

압밀이 진행중인 지반에 설치된 말뚝의 공학적 거동을 지배하는 주요인자들에 대한 연구

A Study of Governing Factors on the Engineering Behaviour of a Single Pile in Consolidating Ground

김 성 희¹⁾ · 전 영 진¹⁾ · 김 정 섭¹⁾ · 이 철 주[†]

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

Received: December 28th, 2016; Revised: January 24th, 2017; Accepted: April 4th, 2017

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 a single pile in consolidating ground from coupled consolidation analyses. A single pile with typical minimum and maximum ranges of fill height and clay stiffness has been modelled. The computed results demonstrate that the higher the height of the fill above the clay surface and the smaller the stiffness of the clay, the higher the dragloads and the negative skin friction-induced pile settlements. It has been found that the development of dragloads and pile settlement is more governed by the stiffness of the clay rather than the height of the fill. Positive shaft resistance is mobilised only after the average degree of consolidation is larger than 50%. Although the pile is installed when the degree of consolidation is 50% or more, relatively large negative skin friction can nevertheless develop on the pile. On the other hand, when a load is applied on the pile experiencing an increase in the negative skin friction with time during consolidation, the pile undergoes a large increase in the final settlement of up to 95% compared to that of a pile without axial load on the pile head. The allowable pile capacity when there is negative skin friction on the pile is reduced by about 4-11% compared to a pile without negative skin friction.

Keywords : Design of piles, Negative skin friction, Numerical modelling and analysis, Piles, Soft ground

요 지 : 본 연구에서는 압밀을 고려한 고등 3차원 유한요소해석을 통하여 압밀이 진행중인 지반에 근입된 단독말뚝의 거동을 지배하는 주요인자에 대한 검토를 실시하였다. 일반적으로 실무에서 고려되는 최소 및 최대 범위의 성토고 및 연약지반의 탄성계수를 가정하여 단독말뚝을 고려하였다. 성토고가 높을수록 그리고 점토의 탄성계수가 작을수록 말뚝에 작용하는 부마찰은 증가하는 것으로 나타났으며, 부마찰력 및 침하는 성토고 보다는 점토의 탄성계수에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 부마찰에 의한 말뚝의 부마찰력 및 침하는 압밀 초기 단계에서 비교적 빠르게 발생하는 것으로 분석되었다. 정마찰은 압밀 초기에는 발현되지 않았다가 압밀도 50% 이후부터 급격하게 증가하였다. 말뚝이 압밀이 상당히 진행된 압밀도 50% 이상인 지반에 설치되어도 비교적 큰 크기의 부마찰이 말뚝에 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 한편 부마찰이 발생 중인 말뚝에 하중을 작용시키면 그렇지 않은 경우에 비해 말뚝의 최종침하가 최대 약 95% 증가하는 것으로 나타났다. 부마찰이 작용하는 말뚝의 설계지지력은 부마찰이 작용하지 않는 말뚝에 비해 약 4-11% 감소하는 것으로 분석되었다.

주요어 : 말뚝의 설계, 말뚝, 연약지반, 부마찰, 수치해석

1. 서 론

상부구조물을 지지하기 위해 연약지반에 근입되는 말뚝이 적절하게 시공되지 못한 경우, 부마찰(negative skin friction)로 인해 상부구조물의 사용성 및 안정성이 심각하게 저하되는 지반재해가 발생할 우려가 있다. 이는 태풍, 국지성 집중호우 및 풍수해 등에 의해 유발되는 산사태나 토석류 같은 자연 지반재해와는 그 성격이 상이한 인공지반재해라고 할 수 있

다. 압밀이 진행 중인 근입된 말뚝에는 침하로 인한 말뚝과 인접한 지반 사이의 상대전단변위(relative shear displacement) 즉 전단응력전달(shear stress transfer)로 인해 부마찰이 발생하며 말뚝에 상재하중과는 무관한 압축력(dragload) 및 침하(downdrag)가 발생한다(Lee, 2001; Jeong et al., 2014). 실례로 압밀이 진행중인 연약지반 상에 시공된 말뚝이 설계 및 시공이 적절하게 이루어지지 못했을 경우 상부구조물의 균열 및 부등침하 발생의 사용성 저하, 압축력에 의한 말뚝

1) Post Graduate Research Student, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

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

의 파손 및 군말뚝의 경우 외곽말뚝이 기초판에서 인발되는 등 다양한 피해사례가 보고된 바 있다(Lee, 2001). 이러한 피해의 대부분은 부마찰로 인해 발생한 말뚝의 과도한 침하로 인한 것이다. 본 연구에서는 이러한 지반재해와 밀접한 관련이 있는 압밀이 진행중인 지반에 근입된 말뚝의 거동에 대한 연구를 수행하였다.

이러한 현상에 대해 지난 50여 년간 다양한 현장, 실내시험 및 이론적인 연구가 수행되어 왔으며, 이를 통해 부마찰이 발생하는 기본 메커니즘에 대해 명확하게 규명되었다(Lee, 2001; Leung, 2009). 그러나 기존 이론연구의 대부분은 배수조건하에서 말뚝에 작용하는 부마찰에 대한 연구로 국한되어 있으며, 연약지반의 압밀은 연약지반 표면에 실시되는 성토가 아닌 연약점토 상부에 등분포응력을 작용시키는 방식으로 모델링 되어 왔다(Lee et al., 2002; Lee & Charles, 2004; Comodromos & Bareka, 2005; Lee et al., 2006; Ng et al., 2008; Lee, 2009a & 2009b). 따라서 기존 연구에서는 압밀진행에 따른 말뚝의 거동 및 성토체와 말뚝 사이에서의 상호거동에 대하여 분석할 수 없었다. 특히 압밀침하의 영향을 받는 부마찰 현상을 배수조건에서 검토하는 기존의 분석방식은 논리적으로 모순이다. 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 말뚝과 인접한 지반에서 유효수직응력의 변화에 대해서는 Lam et al.(2013) 및 Kim et al.(2016)의 기초적 연구를 제외하고는 아직까지 구체적인 연구가 수행되지 못하였다.

압밀이 진행중인 지반에 근입된 말뚝의 거동은 주로 지반의 침하량에 영향을 받으므로(Lee & Charles, 2004) 그 거동을 지배하는 주요인자는 결국 성토고와 점토의 강성이다. 또한 말뚝은 성토 이후 점토지반이 일정한 압밀도에 도달된 이후 설치되는 경우가 많으며, 그 후 압밀이 진행되어 부마찰력이 점차 증가하는 가운데 말뚝두부에 상재하중이 작용할 수 있다. 이러한 상황은 실무적인 관점에서 매우 중요하지만 이에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실무에서 부마찰과 관련하여 발생할 수 있는 다양한 상황에 대한 분석을 수행하였다. 즉 점토의 탄성계수 및 성토고, 압밀이 진행중인 지반에 말뚝이 설치되는 시점, 말뚝두부에 상재하중이 작용하는 시점, 그리고 부마찰의 발생으로 인한 설계지력의 감소 등에 대한 상세분석을 실시하였다. 이에 본 연구에서는 압밀이 진행중인 연약지반에 근입된 말뚝에 작용하는 부마찰의 특성을 현장조건과 유사하게 모사하기 위해 성토 및 압밀을 고려한 고등 3차원 유한요소해석을 수행하여 단독 말뚝에 작용하는 부마찰의 특성을 다각도에서 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 해석조건

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석 프로그램인 Plaxis-3D를 이용하여 부마찰이 작용하는 단독말뚝의 거동을 압밀해석 및 배수해석을 통해 분석하였다. Plaxis-3D는 지반공학 분야의 다양한 문제에 대한 지반 및 구조물의 변형 및 안정성 분석을 수행하는데 널리 사용되고 있다(Brinkgreve et al., 2015). 3차원 해석에 있어 흙 및 구조물의 체적은 10개의 절점(node)을 가지는 사면체(tetrahedral) 요소를 통해 모델링 되었다. 본 연구에서는 XY 평면에 대한 대칭조건을 적용하여 전체 메쉬의 1/4만을 고려하였다. Fig. 1(a)는 해석에 적용된 대표 유한요소해석 mesh를 보여주며, Fig. 1(b)는

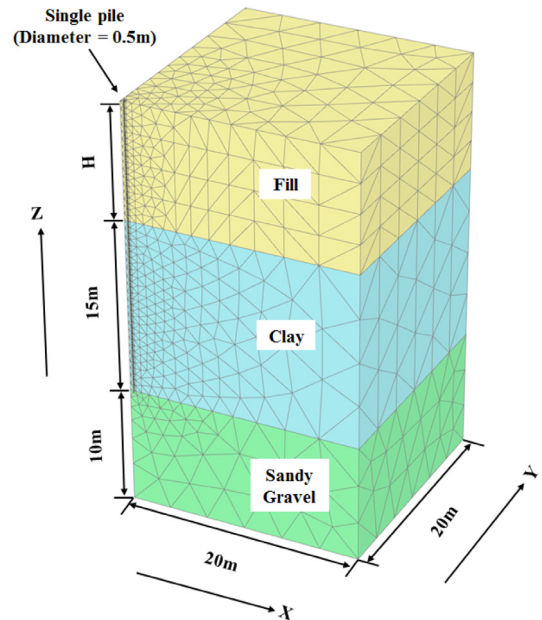


Fig. 1(a). A representative three-dimensional finite element mesh used in the numerical modelling ($H=2.5-10$ m)

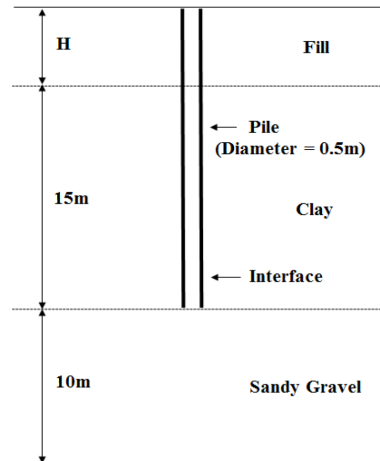


Fig. 1(b). A sectional view of analysis geometry ($H=2.5-10$ m)

해석 단면도를 보여주고 있다. 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 부마찰이 작용하는 말뚝의 거동을 지배하는 주요 요소를 고려하기 위하여 다양한 성토고(H=2.5, 5, 7.5, 10m)에 대해 검토하였다. 본 연구에서 말뚝의 직경은 0.5m이며 그 길이는 (15+H)m로 가정하였다. 수치해석에서 성토체를 제외한 나머지 지반은 상부의 연약점토 15m 및 하부의 모래자갈층 10m로 가정하였으며, 말뚝의 선단은 점토와 모래자갈층의 경계면에 위치하며, 모래자갈층이 지지층으로 작용한다. 또한 부마찰로 인해 유발된 말뚝과 인접한 흙의 응력성분의 변화를 분석하기 위하여 두께 0.25m를 가지는 링(ring) 형태의 그룹을 지정하였다. 본 해석에서 지하수위는 점토의 표면에 존재하는 것으로 가정하였다.

2.2 재료의 물성치

본 연구에서는 Phamvan(1989) 및 Lee(2001)의 연구결과를 참조하여 지반 및 말뚝의 물성치를 적용하였다. Table 1은 해석에 적용된 지반 및 말뚝의 물성치를 보여준다. 점토층의 침하를 지배하는 주요 영향인자인 점토의 강성을 검토하기 위해 매우 연약한(very soft) 점토에서 견고한(stiff) 점토의 일반적 범위라고 할 수 있는 2-20MPa의 탄성계수를 해석에서 고려하였다(Lee, 2001). 말뚝에는 등방탄성모델(isotropic elastic model)이 적용되었고 연약점토, 성토층 및 모래자갈층에는 Mohr-Coulomb의 파괴기준(failure criterion) 및 비관련흐름법칙(non-associated flow rule)으로 정의되는 탄소성 모델을 적용하였다. 또한 말뚝-인접지반의 경계에 경계면 요소(interface element)를 지정하여 소성항복(plastic yielding)이 유발될 경우, 전단응력의 크기가 증가하는 것을 제한하고 말뚝과 지반 사이에 미끄러짐(slip)이 적절히 발생할 수 있도록 하였다.

지반-구조물 경계면에서의 상호 작용을 적절히 모델링하기 위하여 조인트 요소를 적용하였고, 말뚝-주변 흙 사이 접

촉면에서의 전단응력전이 과정을 적절히 반영할 수 있다(Brinkgreve et al., 2015). 이때 말뚝시공으로 인해 감소된 말뚝-인접지반 사이에서의 전단강도상수(c'_{int} , ϕ'_{int})는 다음의 Eq. (1)-(2)의 강도감소계수(strength reduction factor, $R_{int}=0.7$)를 적용하여 산정하였다(Brinkgreve et al., 2015).

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

$$\phi'_{int} = \tan^{-1}(R_{int} \tan(\phi')) \quad (2)$$

여기서 c' 은 흙의 점착력이고, ϕ' 은 흙의 내부마찰각이다.

2.3 수치해석 과정 및 분석

본 해석에서는 Phamvan(1989)의 시공사례를 참조하여 말뚝의 시공 및 성토 과정을 모델링 하였다. 말뚝은 성토가 실시되기 이전 지중에 근입되는 것으로 가정하였다. 이후 점토층의 압밀 발생 및 이로 인한 말뚝에 부마찰이 발생하는 상황을 분석하기 위하여 말뚝설치 후 점토의 표면에 2.5-10m 두께의 성토가 5일 동안 실시되는 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 말뚝시공에 의한 말뚝과 인접한 지반의 상태변화(응력 및 함수비 변화)를 고려하지 않았으므로 본 연구에서 가정한 말뚝은 현장타설말뚝의 거동과 유사하다고 가정할 수 있다(Lee, 2001). 즉 말뚝과 인접한 지반의 수직 및 수평 성분은 순수하게 흙만 존재하는 경우와 동일하다. 성토 이후 Table 2와 같이 다양한 압밀도에 대해 압밀해석을 실시했으며, 점토층의 평균압밀도(average degree of consolidation, U)는 배수조건인 지표면의 최대침하와 임의의 시간에서 발생한 지표면의 침하를 비교하여 산정하였다. 한편 말뚝의 축력 및 말뚝과 인접한 지반에 설치된 ring 요소에서의 응력성분을 산정할 때는 특정 심도에서의 평균값을 고려하였다.

Table 1. Material parameters assumed in the numerical modelling (Slightly modified from Lee, 2001)

Soil/Pile	Model	E (MPa)	c' (kPa)	ϕ'	γ (kN/m ³)	K_0	v'
Clay	Mohr coulomb	2-20	3	25	18	0.65	0.3
Sandy-gravel		50	1	35	20	0.50	0.3
Fill		10	1	30	20	0.50	0.2
Pile	Elastic	20,000	-	-	25	-	0.2

E=Young's modulus, c' =cohesion, ϕ' =friction angle of soil, γ =unit weight, K_0 =earth pressure coefficient at rest, v' =Poisson's ratio, permeability of clay= 5×10^{-5} m/sec

Table 2. Time for average degree of consolidation and corresponding settlement at surface of clay

Average degree of consolidation (%)	25	50	75	90	95	100 (drained)
Time (days)	115	375	895	1,615	2,145	-
Maximum settlement (mm)	55.5	111.0	166.5	199.8	210.9	222.0

3. 해석결과

본 장에서는 수치해석을 통해 도출된 결과를 상세히 분석하였다. 압밀도에 따른 부마찰의 발생특성, 점토의 탄성계수 및 성토고가 말뚝에 미치는 영향, 말뚝설치 시점, 말뚝두부 하중의 작용시점 그리고 부마찰의 발생유무에 따른 하중-침하 특성을 논의하였다. Table 3은 점토의 강성($E=2-20\text{MPa}$) 및 성토고($H=2.5-10\text{m}$)에 따른 말뚝에 작용하는 최대부마찰력 및 침하량을 정리하여 보여준다. 점토의 강성이 감소할수록 그리고 성토고가 증가할수록, 부마찰에 의한 말뚝의 축력 및 침하량은 증가하는 경향을 보이는데 이는 압밀에 따른 지반침하량의 크기가 증가하므로 말뚝-인접지반에서의 경계면에서의 전단응력 전이가 증가하기 때문으로 분석된다. 또한 해석에서 가정한 조건에서는 성토고에 비해 점토의 강성이 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 한편 수치해석의 정당성을 검증하기 위하여 Phamvan(1989)가 보고한 실측자료에 대한 Class-C type의 수치해석을 수행하여 이를 비교·분석하였다.

3.1 압밀도에 따른 부마찰의 발생

Fig. 2(a)는 기준해석(성토고 $H=5\text{m}$, 점토의 $E=5\text{MPa}$)을 통해 산정된 압밀도별 말뚝의 최대부마찰력(P) 및 선단에서의 축력(Q) 그리고 P 와 Q 의 차이인 최대정마찰력(N)을 압밀 종료 후의 크기(P_{\max} , Q_{\max} , N_{\max})로 정규화시킨 값을 보여준다($P_{\max}=606.9\text{kN}$). 부마찰력은 압밀도 25%에서 전체의 약 65% 발현된 것으로 나타났으며, 말뚝선단에서의 축력 역시 유사한 경향으로 발현되고 있다. 그에 비해 정마찰력은 압밀 초기 단계에서는 발현되지 않았다가 압밀도 50% 이후부터 급격하게 증가하고 있다. 이는 압밀도가 낮은 경우 하향의 부마찰력이 모두 말뚝의 선단지지력으로 지지되기 때문이며, 부마찰력이 증가하면서 말뚝에 작용하는 하중성분의 평형성을 유지하기 위해 중립면(neutral plane)이 점차 상향으로 이동하면서 정마찰이 발현되기 때문으로 이는 Lee(2001)의 연구결과와도 일치한다.

Fig. 2(b)는 기준모델에서 압밀진행에 따른 단독말뚝에 작용하는 정규화된 심도별 부마찰력의 분포 P_z/P_{\max} 를 보여주고 있다. 여기서 P_z 는 임의 심도에서의 부마찰력을 의미하

고, P_{\max} 는 압밀종료 후 말뚝에 작용하는 최대부마찰력을 의미한다($P_{\max}=606.9\text{kN}$). 말뚝의 심도가 깊어질수록 그리고 압밀이 진행될수록 부마찰력이 지속적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. $Z/L=0.5-0.9$ 인 경우 압밀도가 증가할수록 부마찰력이 지속적으로 증가하는데 비해, $Z/L=0.1, 0.3$ 인 경우 압밀도 초기에 발생한 부마찰력이 압밀진행에 따라 약간 감소하는 것을 알 수 있다.

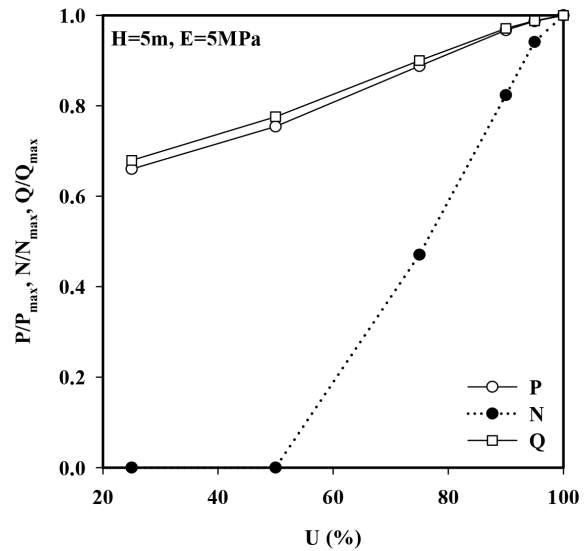


Fig. 2(a). Distributions of normalised dragload (P), end-bearing (Q) and N ($P-Q$) with average degree of consolidation

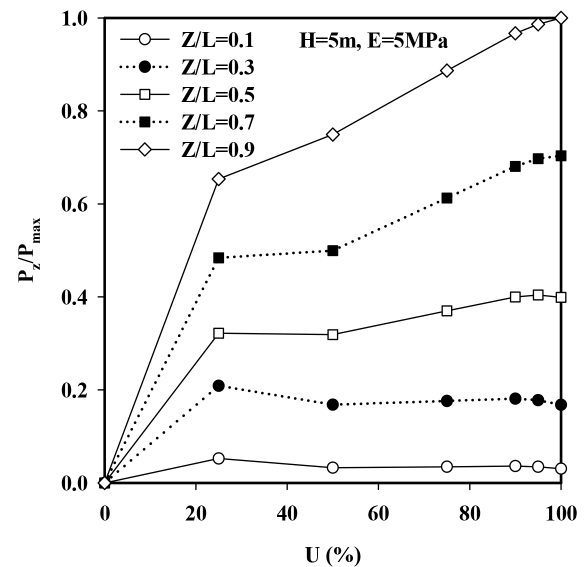


Fig. 2(b). Development of normalised dragload at depths (P_z) with average degree of consolidation

Table 3. Maximum dragload and settlement of the single pile at various stiffness of clay and height of fill

	$E=5$ (MPa)				$H=5$ (m)			
	$H=2.5$	$H=5$	$H=7.5$	$H=10$	$E=2$	$E=5$	$E=10$	$E=20$
Dragload (kN)	406	606.9	807.4	1031.2	664.9	606.9	571.2	518.9
Settlement (mm)	21.8	40	59	80.2	47	40	34.3	28.1

3.2 탄성계수 및 성토고의 영향

Figs. 3(a)-3(b) 및 Figs. 4(a)-4(b)는 점토의 탄성계수 및 성토고의 영향을 검토하기 위하여 압밀해석을 통해 산정된 특정 압밀도($U=25-100\%$)에서 말뚝의 최대 부마찰력 P 와 침하량 δ 을 압밀이 100% 진행되었을 때의 각 해석 조건별 부마찰력 P_{max} 와 말뚝의 최대침하인 δ_{max} 로 정규화한 값인 P/P_{max} 및 δ/δ_{max} 의 분포를 보여준다. Figs. 3(a)-3(b)에서는 일정한 성토고 5m에 대해 점토의 탄성계수를 변화시켰으며, Figs. 4(a)-4(b)에서는 점토의 탄성계수를 5MPa로 일정하게 유지시키는 가운데 성토고를 2.5-10m로 변화시켰다. Figs. 3(a)-3(b)에 의하면 점토의 탄성계수가 증가할수록 부

마찰력 및 침하량이 발생하는 속도가 점점 증가한다. 압밀도 25%에서 부마찰력 및 침하는 압밀종료 후 최댓값 각각 58-75% 및 58-85%로 비교적 조기에 발현되고, 이후의 증가량은 상대적으로 작은 편이다. 말뚝의 침하는 부마찰력의 크기가 증가하는 경향에 비해 점토의 강성에 더 크게 영향을 받는 것으로 보인다. 한편 Figs. 4(a)-4(b)에 의하면 부마찰력 및 침하는 압밀도가 증가함에 따라 성토고가 낮을수록 상대적으로 빨리 발현되지만 점토의 강성에 비해 성토고에는 그리 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타난다. 즉 압밀의 진행에 따른 부마찰력 및 말뚝침하의 발생 경향은 성토고보다는 점토층의 강성에 훨씬 더 영향을 많이 받는 것으로 분

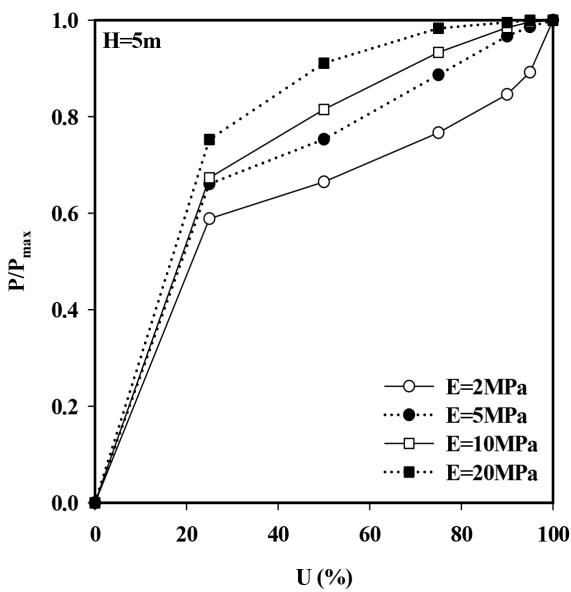


Fig. 3(a). Distributions of normalized dragload with stiffness of clay at different degree of consolidation

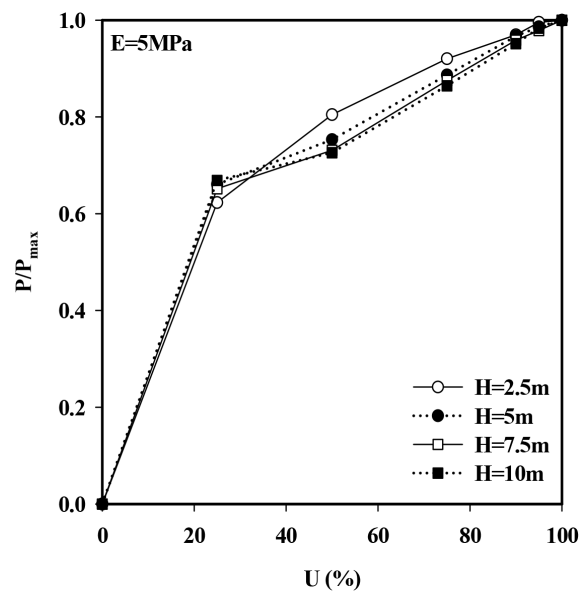


Fig. 4(a). Distributions of normalized dragload with height of fill at different degree of consolidation

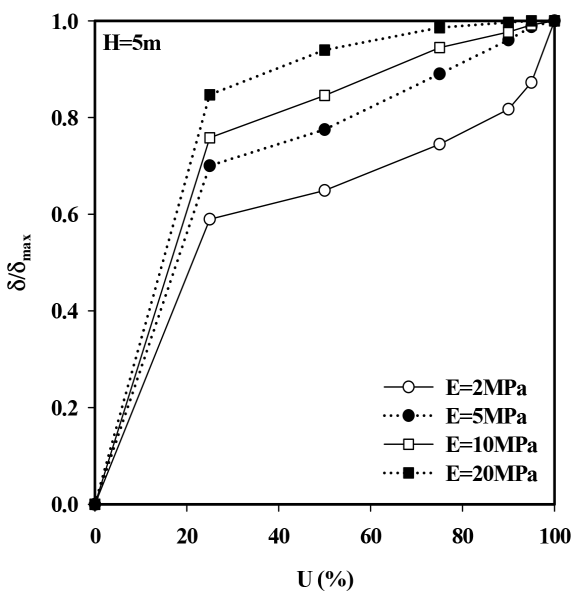


Fig. 3(b). Distributions of normalized downdrag with stiffness of clay at different degree of consolidation

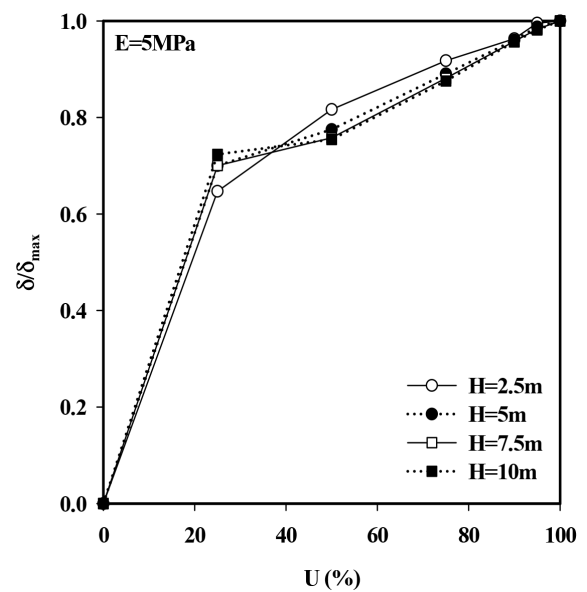


Fig. 4(b). Distributions of normalized downdrag with height of fill at different degree of consolidation

석된다. 이는 본 연구에서 검토한 탄성계수는 최대 10배 차이가 나는데 비해, 성토고는 최대 4배 차이가 나는데 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 5(a)-5(b)는 압밀도의 증가에 따른 최대부마찰력과 최대침하량의 크기를 다양한 성토고 및 점토의 탄성계수에 대해 직접적으로 분석하였다. 앞의 경우와 동일하게 최대부마찰력과 침하량 모두 조건별 최댓값인 P_{max} 및 δ_{max} 으로 정규화하였다. 그래프 상의 각 점들은 조건별 다양한 압밀도 (25-100%)에 따른 값들을 도시한 것이다. Figs. 3(a)-3(b) 및 Figs. 4(a)-4(b)에 나타난 바와 같이 부마찰력 및 침하의 압밀도 초기에 비교적 크게 발생했기 때문에 그래프는 대략 0.58-0.85에서 시작한다. 부마찰력과 말뚝 침하의 관계는 거

의 선형적으로 증가하고 있으며 Fig. 5(a)에서 점토의 탄성계수의 값에 약간의 영향을 받는 것으로 나타난 데 비해, Fig. 5(b)의 경우 성토고와 거의 무관하게 증가한다. 이는 앞서 논의한 것과 같이 압밀의 진행에 따라 말뚝에 작용하는 부마찰은 성토고보다는 점토의 탄성계수에 더 큰 영향을 받는다는 것을 다시 한번 입증하였다.

3.3 말뚝과 인접한 지반의 수직응력 변화

Zeevart(1983) 및 Jeong(1992)에 의하면 말뚝에 부마찰이 작용하는 경우 말뚝과 인접한 주변지반의 수직응력의 일부가 말뚝으로 전이되므로 말뚝 인근 흙의 수직응력이 감소하

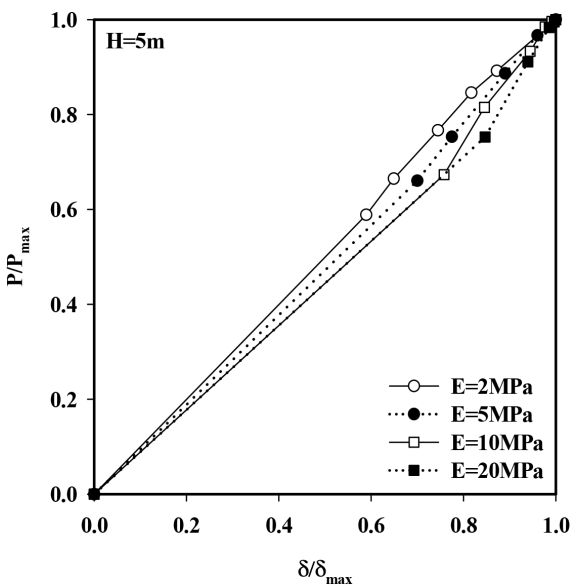


Fig. 5(a). Relation between normalised downdrag and dragload with stiffness of clay

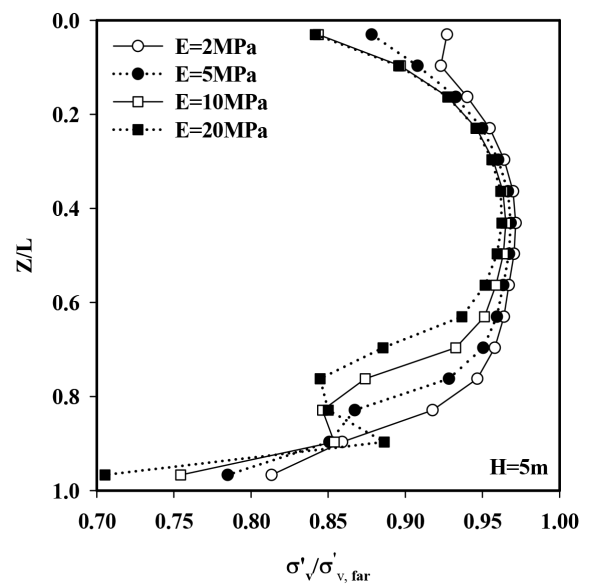


Fig. 6(a). Distributions of normalised vertical effective soil stresses with depth

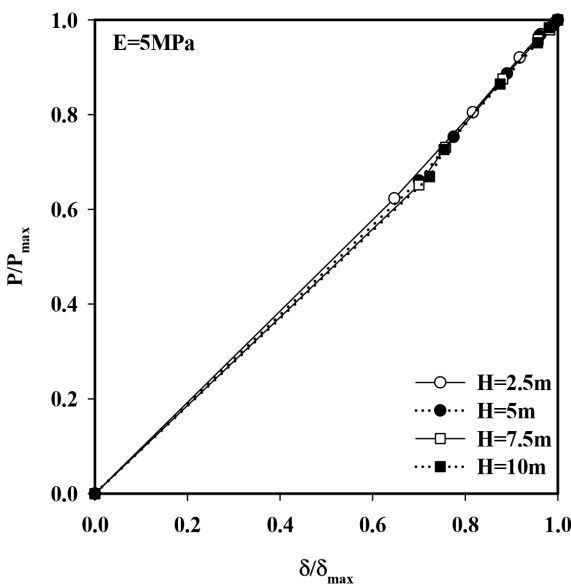


Fig. 5(b). Relation between normalised downdrag and dragload with thickness of fill

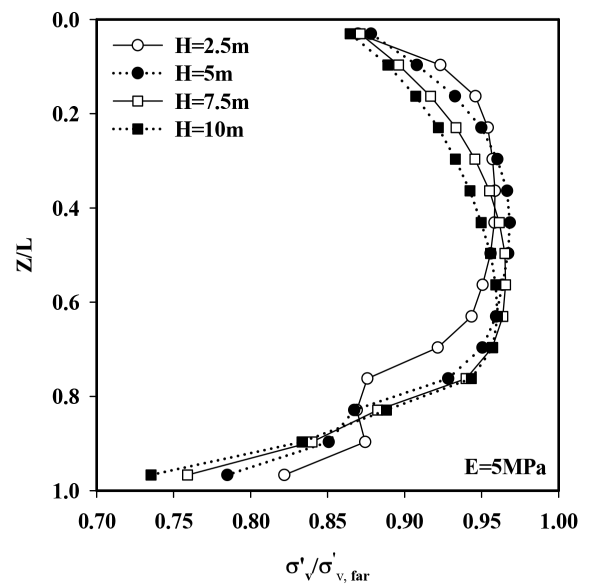


Fig. 6(b). Distributions of normalised vertical effective soil stresses with depth

게 된다. Figs. 6(a)-6(b)는 배수조건에서 말뚝과 인접한 두께 250mm ring 형상의 흙 요소에서 심도별 유효수직응력을 조건별 Far field의 유효수직응력으로 정규화하여 나타내었다. 본 연구에서는 압밀에 의한 영향을 가장 크게 받을 것으로 판단된 점토층에 대해서만 검토하였다. Fig. 6(a)에 의하면 점토의 탄성계수에 대하여 점토의 상부부터 탄성계수가 증가할수록 수직응력이 더 크게 감소하는 것으로 분석되고, 중립면 인근을 제외한 모든 부분에서 뚜렷하게 구분된다. 한편 Fig. 6(b)의 성토고의 영향을 고려할 경우 말뚝의 중간 부분까지 그 영향이 뚜렷하게 나타나지 않지만, 말뚝의 선

단부분에서는 성토고가 높을수록 유효수직응력의 감소가 더 크게 발생하는 경향을 보이고 있다. 두 경우 유사하게 수직응력은 점토층 최하단 인근에서 최대 약 30% 정도 감소하는 것으로 산정된다. 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 상재 하중에 의해 말뚝에 부마찰이 유발되었으나 본 연구에서는 실제성토에 의해 부마찰이 유발되었다는 점과 관련이 있는 것으로 추정되지만, 아직까지 실험이나 현장실측을 통해서 확인되지 못했으므로 향후 이에 대해 명확하게 규명할 필요가 있다고 판단된다.

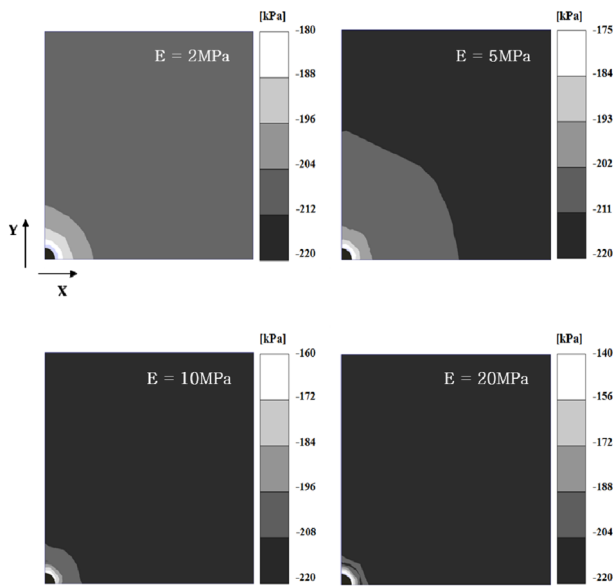


Fig. 7(a). Distributions of effective vertical soil stresses σ'_v ($Z/L = 0.95$, $H = 5m$, σ'_v at farfield = 216 kPa), (Range of X and Y = 0-5 m)

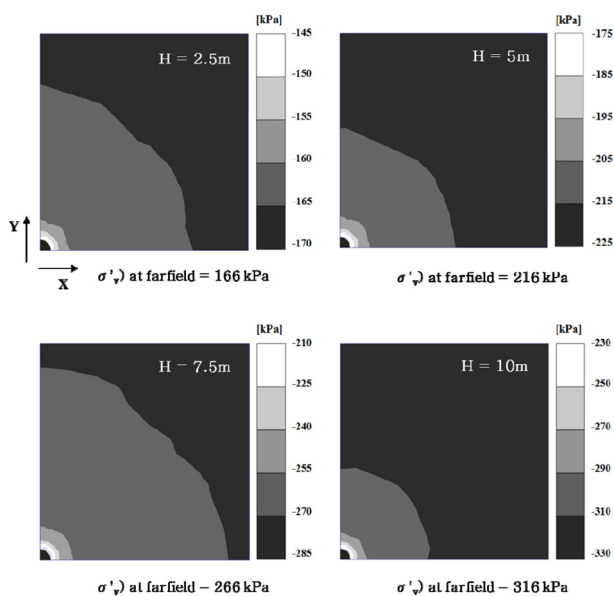


Fig. 7(b). Distributions of effective vertical soil stresses ($Z/L = 0.95$, $E = 5 MPa$), (Range of X and Y = 0-5 m)

Figs. 7(a)-7(b)은 XY 평면에서 흙 요소의 유효수직응력을 나타낸다(말뚝이 설치된 곳으로부터 X 및 Y 방향 5m까지). 여기서 Fig. 7(a)는 점토의 탄성계수에 따른 분포도이며, Fig. 7(b)는 성토고에 따른 점토의 심도 $Z=14.5m$ (말뚝의 $Z/L=0.95$)에서 흙의 유효수직응력의 분포이다. 이때 각각의 등고선은 배수조건에서 단독말뚝에 대한 흙의 유효수직응력분포를 나타낸다. 모든 등고선에서 볼 수 있듯이 흙의 유효수직응력은 말뚝으로부터의 수평이격거리가 증가할수록 점차 감소하는 경향을 보인다. 이는 Jeong(1992)의 수치해석 결과와 일치한다. 앞서 언급한 바와 같이 점토의 탄성계수가 증가할수록 수직응력도 더 크게 감소하는 것으로 나타난다. 점토의 강성의 경우와 유사하게 성토고가 증가할수록 수직응력도 크게 감소하는 것으로 분석된다. 그러나 모든 경우 응력이 감소하는 영역은 비교적 말뚝의 인근으로 국한되어 있음을 주목할 필요가 있다.

3.4 말뚝설치 시점에 따른 영향

앞서 언급한 바와 같이 실무적인 관점에서 지표면 상에 성토가 실시된 후 일정한 압밀이 진행된 이후 말뚝이 설치되는 상황을 검토할 필요가 있다. 이에 성토작업이 종료된 후 말뚝이 다양한 압밀도(25, 50, 75, 90, 95%)진행 후 설치되었다고 가정하였다. Figs. 8(a)-8(b)는 이러한 해석을 통해 산정된 최대부마찰력과 말뚝침하의 분포를 정규화하여 보여준다. 말뚝이 설치된 시점의 압밀도가 낮을수록 최종부마찰력 및 침하가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 말뚝 설치 시점이 늦을수록 말뚝의 침하가 감소되는 정도가 부마찰력이 감소되는 정도보다 더 큰 것으로 나타났다. 압밀도 50% 이후에 말뚝이 설치된 경우 말뚝 침하량은 약 60% 감소되지만 부마찰력은 단지 15%만 감소한다. 이는 말뚝-지반 사이 경계면에서 전단응력을 발현시키기에는 단지 매우 작은 상대전단변위만으로도 충분하기 때문이다.

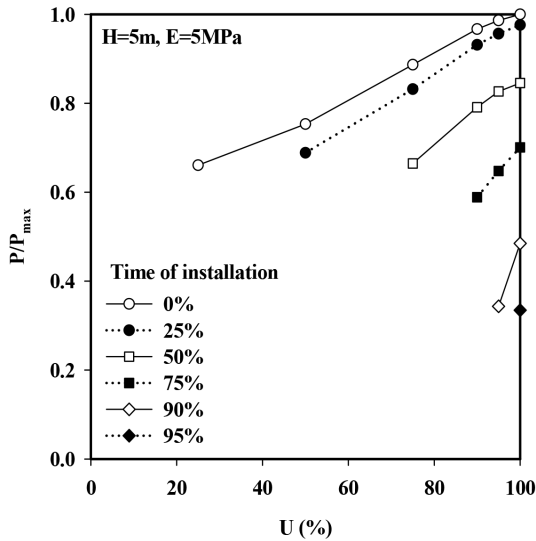


Fig. 8(a). The effect of time of pile installation during consolidation on normalised dragload

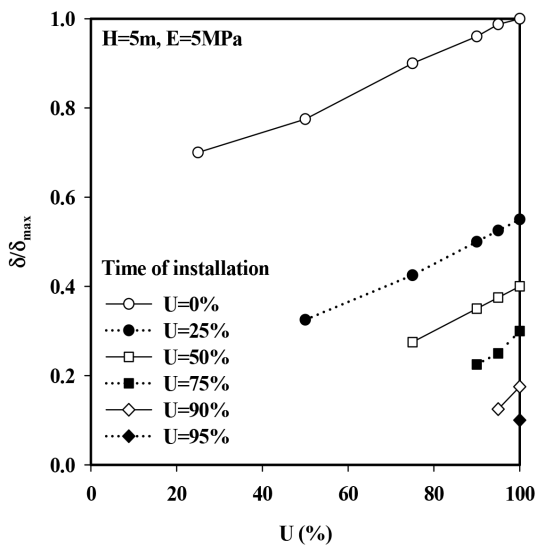


Fig. 8(b). The effect of time of pile installation during consolidation on normalised downdrag

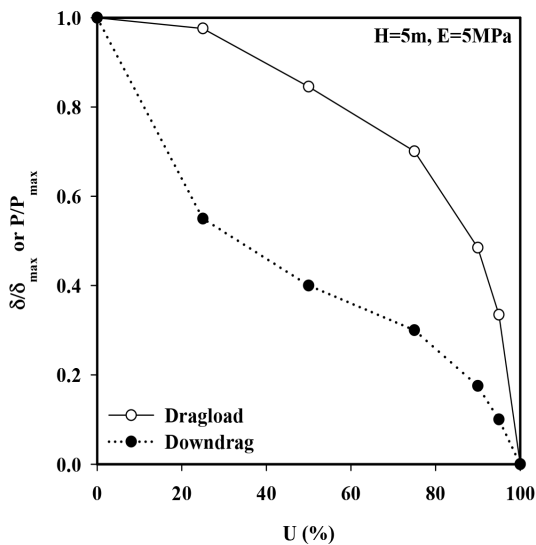


Fig. 8(c). The effect of time of pile installation during consolidation on normalised dragload and downdrag

Fig. 8(c)는 Figs. 8(a)-8(b)의 결과로부터 상이한 압밀도에서 설치된 말뚝의 최종 부마찰력 및 침하량을 말뚝이 압밀진행 이전에 설치된 경우의 최대 부마찰력 및 침하량으로 정규화시킨 값을 보여준다. 앞서 언급한 바와 같이 말뚝의 설치가 늦을수록 침하량의 감소폭은 부마찰력의 감소폭에 비해 매우 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 다소의 압밀이 진행된 이후에 말뚝이 설치되더라도 여전히 말뚝의 부마찰과 침하가 발생한다는 것을 보여준다. 압밀도 75%에서 말뚝이 설치되는 경우 부마찰력은 성토 직후에 말뚝이 설치되는 경우에 비해 약 30%가 감소되는 것에 비해 말뚝의 침하는 약 70%가 감소한다. 이것은 말뚝의 설치 시점이 늦어질수록 부마찰로 인한 말뚝의 침하를 효과적으로 감소시킬 수 있다는 의미로, 부마찰로 인해 발생한 지반재해의 대부분이 침하에 의한 것이라는 것을 고려한다면 실무에서 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

3.5 말뚝에 상재하중이 작용하는 시점의 영향

앞서 언급한 바와 같이 압밀이 진행중인 지반에서 말뚝이 설치되는 시점은 부마찰력과 말뚝침하의 크기를 지배하는 중요한 인자이다. 이와 함께 지반의 압밀에 따라 부마찰이 점차 증가하고 있는 말뚝의 두부에 하중이 작용하는 시점은 부마찰력의 발현 및 말뚝침하에 영향을 줄 것으로 판단된다. 이에 다양한 압밀도에서 말뚝두부에 하중을 작용시켜 그 영향을 분석하였다. 말뚝의 하중재하는 배수조건에서 수행된 것으로 가정하였다. 또한 말뚝에 하중이 재하된 후에 점토층의 압밀이 계속하여 진행되는 것으로 가정하였다. 여기서 말뚝에 가한 하중은 기준모델에서의 최대 부마찰력 ($P_{max}=606.9\text{kN}$)을 사용하였다.

Fig. 9(a)는 압밀도 25% 및 75% 이후 말뚝에 상재하중을 작용시킨 경우의 말뚝의 축력분포를 보여준다. 즉 상재하중 작용이전 말뚝의 축력분포, 상재하중을 작용시킨 직후의 축력분포 그리고 압밀 종료 후의 축력분포를 나타낸다. 말뚝에 상재하중을 작용시킨 직후 부마찰력이 완전히 소멸되거나(압밀도 25%), 대부분 소멸되는 것으로 나타났다(압밀도 75%). 그러나 이어지는 압밀과정에서 부마찰력은 다시 발생하는 것으로 나타나는데, 그 크기는 압밀도가 25%인 경우가 압밀도가 75%인 경우에 비해 훨씬 더 크게 산정된다.

Fig. 9(b)는 말뚝에 하중이 작용된 시점에 따른 하중 작용 이전의 침하량, 하중작용 직후 그리고 최종 침하량을 말뚝 두부에 하중이 작용하지 않은 경우의 최종 침하량으로 정규화시킨 δ/δ_{max} 을 보여준다. 이때 δ 는 임의시점의 말뚝두부의 침하, δ_{max} 는 기준모델의 배수조건하에서의 말뚝 침하량($\delta_{max}=40\text{mm}$)이다. 임의 압밀도에서 말뚝에 상재하중을 작용

시키면 상재하중이 작용하는 시점의 압밀도와는 무관하게 약 $0.3\delta_{max}$ 의 침하가 발생한다. 또한 말뚝의 최종침하량은 말뚝에 하중이 작용하지 않는 경우에 비해 최대 약 95% 증가하는 것으로 분석된다. 말뚝에 상재하중이 작용하는 시점이 늦을수록 상재하중 작용 이후에 발생하는 침하량이 감소한다. 압밀이 많이 진행되어 있는 조건에 하중을 작용시킬 경우, 즉 상대적으로 단단해진 지반에 하중이 가해지면 침하가 적게 발생하기 때문에, 실제 시공에서도 압밀을 충분히 기다린 후에 말뚝에 하중을 작용시키는 것이 합리적이고 판단된다.

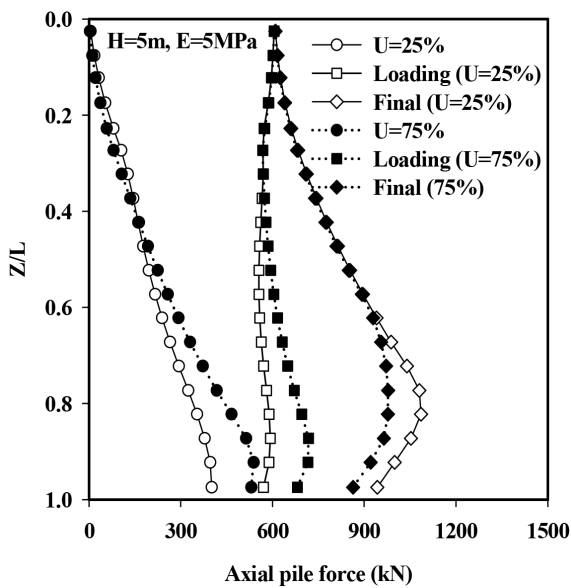


Fig. 9(a). Distributions of axial pile forces with depth at various stages

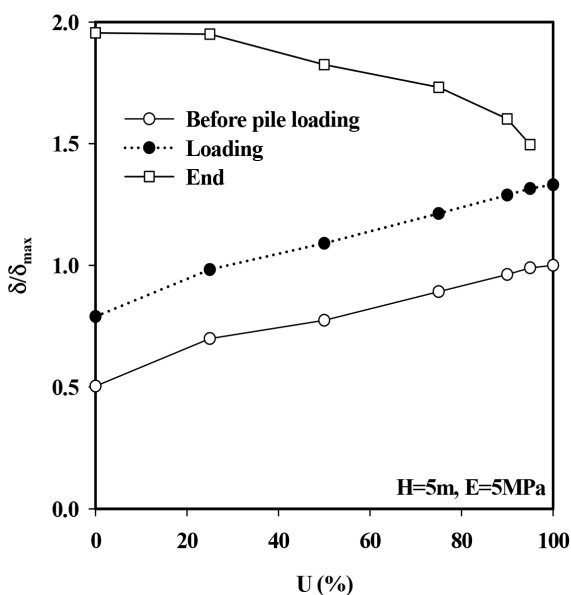


Fig. 9(b). Distributions of normalised downdrag with average degree of consolidation

3.6 부마찰에 의한 하중-침하 영향

부마찰의 발생에 의한 말뚝의 하중-침하 특성을 고찰하기 위하여 배수조건에서 부마찰이 발생한 말뚝(NSF로 칭함)과 말뚝이 성토로 인한 지반의 압밀이 종료된 이후 설치된 경우(no NSF로 칭함, 즉 말뚝에 부마찰이 작용하지 않음) 그의 거동을 비교·분석하였다. Figs. 10(a)-10(b)는 점토의 강성 및 성토고의 변화를 고려한 부마찰의 영향을 받은 말뚝(NSF)과 그렇지 않은 말뚝(no NSF)에 대해 산정된 하중-침하 관계를 보여준다. 점토의 강성이나 성토고가 동일한 조건에서 NSF의 경우, no NSF의 경우에 비해 침하가 약간 더 증가하는 것으로 분석된다. 이러한 차이는 점토의 강성이 큰 경우에 더 현저한 것으로 나타났다. 또한 말뚝의

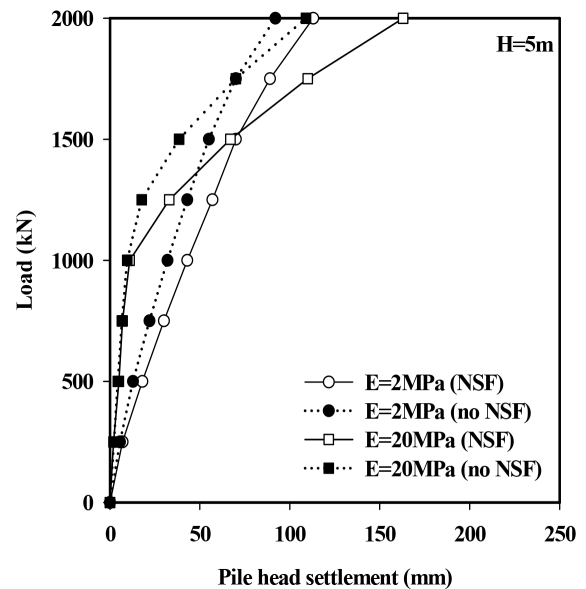


Fig. 10(a). Relation between axial pile load and pile head settlement

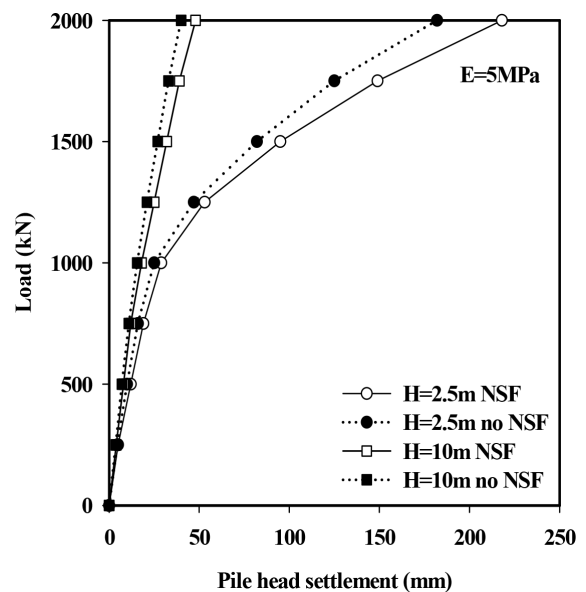


Fig. 10(b). Relation between axial pile load and pile head settlement

침하가 증가할수록 그 차이도 지속적으로 증가하는 것으로 보인다. 그러나 그 차이는 그리 크지 않은데 이는 앞서 언급한 바와 같이 부마찰의 발생으로 인한 인접지반의 수직응력의 감소에 비해 수평응력의 변화는 그리 크지 않기 때문인 것으로 분석된다. 이것은 부마찰의 발생에 의해 말뚝단면의 저항력이 크게 감소된다고 주장한 Zeevart(1983)의 이전연구와는 상이하다. 본 연구결과를 말뚝에 부마찰이 작용하는 경우 그로 인해 말뚝의 지지력이 약간 감소하긴 하지만, 그 감소 정도는 대단히 크지는 않다는 사실을 보여주는데 이는 Lee(2001)에 의해 보고된 바 있다.

Fig. 11은 조건별 상재하중 작용이전에 부마찰이 작용했을 때의 설계지지력 P_{aNSF} 와 부마찰이 작용하지 않은 경우의 설계지지력 P_{aNSF} 으로 정규화하여 나타낸 것이다. 말뚝의 설계지지력은 해석 조건별 말뚝의 하중-침하 곡선으로부터 Davisson방법을 이용하여 극한지지력을 구한 후에 그 값을 안전율 2로 나누어 산정하였다(Davisson, 1972). Fig. 11에 의하면 부마찰이 작용하는 경우 그렇지 않은 경우에 비해 설계지지력이 약간 감소하는 것으로 분석되는데, 본 연구에서 가정된 점토의 강성과 성토고의 크기에 대해 약 P_{aNSF}/P_{aNSF} 은 0.89-0.96 정도의 범위를 보인다. 점토의 탄성계수가 작을수록 그리고 성토고가 높을수록 부마찰이 작용하는 경우의 설계지지력이 가장 크게 감소하는 것으로 분석된다. 즉 말뚝에 부마찰이 크게 발생할수록 말뚝의 설계지지력이 감소하는 것으로 분석된다. 이러한 경향은 성토고가 높거나 지반의 강성이 작아 지반의 침하가 증가하고, 이로 인해 부마찰로 인한 말뚝과 인접한 지반의 수직응력과 수평응력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

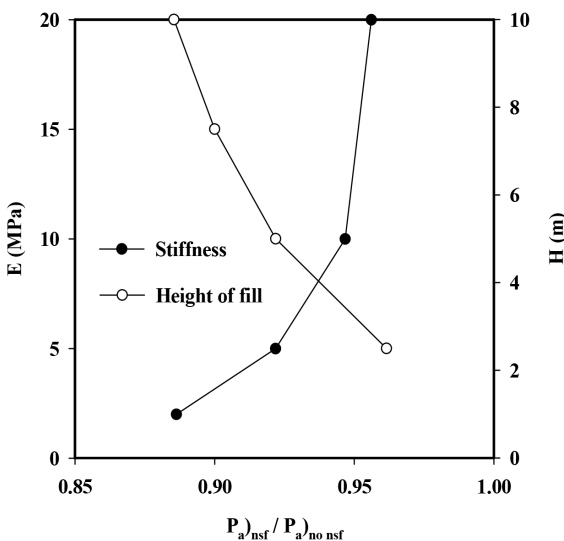


Fig. 11. Changes of normalised allowable pile capacity with and without negative skin friction

3.7 부마찰 완료 후 상재하중의 영향

Fig. 12(a)는 기준모델($E=5\text{MPa}$, 성토고=5m)에서 말뚝에 부마찰이 모두 발현된 후 말뚝두부에 상재하중을 작용시킨 경우 하중별 말뚝의 축력분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 상재하중이 점차로 증가할수록 부마찰이 발생하는 구간이 감소하며 이에 의한 압축력이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 하중이 1,000kN 작용하는 경우 말뚝의 축력이 심도별로 지속적으로 감소하므로 이때 부마찰이 완전히 소멸되었다는 것을 알 수 있다. 이는 (Leung et al., 2004; Leung, 2009; Ng et al., 2008)의 연구결과와 일치

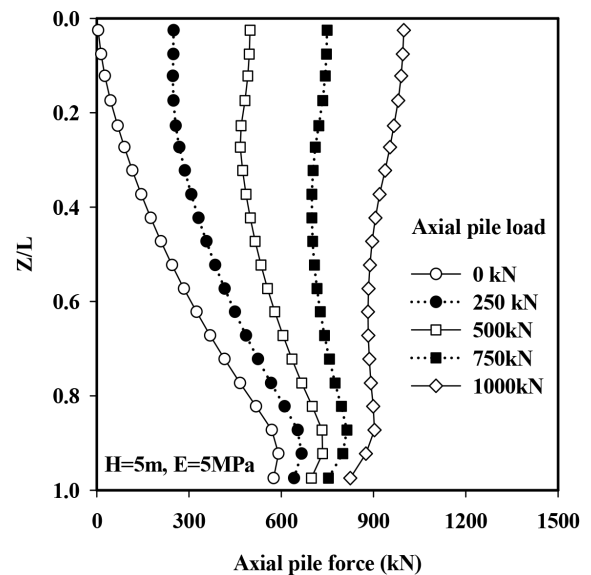


Fig. 12(a). Distributions of pile force with depth due to application of axial pile load after full mobilisation of dragload

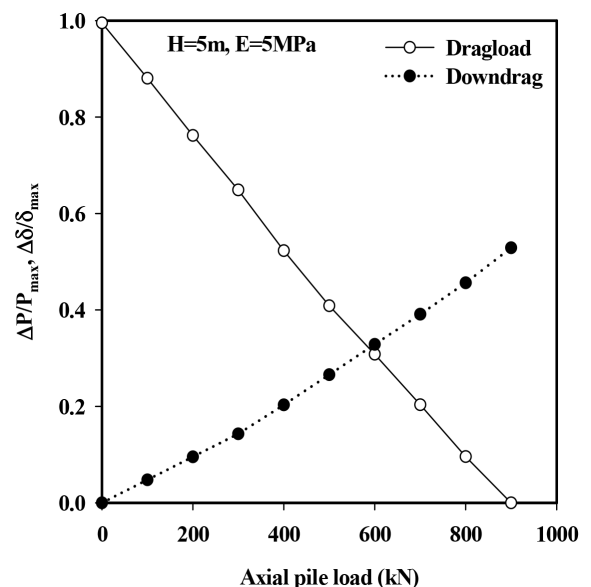


Fig. 12(b). Changes of normalised axial pile force and pile settlement due to application of axial pile load after full mobilisation of dragload

한다. Fig. 12(b)는 기준모델에서 상재하중이 점차적으로 증가할 때 부마찰력이 감소된 크기 ΔP 와 상재하중에 의한 말뚝 침하량의 증가 $\Delta\delta$ 를 각각 배수조건하에서의 최대부마찰력($P_{max}=606.9kN$)과 최대침하량($\delta_{max}=40mm$)으로 정규화하여 나타내었다. 상재하중이 증가함에 따라 말뚝의 부마찰력은 지속적으로 감소하는데 비해 말뚝의 침하는 증가하는 경향을 보이고 있다. 최종적으로 말뚝에 900kN(최대부마찰력의 약 1.5배)가 작용하는 경우 부마찰은 모두 소멸되는 것으로 분석된다. 이때 말뚝두부의 침하는 부마찰에 의한 말뚝 최대침하의 약 0.5배 증가하는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

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

- (1) 부마찰력은 압밀도가 25%일 때 최종크기의 65% 정도가 발현되며, 말뚝 선단의 축력도 그에 따라 나타나는데 부마찰력과 유사하게 65% 발현되었다. 그에 비해 정마찰은 압밀 초기에는 발현되지 않았다가 압밀도 50% 이후부터 급격하게 점차 증가하였다.
- (2) 정규화된 부마찰력 및 침하가 압밀도에 따라 증가하는 경향은 성토고에는 그리 영향을 받지 않는 것으로 나타난다. 즉 부마찰력 및 말뚝침하의 발생 경향은 성토고 보다는 점토층의 강성에 훨씬 더 영향을 많이 받는 것으로 분석된다.
- (3) 말뚝에 작용하는 부마찰로 인해 말뚝과 인접한 지반의 수직응력이 최대 약 30% 감소하는 것으로 분석되었다. 그에 비해 수평응력은 거의 변하지 않는 것으로 나타났다.
- (4) 점토층의 압밀도가 낮을 때 설치된 말뚝일수록 이후 부마찰력 및 침하가 크게 발생하며, 부마찰력에 비해 침하가 말뚝설치 시점에 더 큰 영향을 받는 것으로 분석된다. 즉 현장 여건이 허용하는 한 가급적 지반의 압밀이 충분히 진행된 이후(대략 $U=50\%$ 이상) 말뚝을 설치하는 것이 상부구조물의 사용성을 확보할 수 있다는 측면에서 매우 중요하다.
- (5) 압밀의 진행에 따라 부마찰이 발생 중인 말뚝의 두부에 상재하중을 작용시키면 상재하중이 작용하지 않은 경우에 비해 큰 말뚝의 침하가 발생한다. 한편 상재하중의 작용시점이 늦어질수록 말뚝의 최종 침하량은 감소하는 경향을 보였다.
- (6) 부마찰이 작용하는 경우 그렇지 않은 경우에 비해 설계지

지력이 약간 감소하는 것으로 분석되는데, 본 연구에서 가정한 점토의 강성과 성토고의 변화에 대해 약 0.85-0.96 정도의 범위를 보인다. 말뚝두부에 배수조건에 의한 최대부마찰력의 약 1.5 배의 상재하중이 작용하는 경우 부마찰은 완전히 소멸되며 이때 부마찰에 의한 최대말뚝침하의 약 0.5 배의 침하가 추가로 발생한다.

감사의 글

2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였습니다(과제번호-520160351). 본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구입니다[MPSS-자연-2015-79].

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. Davisson, M. T. (1972), High capacity piles. Proceedings of Lecture Series in Innovations in Foundation Construction, ASCE, Illinois Section, pp. 81~112.
4. Jeong, S. S. (1992), Nonlinear three-dimensional analysis of downdrag on pile groups, PhD thesis, Texas A&M University, pp. 1~165.
5. 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.
6. Kim, S. H., Jeon, Y. J. and Lee, C. J. (2016), A study on the behaviour of single piles and pile groups in consolidating ground from coupled consolidation analyses, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 17, No. 7, pp. 15~25 (in Korean).
7. 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.
8. 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.
9. Lee, C. J. (2001), The influence of negative skin friction on piles and in pile groups, PhD thesis, Cambridge University, pp. 1-R13.
10. 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.
11. Lee, C. J. and Charles, W. W. Ng. (2004), Development of downdrag on piles and pile groups in consolidation soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 9, pp. 905~914.
 12. 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.
 13. 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).
 14. 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).
 15. 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.
 16. Leung, C. F. (2009), Negative skin friction on piles, *Indian Geotechnical Conference 2009*, Guntur, India, pp. 827~836.
 17. 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.
 18. Phamvan, P. (1989), Negative skin friction on driven piles in Bangkok subsoils, Ph.D Thesis, AIT, Bangkok, Thailand, pp. 1~235.
 19. Zeevaert, L. (1983), *Foundation engineering for difficult subsoil conditions*, 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 351~395.