝단을 기준하여 수직방향에 위치한 절점의 변위를 분석하였다.

한편, 지반의 초기응력은 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 깊이 따라 선형적으로 증가하는 것으로 가정하였다.

Table 3 Original Mohr-Coulomb model parameters(Sand for SCP)

Parameters	Description	Value
$E_o(kPa)$	Young's modulus at the datum elevation	9.48E+03
$m_E(kPa/m)$	Rate or increase of Young's modulus with depth	0
$y_o(m)$	Datum elevation at which $E = E_o$	0
ν	Poisson's ratio	0.3
$c_o(kPa)$	Cohesion at the datum elevation	0
$m_c(kPa/m)$	Rate or increase of cohesion with depth	0
ϕ	Internal friction angle	43

Table 4 Modified Cam-clay model parameters(Clay for Model Ground)

Parameters	Description	Value
λ	Slope of isotropic compression line in $v-\ln p'$	0.226
κ	Slope of unload-reload lines in $v-\ln p'$	0.0422
e_{cs}	Reference void ratio on critical state line when $p'=1kPa$	2.233
M	Slope of critical state line in $q-p'$	0.941
ν	Poisson's ratio	0.3

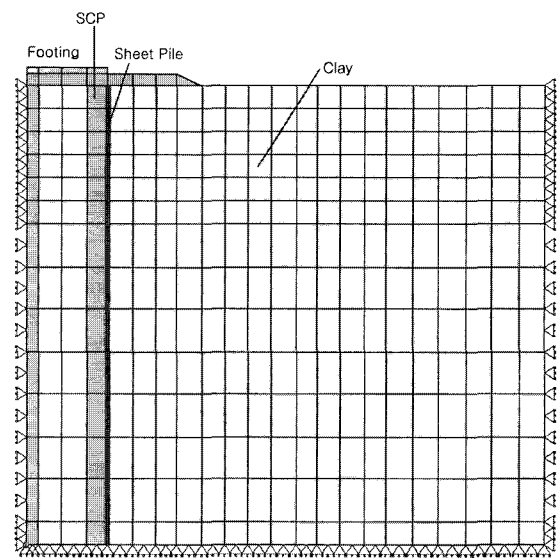


Fig. 8 FEM mesh

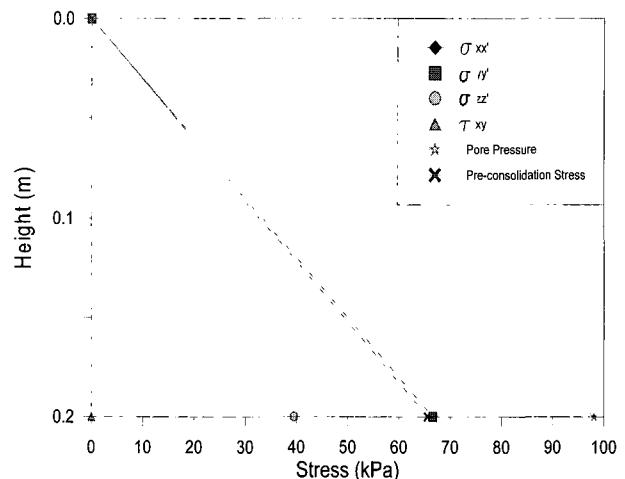


Fig. 9 Initial stress distribution

5. 결과분석

SCP로 개량된 부분을 Sheet pile로 대체하였을 때의 거동을 알아보기 위하여 연직재하실험을 실시한 후 다음과 같이 하중

-침하 관계, 토압 및 응력분담 특성, 최종함수비 분포 등의 결과를 획득하였다.

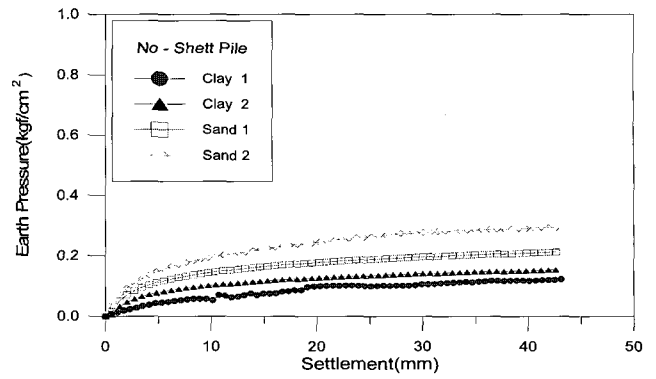
5.1 하중-침하 특성

Fig. 10은 Sheet pile 설치조건에 따른 하중-침하 곡선으로 원심모형실험과 수치해석 결과를 비교 도시하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 원심모형실험결과와 수치해석 결과가 전반적으로 잘 일치하였으며 Sheet pile을 설치할 수록 하중-침하 곡선의 초기접선 기울기와 항복하중강도가 증가하는 경향성을 나타내었다. 또한 항복하중강도에 이르는 변위는 5~10mm의 범위로 나타났으며 하중-침하 곡선의 값을 Log-Log로 도시하여 구한 항복하중강도는 Sheet pile을 양쪽에 설치한 경우와 한쪽에 설치한 경우, 설치하지 않은 경우에 대하여 각각 0.73, 0.52, 0.47 kgf/cm^2 으로 나타나 Sheet pile을 설치할수록 항복하중강도가 약 10~55% 증가하였다. 이러한 경향은 연직 하중 재하시 기초가 지반을 관입함에 따라 발생하는 기초파괴 활동을 Sheet pile이 억제하므로써 항복하중강도가 증가하는 것에 기인된 것이다.

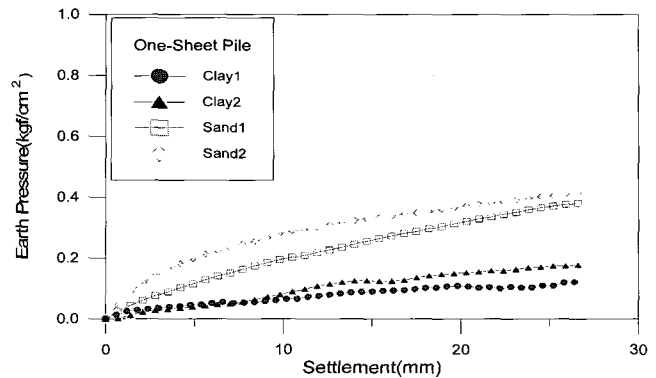
5.2 토압분포 및 응력분담비

하중재하에 따라 발생하는 SCP 복합지반의 토압을 측정하여 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서와 같이 연직재하에 의해 발생하는 침하량이 증가함에 따라 토압은 지속적으로 증가하는 경향을 보이며 SCP의 경우 점토지반 보다 강성이 크기 때문에 점토에 비해 토압 증가량이 상대적으로 크게 나타났다.

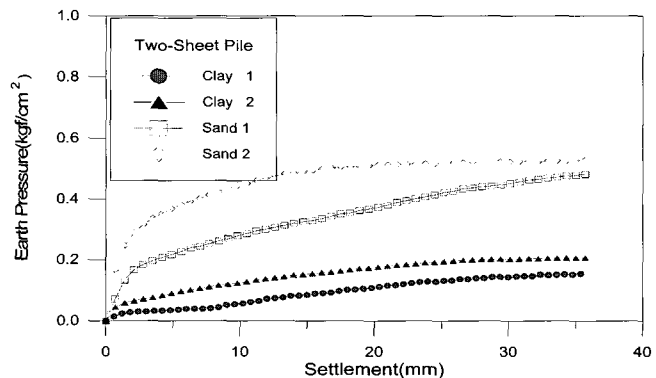
Fig. 12는 SCP와 점토지반이 받는 토압변화를 이용하여 구한 응력분담비의 변화를 침하량에 따라 도시한 것이다. 실험 결과를 보면 하중을 가한 직후에는 자료의 분산이 있으나 대체적으로 실험조건에 따라 응력 분담비가 2.0~4.0정도의 값에서 수렴함을 알 수 있다. 또한 응력분담비는 침하량이 증가함에 따라 초기보다 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 강성체의 SCP가 항복하중에 도달하는 연직 변위량이 연약점성토에 비하여 작기 때문에 SCP의 항복하중 도달 이후에 점진적인 강성도의 감소에 따라서 작용 응력이 점토지반으로 전이되기 때문이다.



(a) No Sheet pile



(b) One - Sheet pile



(c) Two - Sheet piles

Fig. 11 Earth pressure-settlement curve

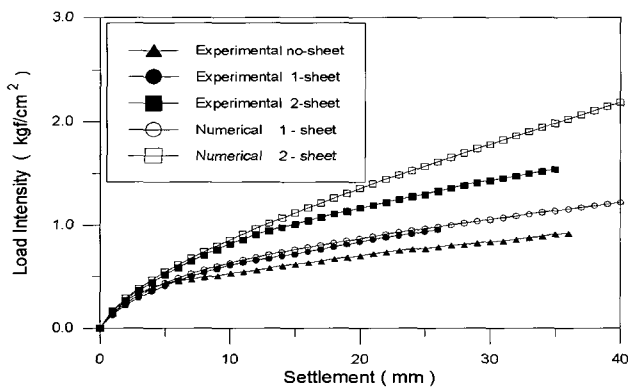
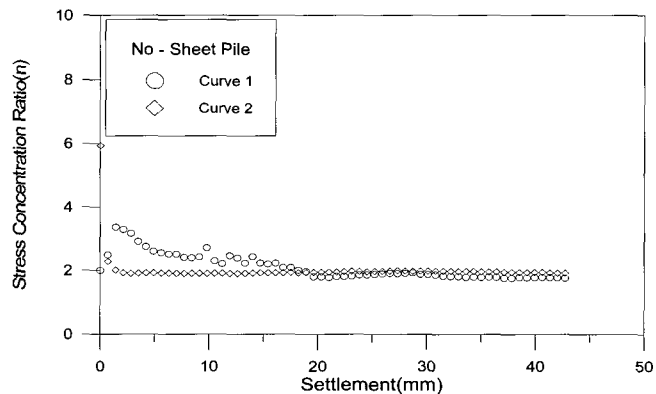
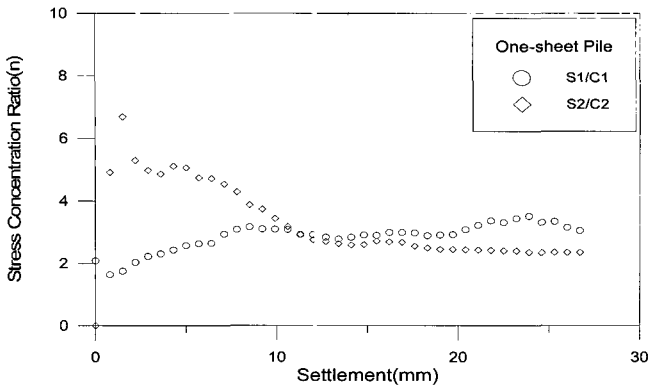


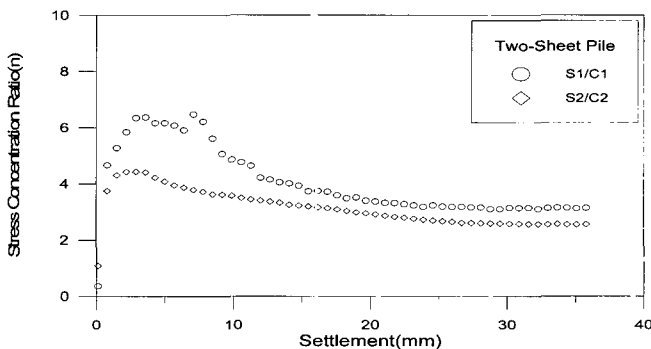
Fig. 10 Load-settlement curve



(a) No Sheet pile



(b) One - Sheet pile



(c) Two - Sheet piles

Fig. 12 Stress concentration ratio-settlement curve

5.3 지반변위 형상

원심모형 실험 후 모형토조의 전면판을 탈착하여 지반의 변위형상을 관찰한 결과 Sheet pile을 설치하지 않은 경우 기초 재하판의 관입에 따라 좌우측에 위치한 SCP가 지표면에서 최대 약 2cm 정도의 수평이동이 발생하였으며 벌징(Bulging)에 의한 지반파괴가 크게 발생하였는데 이는 복합지반의 항복시점을 지나 극한의 상황까지 압축을 지속한 결과로 판단된다. 또한 재하판 양쪽 측면을 Sheet pile로 보강한 경우 수평방향으로 구속되어 있어 하중재하시 재하판과 Sheet pile이 일체로 관입되는 형태의 변위거동을 나타내었다. 또한 실험종료 후 지반단면을 절개한 결과 Sheet pile이 타입된 내부구간에 위치한 SCP의 직경이 전체적으로 증가하는 형상을 지니고 있는데 이는 초기 벌징(Bulging)에 의한 지반파괴 때문인 것으로 판단된다. 한편, Sheet pile을 한쪽만 보강한 경우 하중재하에 따라 보강되지 않은 방향으로의 수평변위가 발생함을 관찰하였다.

한편 Sheet pile 설치에 따른 지반용기량과 수평변위 억제효과를 알아보기 위하여 수치해석시 3, 5, 7, 10mm의 침하량이 발생하는 시점에서의 지반변위를 분석하였다. Fig. 13은 Sheet pile 설치조건에 따라 지반변위 형상을 나타낸 것으로 상단 그림은 지반의 용기량을 하단은 정규화된 깊이에 대한 수평변위량을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 침하량이 증가할수록 지반 용기량은 증가하였으며 Sheet

pile을 설치하지 않은 경우와 비교하여 Sheet pile을 한쪽에 설치한 경우와 Sheet pile을 양쪽에 설치한 경우 각각 약 20, 30%의 지반 용기량은 감소하였고 기초끝단에서 약 1~2cm 가량 이격된 지점에서 지반용기량이 최대로 발생하는 것으로 나타났다.

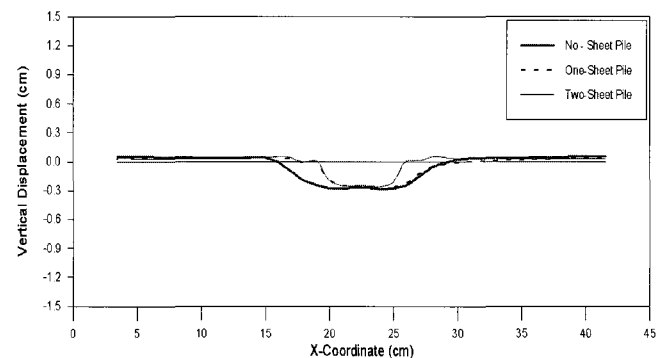
한편, 침하량이 증가함에 따라 수평변위도 증가함을 알 수 있으며 Sheet pile을 설치하지 않은 경우 깊이에 따른 수평변위를 분석한 결과 정규화 깊이 0.1 부근에서 최대 수평변위가 발생하는 것으로 나타났으며 주로 상부층에 국한되어 변위가 발생하였고 깊이비 0.7부근을 중심으로 Sheet pile 상부가 기초 바깥방향으로 회전하는 형태의 변위양상을 보이고 있다.

Sheet pile을 설치하지 않은 경우와 비교하여 기초재하판 아래 한쪽 단에만 Sheet pile을 설치하였을 때는 설치한 부분에서는 약 43%의 수평변위가 감소하였으나 Sheet pile일 설치 안된 부분은 약 28%의 수평변위 감소효과를 나타내었다. 또한 기초 재하판 양단에 Sheet pile을 설치한 경우는 양단 모두에서 약 40%에서 수평변위 감소효과를 나타내었다. Sheet pile을 한쪽에 설치한 경우 설치한 부분에서의 수평변위 감소효과가 Sheet pile을 양쪽에 설치한 경우보다 약 3%크게 나타난 것은 한쪽만 설치한 경우 연직하중이 증가함에 따라 설치되지 않은 부분으로 변위가 유도됨에 따라 변위 억제효과가 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

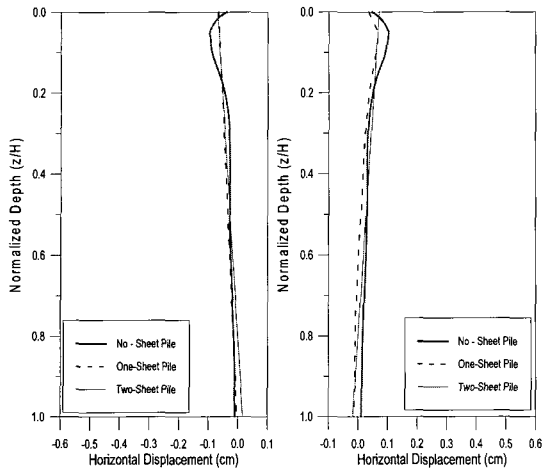
5.4 최종함수비 분포

연직재하실험 후 토조의 아크릴 벽면을 해체하고 일정간격으로 점토시료 채취하여 함수비를 측정하였다. 측정된 함수비 결과를 이용하여 Sheet pile 설치조건에 따른 최종함수비 분포를 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 Sheet pile을 설치하지 않은 경우 좌우 대칭 형태의 함수비 분포형태를 보이며 최종 함수비는 SCP주변의 경우 50~53%, 벽면부근의 경우 62~69%로 나타나 SCP에 의한 배수거리 단축으로 인하여 압밀 효과가 큰 것으로 나타났다.

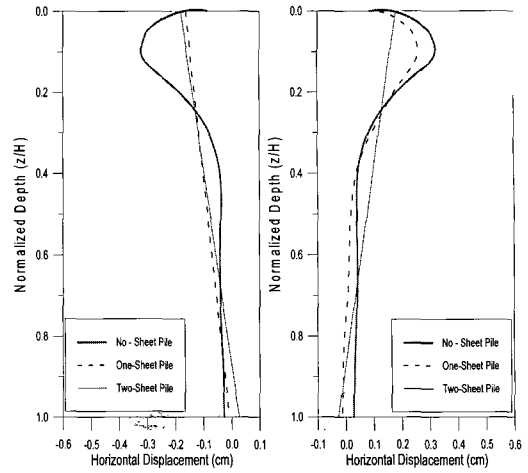
또한 Sheet pile이 설치된 경우 Sheet pile을 경계로 내부의 경우 43~53%, 외부의 경우 62~69%로 Sheet pile에 의한 차수효과가 발생하였음을 알 수 있다.



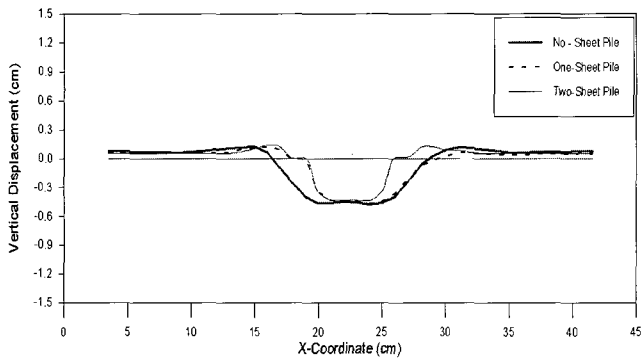
변위억제형 Sheet pile 설치에 따른 SCP복합지반의 지지력 특성



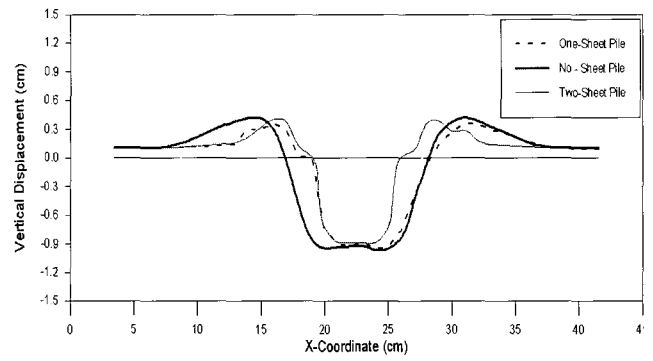
(a) settlement = 3mm



(c) settlement = 7mm



(b) settlement = 5mm



(d) settlement = 10mm

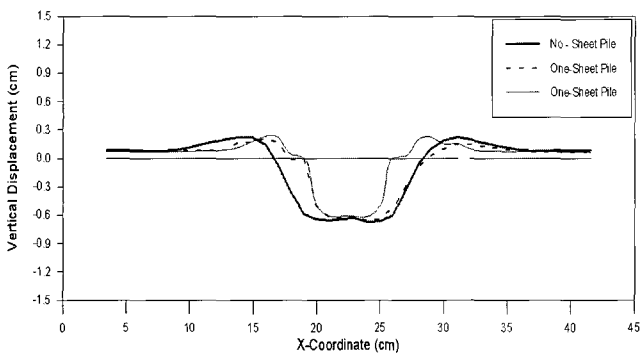
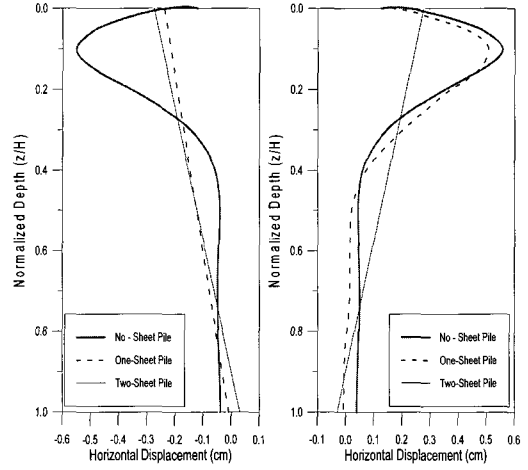
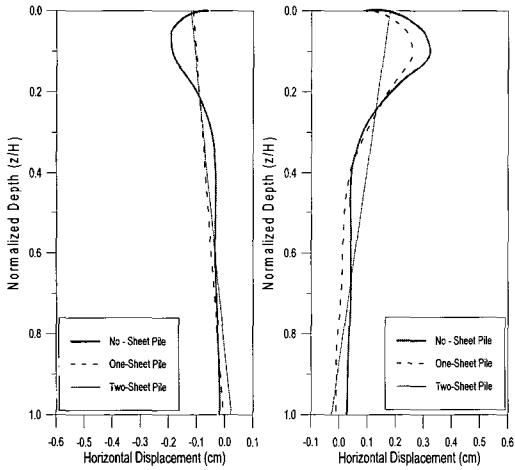
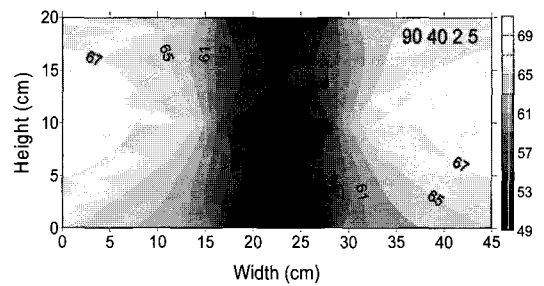
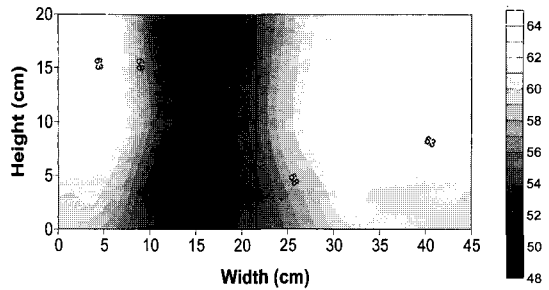


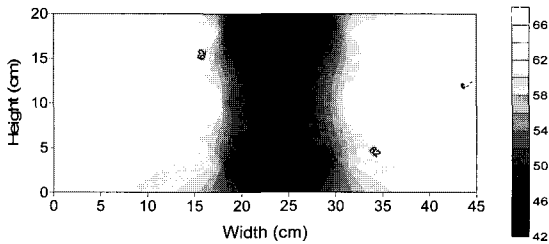
Fig. 13 Ground displacement during staged construction



(a) No Sheet pile



(b) One - Sheet pile



(c) Two - Sheet piles

Fig. 14 Distribution of final water contents

6. 결 론

- 1) Sheet pile 설치에 따른 원심모형실험 결과 Sheet pile이 기초과파 활동을 억지하므로써 항복하중강도가 약 10~55% 증가하였다. 따라서, 연약지반에 SCP와 Sheet pile을 병용하여 타설하였을 때 Sheet pile로 인한 지반의 극한지력 증대효과를 기대할 수 있다.
- 2) 원심모형실험결과 Sheet pile의 설치 변화에 따른 응력분담비의 범위는 약 2~4의 값을 나타내었고 SCP에 집중되어 있는 응력이 SCP의 항복으로 인하여 점성토지반으로 응력의 전이됨에 따라 침하량이 증가할수록 응력분담비는 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 변위억제형 Sheet pile 로 인한 지반응기량 억제 효과를 수치해석으로 검토한 결과, Sheet pile을 한쪽에 설치한 경우와 Sheet pile을 양쪽에 설치한 경우 각각 약 20, 30%의 지반응기량은 감소하였고 기초끝단에서 약 1~2cm 가량 이격된 지점에서 지반응기가 최대로 발생하는 것으로 나타났다.
- 4) SCP의 수평변위를 검토한 결과 Sheet pile이 설치되지 않은 경우 정규화 깊이 0.1 부근에서 최대 수평변위가 발생하는 것으로 나타났으며 정규화 깊이 0.7부근을 중심으로 Sheet pile 상부가 기초 바깥방향으로 회전하는 형태의 변위양상을 나타내었다.
- 5) Sheet pile을 설치하지 않은 경우와 비교하여 Sheet pile을 설치하였을 때 약 28~43%의 수평변위가 감소하여 Sheet pile 설치로 인한 변위억제 효과가 있음을 알수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 김병일, 박용원, 윤길립, 조성환(2000), “모래다짐말뚝(SCP)으로 개량된 연약지반의 유한요소해석”, 대한토목학회논문집, 제20권, 제4-C호, pp.357~366.
- [2] 김재권, 홍의준, 김수일, 정상섭(2002), “연약지반에 타입된 모래다짐말뚝의 하중-침하 특성”, 대한토목학회논문집, 제22권, 제4-C호, pp.423~432.
- [3] 유남재, 박병수, 정길수, 고정환, 김지성(2005), SCP보강 점성토지반의 지지력 및 응력분담특성, 한국지반공학회 논문집 제21권1호, pp.81~91.
- [4] 홍의준, 김재권, 정상섭, 김수일(2003), “연성하중을 받는 모래다짐말뚝(SCP)의 거동분석”, 한국지반공학회논문집, 제19권 4호, pp.223~233.
- [5] Masaki, K., and Kiyoharu, M. (1993), "Behavior of Sheet Pile Walls in the Improved Ground by Sand Compaction Piles of Low Replacement Area Ratio", Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol. 32, No. 2, pp. 187~211.
- [6] Murayama, S. (1957), "Improvement of Soft Ground by Sand Compaction Piles (Compozer Method)", Conference Papers of Osaka Construction Works, pp.1~17.
- [7] Roscoe, K. H., Burland, J. B.(1968), "On the Generalized Stress-Strain Behavior of Wet Clay", Engineering Plasticity, Cambridge Univ., Press, Cambridge, pp.535~609.
- [8] SAGE CRISP(2000), "User's Guide and Technical Reference Guide", SAGE Engineering Ltd.
- [9] Yabushita, H., Mizuno, Y., Iwazaki, M. Sawai, M. (1976), "On Earth Pressure of Composite Ground", The 11th Conf. of JSSMFE, pp. 717~720.
- [10] Yagi, N., Yatabe, R. and Takechi, O. (1983), "Simple Shear Characteristics of Composite Ground", The 18th Conf. of JSSMFE, pp. 951~952.

원고접수일 : 2006년 9월 11일

원고채택일 : 2006년 10월 9일