

연약지반에 타입된 모형말뚝에 작용하는 부마찰력 거동분석

Behavior of Negative Skin Friction on Model Pile Driven In Soft Clay

이규환¹⁾, Kyu-Hwan Lee, 심민보²⁾, Min-Bo Shim, 이장덕³⁾, Chang-tok yi, 이 송⁴⁾, Song Lee, 이수덕⁵⁾, Su-Dok Lee

¹⁾ 서울시립대학교 대학원 박사과정, Ph.d Student, Dept. of Civil Engineering, SCU.

²⁾ 서울시립대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, SCU.

³⁾ S & Q 전문위원, Advisor, Safety and Quality Control Co,

⁴⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, SCU

⁵⁾ 대한주택공사 주택연구소 단지 토목토질부 부장, Manager, Korea National Housing Co.,

SYNOPSIS : In many cases of founding structures on soft soils, pile foundation proves to be the only logical and economical choice. However, the use of pile foundation is not limited to soft ground. Current method of predicting downdrag forces along the pile shaft in clay could overpredict the estimated capacity. Therefore, understanding the nature and the behavior of downdrag forces along the pile shaft is absolutely essential. The paper describes the measurement of downdrag forces on the model piles driven in the cylindrical chamber filled by remolded marine clay. The model pile was driven after around 90% consolidation of soft ground applied the load to induce settlement in the ground during the test. Three instrumented systems, load cells were installed on the model piles consisted of three parts to measure the downdrag forces independently. Pore pressures and ground movements in the ground were monitored throughout the period of investigation. The measured downdrag forces were also compared to the forces obtained from pulling test. The results were analyzed and discussed in the paper.

KEYWORDS : Soft soil, Downdrag force, Model pile, Remolded marine clay, Load cell, Pulling test

1. 서 론

연약 지반상에 시공된 말뚝기초에서 말뚝과 주변 지반간의 상대적인 침하에 의해 말뚝에 작용하는 부마찰력은 그 크기가 매우 큰 경우에는 말뚝의 장기 허용 지지력의 수배가 되어 말뚝 자체에 큰 부담을 주어 말뚝의 파손을 일으키며, 말뚝의 지지력을 크게 감소시킬 수가 있다. 따라서, 부마찰력이 예상되는 지반에 말뚝 기초로 구조물을 시공한다면 부마찰력으로 인한 말뚝의 불안정으로 구조물 전체가 침하하거나 부등 침하가 발생하여 치명적인 손상을 일으킬 수가 있다. 국내에서는 이러한 부마찰력에 대한 명확한 인식없이 말뚝을 설계, 시공하고 있으며, 부마찰력에 대한 현장 실험도 극히 제한적으로 이루어지고 있다. 그러나, 최근 들어 연약 지반상에 말뚝 기초의 사용이 점점 증가하고 있으며, 이에 대한 관심도 고조되고 있다.

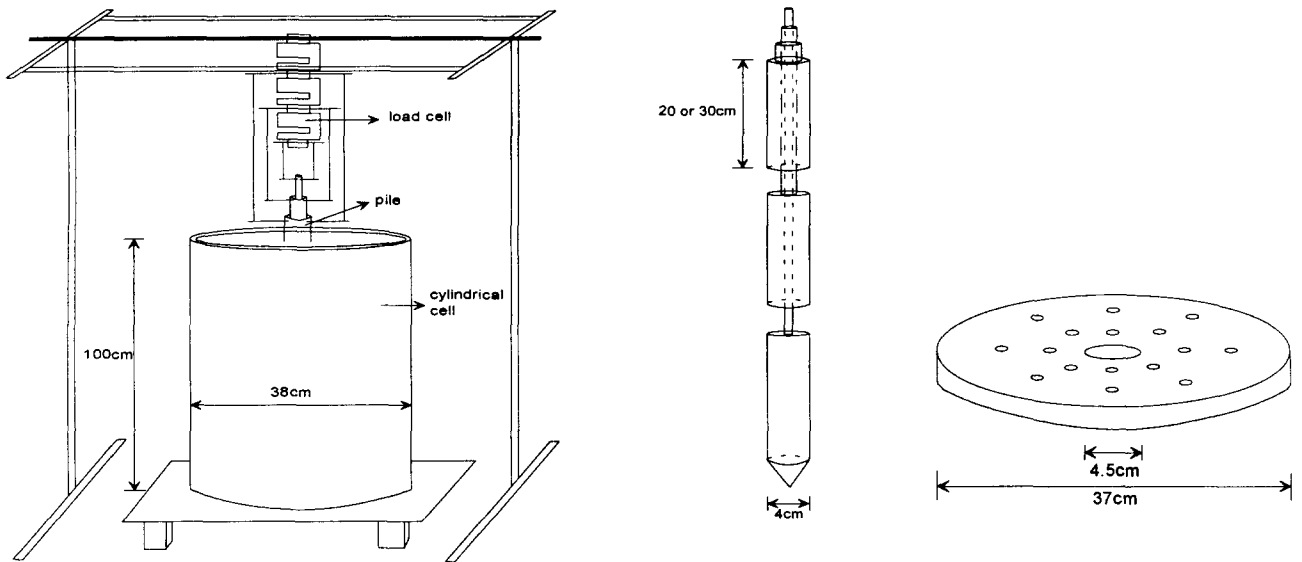
국내의 경우, 임종석(1987)은 처음으로 부마찰력에 대한 실내 모형 실험을 수행하였다. 스트레인 게이지가 장착된 압력 게이지를 이용하여 말뚝의 중립점에 대한 연구와 역칭재 및 확대 선단부에 의한 부마찰력 감소 효과에 대한 연구를 실시하였다.

본 연구는 균말뚝 시공으로 인한 부마찰력 저감 효과를 파악하기 위한 예비 연구로 재성형된 연약점토지반에 타입된 모형 말뚝에 작용하는 부마찰력의 분포와 크기를 측정하여 부마찰력의 특성을 파악하고, 모형 말뚝의 표면 거칠기를 달리하여 부마찰력의 크기를 측정하여 부마찰력의 감소 효과를 검증하고, 인발 시험을 통해 산출한 마찰력과 부마찰력을 비교 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 모형 말뚝 시험

본 연구에 사용된 시험 장치는 크게 원형 토조, 모형 말뚝, 로드셀, 간극수압계, 재하판으로 구분된다. 원형 토조는 직경 38cm, 높이 100cm로 두께 0.5cm의 투명한 원형 아크릴을 이용하여 제작하였다. 표면이 거칠은 모형 말뚝과 표면이 매끄러운 말뚝은 4cm의 직경을 갖으며, 높이는 각각 60cm, 90cm로 아크릴을 이용하여 3단으로 분리 제작하였고, 말뚝 선단부는 60°의 원추형 콘 모양으로 제작하였다. 모형 말뚝을 3단으로 분리 제작함으로써 깊이에 따라 각 부분에 작용하는 부마찰력을 측정할 수 있도록 하였다. 모형 말뚝 각 단에 작용하는 부마찰력을 측정하기 위한 로드셀은 최대용량 20kg이며, 허용 오차는 1/5000로 5g 단위로 하중을 읽을 수가 있으며, 로드셀과 말뚝의 연결은 강성이 큰 강봉을 이용하여 말뚝에 걸리는 하중을 로드셀에 전달되도록 하였다. 간극수압계는 최대 3.5kg/cm²까지 측정할 수 있는 VWP용을 사용하였다. 또한, 원형 토조에 투기된 시료의 압밀 및 말뚝 타입 후 지반에 상재하중을 가하기 위하여 직경 37cm, 두께 1.7cm의 원형의 강철판으로 재하판을 제작하였다. 재하판은 중앙부에 직경 4.5cm의 원형구멍을 통하여 말뚝을 타입할 수 있도록 하였으며, 여러 개의 작은 원을 내고 재하판 하부에 부직포를 붙여 상부 배수층 역할을 하도록 하였다.



(a) 모형 토조 및 로드셀

(b) 모형 말뚝

(c) 원형 하중판

그림 1. 부마찰력 측정 시험 장치

2.2 인발시험

모형 말뚝에 작용하는 부마찰력 측정 시험을 완료한 후에 지반 침하로 인하여 유발된 부마찰력과 말뚝 인발 시 작용하는 주면 마찰력을 비교하기 위하여 인발 시험을 실시하였다. 인발시험은 도르레 원리를 이용하여 모형 말뚝과 인발 시험 장치 사이에 인발력을 측정하기 위한 로드셀을 부착하여 일정변형율로 모형 말뚝을 인발하였다. 모형 말뚝 인발에 사용된 로드셀은 용량이 50kg이며, 허용오차는 1/5000로서 10g 단위로 하중을 읽을 수가 있다. 또한, 인발시 말뚝 머리의 수직 변위를 측정하기 위해서 1/100mm까지 측정할 수 있는 스탠드형 다이얼 게이지를 이용하였다.

3. 시험시료 및 시험방법

3.1 시험시료의 기본물성치

본 연구에서는 부산 지역 해안에서 얻은 준서 점토를 이용하였으며, 균질성을 확보하기 위하여 #40번체를 이용하여 체가름을 실시하였다. 총 5회의 물성시험을 한 결과는 표 1과 같으며, 허용오차는 $\pm 3\%$ 범위 안에 있었다.

표 1. 준서 점토의 물성 시험 결과

비중	액성 한계	소성 한계	소성 지수	#200 통과량	통일분류법
2.68 ± 0.01	$44.0 \pm 3\%$	$25.0 \pm 3\%$	$19 \pm 3\%$	96%	CL

3.2 교란시료의 성형

#40체를 이용하여 체가름한 준서토를 교반기로 완전히 교반시킨 후에 평균 초기 함수비가 각각 77%, 66%인 시료를 원형 토조에 투기를 하였다. 시료를 투기한 후에 간극수압계의 읽음 값과 침하량을 분석하여 자중 압밀이 종료되어 시료가 안정된 시점에서 재하판을 이용하여 시료를 압밀시켰다.

투기된 시료는 자중과 상재 하중에 의하여 상부 배수와 하부 배수가 동시에 이루어지도록 상, 하부에 배수재를 설치하였고, 시료의 압밀을 촉진시키기 위하여 원형 토조의 벽면 세 부분에 배수재를 설치하였다. 시료의 압밀도는 침하량 곡선과 간극수압계를 이용한 과잉간극수압의 소산 정도를 가지고 파악하였다.

3.3 시험방법

원형 토조에 소정의 함수비로 교반된 시료를 투기한 후에 상재 하중을 단계적으로 재하하였으며, 간극수압계와 침하 분석을 통하여 변화가 미소한 시점에서 말뚝을 타입하였다. 간극수압계는 준서토를 투기하기 전에 시료 하단에서 45cm, 말뚝의 중심에서 18cm 떨어진 벽면에 부착하였다. 초기 지반의 압밀과 강도증가를 위해서 두 개의 재하판을 이용하였으며, 말뚝 타입 후에 상재하중의 역할을 하도록 한 개의 재하판을 추가로 사용하였다. 하중 재하에 의한 지반 침하량은 원형 토조의 대각선 방향으로 두 부분에 눈금자를 부착하여 읽은 값을 평균하여 산정하였다.

재하 하중에 의한 지반 강도의 증가를 파악하기 위해서 모형 말뚝을 타입하기 전에 소형 배인시험기를 이용하여 심도별 비배수 전단강도를 측정하였다. 말뚝 타입시에는 가이드 셀을 이용하여 말뚝 관입시에 수직성이 유지되도록 하였으며, 말뚝의 타입은 말뚝 머리를 손으로 눌러서 관입하였다. 말뚝에 작용하는 부마찰력은 말뚝 각 단과 로드셀을 강봉으로 연결하고 로드셀에 연결된 지시계를 통하여 하중 값을 측정하였다.

모형 말뚝의 부마찰력 측정을 완료한 후에 소형 배인시험기를 이용하여 비배수 전단강도를 측정하였다. 또한, 표면이 거칠은 모형 말뚝에 대해서 인발 시험을 실시하였으며, 인발 속도는 평균 0.16 mm/sec의 변형속도를 유지하도록 하였다. 원형 토조에서 말뚝을 제거하고, 말뚝 외경으로부터 10cm에 위치한 측면 배수재가 설치되지 않은 부분에서 불교란 시료를 채취하여 심도별 함수비와 단위 중량을 측정하였다.

말뚝 재료의 표면 거칠기에 따른 부마찰력의 거동 특성을 파악하기 위해서 콘크리트 말뚝 표면과 같은 거칠기를 갖도록 말뚝 표면에 샌딩(sanding)을 한 경우와 모형 아크릴 말뚝을 그대로 이용한 경우를 구분하여 시험을 실시하였다.

4. 실험 결과 분석

4.1 표면이 거친 말뚝

표면이 거친 말뚝에 대한 부마찰력 거동 분석을 위해서 평균 함수비 77%의 준섫 점토를 교반하여 초기 높이가 100cm의 슬러리 상태로 원형 토조에 투기하였으며, 시간에 따른 지표 침하량과 간극수압 변화는 그림 2, 3과 같다. 지반의 압밀과 강도증진을 위한 하중재하는 2단계로 나누어 하중을 재하하였으며 상재하중(0.05kg/cm²) 재하로 인한 총 침하량은 18.3cm이었으며, 말뚝 타입 후 최종 부마찰력 측정 완료시까지의 침하량은 약 1.3cm이었다. 말뚝 타입시 말뚝 타입으로 인한 영향으로 약 0.4cm정도 침하량이 상승하였다. 그림 3과 같이 말뚝 타입으로 인하여 말뚝 주변 지반의 간극수압은 급격히 증가하다가 시간의 경과에 따라 과잉간극수압이 서서히 소산되는 경향을 나타내었다.

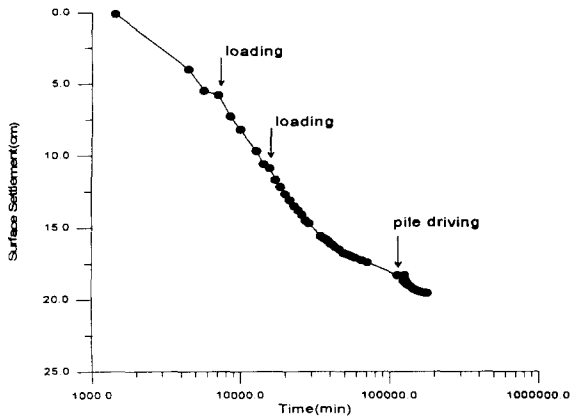


그림 2. 시간에 따른 지표 침하

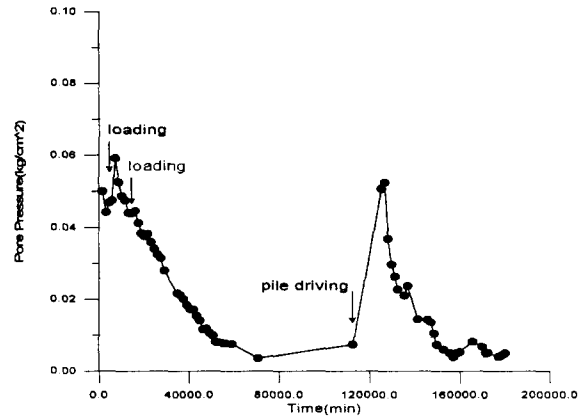


그림 3. 시간에 따른 간극 수압

말뚝 타입 후 시간 경과에 따른 말뚝 각 단에 걸리는 부마찰력을 측정한 결과는 그림 4, 5와 같다. 부마찰력은 상단에서 가장 크게 발휘되었으며, 중간단, 하단의 순서로 발휘되었다. 시간의 경과에 따라 말뚝 각 단의 부마찰력은 일정하게 증가하여 수렴하는 경향을 보여주고 있다.

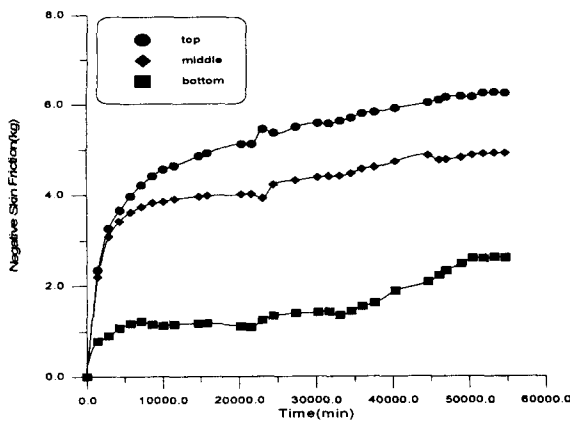


그림 4. 시간에 따른 부마찰력

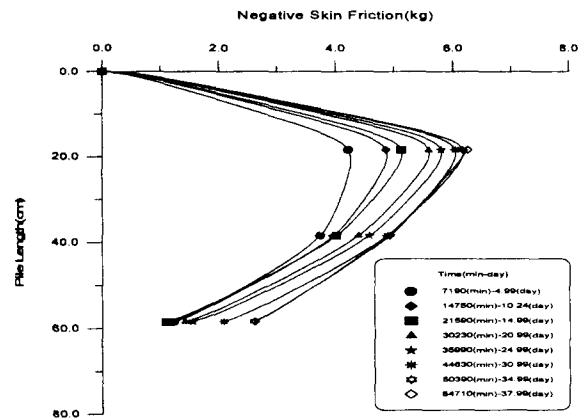


그림 5. 말뚝 길이에 대한 부마찰력

말뚝에 작용하는 부마찰력 측정이 완료된 후에 불교란 시료를 채취하여 구한 심도별 함수비와 비배수 전단 강도를 나타낸 결과는 그림 6, 7과 같다. 함수비 분포는 상층과 하층에서 중간층에 비하여 작은 값을 나타내었지만 심도별로 변화 폭이 비교적 작았다. 또한, 비배수 전단 강도의 분포는 함수비 분포와 반대의 경향을 나타내었으며, 말뚝 타입 전후의 비배수 전단 강도는 평균 1.4배의 증가를 보였다.

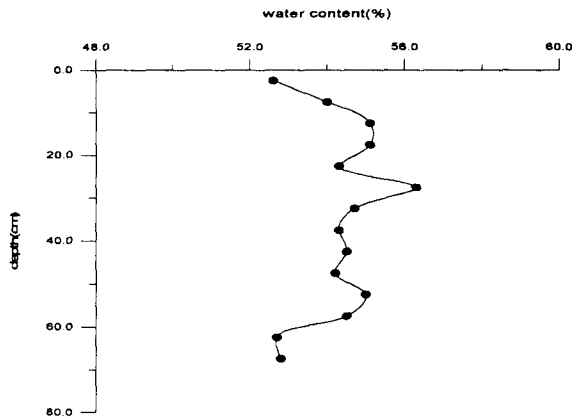


그림 6. 심도에 따른 함수비

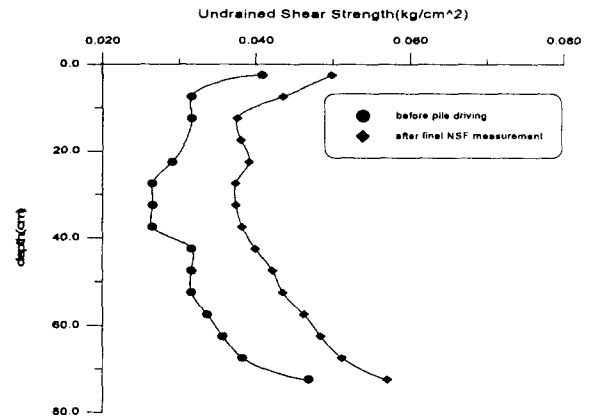


그림 7. 심도에 따른 비배수 전단 강도

그림 8은 말뚝 변위와 인발 시험의 관계를 나타낸 것으로 말뚝과 지반 사이의 상대 변위가 약 0.3mm에서 최대 인발 하중에 도달하였으며, 이 후에 인발 하중은 일정한 값에 수렴을 하였다.

단위 면적당 부마찰력과 인발력, 그리고 비배수 전단 강도와와의 관계는 그림 9와 같다. 단위 면적당 부마찰력은 말뚝 상단에서 가장 크게 발휘되었으며, 하단으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 모형 말뚝의 단위 면적당 작용하는 최대 인발응력은 0.04 kg/cm²로 단위 면적당 최대 부마찰력 0.027kg/cm²에 비해 약 1.5배 정도 크게 나타났다. 말뚝에 작용하는 부마찰력과 인발력의 차이는 주로 말뚝과 주변 지반의 상대변위 속도차에서 기인한 것으로 판단된다. 단위 면적당 부마찰력과 비배수 전단 강도와와의 관계는 비배수 전단강도의 값이 약 1.5배 정도 크게 발생하였으며, 비배수 전단 강도와 인발력은 거의 비슷하게 분포하였다.

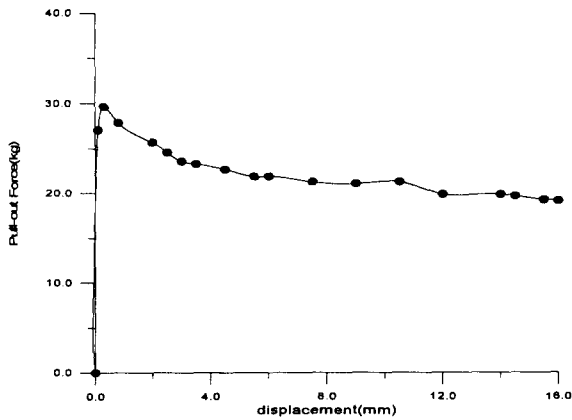


그림 8. 말뚝 변위-인발력

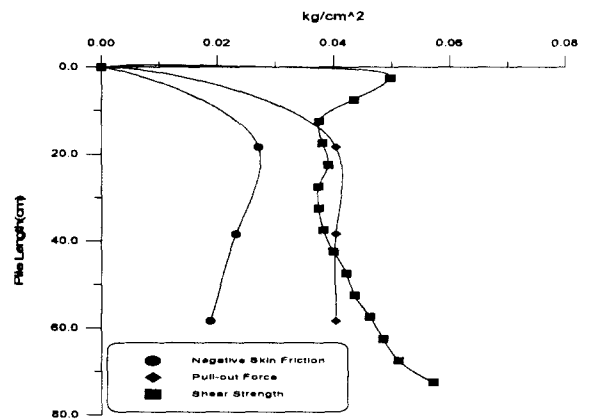


그림 9. 부마찰력-인발력-비배수 전단 강도

시간에 따른 지표 침하량과 말뚝 상단에 작용하는 부마찰력 관계는 그림 10과 같다. 부마찰력은 약 1.3cm 정도의 변위 발생시 최대치에 도달하였으며, 부마찰력 증가와 지표 침하량 증가는 유사한 경향을 보여주고 있다.

비배수 전단 강도와 유효 응력에 대한 말뚝의 각 단에 작용하는 최종 부마찰력 실측치의 비(α, β)는 그림 11과 같다. α 값은 부마찰력과 베인 시험에서 구한 비배수 전단강도의 관계를 통하여 산정하였고, β 값은 불교란 시료를 채취하여 각 심도별로 단위중량을 측정하여 구한 유효응력과 부마찰력의 관계를 통하여 산정하였다. α 값은 말뚝 상단에서는 0.7, 중간단에서는 0.6, 하단에서는 0.4로 평균 0.53으로 나타났으며, β 값은 말뚝 상단에서는 약 0.2, 중간단에서는 0.1, 말뚝 하단에서는 0.05로 평균 0.11로 나타났다.

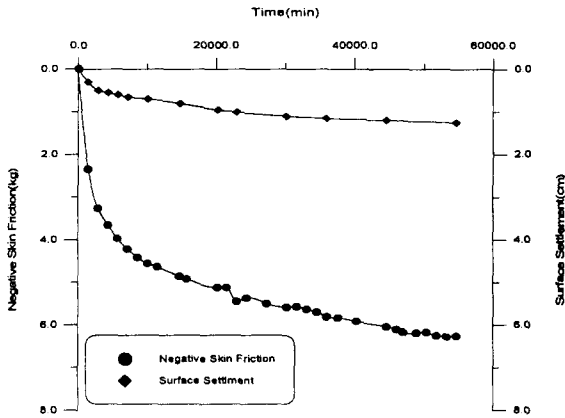


그림 10. 지표 침하 - 말뚝 상단 부마찰력

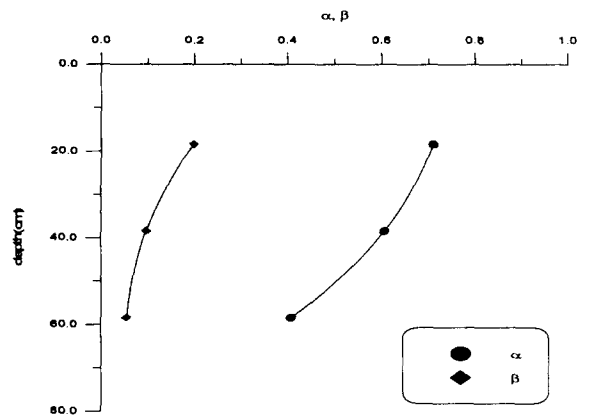


그림 11. 부마찰력에 대한 α 값과 β 값

4.2 표면이 매끄러운 말뚝

준설 점토를 슬러리 상태로 교반하여 평균 함수비 66%, 시료 높이 96cm로 원형 토조에 투기한 후에 시간 경과에 따른 지표 침하량 및 간극수압 변화를 그림 12, 13에 나타내었다. 상재 하중(0.05kg/cm^2) 재하로 인한 총 침하량은 13.7cm이었으며, 말뚝 타입 후 최종 부마찰력 측정 완료시까지의 침하량은 약 2.7cm이었다. 또한, 말뚝 타입시 말뚝 타입으로 인한 영향으로 약 0.8cm정도 침하량이 상승하였다. 하중 재하로 인한 시간 경과에 따른 지반의 간극수압은 점점 감소되다가 말뚝을 타입한 시점에서 급격히 증가하다가 시간의 경과에 따라 과잉간극수압은 서서히 감소하는 경향을 보여주고 있는데, 표면이 거칠은 말뚝에서 나타난 경향과 동일하였다.

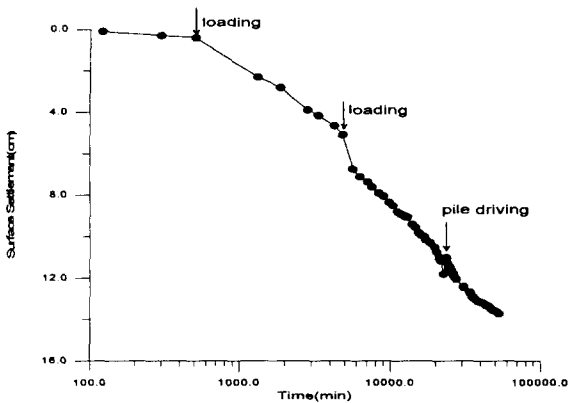


그림 12. 시간에 따른 지표 침하

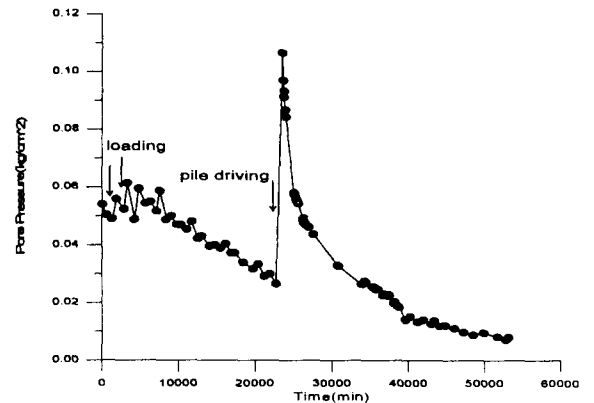


그림 13. 시간에 따른 간극 수압

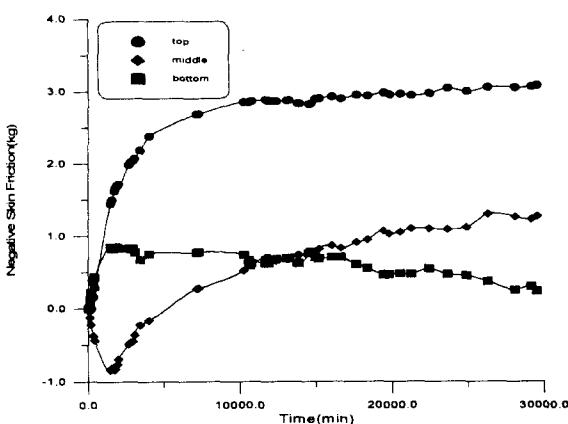


그림 14. 시간에 따른 부마찰력

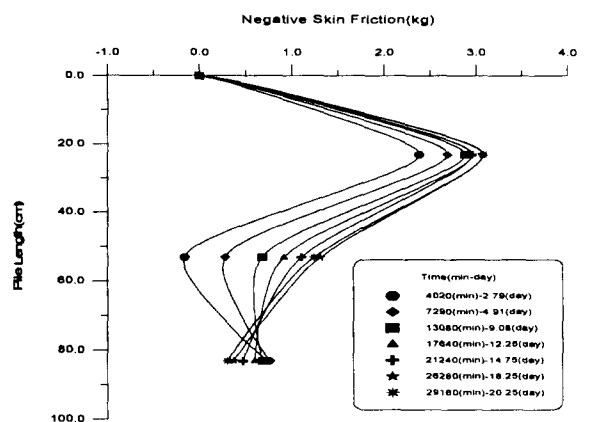


그림 15. 말뚝 길이에 대한 부마찰력

말뚝 타입 후 시간의 경과에 따른 말뚝 각 단에 걸리는 부마찰력을 측정된 결과는 그림 14, 15와 같다. 말뚝의 각 단에 작용하는 부마찰력은 상단에서 가장 크게 발휘되었으며, 하단, 중간단의 순서로 발휘되다가 시간 경과에 따라 중간단의 부마찰력은 크게 증가하고 하단의 부마찰력은 일정하게 감소하여 중간단, 하단의 순서로 부마찰력이 발휘되었다. 말뚝을 타입한 초기에 말뚝의 중간단에서 정의 마찰력이 발휘되었으며, 이는 심도에 따른 함수비 및 비배수 전단 강도 분포에서 보듯이 중간층의 상태가 매우 연약해서 말뚝 타입시 발생된 지반의 용기에 큰 영향을 받았기 때문이라고 판단된다.

그림 16은 말뚝의 길이에 따른 말뚝 각 단의 작용하는 부마찰력의 누적치를 나타낸 것으로 말뚝의 심도가 증가함에 따라 부마찰력이 서서히 감소함을 보여주고 있다.

단위 면적당 최대 부마찰력과 비배수 전단 강도와 관계는 그림 17과 같다. 단위 면적당 최대 부마찰력은 상단에서 가장 크게 발휘되었으며, 하단으로 갈수록 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 침하량이 상단에서 가장 크게 발생하기 때문이라 생각되며, 표면이 거칠은 말뚝의 최대 부마찰력과 동일한 분포를 나타내고 있다. 말뚝 상단의 최대 부마찰력과 비배수 전단 강도의 관계는 비배수 전단강도의 값이 약 2.2배 정도 크게 발생하였다.

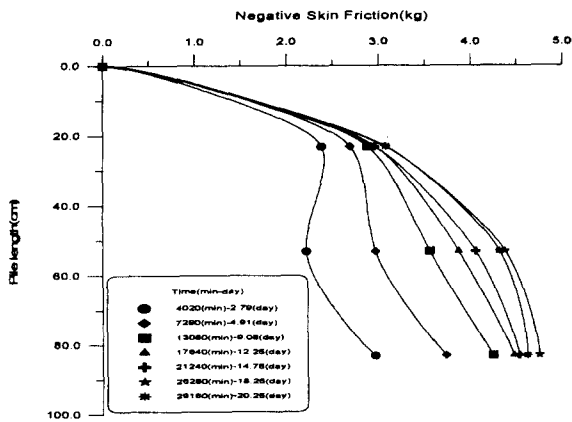


그림 16. 말뚝에 작용하는 부마찰력

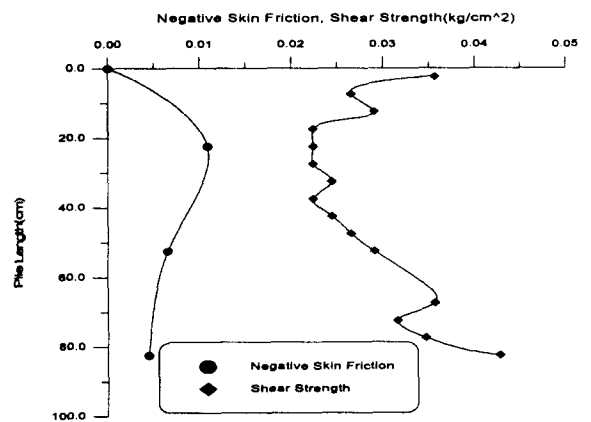


그림 17. 최대 부마찰력 - 전단 강도

부마찰력 측정을 완료한 후에 실시한 심도별 함수비 변화와 비배수 전단 강도 변화를 나타낸 결과는 그림 18, 19와 같다. 심도별 함수비 분포는 상층과 하층에서 비교적 작고, 중간층에서 크게 나타났으며, 이와는 달리 비배수 전단 강도는 상층과 하층에서 크고, 중간층에서는 가장 작은 값을 나타내어 중간층이 가장 연약함을 알 수 있다.

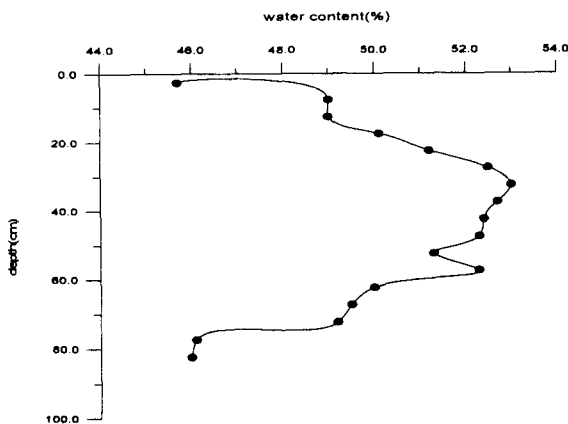


그림 18. 심도에 따른 함수비

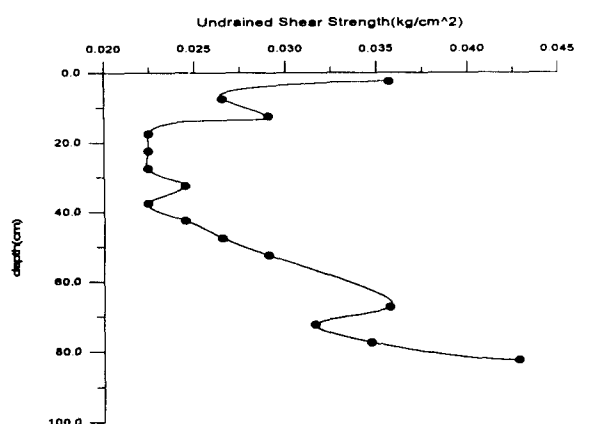


그림 19. 심도에 따른 비배수 전단 강도

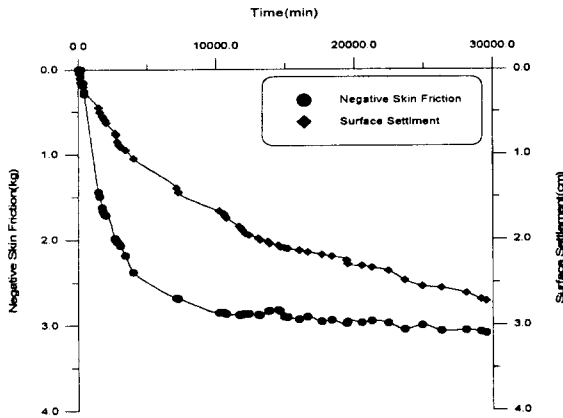


그림 20. 지표 침하 - 말뚝 상단 부마찰력

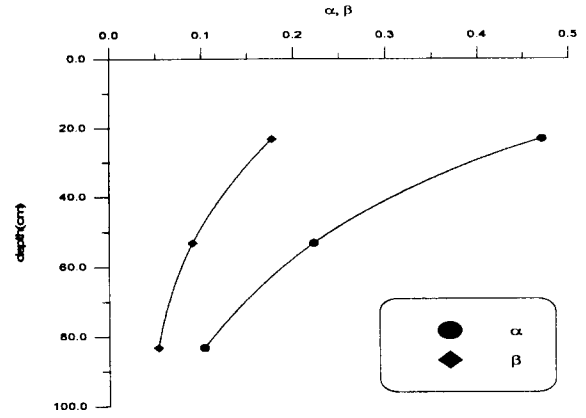


그림 21. 최대 부마찰력에 대한 α , β

시간에 따른 지표 침하량과 말뚝 상단에 작용하는 부마찰력 관계는 그림 20과 같으며, 지표 침하량이 2.7cm 일 때 부마찰력이 최대치에 도달하였다. 표면이 매끄러운 말뚝의 지표 침하량은 표면이 거칠은 말뚝과 비교하여 약 2배 정도의 큰 침하량에서 최대 부마찰력에 도달하였다.

비배수 전단강도와 유효 응력에 대하여 말뚝의 각 단에 작용하는 최종 부마찰력 실측치의 비(α, β)는 그림 21과 같다. α 값은 말뚝 상단에서는 0.47, 중간단에서는 0.22, 하단에서는 0.10로 평균 0.26으로 나타났으며, β 값은 말뚝 상단에서는 약 0.18, 중간단에서는 0.09, 말뚝 하단에서는 0.05로 평균 0.10로 나타났다.

4.3 시험결과 비교 고찰

말뚝에 작용하는 부마찰력의 크기를 비교한 결과 부마찰력은 지반의 강도와 말뚝의 표면 거칠기에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 표면이 매끄러운 말뚝의 최대 부마찰력은 0.0108 kg/cm^2 이었으며, 표면이 거칠은 말뚝의 최대 부마찰력은 0.027 kg/cm^2 로 2.5배 증가하였다. 약 1.7배 정도의 지반 강도 차이가 발생하였다는 점을 고려하면 지반 강도에 비하여 말뚝의 표면 거칠기가 부마찰력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

또한, 최대 부마찰력이 발휘되기까지 지반 강도에 따라 말뚝과 주변지반의 상대변위가 서로 다를 수 있었다. 표면이 거칠은 말뚝의 경우에는 최대 부마찰력이 발휘되는 지반 침하량은 1.3cm이었으며, 표면이 매끄러운 말뚝의 지반 침하량은 2.7cm로 나타났다. 최대 부마찰력이 발휘되기 위한 지반 침하량은 지반의 강도에 따라 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

표면이 거칠은 말뚝의 평균 α 값은 0.53이었으며, 표면이 매끄러운 말뚝의 경우 0.26으로 나타났다. 또한, 표면이 거칠은 말뚝과 표면이 매끄러운 말뚝의 평균 β 값은 각각 0.11, 0.10으로 나타났다. 이러한 결과로부터 α 값은 지반 강도와 말뚝의 표면 거칠기에 큰 영향을 받았으며, β 값은 지반 강도와 표면 거칠기에 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 준설 점토로 성형한 지반에 표면 거칠기를 달리한 모형 말뚝을 타입하여 말뚝에 작용하는 부마찰력에 관한 실내 모형실험을 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 말뚝 하단에 작용하는 부마찰력은 시간의 경과에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있어 말뚝의 중립점이 하단부에 존재하는 것으로 판단된다.
- 2) 단위 면적당 최대 부마찰력은 말뚝의 표면 거칠기에 관계없이 말뚝 상단에서 가장 크게 발휘되었으며, 하단으로 갈수록 감소하였다.
- 3) 말뚝의 주변에 발휘되는 부마찰력의 크기는 지반 강도보다는 말뚝의 표면 거칠기에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

로 나타났다.

- 4) 지반 강도와 말뚝의 표면 거칠기에 대하여 α 값은 큰 영향을 받은 반면, β 값은 상대적으로 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.
- 5) 표면이 콘크리트 말뚝과 같은 거칠기를 갖는 모형 말뚝에 대한 인발 시험 결과 말뚝 주변에 작용하는 최대 인발력에 대한 최대 부마찰력의 비는 약 67%이었다.

감사의 글 : 본 논문은 대한주택공사의 연구비 지원으로 수행된 “연약지반에서의 군말뚝효과를 고려한 말뚝의 설계 및 시공기법개선에 관한 연구”중 일부분으로, 많은 도움을 주신 관계자 여러분께 진심으로 감사를 드립니다.

6. 참고문헌

1. 김수일, 정상삼, 정성용(1994), “연약 지반에 시공된 말뚝의 주변 마찰력 산정 간편법”, 대한토목학회논문집, 제 14권 제 1호, pp 171-178.
2. 임중석(1987), 말뚝의 부주면 마찰력에 관한 모형 실험 연구, 박사학위 논문, 서울대학교 대학원, pp 4-15.
3. Endo, M., Minou, A., Kawasaki, T. and Shibata, T. (1969), “Negative skin friction acting on a steel pipe pile in clay”, Proceeding of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pp 85-92.
4. Bjerrum, L., Johannessen, I. J., and Eide, O. (1969), “Reduction of Negative friction on steel piles to rock”, Proceeding of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pp 27-34.
5. Walker, L. K. and Darvall, P. le P. (1973), “Downdrag on coated and uncoated piles”, Proceeding of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pp 257-262.
6. Bozozuk, M. (1981), “Bearing capacity of pile preloaded by downdrag”, Proceeding of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pp 631-636.
6. Toru Shibata, Hideo Sekiguchi, and Hiroshi Yukiitomo (1982), “Model Test and analysis of negative friction acting on piles”, Soil and Foundation, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 22, NO.2, pp 29-39.
7. Indraratna, B., Balasubramaniam, A. S., Phamvan, P. and Wong, Y. K. (1992), “Development of negative skin friction on driven piles in soft Bangkok clay”, Canadian Geotechnical Journal. Vol.29, pp 393-404.
8. Burland, J. B and Stakes, W. (1994), “Review of measured negative pile friction in terms of effective stress”, Proceeding of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pp 493-496.