

모형시험을 통한 무리말뚝 내 단독말뚝의 위치별 부주면마찰력에 관한 연구

A Study on the Negative Skin Friction Depending upon the Locations of Piles in a Group Using Model Test

임종석¹⁾, Jong-Seok Lim, 박종희²⁾, Jong-Hee Park, 심종선²⁾, Jong-Sun Sim

¹⁾ 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 교수, Prof., Major in Civil Eng., Division of Construction Eng., Collage of Eng., Mokpo National Univ.

²⁾ 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 석사과정, Graduate Student, Major in Civil Eng., Division of Construction Eng., Collage of Eng., Mokpo National Univ.

SYNOPSIS : Generally most of pile foundations are constructed with group pile rather than single pile. The study on efficiency and bearing capacity which are major elements for rational design of this group pile has been actively progressed, whereas there are truly only a few studies of negative skin friction working on group pile due to the consolidation of ground.

The purpose of this study is to determine, among the elements of negative skin friction applied to pile, the occurrence modality of negative skin friction at center, side, and corner of 3×3 group pile using model test and, based on those observations, to propose the effective design direction of group pile.

Keywords : negative skin friction, consolidation, group pile, soft clay soil, model test, model pile

1. 서론

최근 우량지반의 고갈로 인한 연약지반 및 불량지반의 개발이 빈번해지고 있는 현 추세에서, 지반의 압밀로 인해 발생하는 부주면마찰력(Negative Skin Friction)은 연약지반에서 말뚝주변의 지반이 말뚝자체의 침하량보다 상대적으로 많은 변위가 발생되어 말뚝에 하향력을 발생시킨다. 이 하향력은 말뚝에 수직응력과 침하량을 증가시켜 말뚝의 지지력을 감소시키거나 구조적 파괴를 발생시키는 등 구조물의 안정성을 저해한다. 연약지반상에 말뚝기초의 사용이 급증함에 따라 피해사례가 발생하여 원인을 규명한 결과 부주면마찰력에 의한 것으로 확인됨에 따라 부주면마찰력에 대한 관심이 점차 고조되는 추세이다.

일반적으로 말뚝기초의 시공은 단독말뚝으로 시공하는 것보다 무리말뚝으로 시공하는 경우가 대부분인데, 이러한 무리말뚝의 합리적인 설계를 위한 주요요소인 효율, 지지력의 연구는 활발히 진행되고 있는 반면, 무리말뚝에 작용하는 부주면마찰력에 대한 연구는 미흡한 것이 사실이다. 연약지반에서 부주면마찰력의 메카니즘을 정확히 규명하지 못함에도 불구하고 말뚝의 부주면마찰력의 영향으로 지반침하에 대한 피해가 아직까지 크게 노출되지 않은 것은 설계시 안전율이 크고 위치별 말뚝에 발생하는 부주면마찰력의 크기를 과다하게 반영하고 있기 때문이다.

부주면마찰력의 크기는 현장시험을 통하여 측정하는 경우가 가장 정확하나 막대한 비용과 측정기간이 장기간 필요하므로 일반적으로 경험식을 이용하고 있다. 이러한 여건상 현장시험의 전단계로 실내모형시험에 대한 필요성은 점점 커지고 있다.

Liu et al.(1985)은 비점성지반에서 무리말뚝에 대한 광범위한 재하시험 결과를 토대로 무리말뚝 내에서 말뚝의 위치에 따라 서로 다른 평균주면마찰력을 나타낸다고 제안하였다. 이와 같은 맥락으로 무리

말뚝에서 발생하는 부주면마찰력 또한 말뚝의 위치에 따라 서로 다른 값을 나타낼 것으로 예상된다.

이와 같은 배경으로 본 연구에서는 무리말뚝의 위치에 따른 부주면마찰력의 양상을 확인하고자 3×3 무리말뚝을 이용한 모형압밀시험을 말뚝간 간격을 달리하여 총 5회 실시하였고 이를 통하여 중앙, 측면, 모퉁이말뚝에서 부주면마찰력의 대·소를 확인하였다.

2. 문헌연구

말뚝에 작용하는 부주면마찰력의 크기와 이를 발현하기 위한 말뚝과 지반과의 상대적인 침하량 등의 국외의 연구가 Johanneson and Bjerrum(1965), Endo et al.(1969), Kuwabara and Poulos(1989) 등에 의해 계측기를 부착한 말뚝을 이용한 현장시험을 중심으로 진행되어 왔다. 그리고 국내의 경우 임종석(1987)을 시작으로 이장오(1990), 정상섭(1993) 등이 연구를 진행하였으며 1998년 대한주택공사 주택연구소에서 무리말뚝에 대한 부주면마찰력 모형시험을 실시한 바 있다.

Liu et al.(1985)은 비점성지반에서 현장친공말뚝으로 이루어진 무리말뚝에 대한 광범위한 재하시험 결과를 토대로 그림 1과 같이 무리말뚝 내에서 말뚝의 위치에 따라 서로 다른 평균주면마찰력을 나타낸다고 제안하였다.

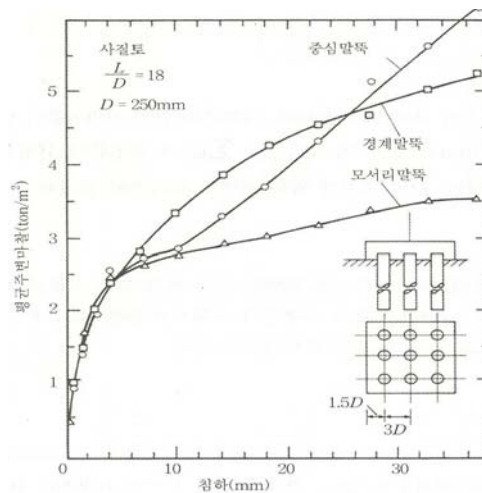


그림 1. 말뚝의 위치에 따른 평균주면마찰력 (Liu et al.(1985))

이 점에 착안하여 무리말뚝에 작용하는 부주면마찰력 또한 평균주면마찰력과 같이 서로 다른 값을 나타낼 것으로 예상하였고, 이러한 의문점을 확인하고자 본 실내모형시험을 설계하였다.

그리고 대한주택공사(1998)에서 실시한 부주면마찰력 모형시험은 무리말뚝내에서 시간의 흐름에 따른 각 말뚝별 부주면마찰력을 측정하는 본 연구와 달리 말뚝의 정해진 심도에 작용하는 부주면마찰력을 측정한다는 것에서 차이가 있다. 그러나 무리말뚝의 부주면마찰력을 측정한다는 것과 모형시험의 방법도 유사하므로 본 연구를 수행하는데 필요한 기반지식을 얻기 위하여 개략적으로 문헌연구 하였다.

주택공사에서 실시한 모형시험은 말뚝의 타입 본 수가 25개 이상이면 군말뚝효과가 저감한다는 기존의 연구를 토대로 2×2 무리말뚝, 3×3 무리말뚝, 4×4 무리말뚝을 대상으로 실시되었다. 그리고 말뚝의 간격 또한 5D 이상 떨어져 배치되면 부주면마찰력 저감율이 급격히 떨어진다는 기존의 연구 결과를 바탕으로 2.5D, 4D, 5D의 형태로 구분하여 실시하였다.

시험장치는 크게 토조, 모형말뚝, 재하판, 하중재하 장치, Load cell로 구성되었으며, 계측기로는 간극수압계, 토압계, Push-pull계이저를 사용하였다. 그리고 지반특성을 알아보기 위하여 입도분포, 액성한계, 소성한계 등 기본 물성시험과 압밀계수를 측정하기 위한 압밀시험을 실시하였다. 시험지반의 성형은 #40번제로 체가름 한 후에 교반기로 교반시킨 후 투기하여 시험을 진행하였다. 그 결과 중앙말뚝, 측면말뚝, 모퉁이말뚝 순으로 부주면마찰력의 크기가 크게 나타났다.

3. 실내모형시험

3.1 시험지반조성 및 흙의 물리적 특성

시험에 사용한 연약지반은 지리적으로 가깝고 연약지반이 넓게 분포하는 목포지역에서 채취하였으며, 이것을 #40번체로 걸러서 통과분만을 사용하였다. 시험지반은 흙을 물과 반죽하여 채워 넣는 방식으로 조성하였으며, 함수비가 지나치게 커져 지반의 침하량 또한 커지는 것을 우려하여 경험적으로 적합하다고 판단된 55~60%의 함수비로 지반을 조성하였다.

그리고 사용된 흙의 물리적 특성을 파악하기 위하여 비중, 액성한계, 소성한계 시험을 실시하였고, 그 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 시료의 물리적 특성

G_s	$LL(\%)$	$PL(\%)$	PI	#200 통과율(%)	통일분류법
2.67	38.0	29.5	8.5	97	CL-ML

3.2 시험장비

실내모형시험을 실시하기 위하여 토조와 모형말뚝을 각각 제작하였다. 토조의 크기는 가로 80cm, 세로 80cm, 높이 100cm로 제작하였으며, 성형지반의 내부상태를 육안으로 확인하기 위하여 토조의 정면과 뒷면에 아크릴을 설치하였다. 압밀시 발생하는 간극수압의 배수는 상향배수만을 채택하였으므로 별도의 배수구는 마련하지 않았으며, 상향으로 배수되는 간극수는 마른 형질이나 수건 등을 이용하여 흡수시켰다.

계측용 모형말뚝은 그림 2와 같이 제작하였다. 말뚝의 직경은 6cm, 길이 70cm, 두께 0.5cm이며, 부주면마찰력 측정용 토압계를 부착하기 위하여 말뚝의 선단부로부터 상부 10cm 위치를 절단하여 말뚝두부와 분리하였으며, 절단면에 너비 5cm, 높이 1cm의 홈을 파서 토압계의 부착을 용이하게 하였다.

그리고 말뚝의 선단은 60°의 각도로 다듬어서 제작하였으며, 모형말뚝의 재질은 PVC를 이용하는 한편 현장시험에 사용되는 말뚝의 거칠기를 재현하기 위하여 PVC말뚝에 사포를 이용하여 문질러서 거칠기를 준 뒤 시험을 실시하였다.

모형말뚝에 작용하는 하향력, 모형말뚝의 변위, 지반의 침하량을 측정하기 위하여 토압계, 침하량측정기를 준비하였다. 토압계는 각각의 말뚝에 1개씩 부착하였고, 선단부에서 상부 10cm 높이에 부착하였다. 침하량측정기는 토조의 전면부와 후면부에 각각 1개씩, 그리고 모형말뚝의 압축력을 확인하기 위하여 중앙말뚝, 측면말뚝, 모퉁이말뚝 중 각각의 대표말뚝(0번말뚝, 4번말뚝, 7번말뚝)을 정하여 1개씩, 총 5개의 침하량측정기를 부착하였다.

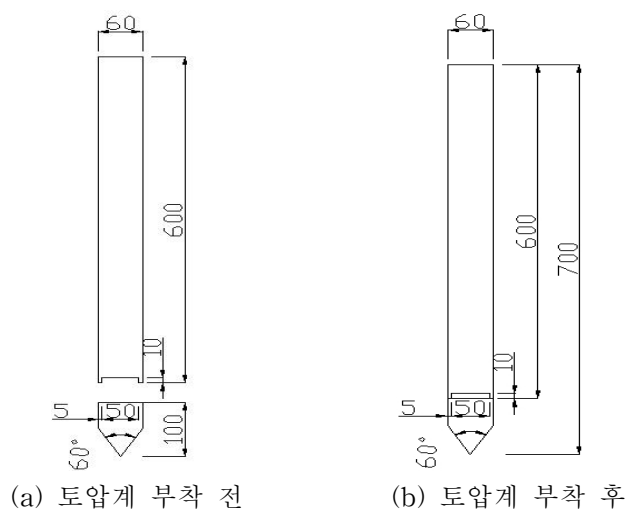


그림 2. 계측용 모형말뚝

3.3 시험방법

본 시험을 위한 시료는 연약지반이 넓게 분포되어 있고, 지리적으로 가까운 목포지역에서 채취 하였다. 채취된 시료는 채취 · 운반과정에서 교란된 상태이므로 실내시험시 균등성 확보와 원지반의 강도를 재현하기 위하여 교반 후 토조에 투기하였다. 시료를 투기한 후, 시료의 침강과 자중압밀 단계를 거쳐 시료가 어느 정도 안정화된 시점까지 방치 한 후 시험을 실시하였다.

모형말뚝의 길이가 70cm이고 모래를 이용하여 하중을 재하하기 때문에 토조 바닥에서 55cm높이까지만 연약지반을 조성하였으며, 이때 시험지반의 함수비는 위에서 언급한 바와 같이 55~60%의 범위로 조성하였다.

연약지반 조성을 마친 후 위 그림 2와 같이 계측기가 부착된 모형말뚝을 토조의 바닥까지 타입 하였다. 말뚝을 타입할 때, 고무망치를 이용하여 토압계 및 여러 계측기에 가해지는 충격을 최소화 하였으며, 수평계를 이용하여 말뚝의 수평을 맞춰가며 타입하였다. 말뚝중심간의 간격은 직경의 5배이하에서는 부주면마찰력 감소현상이 있음을 제시한 정상섬(1993)의 연구결과를 토대로 5D이하의 간격(2.5D 3회, 4D 2회)로 유지하여 말뚝을 타입하였다.

모형말뚝의 타입순서는 대한주택공사에서 실시한 모형시험에 착안하여 그림 3과 같이 타입하였다.

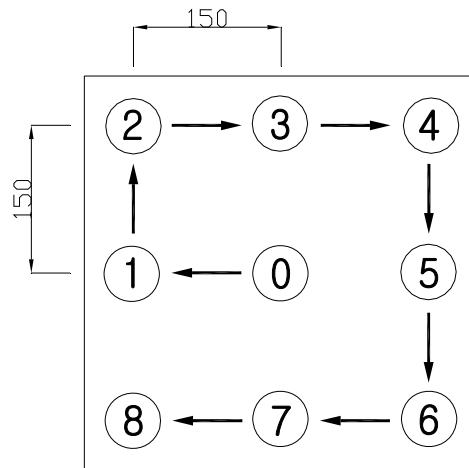


그림 3. 모형말뚝의 타입순서 및 각각의 번호

무리말뚝의 각 명칭은 그림 3에서 0번을 중앙(center)말뚝으로 1,3,5,7번을 측면(side)말뚝으로 2,4,6,8번을 모퉁이(corner)말뚝으로 각각 명칭하였다.

모형말뚝의 타입을 마친 후 하중재하수단으로 연약지반 위 13cm정도 높이까지 모래를 채워서 압밀을 유도하였다. 압밀이 진행되는 과정에서 발생하는 간극수압은 상향배수만을 채택하였으므로 모래를 통하여 배출된 연약지반의 간극수압은 마른형질을 이용하여 제거하였다. 그리고 시험 중에 발생하는 지반의 침하량을 측정하기 위하여 토조의 전면부와 후면부에 침하량측정기를 설치하였다.

위의 과정을 거쳐 모든 시험 준비를 마친 후 데이터로거를 이용하여 4시간 간격으로 약 11일간 데이터를 수집하였다. 데이터의수집은 데이터로거를 이용하였다.



그림 4. 모형시험의 입면도

4. 시험결과 및 분석

4.1 말뚝간 간격 2.5D

무리말뚝에 작용하는 위치별 부주면마찰력을 확인하기 위하여 2.5D간격으로 모형시험을 3회 실시하였고 이를 분석하였다. 분석방법은 매 시험마다 총부주면마찰력곡선을 도시하여 각각의 부주면마찰력을 확인하였으며, 다음으로 중앙, 측면, 모퉁이말뚝 별로 따로 자료를 나누고 이에 대한 평균선을 도출·분석함으로써 서로의 대·소를 확인하였다.

그리고 3회에 걸쳐 실시된 모형시험결과를 모두 통합하여 중앙, 측면, 모퉁이말뚝의 평균선을 도출·분석함으로써 말뚝간의 간격 2.5D에서의 최종적인 결과를 도출하다.

그림 5는 무리말뚝의 간격 2.5D로 실시한 3번의 모형시험결과를 취합한 그래프이다. 1차시험의 7번, 8번말뚝, 2차시험의 1번, 2번, 7번, 8번말뚝, 3차시험의 1번 2번, 6번, 7번말뚝은 여타 말뚝에 비하여 지나치게 큰 값을 보이거나 작은 값을 나타내는 관계로 분석에서 제외하였다.

3회에 걸쳐 실시한 모형시험결과로 중앙말뚝은 3개의 샘플을 측면말뚝 7개, 모퉁이말뚝 7개의 샘플을 얻을 수 있었고, 이를 각 말뚝별로 나누어 각각의 그래프 및 평균선 그래프를 도시하였다. 그리고 평균선 그래프를 서로 비교하여 각각의 대소를 확인하였다.

시험 진행과정에서 압밀로 인한 지반의 침하량은 3번의 모형시험 모두 큰 값을 나타내지 않았다. 1차 시험에서 0.52cm, 2차시험에서 0.88cm, 3차시험에서 1.34cm의 침하량을 각각 나타냈으며, 평균 0.91cm의 침하량을 나타내었다.

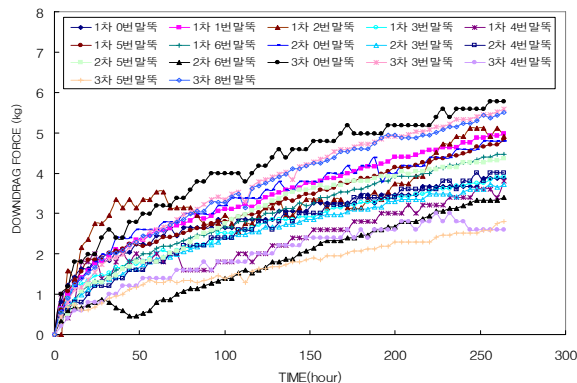


그림 5. 각 말뚝의 부주면 마찰력(2.5D 통합)

그림 5를 보면 3차시험 값들이 비교적 큰 부주면마찰력값을 나타내었다. 이는 지반조성 과정에서 1차, 2차시험에 비하여 3차시험 지반의 함수비가 좀 더 컸던 것으로 판단된다.

3차시험의 0번말뚝이 5.78kg으로 가장 큰 값을 나타내었고 3차 3번말뚝, 3차 8번말뚝이 5.58kg, 5.50kg으로 큰 값을 나타내었다. 나머지말뚝들은 4.98kg~2.60kg의 부주면마찰력값을 나타내었다. 부주면마찰력은 대부분의 말뚝에서 시험시작 후 16시간까지 급격히 상승하는 양상을 보였으며, 그 이후에는 점차 안정되면서 완만히 상승하는 양상의 그래프를 보였다.

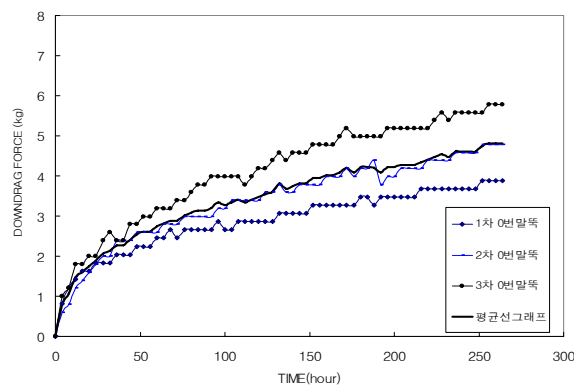
다음으로 무리말뚝의 중앙, 측면, 모퉁이말뚝간의 부주면마찰력의 크기를 비교하기 위하여 각각에 해당하는 말뚝을 따로 모아 평균선 그래프를 그림 6과 같이 도시하였다.

중앙말뚝은 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 측정시작 16시간동안 1차시험 1.63kg, 2차시험 1.40kg, 3차시험 1.80kg까지 급격한 증가를 보인 이후에 그래프의 기울기가 완만해지면서 꾸준히 상승하는 양상을 보였고, 측정시작 11일 후에는 1차시험 3.88kg, 2차시험 4.78kg, 3차시험 5.78kg의 부주면마찰력을 나타내었다. 그리고 이를 평균한 그래프를 보면 16시간동안 1.61kg까지 급격한 증가 양상을 보인 후 시험시작 11일 후에는 4.81kg의 부주면마찰력을 나타내었다.

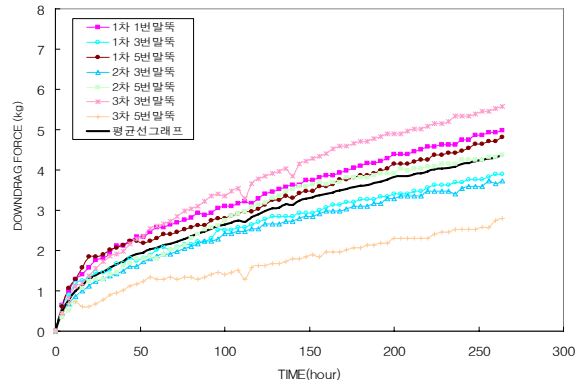
측면말뚝만을 모아 놓은 그림 6(b)에서는 3차시험 3번말뚝이 5.58kg으로 가장 큰 부주면마찰력값을 나타내었고, 다음으로 1차시험 1번말뚝, 1차시험 5번 말뚝이 4.98kg, 4.81kg으로 큰 값을 나타내었으며, 나머지말뚝들은 4.38~2.8kg의 부주면마찰력값을 나타내었다. 그리고 이를 평균한 그래프를 살펴보면 시험시작 16시간동안 1.30kg까지 급격한 증가 양상을 보인 후 시험시작 11일 후에는 4.38kg의 부주면마찰력을 나타내었다.

모퉁이말뚝만을 모아놓은 그림 6(c)를 보면 3차시험 8번말뚝이 5.50kg으로 가장 큰 부주면마찰력값을 나타내었고, 다음으로 1차시험 2번말뚝, 1차시험 6번 말뚝이 4.91kg, 4.46kg으로 큰 값을 나타내었으며, 나머지말뚝들은 4.00~2.60kg의 부주면마찰력값을 나타내었다. 모퉁이말뚝의 부주면마찰력 그래프의 양상은 급격한 증가 후 완만히 상승하는 양상을 보이는 중앙, 측면말뚝과 달리 상승과 하강을 반복하면서 증가하는 양상을 나타내었다. 그리고 이를 평균한 그래프를 살펴보면 시험시작 16시간동안 1.11kg까지 증가한 후 시험시작 11일 후에는 4.14kg의 부주면마찰력을 나타내었다.

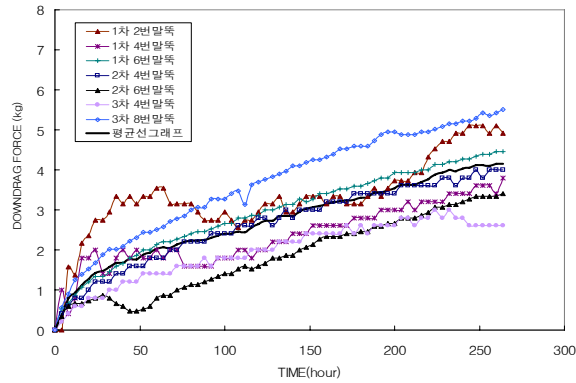
마지막으로 각 말뚝의 평균선 그래프만을 모아 놓은 그림 6(d)의 그래프를 보면 중앙말뚝은 11일이 경과한 시간까지 4.81kg의 하향력을 나타내는 반면 측면말뚝은 같은 시간동안 평균 4.38kg, 모퉁이말뚝은 평균 4.15kg의 부주면마찰력을 나타내었다. 시험시작과 함께 중앙, 측면, 모퉁이말뚝 모두 급격히 상승하는 양상의 그래프를 보였으며, 그 이후에는 그래프의 경사가 완만해지면서 꾸준히 상승하는 양상을 나타내었다.



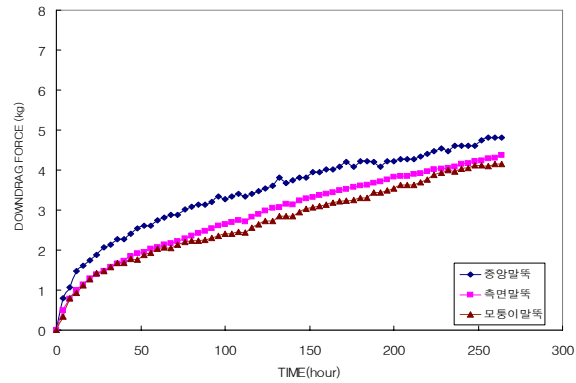
(a) 중앙말뚝



(b) 측면말뚝



(c) 모퉁이말뚝



(d) 평균선그래프

그림 6. 각 말뚝의 평균선 그래프 도출(2.5D 통합)

중앙, 측면, 모퉁이말뚝의 부주면마찰력 크기는 중앙말뚝, 측면말뚝, 모퉁이말뚝의 순서로 큰 값을 나타내었지만, 그 차이는 중앙말뚝과 모퉁이말뚝 사이에 0.7kg의 매우 작은 값이었다.

4.2 말뚝간 간격 4D

무리말뚝 내 단독말뚝에 작용하는 위치별 부주면마찰력을 확인하기 위하여 4D(24cm)간격으로 모형시험을 2회 실시하였고 이를 분석하였다. 분석방법은 4.1과 동일하게 매 시험마다 총부주면마찰력곡선을 도출하여 각각의 부주면마찰력을 확인하였으며, 다음으로 중앙, 측면, 모퉁이말뚝 별로 따로 자료를 나누고 이에 대한 평균선을 도출·분석함으로써 서로의 대·소를 확인하였다.

그리고 2회에 걸쳐 실시된 모형시험결과를 모두 통합하여 중앙, 측면, 모퉁이말뚝의 평균선을 도출·분석함으로써 말뚝간의 간격 4D에서의 최종적인 결과를 도출하였다.

그림 7은 무리말뚝의 간격 4D로 실시한 2번의 모형시험결과를 취합한 그래프이다. 1차시험의 1번, 2번, 6번, 7번, 8번, 2차시험의 1번 2번, 6번말뚝은 4.1과 같이 여타 말뚝에 비하여 지나치게 큰 값을 보이거나 작은 값을 나타내는 관계로 분석에서 제외하였다.

2회에 걸쳐 실시한 모형시험결과로 중앙말뚝은 2개의 샘플을 측면말뚝 5개, 모퉁이말뚝 3개의 샘플을 얻을 수 있었고 이를 앞에서 분석했던 바와 같이 각 말뚝별로 나누어 각각의 그래프 및 평균선그래프를 도시하였다. 그리고 평균선그래프를 서로 비교하여 각각의 대소를 확인하였다.

시험 진행과정에서 압밀로 인한 지반의 침하량은 2번의 모형시험 모두 큰 값을 나타내지 않았다. 1차 시험에서 1.29cm, 2차시험에서 1.15cm의 침하량을 각각 나타냈으며, 평균 1.22cm의 침하량을 나타내었다.

그림 7을 보면 1차시험 값들이 비교적 큰 부주면마찰력값을 나타내었다. 이는 지반조성 과정에서 2차 시험에 비하여 1차시험 지반의 함수비가 좀 더 컸던 것으로 판단된다.

1차시험의 0번말뚝이 7.27kg으로 가장 큰 값을 나타내었고, 다음으로 2차 3번말뚝, 1차 3번말뚝이 5.77kg, 5.34kg으로 큰 값을 나타내었다. 나머지말뚝들은 4.81kg~3.75kg의 부주면마찰력값을 나타내었다. 부주면마찰력은 대부분의 말뚝에서 시험시작 후 16시간까지 급격히 상승하는 양상을 보였으며, 그 이후에는 점차 안정되면서 완만히 상승하는 양상의 그래프를 보였다.

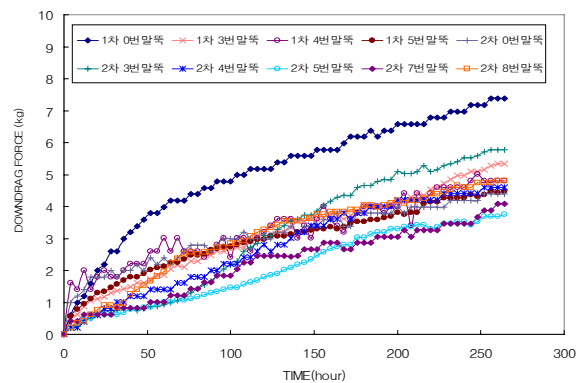


그림 7. 각 말뚝의 부주면 마찰력(4D 통합)

다음으로 무리말뚝의 중앙, 측면, 모퉁이말뚝간의 부주면마찰력의 크기를 비교하기 위하여 각각에 해당하는 말뚝을 따로 모아 평균선 그래프를 그림 8과 같이 도시하였다.

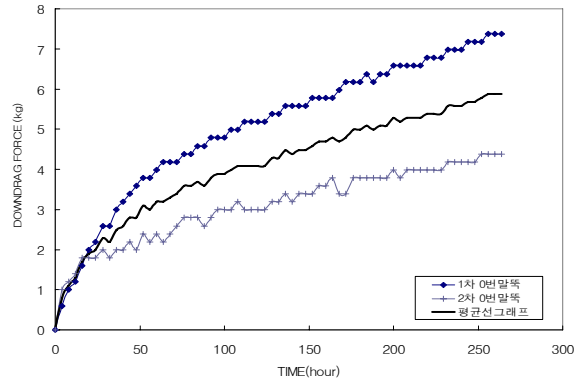
중앙말뚝은 그림 8(a)에서 보는 바와 같이 측정시작 16시간동안 1차시험 1.59kg, 2차시험 1.79kg까지 급격한 증가를 보인 이후에 그래프의 기울기가 완만해 지면서 꾸준히 상승하는 양상을 보였고, 측정시작 11일 후에는 1차시험 7.27kg, 2차시험 4.39kg의 부주면마찰력을 나타내었다. 그리고 이를 평균한 그래프를 보면 16시간동안 1.69kg까지 급격한 증가 양상을 보인 후 시험시작 11일 후에는 5.88kg의 부주면마찰력을 나타내었다.

측면말뚝만을 모아 놓은 그림 8(b)에서는 2차시험 3번말뚝이 5.77kg으로 가장 큰 부주면마찰력값을 나타내었고, 다음으로 1차시험 3번말뚝, 1차시험 5번 말뚝이 5.34kg, 4.48kg으로 큰 값을 나타내었으며, 나머지말뚝들은 4.08kg~3.75kg의 부주면마찰력값을 나타내었다. 그리고 이를 평균한 그래프를 살펴보면 시험시작 16시간동안 0.83kg까지 급격한 증가 양상을 보인 후 시험시작 11일 후에는 4.72kg의 부주면마찰력을 나타내었다.

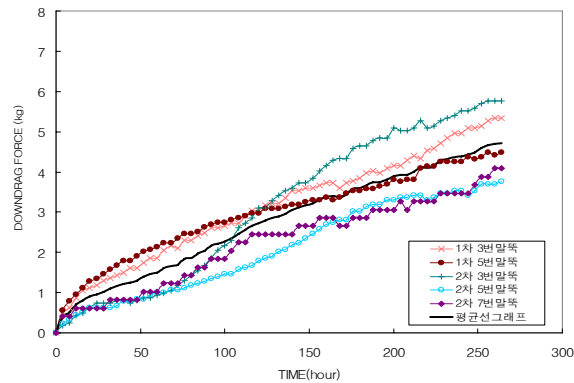
모퉁이말뚝만을 모아놓은 그림 8(c)를 보면 1차시험 4번말뚝과 2차시험 4번말뚝이 4.81kg으로 가장 큰 부주면마찰력값을 나타내었고, 다음으로 2차시험 8번말뚝이 4.60kg의 부주면마찰력값을 나타내었다. 모퉁이말뚝의 부주면마찰력 그래프의 양상은 급격한 증가 후 완만히 상승하는 양상을 보이는 중앙, 측면 말뚝과 달리 상승과 하강을 반복하면서 증가하는 양상을 나타내었다. 그리고 이를 평균한 그래프를 살

펴보면 시험시작 16시간동안 1.01kg까지 증가한 후 시험시작 11일 후에는 4.71kg의 부주면마찰력을 나타내었다.

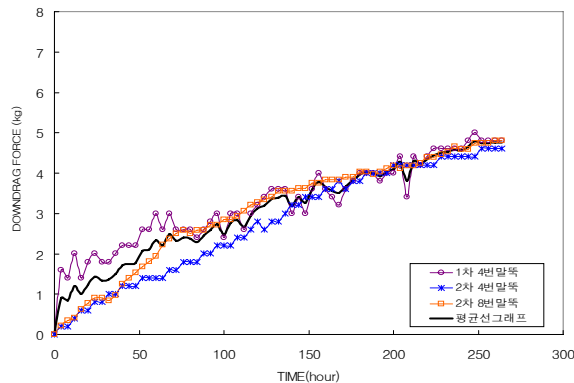
마지막으로 각 말뚝의 평균선 그래프만을 모아 놓은 그림 8(d)의 그래프를 보면 중앙말뚝은 11일이 경과한 시간까지 5.88kg의 하향력을 나타내는 반면 측면말뚝은 같은 시간동안 평균 4.72kg, 모퉁이말뚝은 평균 4.71kg의 부주면마찰력을 나타내었다. 시험시작과 함께 중앙, 측면, 모퉁이말뚝 모두 급격히 상승하는 양상의 그래프를 보였으며, 그 이후에는 그래프의 경사가 완만해지면서 꾸준히 상승하는 양상을 나타내었다.



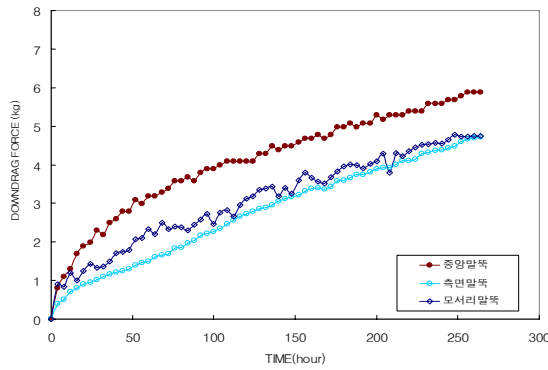
(a) 중앙말뚝



(b) 측면말뚝



(c) 모퉁이말뚝



(d) 평균선그래프

그림 8. 각 말뚝의 평균선 그래프 도출(4D 통합)

중양, 측면, 모퉁이말뚝간의 부주면마찰력 크기는 중양말뚝, 측면말뚝, 모퉁이말뚝의 순서로 큰 값을 나타내었다. 중양말뚝과 측면, 모퉁이말뚝간의 부주면마찰력값은 1.1kg정도의 차이를 보였고, 측면말뚝과 모퉁이말뚝의 부주면마찰력의 크기는 0.1kg으로 매우 미세한 차이를 보였다. 말뚝간 간격 4D를 통합한 평균선곡선에서 측면말뚝과 모퉁이말뚝간의 부주면마찰력이 0.1kg에 불과 하지만 측면말뚝이 더 큰 값을 나타낸다고 결정한 이유는 측면말뚝 평균선그래프의 기울기가 모퉁이말뚝 평균선그래프의 기울기 보다 더 급하여 시험을 조기에 종료하지 않고 좀 더 진행하였으면 측면말뚝이 더 큰 값을 나타낼 것으로 보이기 때문이다.

4.3 대한주택공사 보고서와 시험값의 비교

무리말뚝의 말뚝 내 위치별 부주면마찰력을 알아보기 위하여 모형시험을 실시한 사례는 1998년 주택공사에서 실시한 보고서를 제외하고는 전무한 상황이다. 주공보고서가 무리말뚝의 각단에 작용하는 부주면마찰력을 측정하는 반면 본 연구에서는 시간에 따른 말뚝 선단부에서의 부주면마찰력을 측정한다는 것에서 약간의 차이가 있지만, 본 연구로 얻은 부주면마찰력값의 신뢰도 및 타당성 여부를 판단하기 위하여 주공보고서의 내용과 비교·검토하였다.

주공보고서에서 말뚝간 간격 2.5D로 실시한 모형시험 결과값은 얻을 수 있었지만 말뚝간 간격 4D에서의 결과값은 식별이 불가능하였다. 이러한 이유로 본 절에서는 말뚝간 간격 2.5D에서 실시한 모형시험만을 비교하였으며 그 결과를 그림 9와 같이 도시하였다.

그림 9에서 주공 보고서의 부주면마찰력은 중양, 측면, 모퉁이말뚝 순서로 측정 후 약 5일이 경과한 시점에 2.67kg, 1.90kg, 1.52kg의 값을 나타내었고, 약 10일이 경과했을 때는 4.47kg, 3.61kg, 2.76kg의 값을 나타내었다. 그에 반해 본 연구를 통하여 얻은 평균선 그래프는 5일 경과 후 약 3.81kg, 3.07kg, 2.85kg의 값을 10일 후 약 4.74kg, 4.23kg, 4.11kg의 값을 보였다.

주공보고서에서 중양, 측면, 모퉁이 말뚝 순으로 큰 값을 나타내는 것과 같이 본 연구의 평균곡선도 마찬가지로 측면, 중양, 모퉁이 말뚝순으로 큰 값을 나타냈다. 그러나 10일이 경과후의 부주면마찰력의 차이를 보면 중양말뚝이 0.3kg, 측면말뚝 0.62kg를 비교적 유사한 값을 나타낸 반면, 모퉁이말뚝 1.35kg의 차이를 보였다. 중양말뚝과 측면말뚝의 비교적 유사한 수치에 반해 모서리말뚝은 약간 큰 격차를 보였다. 이는 주공에서 실시한 시험방법과 본 연구에서의 시험방법의 차이로 인한 격차라 보여진다.

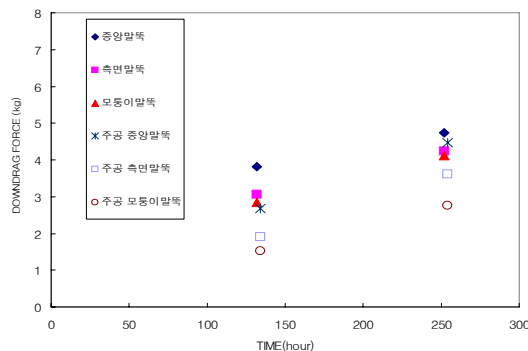


그림 9. 주택공사보고서와의 비교(2.5D)

5. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 무리말뚝에 작용하는 부주면마찰력의 위치별 크기를 알아보기 위하여 실내모형시험을 실시하였고, 이를 비교·분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 시험지반의 침하량은 시험 시작 11일이 경과 후 말뚝간 간격 2.5D에서 평균 0.91cm, 4D에서는 1.22cm로 매우 작은 값을 나타내었다. 이는 압밀을 유도하기 위해 연약지반 상부에 재하한 모래의 무게가 예상과는 달리 그리 크지 않았고, 시험을 11일간만 진행하였기에 압밀이 완전히 완료되지 않았기 때문이라 생각된다.
- 2) 대부분의 말뚝에서 부주면마찰력이 16시간까지 급격한 상승을 이루다가 그 이후 점점 안정세를 보이며 완만히 상승하는 양상의 그래프를 나타내었다. 이는 시험초기에 급격한 압밀이 이루어진 후 시간의 경과에 따라 압밀속도가 안정세를 보이기 때문이라 생각된다.
- 3) 말뚝간격 2.5D의 각 위치별 평균선을 구하여 부주면마찰력의 크기를 비교한 결과 시험 시작 후 중앙말뚝은 측면, 모퉁이말뚝에 비하여 큰 값을 보이며 증가하였고, 측면말뚝과 모퉁이말뚝은 40시간까지는 유사한 양상을 보였지만 그 이후에는 측면말뚝이 더 큰 값을 나타내면서 증가하였다.
- 4) 말뚝간격 4D의 각 위치별 평균선을 구하여 부주면마찰력의 크기를 비교한 결과 시험 시작 후 중앙말뚝은 측면, 모퉁이말뚝에 비하여 큰 값을 보이며 증가하였다. 그러나 측면말뚝과 모퉁이말뚝은 시험초기에는 모퉁이말뚝이 더 큰 값을 나타냈지만 시험 말미에는 측면말뚝이 더 큰 값을 나타냈다.
- 5) 시험말뚝의 위치별 부주면마찰력의 크기는 말뚝간 간격 2.5D와 4D 모두 중앙말뚝, 측면말뚝, 모퉁이말뚝 순으로 크게 나타났다.
- 6) 대한주택공사에서 실시한 모형시험과의 비교에서 부주면마찰력의 크기는 비슷하게 나타났으며, 중앙, 측면, 모퉁이말뚝의 부주면마찰력 대소 역시 같게 나타났다.

향후 무리말뚝의 배치간격을 다르게 하여 모형시험을 다시 실시함으로써, 부주면마찰력의 변화양상을 확인 할 예정이며, 역청재 및 확대선단부를 적용하여 시험을 진행함으로써 부주면마찰력의 감소효과에 대해서도 연구할 예정이다.

참고문헌

1. 대한주택공사 주택연구소(1998), “연약지반에서의 군말뚝효과를 고려한 말뚝의 설계 및 시공기법 연구” pp. 1-117
2. 이장오(1990), “토질 및 기초분과 : 강관말뚝에 작용하는 부마찰력 측정실험”, 대한토목학회, 학술발표회 개요집, pp. 385-388
3. 임중석(1987), “말뚝의 부주면마찰력에 관한 모형 실험 연구”, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 서울, pp. 1-81
4. 정상섭(1993), “토질 및 기초공학 : 단독말뚝과 군말뚝의 Downdrag”, 대한토목학회지, 제 13권 , 제 4호, pp. 259-268
5. Endo, M., Minou, A., Kawasaki, T. and Shibata, T.(1969), “Negative skin friction acting on a steel pipe pile in clay”, Proc 7th ICSMFE, Vol. 2, pp. 85-92
6. Johannessen, I. J. and Bjerrum, L.(1965), “Measurement of the compression of a steel pile to rock due to settlement of the surrounding clay”, Proc 6th ICSMFE, Vol. 2, pp. 261-264
7. Kuwabara, F. and Poulos, H. G.(1989), “Downdrag forces in Group of piles”, ASCE. Vol. 115, MO. 6, pp. 806-814
8. Liu, J. L., Yuan, Z. L., and Zhang, K. P.(1985), “Cap-Pile-Soil Interaction of Bored Pile Groups.” *Proceedings, Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol. 3, pp. 1433-1436