

## Sheet Pile 설치에 따른 SCP개량지반의 거동

### Behavior of SCP Improved Ground with Installation of Sheet Pile

유 남 재\*      박 병 수\*\*      정 길 수\*\*\*  
Yoo, Nam-Jae    Park, Byung-Soo    Jeong, Gil-Soo

#### Abstract

The paper is to show the behavior of composite ground which is installed with sheet pile in soft soil improved by sand compaction pile. The results of load-settlement relationship, earth pressure, stress concentration characteristics, and final water content were obtained by centrifuge model test.

Two cases of tests, installation of sheet pile on the corner and both side of the loading plate for the improved SCP ground which was designed twice of the footing width, were performed for the tests under the vertical and horizontal loading and both side of corner.

Finite element program(CRISP) for sand compaction pile using elasto-plastic model and numerical analysis for soft soil using modified cam-clay constitutive equation were compared and analyzed with the results of model tests.

The result of analysis show the increased bearing capacity of soil after, SCP and sheet pile was installed.

키워드 : 모래다짐말뚝, 복합지반, 응력분담비, 치환율, Sheet Pile

Keywords : Sand Compaction Pile, Composite Ground, Stress Concentration ratio, Area Replacement Ratio, Sheet Pile

#### 1. 서 론

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

이러한 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile)공법은 바이브로 햄머로 케이싱 파일을 지중에 관입하

여 케이싱 파일을 통하여 모래를 공급하므로써 큰 지름을 가진 다짐 모래말뚝을 지중에 조성하여 지반을 개량하는 공법이다.

모래다짐말뚝은 일본을 중심으로 다양한 연구가 수행되어 오고 있으며 일본의 Murayama(1957)가 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile)이란 용어를 처음 사용한 이래 SCP로 개량된 복합지반의 특성에 대한 이론적 연구와 실내,외 실험을 통한 연구 및 해석적 연구등 많은 성과가 발표되고 있다.

우리나라는 경제성장과 국토개발로 인하여 제한된 가용면적의 확대에 따라 개량대상지역으로 점차 연약지반이 증가하는 추세에 있고, 구조물이 증량화, 대규모화됨에 따라 점성토의 강도증가, 시공기간의 단축화 등을 위한 개량공법이 요구되며, SCP

\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

\*\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

공법의 적용범위도 확대되고 있다.

Masaki 와 Kiyoharu(1993)는 SCP개량 지반의 변형, 파괴거동 및 거동에 영향을 미치는 개량폭, Sheet Pile Wall의 강성 등의 영향에 관해서 실내 원심모형실험으로 검토하였다.

복합지반의 수평저항력에 관해서 Yabushita등(1976)은 2차원 해석의 대상지반의 거동을 토층실험을 통하여 토압식을 제안하였으며, Yagi등(1983)은 수평저항에 관하여 진단시험을 수행하여 수평저항에 관하여 진단파괴거동을 검토하였고, Masaki 등(1993)은 Sheet Pile Wall에 작용하는 개량지반의 수동토압에 관한 원심모형실험을 수행하였다. 이 연구를 통하여 수평하중을 받는 모래말뚝은 전체적으로 변형이 발생하였으나 진단파괴는 발생하지 않았다는 연구발표를 하였다

본 연구에서는 SCP보강 연약지반에 Sheet Pile을 설치한 원심모형실험을 실시하여 SCP개량지반의 수평저항력 및 변형거동을 알아보고자 하였다.

## 2. 모래다짐말뚝

### 2.1 치환율

치환율( $a_s$ )이란 원지반 면적과 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적비로 정의되며, 주로 모래말뚝 타설 간격에 의해 결정된다.

한편, 성토 등 상부구조물이 비교적 경량인 경우에는 치환율( $a_s$ )이 20~40% 정도인 저치환율 SCP공법이 많이 사용되며, 항만공사 등 모래말뚝 자체로 지지력, 진단강도 증가효과 등을 발휘해야 하는 경우에는 치환율( $a_s$ )이 70% 정도인 고치환율 SCP공법이 사용되고 있다(Mikasa 등, 1984). 그러나, 항만공사에서 주로 사용하던 고치환율 SCP공법은 모래의 부족현상과 과다설계에 의한 경제적인 문제로 인하여 치환율 30~40% 정도인 저치환율 SCP공법으로 대체중이다.

그림 1에 모래다짐말뚝과 원지반의 치환율을 나타내었다.

### 2.2 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.

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}$$

여기서,  $\sigma_s$ = 상재하중에 의해 모래말뚝에 발생하는 연직응력,  $\sigma_c$ = 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. 그러므로 응력분담비는 실제 현장경험에 의존하여 2~6(보통 3)범위 안에서 결정하고 있다.

## 3. 실내실험

### 3.1 원지반 성형

모형지반에 사용된 시료는 부산인근에서 채취한 해성점토로서 기본물성은 표1에 나타난 바와같고, 시료를 액성한계 2배의 함수비로 교반시켜 압밀토조(폭 20mm, 길이 450mm, 높이 400mm)에 투기한 후, 압밀토조 상부에 0.05, 0.1, 0.2 kgf/cm<sup>2</sup>의 공기압력을 단계적으로 가하여 7일 정도 예비압밀을 실시하여 예비압밀완료후 20cm 높이의 원지반을 조성하였다.

표 1. 주문진 표준사외 점토의 기본물성

Test		JuMunJin Standard 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	Cu	1.2	12.5
	Cc	1.0	3.6
	USCE	SP	CL

### 3.2 Sheet Pile 모형시험

SCP에 의한 지반개량시 개량폭을 축소하고 대체 재료로서 Sheet Pile을 타입하여 변위억제와 강도증가여부를 규명하고자 Sheet Pile의 설치위치를 변화

시켜가면서 연직재하실험과 수평재하실험을 실시하였다.

그림 1에서와 같이 SCP 개량폭, Sheet pile 설치 위치를 변화시켜가며 모두 2가지 조건으로 실험을 수행하였으며, 이 때 SCP의 상대밀도는 90%, 직경 2cm로 실험조건에 따라 기초 좌측 또는 양측에 SCP대신 1mm 두께의 함석관을 이용하여 Sheet Pile을 모사하였다.

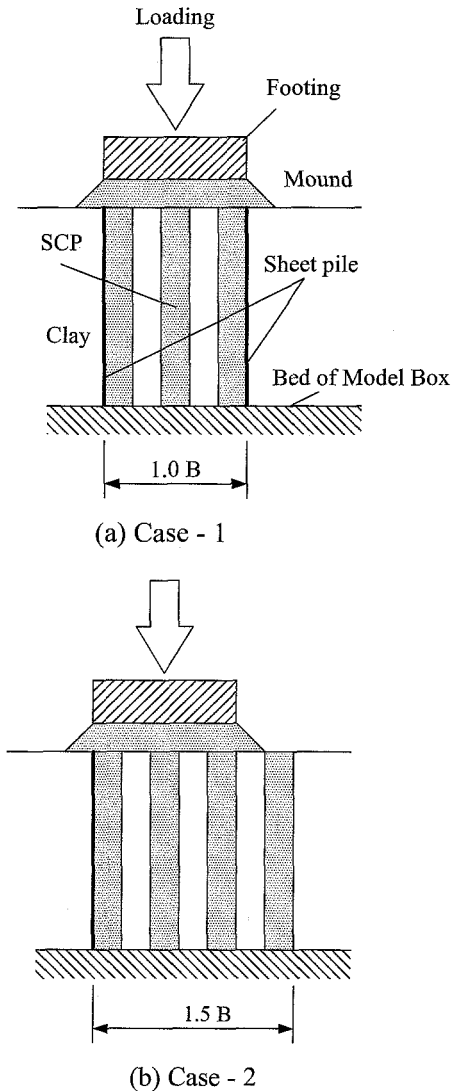


그림 1. Sheet Pile 모형실험 내역

#### 4. 수치해석

모래다짐말뚝이 타설된 복합지반의 거동을 규명하고 원심모형실험결과를 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 일정영역의 경계조건 및 해석에 따른 물성값과 지하수위 위치등을 설정하여 초기지반을 구현하였다. 2단계는 치환율에 따른 모래다짐말뚝을 설치하였고 3단계에서는 하중을 재하하여 4단계에서 점토와 모래말뚝에 발생하는 응력과 하중-침하 관계등을 정리하였다.

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

해석에 사용된 모래다짐말뚝의 매개변수들을 표 2에 나타내었다.

한편, 연약점토지반은 Roscoe와 Burland(1968)등이 제안한 수정 Cam-Clay 모델을 사용하였다. 표준압밀시험 및 압밀비배수(CU)의 삼축압축시험으로부터 구한 모델의 변수값은 표 3에 나타내었다.

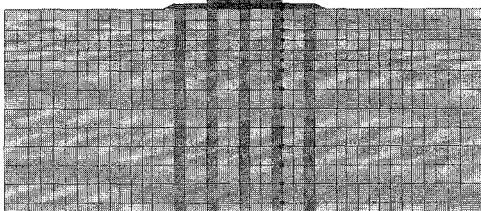
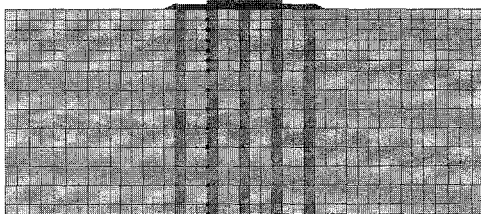
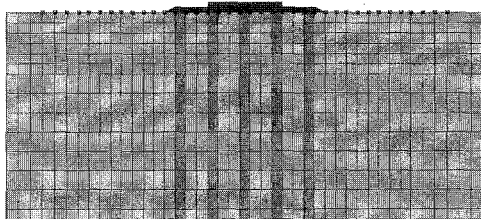
표 2. Original Mohr-Coulomb 모래 변수값

변 수	내 용	값
$E_0$ (kPa)	기준면에서의 탄성계수	9.48E+03
$m_E$ (kPa/m)	깊이에 따른 탄성계수 증가율	0
$y_0$ (m)	$E=E_0$ 인 기준면의 깊이	0
$\nu$	포아송비	0.3
$c_0$ (kPa)	기준면에서의 점착력	0
$m_c$ (kPa/m)	깊이에 따른 점착력 증가율	0
$\phi$	내부마찰각	43

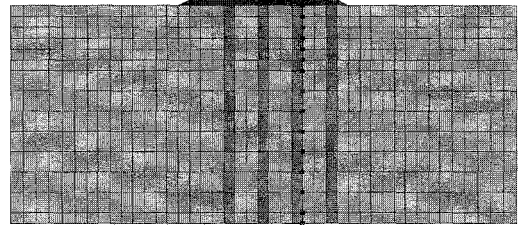
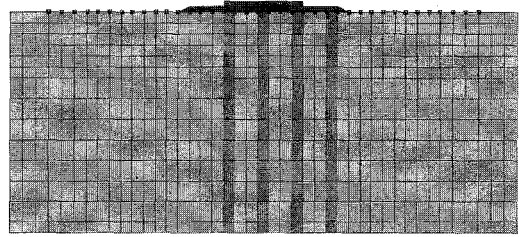
표 3. 점토의 수정 Cam-Clay 모델 변수값

변수	내 용	값
$\lambda$	$v$ - $\ln p'$ 공간의 압축지수	0.226
$\kappa$	$v$ - $\ln p'$ 공간의 팽창지수	0.0422
$e_{cs}$	$v$ - $\ln p'$ 공간에서 $p'=1kPa$ 일 때 한계상태선의 간극비	2.233
M	$q$ - $p'$ 공간의 한계상태선기울기	0.941
$\nu$	포아송비	0.3

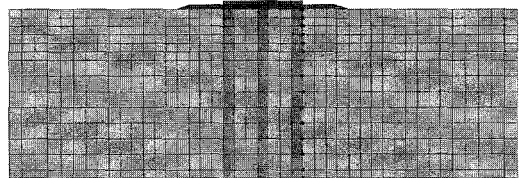
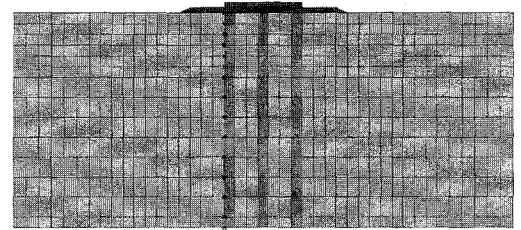
그림 2는 수치해석에 사용된 유한요소 격자와 변위축정 절점을 나타낸다. 유한요소격자망은 358절점 320요소로서 모형지반의 좌.우측은 수평변위를 구속하였으며 바닥면은 연직변위를 구속하였다. 또한, 지반의 지표면에 수위가 위치하는 것으로 하였고 양면배수조건으로 해석을 수행하였다. 그림에서 보는바와 같이 연직재하에 의한 지반변위를 분석하기 위하여 주변지반 응기의 경우 상부층 절점을 이용하였으며, 수평변위는 기초 양끝단을 기준하여 수직 방향에 위치한 절점의 변위를 분석하였다.



(a) Sheet Pile이 설치되어 있지 않은 경우



(b) Sheet Pile이 한쪽에 설치되어 있는 경우



(c) Sheet Pile이 양쪽에 설치되어 있는 경우

그림 2. 수치해석을 위한 유한요소 격자 구성

### 5. Sheet Pile 모형실험 결과

기초폭의 2배 조건으로 개량한 SCP 지반에 대하여 기초 바깥부분에 SCP로 개량된 부분을 Sheet Pile로 대체하였을 때의 거동특성을 비교분석하기 위하여 연직재하실험을 실시하여 하중-침하 관계, 토압 및 응력분담 특성, 최종함수비 분포 등의 결과를 획득하였다.

#### 5.1 하중-침하 특성

Sheet Pile의 설치조건을 변화시켜가며 연직재하 실험을 실시하였으며, 그림 3은 Sheet Pile 설치조건에 따른 하중-침하 곡선을 비교 도시한 것이다. 그

림에서 보는 바와 같이 Sheet Pile을 설치하는 경우 하중-침하 곡선의 초기 접선기울기와 극한지지력은 증가하는 것을 나타냈으며, 항복점의 경우 실험조건에 따라 5~10mm 범위 이내에서 나타나며 Sheet Pile이 설치된 경우 항복하중의 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 연속재하시 Sheet Pile이 지반의 기초파괴활동을 억지하여 하중강도가 증가하는 것으로 추정된다.

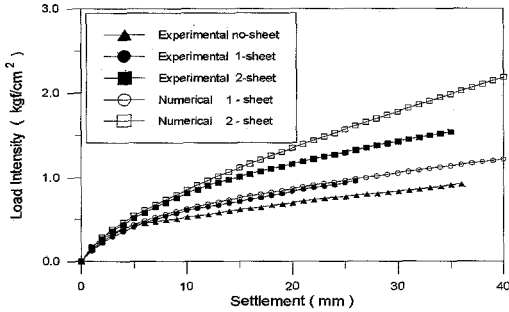
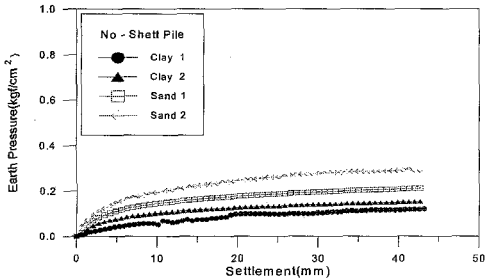


그림 3. 하중-침하곡선

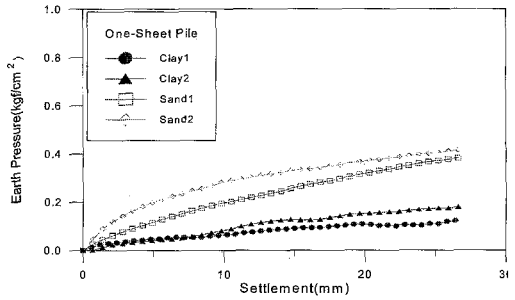
5.2. 토압분포 및 응력분담비

하중제하에 의한 복합지반의 토압분포는 그림 4와 같이 나타났다. 그림에서와 같이 연속재하에 의해 발생하는 침하량이 증가함에 따라 토압은 지속적으로 증가하는 경향을 보이며 모래의 경우 강성에 의하여 점토에 비해 토압 증가량이 상대적으로 크게 나타났다.

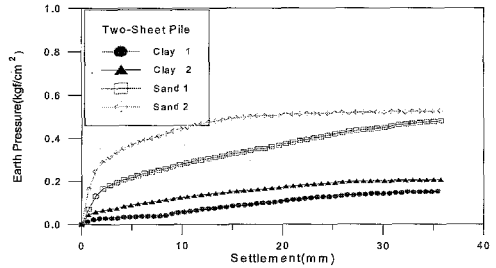
그림 5는 Sheet Pile 설치 조건 변화에 따른 모래말뚝과 점토지반이 받는 토압변화를 이용하여 구한 응력분담비의 변화를 침하량에 따라 도시한 것이다. 실험결과를 보면 하중을 가한 직후에는 자료의 분산이 있으나 대체적으로 실험조건에 따라 응력 분담비가 2.0~4.0정도의 값에서 수렴함을 알 수 있다.



(a) Sheet Pile이 설치되어 있지 않은 경우

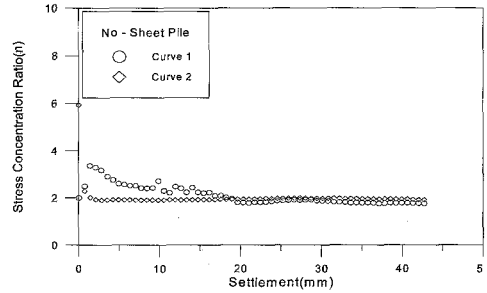


(b) Sheet Pile이 한쪽에 설치되어 있는 경우

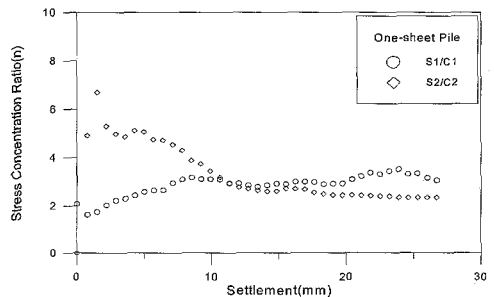


(c) Sheet Pile이 한쪽에 설치되어 있는 경우

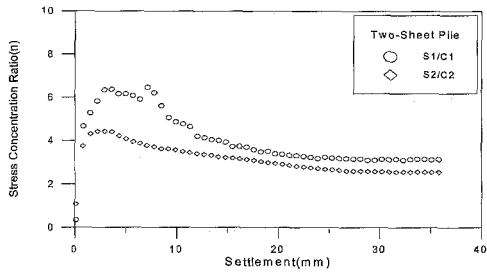
그림 4. Sheet Pile 설치조건에 따른 토압변화



(a) Sheet Pile이 설치되어 있지 않은 경우



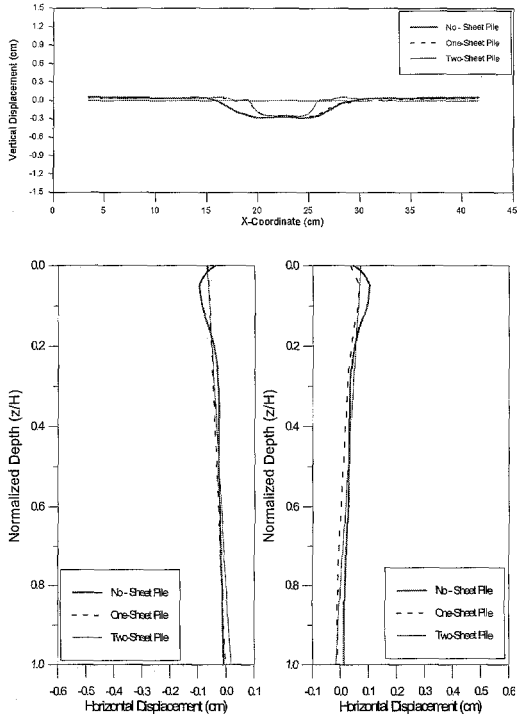
(b) Sheet Pile이 한쪽에 설치되어 있는 경우



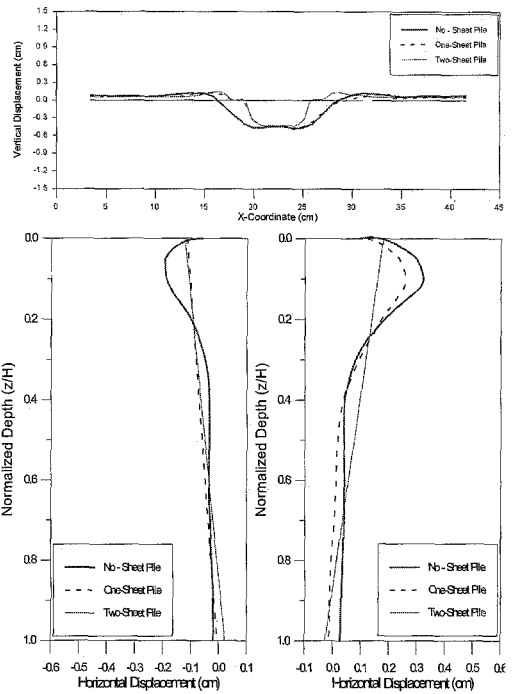
(c) Sheet Pile이 한쪽에 설치되어 있는 경우  
그림 5. Sheet Pile 설치에 따른 응력분담비 변화

### 5.3 지반변위 형상

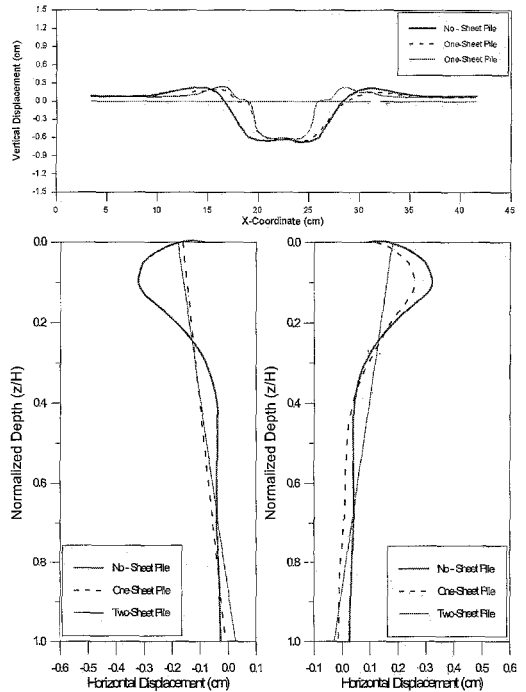
연직재하실험시 각각 3, 5, 7, 10mm의 침하량이 발생하는 시점에서의 지반변위를 분석하기 위하여 수치해석 결과를 이용하여 그림 6과 같이 Sheet Pile 설치조건에 따른 지반변위 형상을 비교 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Sheet Pile이 설치되어 있지 않은 경우 하중 재하시 침하량이 증가할수록 지반의 변위도 증가함을 알 수 있으며 깊이버 0.1부근에서 최대 수평변위가 발생하며 주로 상부층에 국한되어 변위가 발생하는 것으로 나타났다.



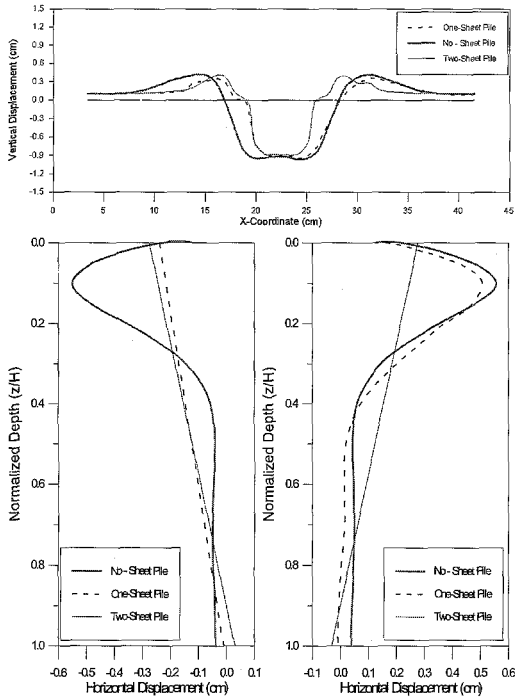
(a) 침하량 3mm 발생시



(b) 침하량 5mm 발생시



(c) 침하량 7mm 발생시

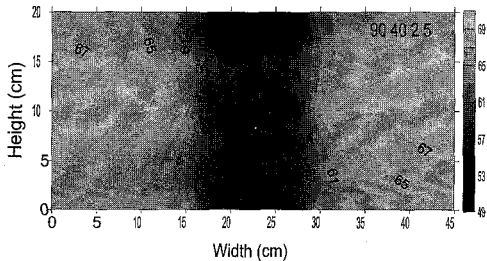


(d) 침하량 10mm 발생시  
그림 6. 단계별 지반변위 형상

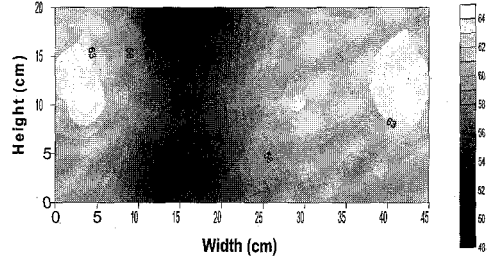
또한 기초끝단에서 1~2cm가량 이격된 지점에서 지반 융기가 최대로 발생하는 것으로 나타났다. Sheet Pile을 설치된 경우 지반변위는 깊이비 0.7부근을 중심으로 Sheet Pile 상부가 기초 바깥방향으로 회전하는 형태의 변위양상을 보이고 있다.

#### 5.4 최종함수비 분포

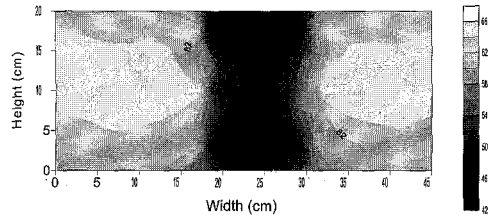
연직재하실험후 일정간격으로 점토시료 채취하여 측정된 함수비 결과를 이용하여 Sheet Pile 설치조건에 따른 최종함수비 분포 결과를 정리하여 그림 7에 나타내었다.



(a) Sheet Pile이 설치되어 있지 않은 경우



(b) Sheet Pile이 한쪽에 설치되어 있는 경우



(c) Sheet Pile이 양쪽에 설치되어 있는 경우

그림 7. 최종함수비 분포

그림에서 보는 바와 같이 Sheet Pile을 설치하지 않은 경우 좌우대칭형태의 함수비 분포형태를 보이며 최종함수비는 모래말뚝주변의 경우 50~53%, 벽면 부근의 경우 62~69%로 나타나 모래말뚝에 의한 배수거리 단축으로 인하여 압밀효과가 큰 것으로 나타났다.

또한 Sheet Pile이 설치된 경우 Sheet Pile을 경계로 내부의 경우 43~53%, 외부의 경우 62~69%로 Sheet Pile에 의한 차수효과가 발생하는 것으로 나타났다.

#### 6. 결론

1) 기초재하판 아래 한쪽모서리에 Sheet Pile을 타설한 경우와 양쪽 모서리에 Sheet Pile을 타설하여 원심모형실험을 실시한 결과, 항복하중강도는 각각 0.52 kgf/cm<sup>2</sup>, 0.73 kgf/cm<sup>2</sup>으로 나타나 Sheet Pile 이 없는 경우 0.47 kgf/cm<sup>2</sup>과 비교하여 Sheet Pile 한 개를 타설하였을때 항복하중강도는 약 10% 증가하였고 Sheet Pile 두 개를 타설하였을때는 약 55% 증가함을 나타내었다. 따라서, 연약지반에 처치환율의 모래다짐말뚝과 Sheet Pile을 병용하여 타설하였을 때 Sheet Pile로 인한 지반의 극한지지력 증대효과를 기대할 수 있다.

2) 변위억제형 Sheet Pile 로 인한 지반용기량 억제 효과를 수치해석으로검토한 결과, 기초재하판 아래 한쪽단에 Sheet Pile을 설치한 경우 지반용기량은

약 20%감소하였으며 기초재하관 양단에 설치한 경우는 약30%정도 감소하는 것으로 나타났다.

3) 수치해석으로 부터 Sheet Pile 설치로 인한 모래 다짐말뚝의 수평변위를 검토한 결과, 기초재하관 아래 한쪽단에만 Sheet Pile을 설치하였을때는 설치한 부분에서 약 43%의 변위가 감소하였으며, 설치안된 부분은 약 28%의 수평변위 감소효과를 나타내었다. 또한 기초재하관 양단에 Sheet Pile을 설치하였을 때는 양단 모두에서 약 40%의 수평변위 감소효과를 나타내었다.

### 참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Murayama, S. (1957). "Improvement of soft ground by sand compaction piles (Compozer method)." Conference papers of Osaka construction works, pp.1-17.
- [3] 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.
- [4] Yabushita, H., Mizuno, Y., Iwazaki, M. Sawai, M. (1976). "On earth pressure of composite ground." The 11<sup>th</sup> Conf. of JSSMFE, pp. 717-720.
- [5] Yagi, N., Yatabe, R. and Takechi, O. (1983). "Simple shear characteristics of composite ground." The 18<sup>th</sup> Conf. of JSSMFE, pp. 951-952. (in Japanese).