

# 연계압밀해석을 통한 압밀이 진행 중인 지반에 근입된 단독말뚝 및 군말뚝의 거동연구

## A Study on the Behaviour of Single Piles and Pile Groups in Consolidating Ground from Coupled Consolidation Analyses

김 성 희<sup>1)</sup> · 전 영 진<sup>1)</sup> · 이 철 주<sup>†</sup>

Sung-Hee Kim · Young-Jin Jeon · Cheol-Ju Lee

Received: March 21<sup>st</sup>, 2016; Revised: March 22<sup>nd</sup>, 2016; Accepted: May 25<sup>th</sup>, 2016

**ABSTRACT** : In the present work, a number of advanced three-dimensional (3D) parametric finite element numerical analyses have been conducted to study the behaviour of single piles and pile groups in consolidating ground from coupled consolidation analyses. Single piles, 4×4 and 6×6 piles inside groups with a spacing of 2.5D were considered, where D is the pile diameter. It has been found that dragload and downdrag on the piles developed rather quickly at the early stage of consolidation. However, when the degree of consolidation was more than 50~75%, only little increases of dragload and downdrag were induced on the pile. Negative Skin Friction (NSF) on the pile in the fill layer was mobilised quickly and remained constant throughout further consolidation. The development of NSF is influenced both by the relative shear displacements at the pile-soil interface and the vertical effective soil stresses during consolidation. The former governed the early stage of consolidation and the latter affected the later stage of consolidation. The vertical effective soil stresses adjacent to the piles were reduced due to the shear stress transfer at the pile-soil interface, in particular for piles inside the pile groups. The range of NSF influence zone concerning the reductions of the effective vertical soil stresses was about 20D measured from the piles in the horizontal direction. On the contrary, the effective horizontal soil stresses acting on the piles were similar to those at the far field.

**Keywords** : Coupled analysis, Negative skin friction, Numerical modelling and analysis, Piles, Pile groups

**요 지** : 본 연구에서는 압밀을 고려한 고등 3차원 유한요소해석을 통하여 압밀이 진행 중인 지반에 근입된 단독말뚝 및 군말뚝의 거동을 연구하였다. 수치해석에서는 단독말뚝 및 말뚝 중심간의 간격이 2.5D인 4×4 및 6×6 군말뚝을 고려하였다. 여기서 D는 말뚝의 직경을 의미한다. 부마찰에 의한 말뚝의 침하 및 부마찰력은 압밀초기 단계에서 비교적 빠르게 발생하는 것으로 분석되었다. 그러나 압밀도가 50~75%를 초과하는 경우 말뚝의 침하 및 부마찰력의 증가량은 상대적으로 크지 않은 것으로 분석되었다. 성토층에서의 부마찰은 신속하게 발현되며 이후의 압밀 단계에서는 일정하게 유지된다. 말뚝에 작용하는 부마찰은 상대변위 및 유효수중응력에 좌우되는 것으로 분석되었다. 압밀 초기단계에서는 상대변위가 큰 영향을 미치는데 비해, 압밀 후반기에서는 유효수중응력이 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다. 말뚝-인접지반에서의 전단응력 전이로 인해 말뚝과 인접한 흙의 유효수중응력이 감소하며 이러한 현상은 군말뚝에서 특히 현저하다. 부마찰이 영향을 미치는 영역의 범위는 흙의 유효수중응력의 분포를 고려할 경우 말뚝으로부터 수평으로 20D 정도 되는 것으로 분석되었다. 이에 비해 말뚝에 작용하는 유효수중응력은 far field 조건의 응력과 거의 유사한 것으로 분석되었다.

**주요어** : 군말뚝, 말뚝, 연약지반, 부마찰, 수치해석

## 1. 서 론

압밀이 진행 중인 연약지반에 근입된 말뚝에는 압밀로 인한 지반침하로 인해 말뚝과 인접지반 사이에서 유발되는 전단응력전이(shear stress transfer)로 인해 부마찰이 발생하며 말뚝에 압축력(dragload) 및 침하(downdrag)가 발생한다. 이러한 문제에 대하여 그동안 다양한 현장, 실내실험 및 이론

적인 연구가 수행되어 왔으며, 이를 통해 부마찰이 작용하는 말뚝의 거동에 대하여 비교적 명확하게 규명되었다(Lee, 2001; Leung, 2009). 그러나 이론적 연구에 있어 기존연구의 대부분은 압밀이 종료된 후 즉 배수조건하에서 말뚝에 작용하는 부마찰에 대한 연구로 제한되어 있으며, 연약지반의 압밀은 연약지반표면에 실시되는 성토가 아닌 연약점토 상부에 등분포응력을 작용시키는 방식으로 모사되어 왔다

1) Department of Civil Engineering, Kangwon National University

† Department of Civil Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : cj32@kangwon.ac.kr)

(Lee et al., 2002; Lee & Ng, 2004; Comodromos & Bareka, 2005; Lee et al., 2006; Ng et al., 2008; Lee, 2009a; Lee, 2009b). 따라서 기존 연구에서는 압밀진행에 따른 말뚝의 거동 및 성토체와 말뚝 사이에서의 상호거동에 대하여 분석할 수 없었다. 특히 압밀과 직접적으로 관련되어 있는 부마찰 현상을 배수조건에서 검토한다는 분석방식에는 논리적으로 모순이 포함되어 있는 실정이다. 한편 Zeevaert(1983), Jeong(1992), Lam et al.(2009), Lee(2009b) 및 Lam et al.(2013)에 의하면 말뚝과 인접한 지반에서는 부마찰에 의한 전단응력 전이로 인해 유효수직응력이 감소하는 것으로 알려졌으나 이에 대해 명확하게 규명되지 못한 실정이다. 특히 군말뚝 내 말뚝과 인접한 지반에서 유효수직응력의 변화에 대해서는 Lam et al.(2009) 및 Lam et al.(2013)의 기초적인 연구를 제외하고는 아직까지 구체적인 연구가 수행되지 못하였다. 이에 본 연구에서는 압밀이 진행 중인 연약지반에 근입된 말뚝에 작용하는 부마찰의 특성을 현장조건과 유사하게 모사하기 위해 성토 및 압밀을 고려한 고등 3차원 유한요소해석을 수행하여 단독말뚝 및 군말뚝에 작용하는 부마찰의 특성을 다각도에서 분석하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 유한요소해석 mesh 및 경계조건

본 연구에서는 3차원 유한요소해석 프로그램인 Plaxis-3D를 이용하여 부마찰이 작용하는 단독말뚝과 4×4 및 6×6 군

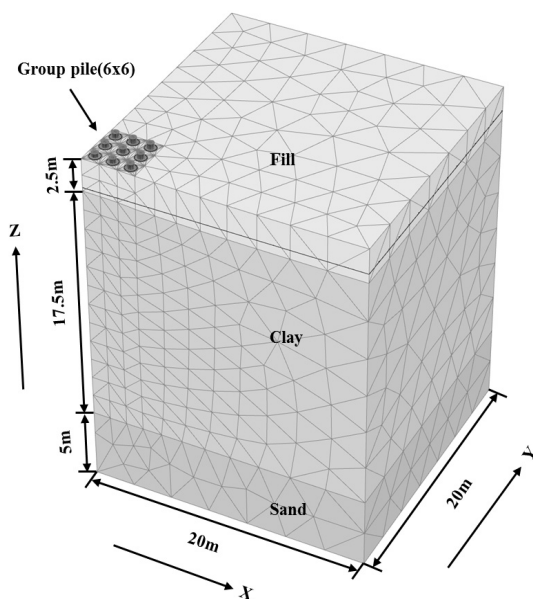


Fig. 1. A representative 3D finite element mesh (1/4 mesh) used in the current study (6×6 pile group)

말뚝의 거동을 압밀해석 및 배수해석을 통해 분석하였다. Plaxis-3D 프로그램은 지반공학 분야의 다양한 문제에 대한 변형 및 안정성 분석을 수행하는 데 사용되는 3차원 유한요소 프로그램이다(Brinkgreve et al., 2015). Plaxis-3D를 통한 3차원 해석에 있어서 흙 및 구조물의 체적은 10개의 절점(node)을 가지는 tetrahedral(사면체) 요소를 통해 모델링된다. Fig. 1은 6×6 군말뚝의 해석에 적용된 유한요소해석 mesh를 보여주며, Fig. 2(a)는 4×4 군말뚝에 대한 해석 단면도를 보여주고 있다. 이때 대칭조건을 적용하여 전체 메쉬의 1/4만을 고려하였다. 본 연구에서 말뚝의 길이는 20m, 직경은

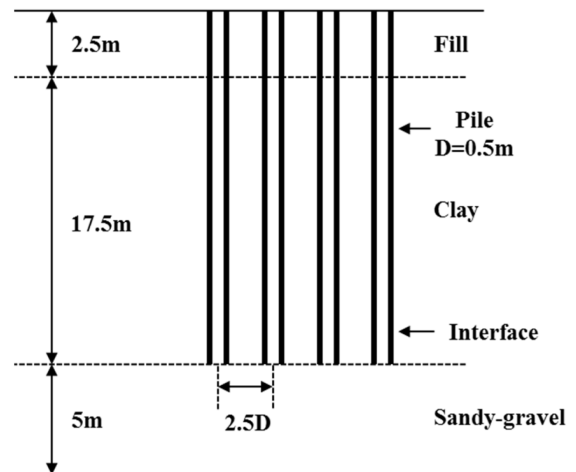


Fig. 2(a). Sectional view of analysis geometry (4×4 pile group, D : pile diameter)

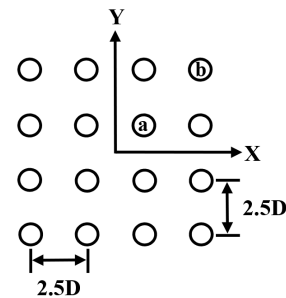


Fig. 2(b). Locations of piles inside a 4×4 pile group (a : G (44a); b : G (44b))

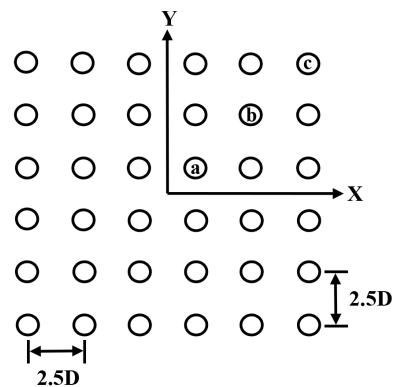


Fig. 2(c). Locations of piles inside a 6×6 pile group (a : G (66a); b : G (66b); c : G (66c))

0.5m로 가정하였으며 군말뚝의 경우 말뚝 중심간의 간격(centre to centre spacing)은 2.5D를 적용하였다(D : 말뚝의 직경 0.5m). 수치해석에서 원지반은 상부의 연약점토(17.5m) 및 모래자갈층(5m)으로 가정하였으며, 말뚝의 선단은 점토와 모래자갈층(Sandy-Gravel)의 경계면에 존재한다. 또한, 부마찰로 인해 유발된 말뚝과 인접한 흙의 응력성분의 변화를 분석하기 위하여 두께 0.2m를 가지는 매우 조밀한 ring 형상의 요소를 별도로 지정하였다. 군말뚝 해석 결과에 대한 합리적 분석을 위해 본 연구에서는 중앙말뚝(centre pile), 중간말뚝(middle pile), 모서리말뚝(corner pile)을 고려했으며 그 위치는 Fig. 2(b)~2(c)에 나타나 있다. 해석 그리드의 바닥은 핀 그리고 측면은 롤러로 지지된 경계조건하에서 해석을 실시하였다. 본 해석에서 지하수위는 점토의 표면에 존재하는 것으로 가정하였다.

## 2.2 지반 및 말뚝의 물성치

Table 1은 해석에 적용된 지반 및 말뚝의 물성치를 보여주고 있다. 본 연구에서는 Phamvan(1989)과 Lee(2001)의 연구결과를 참조하여 지반 및 말뚝의 물성치를 적용하였다. 말뚝에는 등방탄성 모델(isotropic elastic model)이 적용되었고, 연약점토, 성토층(Fill) 및 모래자갈층에는 비관련흐름 법칙(non-associated flow rule) 및 Mohr-Coulomb의 파괴기준(failure criterion)을 따르는 탄소성 모델을 적용하였다. 한편 말뚝-인접지반의 경계에는 경계면 요소(interface element)를 지정하여 소성항복(plastic yielding) 시 미끄러짐(slippage)이 발생할 수 있도록 하였다.

경계면 요소는 지반-구조물의 상호 작용을 적절히 모델화를 가능하게 하는 조인트 요소이며, 말뚝-주변 흙 사이 접촉면에서의 전단거동을 모사하는데 적용할 수 있다(Brinkgreve et al., 2015). 이때 말뚝시공에 의한 흙의 강도감소를 고려

하기 위하여 경계면에서의 전단강도 상수( $c'_{inter}$ ,  $\phi'_{inter}$ )는 강도감소계수(strength reduction factor)  $R_{inter}(0.7)$ 를 이용, Eq. (1)~(2)를 이용하여 산정하였다(Brinkgreve et al., 2015).

$$c'_{inter} = R_{inter} \times c' \quad (1)$$

$$\phi \tan(\phi'_{inter}) = R_{inter} \tan(\tan \phi') \quad (2)$$

여기서  $c'$ 은 흙의 점착력,  $\phi'$ 은 흙의 내부마찰각이다. 본 연구에서는 점토의 압밀거동을 모델링 하기 위하여 배수조건인 지반물성치를 적용하는 effective coupled consolidation 해석을 실시하였다(Brinkgreve et al., 2015). 한편 성토층 및 모래자갈층에는 배수조건인 물성치를 적용하였다. 즉 성토에 의한 점토층의 압밀에 따른 과잉간극수압의 변화를 고려했으며, 말뚝과 인접지반 경계면에서의 상호거동은 유효응력에 의해 지배를 받는 것으로 가정하였다.

## 2.3 해석과정 및 결과분석

본 연구에서는 말뚝시공에 의한 지반교란 및 이에 따른 지반의 응력변화를 포함시키지 않았으므로 본 연구에서 가정한 말뚝은 현장타설말뚝의 거동과 유사하다고 가정할 수 있다. 말뚝은 성토 이전에 점토와 모래의 경계면까지 설치하였으며, 말뚝두부에는 하중을 작용시키지 않았다. 이후 점토지반의 압밀침하 및 말뚝에 부마찰이 발생하는 상황을 모사하기 위하여 Phamvan(1989)의 시공사례를 참조하여 말뚝설치 후 점토의 표면에 2.5m 두께의 성토를 5일 동안 실시하는 것으로 가정하였으며, 점토의 압밀은 성토가 종료된 후 시작되는 것으로 가정하였다. 한편 성토 이후 Table 2와 같이 다양한 압밀도에 대해 압밀해석을 실시했으며, 점토층의 평균압밀도(average degree of consolidation, U)는 배수

Table 1. Material parameters assumed in the current analysis

Material	Model	$K_0$	$\nu'$	E (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$
Clay	Mohr coulomb	0.65	0.3	5	18	3	25
Sandy-gravel		0.50	0.3	50	20	1	35
Fill		0.50	0.2	10	20	1	30
Pile	Elastic	-	0.2	20,000	25	-	-

$K_0$  : earth pressure coefficient at rest,  $\nu'$  : Poison's ratio, E : Young's modulus,  $\gamma$  : unit weight,  $c'$  : cohesion,  $\phi'$  : friction angle, permeability of clay :  $5 \times 10^{-5}$  m/sec

Table 2. Soil settlements and time for consolidation

Degree of consolidation (%)	25	50	75	90	95	Drained
Maximum settlement (mm)	32.5	65	97.5	117	123.5	130
Time (days)	105	460	1,197	2,192	2,947	-

조건 시 발생하는 지표면의 최대 침하와 임의의 시간에서 발생한 지표면의 침하를 비교하여 산정하였다. 한편 말뚝의 축력, ring 형상의 요소에서 응력성분 및 말뚝-인접지반의 경계면에서 상대변위 및 응력성분을 산정하기 위하여 특정 심도에서의 평균값을 적용하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 압밀도에 따른 지반침하 특성

Fig. 3은 압밀도 증가에 따른 far field 위치에서의 지반침하를 흙의 심도에 대해 보여주고 있다. 예상할 수 있듯이 지반침하의 크기는 압밀도에 따라 점차 증가하며, 심도별로 감소하는 분포를 보이고 있다. 이때 점토층의 경우 침하가 지속적으로 증가하는데 비해 성토층 및 모래층은 배수조건의 거동을 보이므로 초기에 발생한 침하량이 더 이상 증가하지 않는 특성을 보인다. 성토층의 경우  $U=25\%$ 인 경우에는 침하량이 40mm 이내로 전단변형이 충분히 크므로 말뚝과 성토층 사이의 경계면에서 흙의 전단강도 대부분이 발휘되었을 것으로 판단된다. 이에 비해 점토층에서는 압밀도가 작은 경우 침하량의 크기가 상대적으로 작고 과잉간극수압이 크므로 말뚝과 점토 사이의 경계면에서는 전단강도의 일부만이 발휘되었을 것으로 추정된다. 말뚝-점토의 경계면에서 전단강도의 발현은 압밀도의 증가에 의한 경계면에서 상대변위의 크기 및 점토의 유효수직응력증가에 영향을 받으며 점차 증가할 것으로 분석된다. 이러한 지반침하 특성은 부마찰로 인해 유발된 말뚝-인접지반의 경계면에서 전단전이

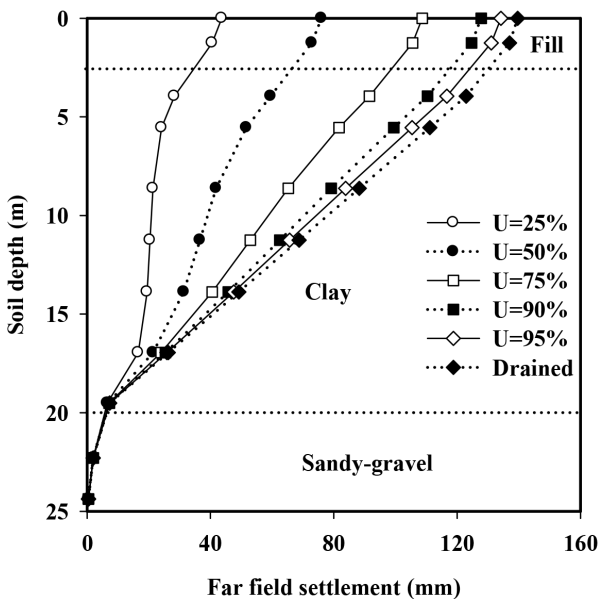


Fig. 3. Ground settlements at far field with depth

특성에 직접적인 영향을 줄 것으로 판단되며 이는 이후 상세히 검토될 것이다.

#### 3.2 말뚝두부의 침하

Fig. 4(a)~4(b)는 압밀도에 따른 정규화된 단독말뚝 및 군말뚝두부의 침하  $\delta/\delta_{s, drained}$ 를 보여주며 이때  $\delta$ 는 부마찰에 의한 말뚝두부의 침하,  $\delta_{s, drained}$ 는 배수조건하에서 단독말뚝의 두부침하를 의미한다. 모든 말뚝에 대해 압밀도 및 압밀시간이 증가함에 따라 말뚝두부 침하량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 성토 직후 말뚝의 침하량은 단독말뚝의 최대침하(즉  $\delta_{s, drained}$ )의 약 32~34% 정도이다. 한편 단독말뚝의 침하량이 가장 크며 군말뚝의 침하는 이에 비해 약 70~

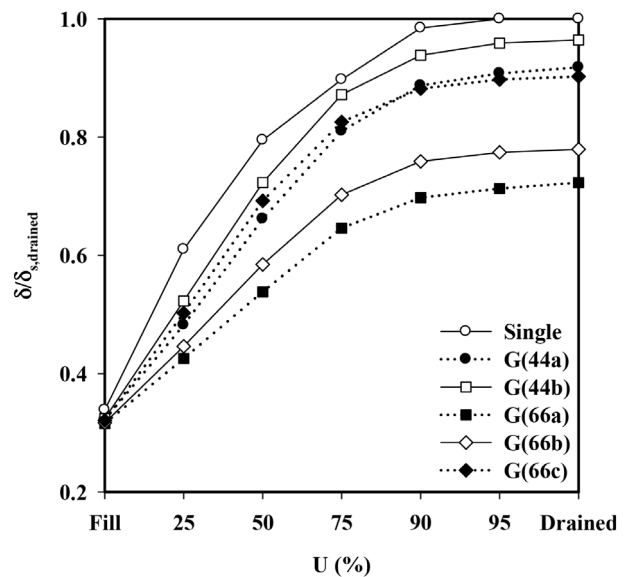


Fig. 4(a). Normalised pile head settlements with degree of consolidation ( $\delta_{s, drained} = 19.5$  mm)

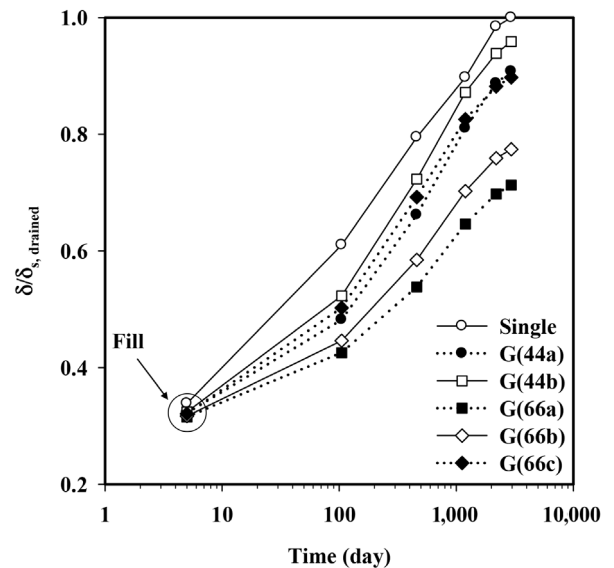


Fig. 4(b). Normalised pile head settlements with consolidation time ( $\delta_{s, drained} = 19.5$  mm)

94%의 크기를 갖는다. 4×4 및 6×6 군말뚝의 경우 말뚝침하량은 중앙부에서 가장 작고, 모서리에서 가장 크게 발생하였다. 이는 군효과(group effect/shielding effect)에 의한 것으로 분석된다(Lee, 2001). 또한, 압밀초기 단계(U=25%)에서 각 말뚝에 대해 최종침하량의 약 53~61%가 발생하며 U=75%까지 선형에 가깝게 증가한다. 그러나 U=75% 이후로는 침하량의 증가 정도는 비교적 미미한 편이며 특히 U=90% 이상인 경우 침하는 거의 증가하지 않는다. 한편 Fig. 4(b)는  $\delta_{s, drained}$ 으로 정규화시킨 각 말뚝두부의 침하를 압밀소요 시간에 대하여 보여주는데 이때 말뚝의 침하는 로그축으로 나타낸 시간에 대해 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

### 3.3 말뚝에 작용하는 상대변위의 분포

Fig. 5(a)는 압밀도에 따른 단독말뚝과 인접지반 사이의 경계면에서 상대변위(relative shear displacement)의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. [상대변위 = 말뚝인접 지반의 침하 - 말뚝의 침하], 그래프에서 (+)ve는 지반의 침하가 말뚝의 침하보다 큰 것을 의미하며(부마찰, negative skin friction), (-)ve는 말뚝의 침하가 지반의 침하보다 큰 것을 의미한다(정마찰, positive shaft resistance). 여기서 Z는 임의지점의 위치, L은 말뚝의 길이(20m)이다. 압밀도가 증가함에 따라 점차 상대변위가 증가하고 있다. 배수조건에서 발생한 최대 상대변위는 약 109mm이며 말뚝의 심도별로 감소하고 있다. 상대변위가 (0)인 중립면(neutral plane)은 약 Z/L=0.90 인근에 위치하며 그 하부에서는 (-)ve의 상대변위가 발생하여 정마찰이 발생하는 것을 알 수 있다. 성토층 자체에서 발생한 상대변위는 비교적 작으나 점토층에서 발생한 큰 상대변위로 인해 U=25%에서 20mm를 초과하는 상대변위가 발생하여 전단강도가 모두 발휘되었을 것으로 추정할 수 있다. 즉 성토층에서의 전단응력 전이는 U=25% 이후 더 이상 발전하지 않는 것으로 판단된다. U=50% 도달 시 중립면 인근을 제외하고는 상대변위의 크기가 충분히 커서 대부분의 전단강도가 발휘되었을 것으로 보인다. 또한, U=75% 이후 상대변위의 증가는 그리 크지 않으므로 이후 부마찰로 인한 전단응력 전이는 주로 압밀진행에 의한 흙의 유효수직응력증가와 관련되었다고 할 수 있다.

Fig. 5(b)~5(c)는 U=50% 및 100%(Drained)에서 단독말뚝 및 군말뚝에 대해 각 말뚝에 대한 상대변위의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 앞서 언급한 군효과로 인해 군말뚝에서의 상대변위는 크게 감소하며 이러한 현상은 특히 중앙부 말뚝에서 두드러진다. 전체적으로 상대변위의 크기는 U=50%인 경우에 비해 U=100%

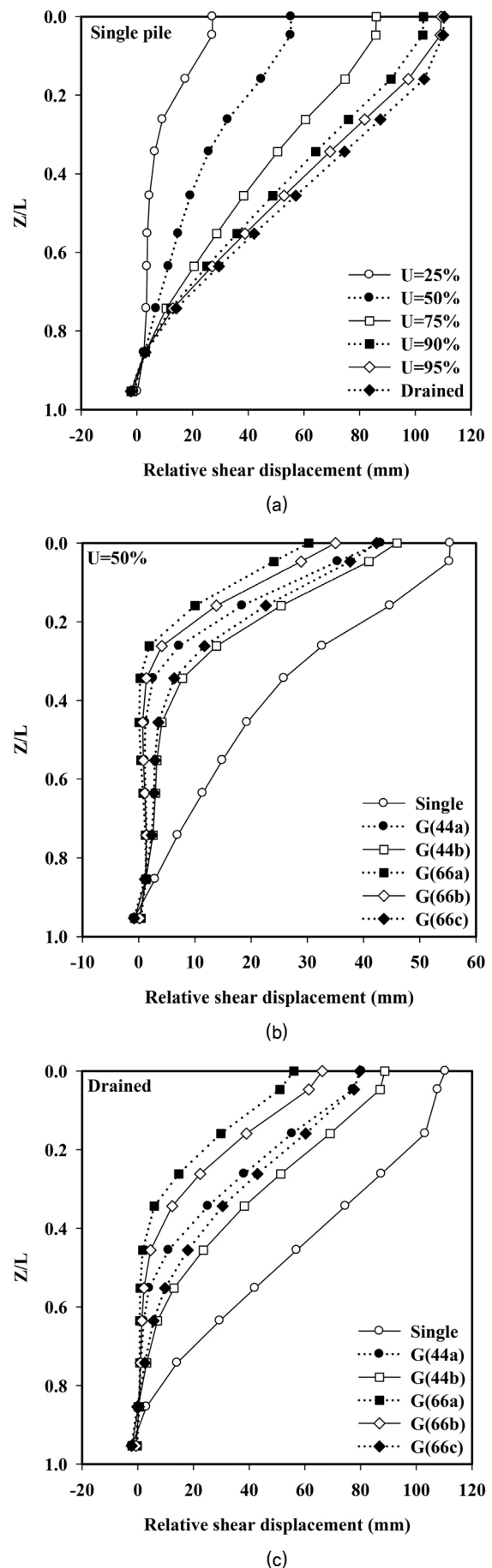


Fig. 5. Distributions of relative shear displacements with depth

일 때 약 2배 증가하는 것을 알 수 있다. 특히  $U=50\%$ 인 경우 군말뚝 상부에서는 상대변위가 매우 작아 전단응력 전이가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

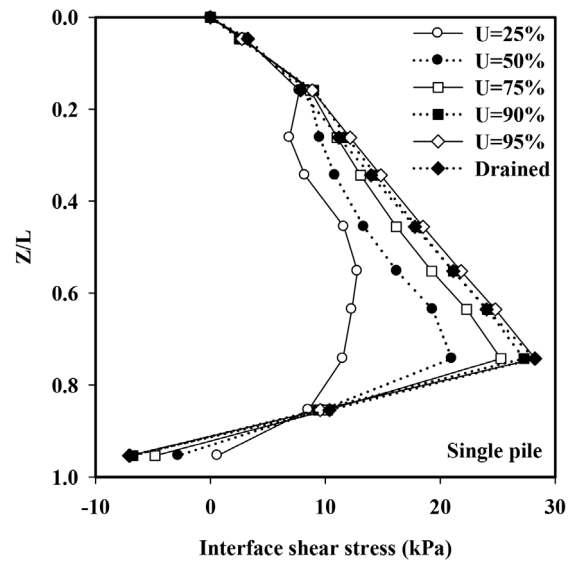
### 3.4 말뚝에 작용하는 전단응력의 분포

Fig. 6(a)는 압밀도의 증가에 따른 단독말뚝-지반의 경계면에서의 전단응력(interface shear stress)의 분포를 보여주고 있다. 말뚝의 선단 부근을 제외하고는 하향의 부마찰이 발생하고, 말뚝의 선단 부근에서는 상향의 마찰저항력이 발생함을 알 수 있다. 성토층의 경우 성토종료 이후 전단응력의 크기는 압밀진행 과정과 거의 무관하게 대체로 일정한 값을 유지하고 있다. 이러한 현상은 앞서 언급한 바와 같이 성토 직후 성토층에서 이미 말뚝과 성토체 사이 경계면에서 대부분의 전단강도가 발휘되어 이후 점토의 압밀진행과는 거의 무관하게 전단응력의 크기가 일정하게 유지되기 때문인 것으로 분석된다. 즉 성토 직후 성토층 내에서 발생한 상대변위는 이미 소성항복을 유발시킬 만큼 충분히 컸음을 알 수 있다. 그러나 점토층에서의 전단응력은 압밀의 진행과 더불어 지속적으로 증가하고 있는데 이는 점토구간에서의 상대변위가 지속적으로 증가하고 있어 소성항복 발생구간이 점진적으로 확대되고 있기 때문으로 판단된다. 압밀도가 25%일 때까지는 전단강도의 극히 일부만이 발휘하지만 압밀도 50~75%에서는 대부분의 전단강도가 발휘하고 있음을 알 수 있다. 또한, 압밀도 75% 도달 이후로는 전단응력의 증가가 비교적 작은 편인데, 이는 앞서 언급한 압밀진행에 따라 상대변위가 증가하는 경향과 일치한다.

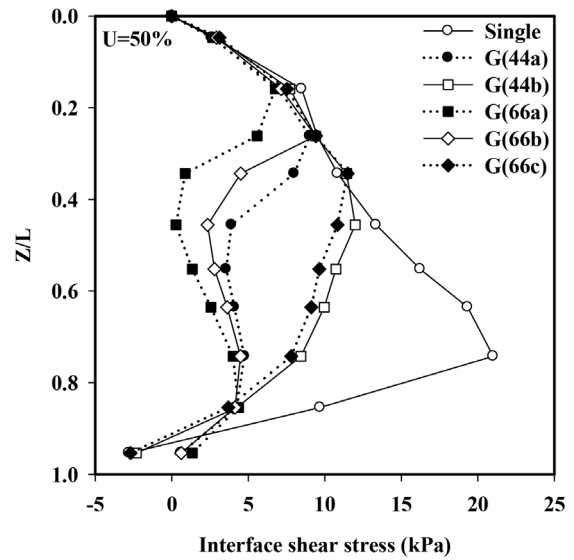
Fig. 6(b)~(c)는  $U=50\%$  및 100%(Drained)에서 단독말뚝 및 군말뚝의 각 말뚝에 대한 전단응력 분포를 정규화된 말뚝의 심도( $Z/L$ )에 대하여 보여주고 있다. 앞서 언급한 군효과로 인해 군말뚝에서의 전단응력은 크게 감소하며 이러한 현상은 특히 중앙부 말뚝에서 두드러진다. 즉 군말뚝의 경우 경계면에서 전단강도의 극히 일부만이 발휘된 것을 알 수 있다.  $U=50\%$ 인 경우 단독말뚝에 비해 군말뚝의 중앙부에서 전단응력의 크기는 매우 작아 부마찰력의 크기 역시 그러할 것으로 판단된다.

### 3.5 말뚝에 작용하는 부마찰력

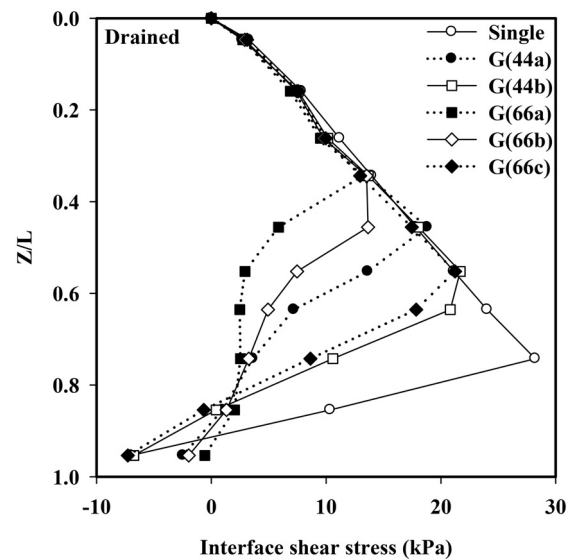
Fig. 7(a)는 압밀진행에 따른 단독말뚝에 작용하는 정규화된 부마찰력의 분포,  $P/P_{s, \text{drained}}$ 를 보여주고 있다. 여기서  $P$ 는 말뚝에 작용하는 부마찰력을 의미하며, 각 말뚝에 작용하는 부마찰력은 배수조건에서 산정된 최대 부마찰력의 크기인  $P_{s, \text{drained}}$ 를 이용하여 정규화하였다. 말뚝에 작용하는 부마찰력은 압밀의 진행에 따라 점차 증가하고 있다. 성토층



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Distributions of interface shear stresses with depth

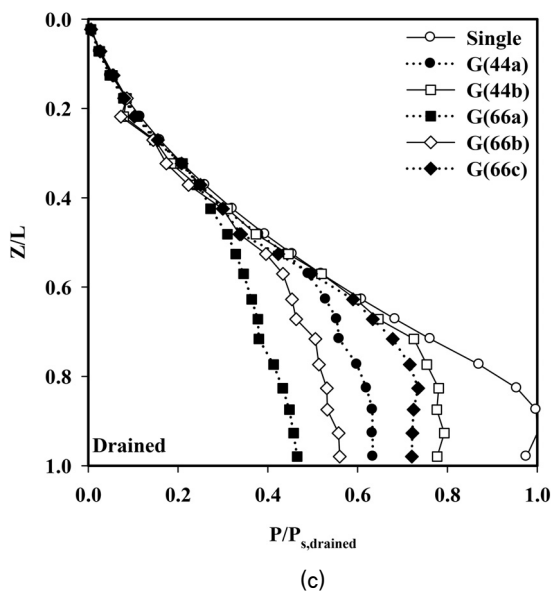
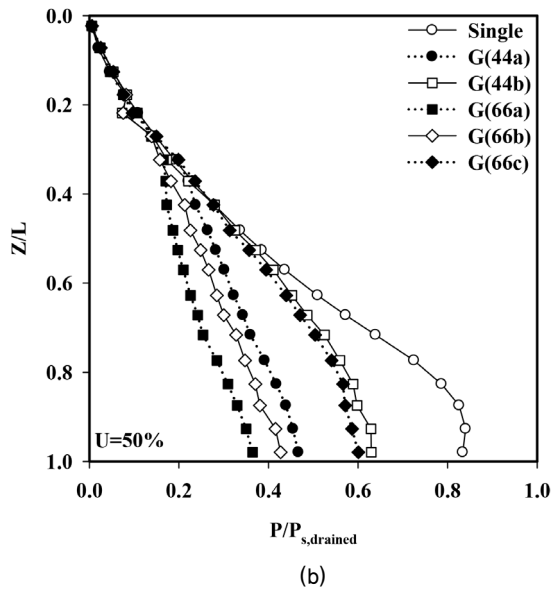
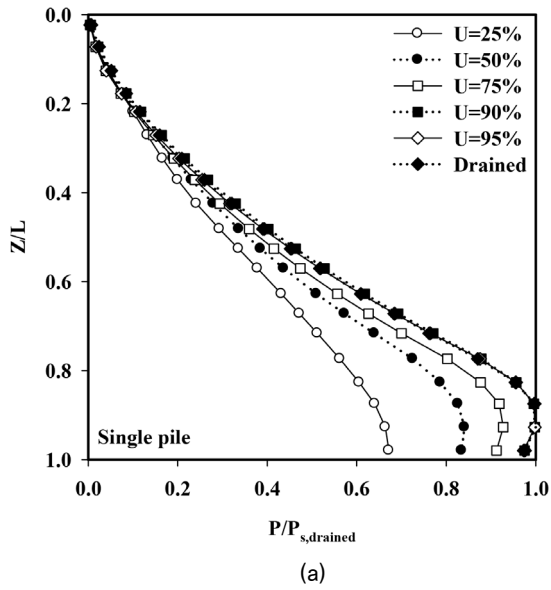


Fig. 7. Distributions of normalised dragloads with depth ( $P_{s, \text{drained}} = 532.3 \text{ kN}$ )

과 접한 말뚝의 심도에서는( $Z/L=0.0\sim 0.125$ ) 압밀의 진행과 크게 관계없이 거의 일정한 부마찰력의 분포를 가진다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 성토하중 작용 시 발생하는 성토층 및 점토층의 탄성변형으로 인해 이미 전단강도의 대부분이 발휘되었기 때문으로 판단된다. 한편 점토층에서는 압밀이 진행됨에 따라 부마찰력이 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 대부분의 부마찰은  $U=75\%$ 에서 발생하며 이후의 증가량은 그리 크지 않은데 이러한 경향은 Phamvan(1989), Leung et al.(2004), Leung(2009) 및 Jeong et al.(2014)의 연구결과와 유사하다. 점토층의 상부부근에서는 소성항복이 비교적 조기에 발생하여 그 이후의 부마찰력 증가는 주로 과잉간극수압의 소산에 의한 지중응력의 증가와 관련이 있는 것으로 판단된다. 한편 점토의 중앙부에서는 압밀의 진행에 따라 부마찰력이 지속적으로 증가하고 있는데 이는 상대변위의

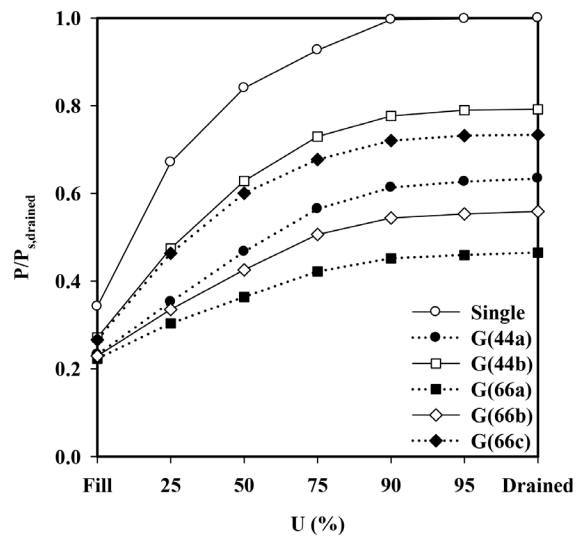


Fig. 8(a). Maximum normalised dragloads with degree of consolidation ( $P_{s, \text{drained}} = 532.3 \text{ kN}$ )

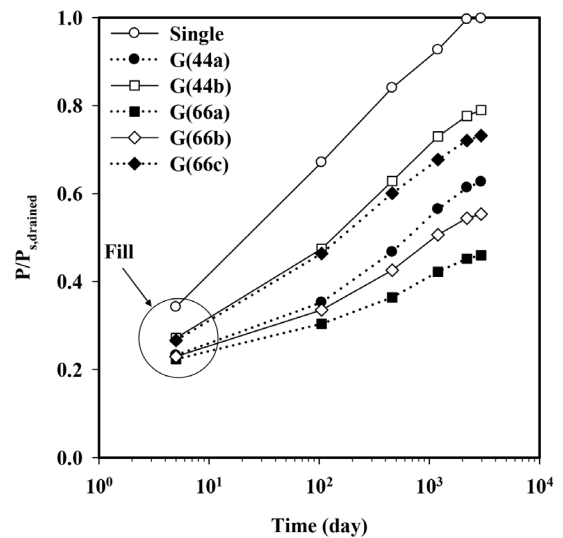


Fig. 8(b). Maximum normalised dragloads with consolidation time ( $P_{s, \text{drained}} = 532.3 \text{ kN}$ )

점진적 증가 및 압밀의 진행에 따른 유효지중응력의 증가가 동시에 영향을 주기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 7(b)~7(c)는  $U=50\%$  및  $100\%$ (Drained)인 조건에서 단독말뚝 및 군말뚝에 대해 산정된 정규화된 부마찰력의 분포를 정규화된 말뚝의 심도( $Z/L$ )에 대하여 보여주고 있다. 앞서 언급한 군효과로 인해 군말뚝에서의 부마찰력은 크게 감소하며 이러한 현상은 특히 중앙부 말뚝에서 두드러진다.  $U=50\%$ 인 경우에 비해 배수조건의 부마찰력의 크기는 약간 더 증가하였다. 앞서  $U=50\%$ 에 비해 배수조건에서의 상대변위는 약 2배 증가한다고 언급한 바 있으나 이에 비해 부마찰력의 증가는 미미한 편으로 이는  $U=50\%$ 에서 상대변위의 크기가 말뚝-흙 사이의 경계면에서 소성항복을 유발시킬 만큼 충분히 크기 때문이며 이후 부마찰력의 증가는 대부분 점토의 유효수직응력증가와 관련되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 8(a)~8(b)는 압밀도에 따른 정규화된 단독 및 군말뚝의 최대 부마찰력의 크기를 보여준다. 이때 각 말뚝에 작용하는 최대 부마찰력은 배수조건에서 산정된 단독말뚝의 최대 부마찰력의 크기인  $P_{s, drained}$ 를 이용하여 정규화하였다. 말뚝에 작용하는 부마찰력은 군말뚝에 비해서는 단독말뚝이 더 크며, 군말뚝의 경우 모서리 말뚝에 비해 중앙부 말뚝의 부마찰력이 더 작게 산정된다. 이는 앞서 논의한 부마찰력이 증가하는 경향과 유사하다. 점토층의 압밀이 진행될수록 최대 부마찰력 역시 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 부마찰력은 로그축으로 나타낸 시간에 대해 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보인다.

### 3.6 말뚝 인접지반의 수직응력성분 변화

앞서 언급한 바와 같이 Zeevaert(1983)에 의하면 말뚝에

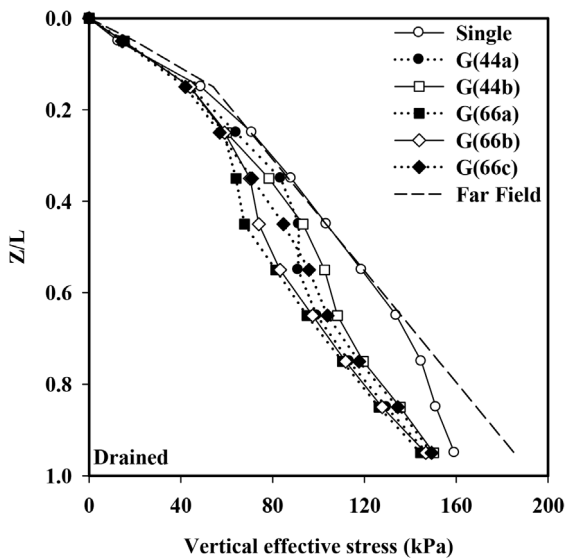
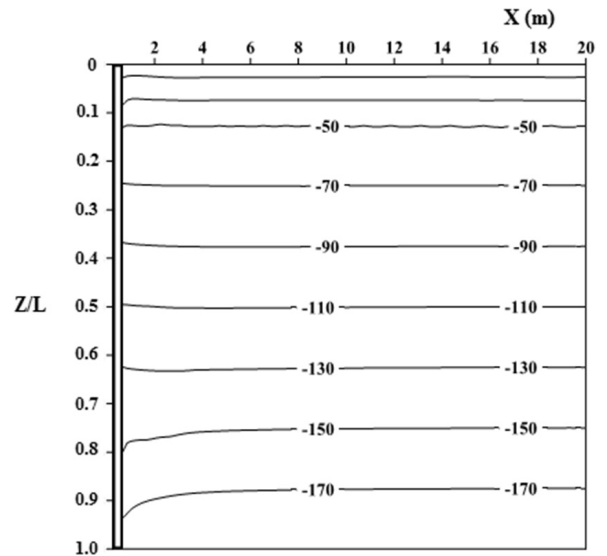
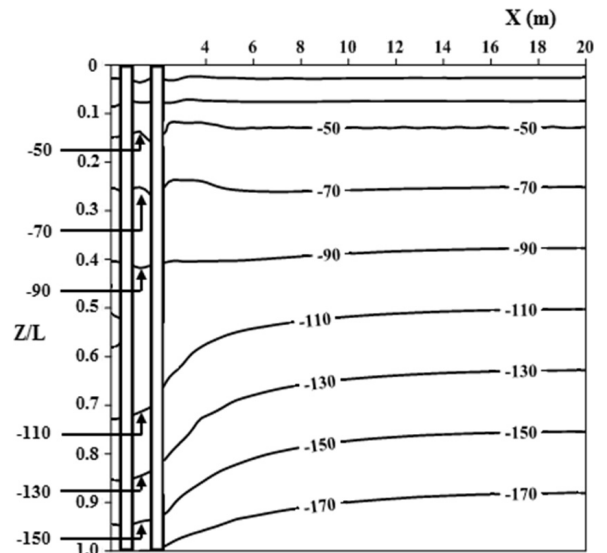


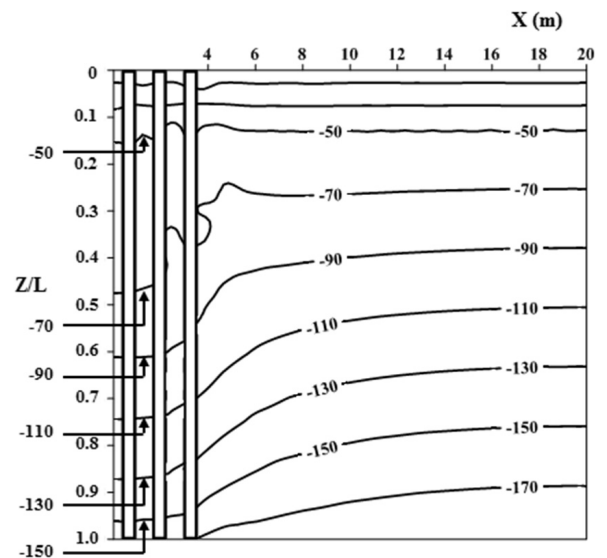
Fig. 9. Distributions of effective vertical stresses with depth



(a) Single pile



(b) 4x4 pile group



(c) 6x6 pile group

Fig. 10. Distributions of effective vertical soil stresses (unit : kPa)



부마찰이 작용하는 경우 주변지반 응력의 일부가 말뚝으로 전이되므로 말뚝 인근 흙의 수직응력이 감소하게 된다. Fig. 9는 배수조건에서 단독말뚝, 4×4 군말뚝 및 6×6 군말뚝과 인접한 두께 200mm ring 형상의 흙 요소에서 심도별 유효 수직응력분포를 보여준다. 또한, 말뚝과 인접한 흙에서의 유효수직응력과의 비교를 위해 far field에서의 유효수직응력도 포함하였다. Fig. 9에 의하면 성토층 및 점토의 상부를 제외하고는 유효수직응력이 far field 조건에 비해 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 단독말뚝의 경우에 비해 군말뚝의 경우 유효수직응력의 감소 정도가 현저히 증가하는 것

을 볼 수 있다. 단독말뚝에서는 말뚝의 하부부근에서 유효 수직응력이 감소하는데 비해, 군말뚝의 경우 말뚝상부에서부터 수직응력이 지속적으로 감소하고 있다. 또한, 4×4 군말뚝에 비해 6×6 군말뚝 인근 흙의 유효수직응력 감소가 더 크며 모서리 말뚝에 비해 중앙부 말뚝과 인접한 흙에서의 유효수직응력이 더 크게 감소한다. Far field 조건에서의 유효수직응력의 총합(유효수직응력×흙의 심도)에 비해 단독말뚝의 경우 약 4.3%가 감소하며, 4×4 및 6×6 군말뚝의 경우 각 말뚝의 위치에 따라 각각 15.2~18.5% 및 19.6~26.1%가 감소하는 것으로 분석되었다.

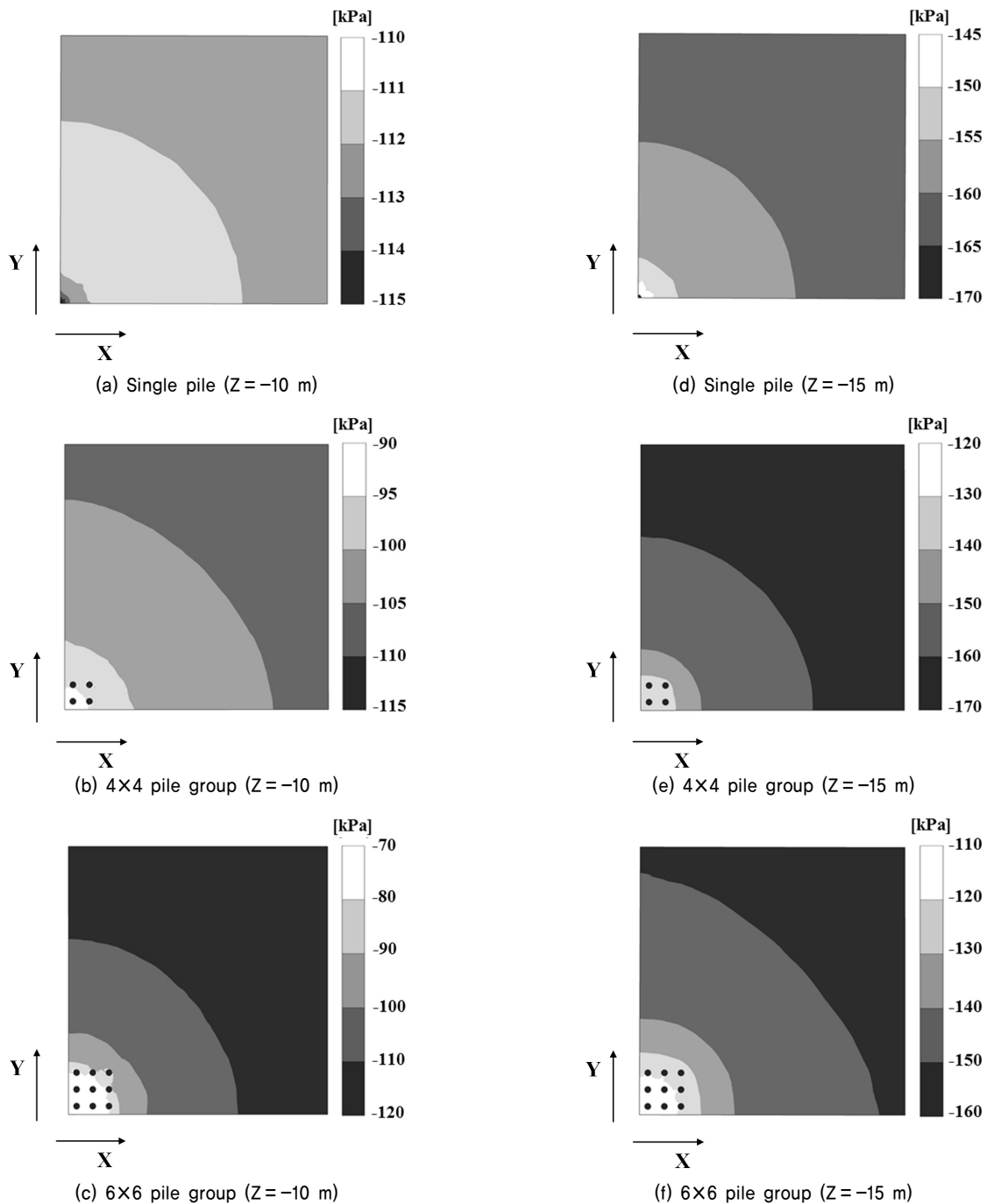


Fig. 11. Distributions of effective vertical soil stresses (a-c : Z = -10 m, d-f : Z = -15 m), (Range of X and Y = 0-20 m) (unit : kPa)

한편 Fig. 10(a)~10(c)는 XZ 평면에서 흙 요소의 유효수직응력을, Fig. 11(a)~11(f)는 XY 평면에서 흙 요소의 유효수직응력을 등고선으로 표현하여 보여준다. 여기서 Fig. 11(a)~11(f)는 심도 Z=-10m 및 -15m에서 흙의 유효수직응력의 분포를 보여준다. 이때 각각의 그래프는 배수조건에서의 단독말뚝, 4×4 및 6×6 군말뚝에 대한 흙의 유효수직응력분포를 나타낸다. 각 등고선에 명확하게 확인할 수 있는 것처럼 유효수직응력의 감소 정도는 단독말뚝보다는 군말뚝에서 두드러지며 특히 중앙부 말뚝 인근에서 가장 크게 감소한다. 또한, 흙의 유효수직응력은 말뚝으로부터의 수평이격거리가 증가할수록 점차 감소하는 경향을 보이는데 이는 Jeong(1992)의 수치해석 결과와 일치한다. 이런 경향을 고려할 때 부마찰에 의한 영향범위는 20D 정도로 평가된다. Fig. 11(a)~11(f)로 부터 말뚝과 인접한 흙에서 유효수직응력이 감소하는 정도는 단독말뚝, 4×4 및 6×6 군말뚝에 대해 각각 최대 약 10%, 25% 및 35%인 것으로 분석된다.

그러나 수직응력의 감소에 비해 수평응력의 변화는 거의 관찰되지 않았는데 이는 Lee(2009b) 및 Lam et al.(2013)의 해석결과와는 상이하다. 이는 기존 수치해석연구에서는 점토의 표면에 작용하는 상재하중에 의해 말뚝에 부마찰이 유발되었으나 본 연구에서는 실제성토에 의해 부마찰이 유발되었다는 점과 관련이 있는 것으로 추정할 수 있으나, 아직까지 실험이나 현장실측을 통해서 확인되지 못했으므로 이에 대해 명확하게 규명할 필요가 있다고 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 압밀이 진행 중인 연약지반에 근입된 말뚝의 거동을 압밀을 고려한 3차원 유한요소해석을 실시하여 고찰하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 성토체와 인접한 말뚝의 상부에서는 대부분의 부마찰력이 성토 직후 발생하였으며 이때 발생한 말뚝-성토체 사이 경계면에서 성토체의 소성항복으로 인해 하부점토의 압밀진행과 무관하게 부마찰력의 크기는 거의 일정하게 유지되었다.
- (2) 말뚝에 작용하는 부마찰력 및 말뚝의 침하는 압밀이 진행될수록 증가하는데 압밀도 50~75% 도달 이후 그 증가량은 비교적 작은 것으로 분석되었다. 이는 말뚝-지반 경계면에서 발생한 소성항복과 관련된 것으로 소성항복 발생 이후 부마찰력의 증가는 주로 압밀의 진행에 따른 흙의 유효응력 증가와 관련이 있는 것으로 분석되었다.

- (3) 부마찰 발생과 관련된 전단응력 전이로 인해 말뚝과 인접한 흙의 유효수직응력은 심도에 따라 점차 감소하는 것으로 분석되었으며, 이러한 경향은 군말뚝 특히 중앙부 말뚝과 인접한 지반에서 가장 큰 것으로 크게 나타났다. 6×6 군말뚝의 경우 말뚝과 인접해 있는 흙의 유효수직응력은 far field 조건에 비해 최대 약 35% 감소하는 것으로 산정되었다. 한편 수직응력의 감소를 고려한 부마찰 영향권의 범위는 말뚝으로부터 수평으로 대략 20D 정도로 분석되었다. 여기서 D는 말뚝의 직경이다. 그러나 수직응력의 감소에 비해 수평응력의 분포는 부마찰의 영향을 거의 받지 않는 것으로 분석되었는데 이에 대한 심화 연구가 필요하다고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2015년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였습니다(과제번호-520150078).

### References

1. Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S. and Swolfs, W. M. (2015), Reference manual, Plaxis 3D 2015 user's manual (Edited by Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S and Swolfs, W. M), pp. 1~284.
2. Comodromos, E. and Bareka, S. (2005), Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis, Computers and Geotechnics, Vol. 32, No. 3, pp. 210~221.
3. Jeong, S. S. (1992), Nonlinear three-dimensional analysis of downdrag on pile groups, PhD thesis, Texas A&M University, pp. 1~165.
4. Jeong, S.S., Ko, J. Y., Lee, C. J. and Kim, J. H. (2014), Response of single piles in marine deposits to negative skin friction from long-term field monitoring, Marine Georesources & Geotechnology, 32, pp. 239~263.
5. Lam, S. Y., Ng, C. W. W., Leung, C. F. and Chan, S. H. (2009), Centrifuge and numerical modelling of dragload effects on piles in consolidating ground, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, No. 1, pp. 10~24.
6. Lam, S. Y., Ng, C. W. W. and Poulos, H. G. (2013), Shielding piles from downdrag in consolidating ground, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No. 6, pp. 956~968.
7. Lee, C. J. (2001), The influence of negative skin friction on piles and in pile groups, PhD thesis, Cambridge University, pp. 1~R13.
8. Lee, C. J., Bolton, M. D. and Al-Tabbaa, A. (2002), Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in piles foundations, Geotechnique, Vol. 52, No. 5, pp. 325~335.
9. Lee, C. J. and Ng, C. W. W. (2004), Development of downdrag on piles and pile groups in consolidation soil, Journal of Geo-

- technical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 9, pp. 905~914.
10. Lee, C. J., Lee, J. H. and Jeong, S. S. (2006), The influence of soil slip on negative skin friction in pile groups connected to cap, *Geotechnique*, Vol. 56, No.1, pp. 53~56.
  11. Lee, C. J. (2009a), A study of the influence of negative skin friction on single piles from consolidation analyses, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 10, No. 2, pp. 29~36 (in Korean).
  12. Lee, C. J. (2009b), The Influence of reduction of vertical stress on the behaviour of piles subjected to negative skin friction, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 1C, pp. 33~39 (in Korean).
  13. Leung, C. F., Liao, B. K., Chow, Y. K., Shen, R. F. and Kog, Y. C. (2004), Behavior of pile subject to negative skin friction and axial load, *Soils & Foundations*, Vol. 44, No. 6, pp. 17~26.
  14. Leung, C. F. (2009), Negative skin friction on piles, *Indian Geotechnical Conference 2009*, Guntur, India, pp. 827~836.
  15. Ng, C. W. W., Poulos, H. G., Chan, V. S. H., Lam, S. S. Y. and Chan, G. C. Y. (2008), Effects of tip location and shielding on piles in consolidating ground, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 134, No. 9, pp. 1245~1260.
  16. Phamvan, P. (1989), Negative skin friction on driven piles in Bangkok subsoils, Ph.D Thesis, AIT, Bangkok, Thailand, pp. 1~235.
  17. Zeevaert, L. (1983), *Foundation engineering for difficult subsoil conditions*, 2<sup>nd</sup> Edition, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 351~395.