

# 부마찰력이 작용하는 기초판으로 연결된 군말뚝의 거동

## The Influence of Negative Skin Friction on Piles in Groups Connected to a Cap

이 철 주<sup>1</sup> Lee, Cheol-Ju

박 병 수<sup>2</sup> Park, Byung-Soo

### Abstract

Over the years the investigation of behaviour of piles in groups connected to a cap in consolidating soil has attracted far less attention than the study of isolated piles in groups. In this paper, a series of three-dimensional numerical simulations have been performed to study the behaviour of pile groups connected to a cap in consolidating ground. Both elastic no-slip and elasto-plastic slip analyses were considered. Based on the analysis results, when piles were connected to a cap, tensile forces were developed near the pile head at the outer piles. Elastic solution and no-slip analysis over-predicted the tensile force near the pile head for outer piles. Relatively speaking, the number of piles in a group is more important than the pile spacing in terms of the influence of negative skin friction on the pile behaviour. The issue on the development of tensile forces on the pile head at the outer piles is perhaps needed to be carefully considered in the pile design to prevent the damages of the pile-cap connection.

### 요 지

압밀이 진행 중인 지반에 근입된 기초판으로 연결된 말뚝의 거동과 관련된 연구는 기초판으로 연결되지 않은 군말뚝의 거동에 관한 연구에 비하여 매우 부족한 실정이다. 본 논문에서는 일련의 3차원 수치해석을 통해서 압밀이 진행 중인 지반에 근입된 군말뚝의 거동에 대한 연구를 수행하였다. 말뚝-지반 경계면에서의 항복(slip)을 고려하지 않은 탄성해석 및 slip을 고려한 탄-소성 해석을 실시하였다. 본 연구 결과, 기초판과 연결된 말뚝의 경우 인장력이 외곽부 말뚝 두부부근에서 발생하는 것으로 나타났고, 탄성이론에 의한 해석 및 slip을 고려하지 않은 해석은 이러한 인장력을 과대평가하는 것으로 해석되었다. 또한 외곽부 말뚝의 인장력 발생은 말뚝의 간격보다는 군말뚝 내의 말뚝개수에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 향후 부마찰의 영향을 받는 말뚝의 설계시 말뚝-기초판 결합부의 피손을 방지하기 위해, 외곽부 말뚝에 작용하는 인장력을 고려해야 할 것으로 분석되었다.

**Keywords :** Clays, Numerical modelling and analysis, Piles, Soil/structure interaction

### 1. 서 론

부마찰(negative skin friction)이 작용하는 단독말뚝 및 기초판(cap)으로 연결되지 않은 군말뚝(free-headed piles in a group)의 거동에 대한 연구는 그 동안 많이

진행되어 왔다(Shibata 등 1982; Jeong 등 2004; Lee 등 2002; Lee & Ng 2004). 그러나 일반적인 경우 군말뚝 내 말뚝의 두부는 콘크리트 기초판으로 결합되어 있어, 기초판으로 연결되지 않은 말뚝과는 상이한 거동을 보일 것으로 예상되나 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정

1 정회원, 강원대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kangwon National Univ, CJ32@kangwon.ac.kr, 교신저자)

2 (주)지완테크 이사 (Director, G-I Tech., Co. Ltd)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이며, 현장 실측을 통해서 분석된 말뚝의 거동연구 역시 제한적으로 존재한다(Chellis 1961; Garlanger & Lambe 1973; Okabe 1977). 기존 연구에 의하면 기초판으로 연결된 군말뚝에 부마찰이 작용하게 되면 중앙부 말뚝의 두부에서는 압축력이, 외곽부 말뚝의 두부에서는 인장력이 발생하게 되어, 최악의 경우 이러한 인장력에 의해 말뚝의 일부가 기초판에서 분리될 수 있는 것으로 보고된 바 있다. Chellis(1961), Garlanger & Lambe(1973) 및 Okabe(1977)는 현장실측 사례분석을 통하여 부마찰에 의해 말뚝의 두부부근에서 발생한 인장력에 대해 보고하였고, Chellis(1961)는 부마찰에 의하여 기초에서 완전히 분리된 말뚝에 대한 사례를 보고하였다. Garlanger & Lambe(1973)에 의해 개최된 부마찰 관련 학회(Proceedings of a symposium on downdrag on piles, MIT, 1973)에서는 교량의 기초로 시공된 군말뚝에 성토로 인하여 발생한 부마찰에 대한 사례보고를 하였다. 교량기초의 일부로 시공된 H-말뚝은 7.5m의 매립층, 4m의 모래층을 지나서 15m의 연약점토층에 시공되었다. 이때 말뚝의 선단은 조밀하고 단단한 경점토(till)층에 지지되었다. 한편, 지표면에 실시된 성토로 인해 발생한 부마찰에 의하여 말뚝은 약 12.5mm 가량 침하된 것으로 추정되었다. 이에 의해 기초로 사용되던 사향(raked piles)의 일부가 기초에서 이탈되었으며, 외곽부 말뚝의 두부부근에 인장력이 측정되었다. 이와 유사하게 Okabe(1977)에 의하여 보고된 현장계측자료는 군말뚝에 발생한 부마찰에 의해 기초판으로 연결된 외부말뚝의 두부에는 인장력이, 내부말뚝의 두부에는 압축력이 발생함을 보여주었다.

한편, 이러한 현상에 대한 해석적인 방법을 통한 연구는 Kuwabara & Poulos(1989) 및 Chow 등(1996)에 의해 실시되었는데, 이들은 Mindlin의 탄성이론을 이용하여 말뚝에 작용하는 축력의 분포를 분석하였다. 이들의 연구에 의하면 외곽부 말뚝의 두부부근에서 인장력이 발생하며, 반대로 중앙부 말뚝의 두부부근에서는 압축력이 발생한다. 그러나 말뚝-지반 사이의 항복(미끄러짐, slip)을 고려하지 않는 탄성이론에 의한 부마찰이 말뚝의 거동에 미치는 영향평가는 매우 비합리적인 것으로 알려져 있다(Lee 등 2002; Jeong 등 2004; Lee & Ng 2004). 즉, 단독말뚝에 발생하는 부마찰의 영향을 과하게 평가할 뿐만 아니라, 군효과(shielding effect)를 과하게 평가하게 되므로 결국은 군말뚝에서의 부마찰력 및 말뚝 침하를 과소하게 평가하여 불안전 측이 될 우려가 있을

것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 말뚝-지반 사이의 미끄러짐(slip)을 고려한 일련의 3차원 유한요소해석을 실시하여 기초판으로 연결된 군말뚝 내 각 말뚝의 거동에 대하여 분석을 실시하였다.

## 2. 유한요소해석

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS (ver. 5.8)를 사용하여 수치해석을 실시하였다. 그림 1은 해석에 사용된 대표적인 3차원 유한요소망으로 말뚝간의 간격이 2.5D인 5×5 군말뚝에 대하여 보여주고 있다. 여기서, D는 말뚝의 직경이다. 해석에 사용된 요소망은 점토층 20m 및 그 하부의 선단지반 5m로 구성되어 있다. 말뚝은 점토층 전체에 시공되어 있으며, 그 선단은 점토층과 선단지반의 경계면에 위치하는 것으로 가정을 하였다(말뚝의 길이 L=점토층의 두께). 한편 말뚝의 근입에 의해 유발되는 말뚝 주변지반의 응력이나 물성치 변화는 해석에서 고려하지 않았다. 수치해석에서는 대칭조건을 고려하여 그림 2(a)~2(b)와 같이 전체 요소망의 1/4만을 사용함으로써 해석에 소요된 시간을 절감시켰다. 본 연구에서 실시된 전체해석의 조건은 표 1과 같으며, 해석에 사용된 군말뚝 내 각 말뚝의 위치는 그림 2에 나타나 있다.

해석에서 가정한 콘크리트 말뚝은 원형으로 직경(D)

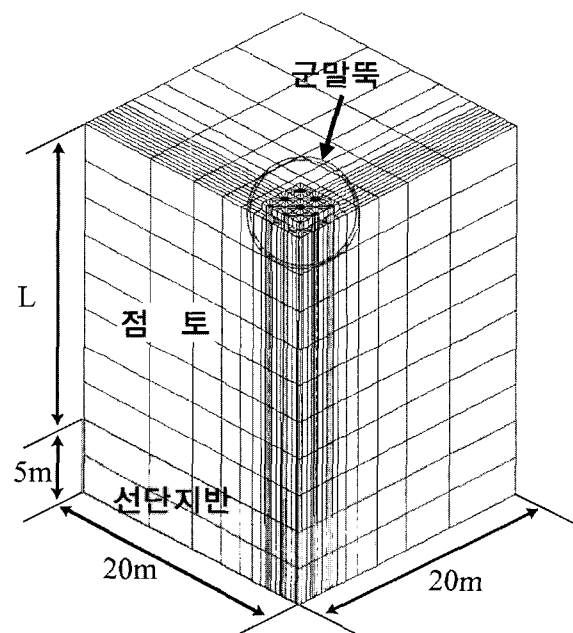


그림 1. 유한요소 해석의 대표 요소망(5×5 군말뚝, 간격 : 2.5D, 말뚝의 길이 L: 20m)

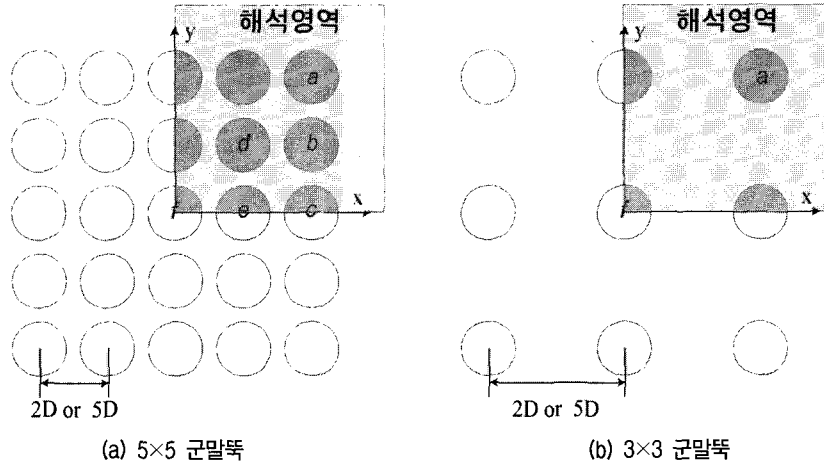


그림 2. 해석영역 및 군말뚝 내 각 말뚝의 위치

표 1. 각 수치해석의 경계조건

해석	L(m)	군말뚝	비고	$\Delta p$ (kPa)
G1	12.5	5×5, 5.0D	E-SL	25
G2	20.0	5×5, 2.5D	SL	50
G3		5×5, 5.0D		
G4		3×3, 2.5D		
G5		3×3, 5.0D		

Note: 1. E-SL : No-slip 및 slip 해석, SL : Slip 해석  
 2. L : 말뚝의 길이 (점토층의 두께), D : 말뚝의 직경(0.5m),  
 $\Delta p$  : 상재하중

은 0.5m이고, 기초판의 두께는 0.5m이며, 기초판과 점토 표면 사이의 상호작용을 고려하지 않기 위해 기초판의 바닥은 점토 표면에서 0.5m 상부에 위치하고 있는 것으로 가정하였다. 또한 유한요소망의 경계조건으로 바닥에는 힌지, 측면에는 롤러 조건을 적용하였다.

본 연구에서는 미끄러짐을 고려하지 않은 탄성해석(no-slip 해석으로 칭함) 및 미끄러짐을 고려한 탄-소성 해석(slip 해석으로 칭함)을 수행하였다. No-slip 해석에서는 말뚝-지반 사이의 경계면이 견고하게 결합되어 있다고 가정하여 상대적인 변위의 발생을 허용하지 않았으며, 말뚝, 기초판, 점토 및 선단지반에 대하여 모두 탄성모델을 적용하였다. 한편, slip 해석에서는 말뚝과 지반의 경계면에서의 상대적인 변위 발생을 허용하였다. 말뚝 및 기초판에 대하여는 탄성모델을 적용하였고, 점토 및 선단지반에 대하여는 비관련 흐름법칙(non-associated flow rule)을 따르는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 표 2에는 해석시 가정한 지반, 말뚝 및 기초판의 물성에 대하여 정리하였다. 모든 해석에서 지하수위는 지표면에 위치하며, 전체지반에 대하여 정수압분포를 가정한 유효응력 해석을 실시하였다.

표 2. 수치해석에서 적용된 물성치

해석		$K_0$	$\nu'$	$\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_c$ (MPa)	$E_{BL}$ (MPa)
G1	P	0.01	0.3	25	12.5	무한대 (선단지지 말뚝)
	C	1.0	0.3	20		
	BL	1.0	0.3	20		
G2~G5	P	0.01	0.25	25	5	50
	C	0.65	0.3	18		
	BL	0.5	0.3	20		

Note: 1. P : 말뚝 & 기초판, C : 점토, BL : 선단지반  
 2. 유효 점착력(c) : 점토 (3kPa), 선단지반 (0.1kPa)  
 3. 한계상태 유효 마찰각( $\phi'_c$ ) : 점토 (20°), 선단지반 (35°)  
 4. 팽창각( $\psi$ ) : 점토 (0.1), 선단지반 (10)  
 5. 말뚝 및 기초판의 탄성계수( $E_p$ ) : 20GPa

slip 해석에 있어서 말뚝-지반 경계면의 거동은 ABAQUS 프로그램에서 제공하는 slip 요소를 이용하여 모사하였다. 경계면은 2D quadratic 18-node elements로 구성되어 있는데, 각 요소는 두개의 동일한 좌표를 갖는 9개의 node를 가진 면에 의해 구성되었다. 경계면은 zero의 두께를 가지고 있으며 상대변위 발생시 전단응력이 발생하게 된다. 일반적인 경우는 상대변위가 2~10mm일 때 경계면에서 항복(yielding)이 발생하며, 이때 최대 마찰력이 발생하는 것으로 알려져 있으며(Lee 등 2002), 이에 본 연구에서는 5mm의 상대변위 발생시 최대마찰력이 발생하는 것으로 가정하였다. 경계면에서의 거동은 최대 상대변위 및 마찰계수(interface friction coefficient),  $\mu$ 의 영향을 받는다, 여기서,  $\mu$ 는  $\tan(\delta)$ 이고,  $\delta$ 는 말뚝과 지반 사이의 마찰각이다. 최대 상대변위가 발생하는 경우,  $p' \times \mu$ 로 정의되는 최대 마찰응력이 발생한다, 여기서,  $p'$ 는 말뚝에 작용하는 유효 수평응력이다. 일반적인 경우 연약점토의 값은 0.15~0.25 등이며, 정규압밀 점토의 정지토압계수,  $K_0$ 는 0.5~0.7이다. 따라서 마찰

계수는 아래의 식 (1)에 의해 0.2~0.5 범위의 값을 가지게 된다.

$$\mu = \tan(\delta') = \beta/K_0 \quad (1)$$

이러한 값은 점토와 강관 말뚝 사이의 마찰계수에 대한 이전의 연구에서 발표된 값들과도 유사하다(Lee 등 2002). 따라서, 본 연구에서는 대표적인 마찰계수의 값으로 0.35를 적용하였다. 말뚝에 가해지는 부마찰은 점토의 표면에 상재하중( $\Delta p$ )을 작용시킴으로서 유발되는 것으로 모델링 하였다. 말뚝 및 지반의 상호거동효과로 인하여 군말뚝에 발생하는 군효과는 부마찰력의 감소( $P_r$ ) 및 말뚝침하의 감소( $W_r$ ) 2개의 항목으로 구분하여 검토를 실시하였다(Lee & Ng 2004).

$$P_r = (P_{s,max} P_{g,max}) / P_{s,max} \quad (2)$$

$$W_r = (W_s - W_g) / W_s \quad (3)$$

여기서,  $P_{max}$ 는 최대 부마찰력이고,  $W$ 는 말뚝두부에 발생하는 침하이다. 한편  $s$  및  $g$ 는 각각 단독말뚝 및 군말뚝을 나타낸다. 외곽부 말뚝의 두부 근처에서 발생하는 최대인장력  $T_{max}$ 는 단독말뚝에 작용하는 최대 부마찰력의 크기를 이용하여  $T_{max}/P_{s,max}$ 로 정규화 하였다.

### 3. 탄성이론과 비교(해석 G1)

Kuwabara & Poulos(1989)는 강성이 무한대인 기초판에 연결된 5.0D간격의 5×5 선단지지 군말뚝의 거동을 탄성이론을 이용하여 분석하였으며, 본 연구에서는 이 결과와 비교를 위해 no-slip 및 slip 해석을 수행하였다. 탄성해석, no-slip 및 slip 해석을 통해서 산정한 군말뚝 내 각 말뚝의 정규화된 축력분포( $P_g/P_{s,max}$ )는 그림 3(a)~3(b)와 같다.

외곽부 말뚝(말뚝 a)의 경우 두부 부근에서 인장력이 발생하고, 중앙부 말뚝(말뚝 f)에는 압축력이 발생한다. No-slip 해석 결과는 말뚝 상부( $Z/L = 0.0\sim 0.4$ )에서 탄성해석과 유사한 경향을 보였으나, 말뚝 하부( $Z/L = 0.4\sim 1.0$ )에서는 축력의 분포가 상이하게 나타났다. 여기서,  $Z$ 는 말뚝의 심도이다. 탄성해석에 의하면 중앙부 말뚝의 경우, 심도가 깊어짐에 따라 정규화된 부마찰력이 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 정의 주면마찰력(positive shaft resistance)이 발현되고 있음을 의미하는데, 선단지지말뚝의 경우 약간의 탄성침하를 제외하고는 말뚝이 침하되지 않기 때문에 이러한 축력의 분포는 물리학적 으로 맞지 않는 것으로 판단된다. 탄성이론에 비하여 no-slip 해석에서는 말뚝에 발생하는 축력이 심도별로 점진적인 증가를 보이는데, 이는 Chow 등(1996)이 연구한 분석 결과와 일치한다. 이는 부마찰이 말뚝길이 전체에 걸쳐서 발생하고 있음을 의미한다. 말뚝의 하부( $Z/L = 0.4\sim 1.0$ )에서는 외곽부 말뚝에서 중앙부 말뚝에서 보

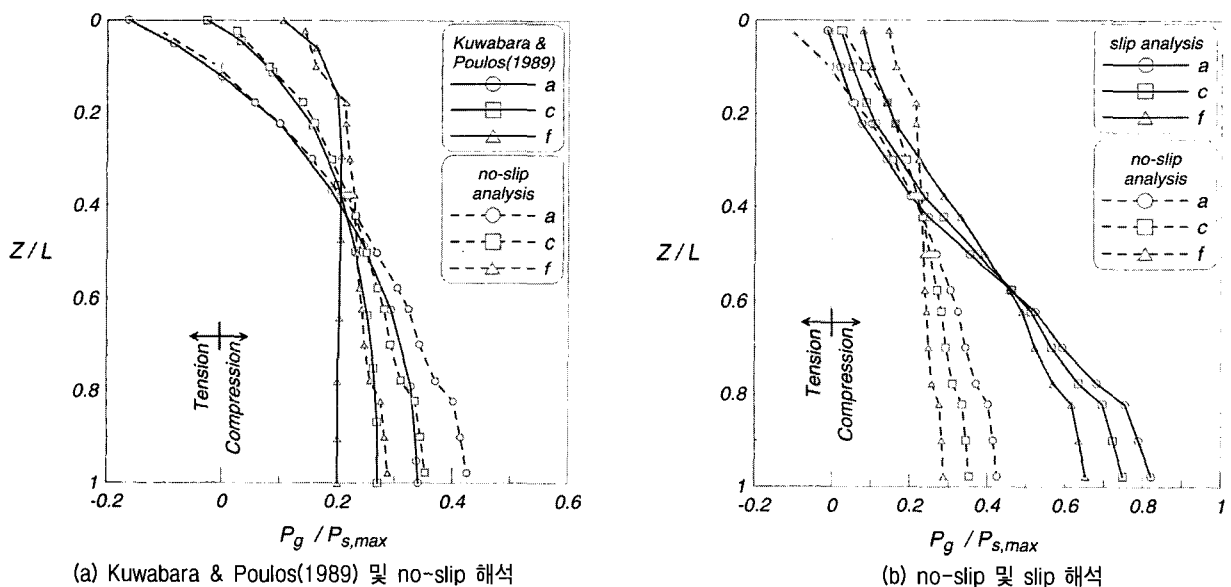


그림 3. 간격 5.0D인 5×5 군말뚝에 작용하는 정규화된 축력의 분포(말뚝의 위치 : 그림 2(a) 참조)

다 더 큰 정규화된 부마찰력이 발생하였다. 이는 균효과(shielding effect)로 인한 것으로, 이로 인해 외곽부 말뚝에 비해 중앙부 말뚝에는 더 작은 부마찰력이 발생했기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

Slip 해석에서 산정한 정규화된 인장력의 크기는 그림 3(b)와 같이 no-slip 해석에서 산정한 인장력 보다 작은 값을 보여주고 있다[ $T_{max}/P_{s,max} = 11\%$ (no-slip 해석) &  $2\%$ (slip 해석)]. 또한 slip 해석에서 산정한  $P_r$ 은 no-slip에 의한 해석보다 작은 값을 나타냈다[no-slip 해석 :  $P_r = 57\sim 71\%$ , slip 해석 :  $P_r = 18\sim 35\%$ ]. 이러한 결과는 slip 해석이 말뚝 사이의 균효과를 더 작게 예측하기 때문인 것으로 판단된다(Lee & Ng, 2004). 이는 탄성해석이 말뚝-지반 사이의 slip을 고려하지 못하기 때문에 균효과를 과대하게 평가하기 때문인 것으로 판단되며, 이로 인해 외곽부 말뚝과 중앙부 말뚝의 상호거동을 과대평가하게 된 것으로 보여진다. 결론적으로 slip 해석에 의한 결과는 no-slip 해석에 비하여 인장력의 크기는 작게 산정되고, 말뚝에 발생하는 최대 압축력의 크기는 더 크게 산정되는 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 말뚝과 기초판의 상호거동(해석 G2)

그림 4는 slip 해석을 통해서 산정한 말뚝간격이 2.5D 인 5×5 말뚝에 발생하는 정규화된 말뚝의 축력( $P_g/P_{s,max}$ )분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 Z/L이 (-)의 값을 가지는 경우는 지표면 위로 돌출한 말뚝의 위치를 의미한다. 그림 4에서 알 수 있듯이 외곽부 말뚝(말뚝 a~c)의 두부부근에서는 인장력이 발생하는 반면, 중앙부 말뚝(말뚝 d~f)의 경우에는 두부에 압축력이 발생하고 있다. 외곽부 말뚝에 작용하는 최대정규화 인장력( $T_{max}/P_{s,max}$ )은 3~8%의 크기를 가지는데, 말뚝 a에서 가장 큰 인장력이 발생하고 말뚝 c에서 가장 작은 인장력이 발생한다. 이러한 인장력은 기초판과 말뚝을 분리시킬 수도 있기 때문에 기초판과 말뚝 두부의 결합부에 대해 적절한 보강이 필요할 것으로 판단된다. 최대 인장력은 외곽부 말뚝(말뚝 a)에서 발생하는 반면, 최대 압축력은 중앙부 말뚝(말뚝 f)에서 발생한다. 중앙부 말뚝에 비하여 외곽부 말뚝의 경우에 두부에서 선단까지의 축력 증가량이 매우 크다. 외곽부 말뚝의 경우 축력은 말뚝의 심도가 깊어질수록 증가하는 반면, 중앙부 말뚝의 경우 중앙부(Z/L = 0.4)에서 선단부근까지 거의 축력이 증가하지 않는 분포를

보여준다. 이는 균효과와 연관이 있는 것으로 판단된다. 중앙부 말뚝에서 산정한  $W_r$ 은 29%인데, 이는 같은 말뚝의  $P_r$ 값인 38%보다 작다. 이러한 경향은 Lee & Ng(2004)가 보고한 기초판으로 연결되지 않은 경우의 균말뚝의 거동과도 유사하다고 할 수 있다.

그림 4에 나타나 있듯이 정규화된 축력의 분포는 말뚝의 상대위치에 따라 크게 좌우된다. 따라서 말뚝의 침하 역시 다를 것으로 판단된다. 해석결과에 의하면 외곽부의 말뚝과 중앙부 말뚝의 침하량 비교를 통해 외곽부의 말뚝의 침하량이 더 큰 것으로 나타났다( $W_a/W_f = 1.014$ ,  $W_a$  : 외곽부 말뚝의 침하,  $W_f$  : 중앙부 말뚝의 침하). 이는 외곽부 말뚝에 작용하는 부마찰이 더 크기 때문이다. 따라서 외곽부 말뚝은 기초판을 아래로 당기는 역할을 하는 반면에, 중앙부 말뚝은 이러한 기초판의 하향 이동에 저항하려고 할 것이며 이에 대해 기초판은 강성이 매우 커서 말뚝의 침하를 거의 균등하게 유지하려는 역할을 한다(Kuwabara & Poulos, 1989). 이러한 외곽부 말뚝, 중앙부 말뚝, 그리고 기초판의 상호작용에 의하여 말뚝에 작용하는 축력이 재분배되어 외곽부 말뚝에는 인장력이, 중앙부 말뚝에는 압축력이 발생하게 되는 것으로 판단 할 수 있다(Teh & Wong, 1995).

외곽부 말뚝의 두부에 작용하는 최대 인장력은 단독 말뚝에 작용하는 최대 부마찰력의 8%정도로써(약 43kN), 말뚝의 두부와 기초판 사이의 결합력이 충분하지 못한 경우 문제가 발생할 수 있는 것으로 판단된다. 즉 외곽부 말뚝두부와 기초판 사이에 균열이 발생하여 말뚝두

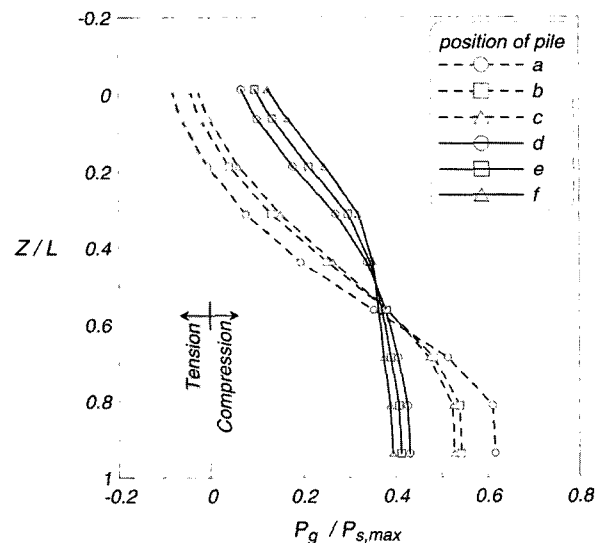


그림 4. 간격 2.5D인 5×5 균말뚝에 작용하는 정규화된 축력의 분포 (slip 해석)(말뚝의 위치: 그림 2(a) 참조)

부 및 기초판의 손상은 물론, 극단적인 경우 외곽부 말뚝이 지지하던 하중의 일부가 중앙부 말뚝으로 전이될 수 있어서 중앙부 말뚝에 설계하중을 초과하는 압축력이 작용할 수 있게 된다(그림 5(a)~5(b) 참조). 즉 중앙부 말뚝은 압축에 대하여 문제가 발생하게 될 수 있어, 추가의 침하가 발생할 수 있고 상부구조물의 사용성이 감소하게 될 것으로 예상된다. 결론적으로 이러한 문제를 사전에 예방하기 위해서는 말뚝에 coating을 실시하여 부마찰을 감소시키는 방법이나, 말뚝두부와 기초판 사이의 결합을 일반적인 시방기준(예: 구조물 기초 설계 기준 및 해설, 한국지반공학회)을 준수하여 품질시공해야 할 것이다.

### 5. 군말뚝의 형상에 의한 영향 (해석 G2~G5)

군말뚝의 형상(말뚝 전체의 수 및 말뚝간의 간격)이

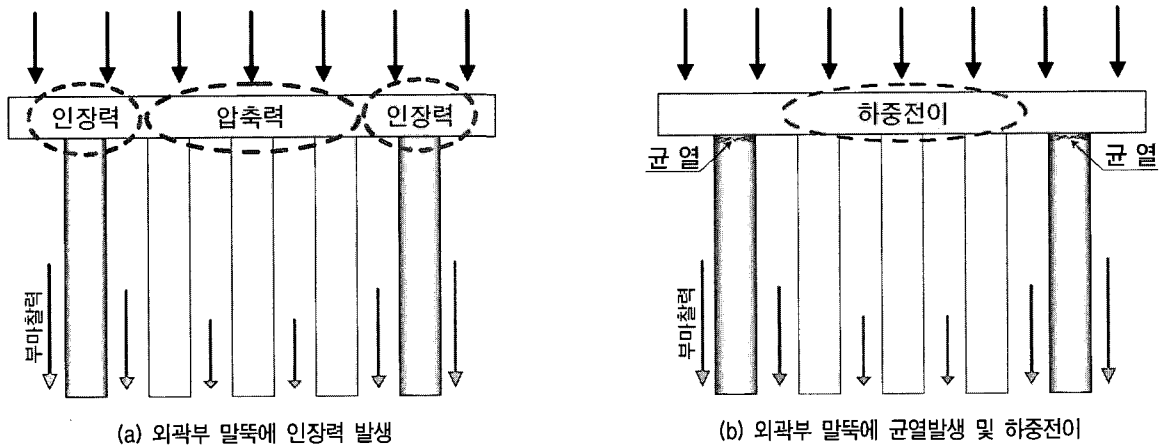
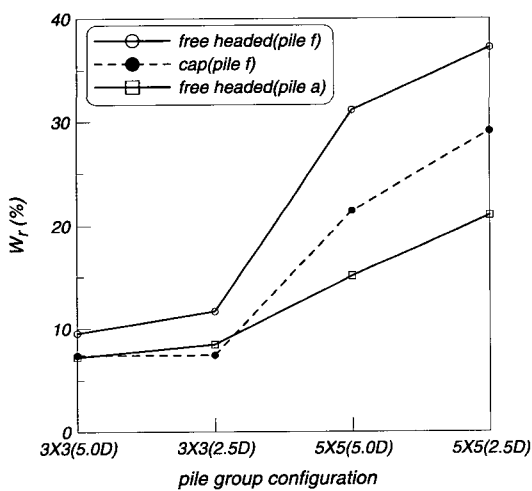
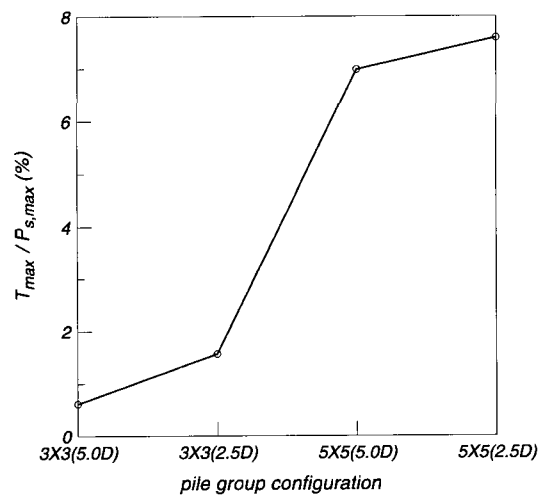


그림 5. 인장력 발생에 의한 균열발생 및 하중전이 개념도



(a)  $W_r$  의 변화



(b)  $T_{max} / P_{s,max}$  의 변화

그림 6. 군말뚝의 형상에 대한  $W_r$  및  $T_{max} / P_{s,max}$ 의 변화분포(slip 해석) (말뚝의 위치: 그림 2(a)~2(b) 참조)

부마찰에 의해 발생하는 인장력 및 균효과에 어떤 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 4개의 수치해석(G2~G5)을 실시하였다(표 1, 2참조). 그림 6(a)~6(b)는 말뚝간격 2.5D와 5.0D를 갖는 3×3 군말뚝과 5×5 군말뚝의 중앙부 말뚝(말뚝 f)과 외곽부 말뚝(말뚝 a)의  $W_r$ 과  $T_{max} / P_{s,max}$ 의 변화를 보여주고 있다. 그림 6(a)에는 말뚝의 두부가 서로 연결되지 않은 경우(free-headed piles in a group)의  $W_r$ 의 분포를 비교를 위하여 포함되어 있다. 그림 6(a)에서 알 수 있듯이 기초판과 연결된 말뚝의 침하( $W_r$ )는 기초판으로 연결되지 않은 말뚝 침하( $W_r$ )의 중간 정도 되는 값을 가지는 것으로 나타났으며, 이는 기초판으로 연결된 말뚝의 경우는 균효과가 좀 더 균등하게 분포되기 때문인 것으로 분석된다(Kuwabara & Poulos, 1989).

그림 6(b)에 의하면 말뚝의 간격이 2.5D 또는 5.0D로 일정할 경우, 5×5 군말뚝에서 3×3 군말뚝보다 더 큰  $T_{max} / P_{s,max}$  값이 산정되었다(2.5D : 1.6%(3×3), 7.6%(5×5) ;

5.0D : 0.6%(3×3), 7.0%(5×5)]. 그러나 말뚝 전체의 수가 9개(3×3) 또는 25개(5×5)로 일정할 경우,  $T_{max}/P_{s,max}$  값의 크기는 말뚝의 간격에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 말뚝 간격이 2.5D인 경우의 인장력은 5.0D인 경우에 비해 약간 증가할 정도이다.

따라서 인장력의 발생은 말뚝 사이의 간격보다는 군말뚝 내 전체말뚝의 수에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단되며,  $T_{max}/P_{s,max}$  값의 변화는 주어진 군말뚝에 대한 침하( $W_s$ )의 변화경향과 유사한 것으로 분석되었다. 따라서 군효과가 증가할수록 말뚝에 작용하는 인장력의 크기도 증가함을 알 수 있다. 해석결과에 의하면, 군효과로 인해 유발되는 군말뚝 내 각 말뚝의 부마찰력 및 침하의 감소는 부마찰의 영향이 감소된다는 측면에서는 말뚝의 거동에 유리한 부분이지만, 부마찰에 인한 외곽부 말뚝에서 발생하는 인장력은 반드시 설계에서 고려되어야 할 불리한 부분인 것으로 판단된다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 부마찰력(NSF)의 영향을 받는 기초판(cap)으로 연결된 군말뚝의 거동을 일련의 3차원 유한요소해석을 실시하여 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었을 수 있었다.

- (1) 기초판으로 연결된 군말뚝에 부마찰이 작용하게 되면 외곽부 말뚝의 두부에 인장력이 발생하고, 중앙부 말뚝의 두부에서는 압축력이 발생한다. 말뚝에 발생하는 인장력은 말뚝과 기초판의 상호작용 및 군효과(shielding effect)에 의해서 말뚝에 발생하는 축력이 재분배되기 때문인 것으로 분석되었다. 탄성이론을 이용하여 말뚝의 거동을 분석한 기존의 연구는 말뚝에 작용하는 인장력의 크기 및 군효과에 의한 부마찰력의 감소정도를 과대평가하는 것으로 나타났다. 말뚝과 주변지반 사이의 경계면에서의 미끄러짐(slip)을 고려한 slip 해석결과에 의하면 탄성이론이나 slip을 고려하지 않은 no-slip 해석결과에 비해 상대적으로 작은 크기의 인장력 및 군효과를 산정하는 것으로 나타났다.
- (2) 말뚝에 작용하는 인장력의 크기는 군말뚝 내 말뚝의 간격보다는 전체 말뚝의 숫자에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 군효과가 증가할수록 말뚝에 작

용하는 인장력의 크기는 증가하는 것으로 분석되었다. 기초판으로 연결된 말뚝의 경우 기초판으로 연결되지 않은 군말뚝내의 말뚝에 비해 말뚝에 발생하는 축력이 보다 균등하게 분포하는 것으로 나타났다.

- (3) 본 연구에서 가정된 해석조건 하에서 분석된 결과에 의하면 외곽부 말뚝의 두부에는 단독말뚝에 발생하는 최대 부마찰력의 약 8%에 해당하는 인장력이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 이때 말뚝의 두부와 기초판 사이의 결합이 충분히 강하지 못한 경우 말뚝두부에 균열이 발생하는 등의 손상이 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 부마찰의 영향을 받는 군말뚝의 설계시 이를 고려하여 부마찰력의 크기를 감소시킬 수 있는 공법을 적용하거나, 말뚝두부와 기초판 사이를 강하게 품질시공해야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. ABAQUS User's and Theory Manuals. (1998), Version 5.8, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc, Rhode Island.
2. Chellis, R.D. (1961), *Pile Foundations*, McGraw Hill Book Co.
3. Chow, Y.K., Lim, C.H., & Karunaratne, G.P. (1996), "Numerical modelling of negative skin friction on pile groups", *Computers and Geotechnics*, 18(3), 201-224.
4. Garlanger, J.E., & Lambe, T.W. (1973), *Proceedings of a symposium on downdrag on piles*, Research Report R-73-56, Soil-331, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts.
5. Jeong, S., Lee, J. H., & Lee, C. J. (2004), "Slip effect at the pile-soil interface on dragload", *Computer and Geotechnics*, 31(2), 115-126.
6. Kuwabara, F., & Poulos, H. G. (1989), "Downdrag forces in group of piles", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 115(6), 806-818.
7. Lee, C. J., Bolton, M.D., & Al-Tabbaa, A. (2002), "Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations", *Geotechnique*, 52(5), 325-335.
8. Lee, C. J., & Ng, C. W. W. (2004), "Development of downdrag on piles and in pile groups in consolidating soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(9), 905-914.
9. Okabe, T. (1977), "Large negative friction and friction-free pile methods", *9<sup>th</sup> ICSMFE*, 1, 679-682. Tokyo, Japan.
10. Shibata, T., Sekiguchi, H., & Yukitomo, H. (1982), "Model test and analysis of negative friction acting on piles", *Soils and Foundations*, 22(2), 29-39.
11. Teh, C.I., & Wong, K.S. (1995), "Analysis of downdrag on pile groups", *Geotechnique*, 45(2), 191-207.

(접수일자 2006. 1. 4, 심사완료일 2006. 8. 14)