

모형시험을 통한 무리말뚝 내 말뚝의 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 말뚝자체나 선단지지력에 부담을 주어 구조물 전체가 침하하거나 부등침하를 일으켜 구조물의 안정성을 저해한다.

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.

Liu et al.(1985)은 비점성지반에서 현장천공말뚝으로 이루어진 무리말뚝에 대한 광범위한 재하시험 결과를 토대로 무리말뚝 내에서 말뚝의 위치에 따라 서로 다른 평균주면마찰력을 나타낸다고 제안하였다. 이와 같은 맥락으로 무리말뚝에서 발생하는 부주면마찰력 또한 말뚝의 위치에 따라 서로 다른 값을 나타낼 것으로 예상된다.

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

이와 같은 배경으로 본 연구에서는 부주면마찰력을 고려한 무리말뚝의 효율적 설계방향을 제시하고자 3×3 무리말뚝을 이용한 모형압밀시험을 실시하여 중앙, 측면, 모퉁이말뚝에서 부주면마찰력의 크기를 확

인하고, 이를 비교분석하였다.

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 현장실험을 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.

먼저 Liu et al.(1985)은 조립토에 설치된 58개의 무리말뚝과 23개의 단독말뚝에 대한 현장시험 결과를 보고한 바 있는데, 이 보고서에서 그림 1과 같이 무리말뚝 내 각각의 말뚝에 작용하는 평균주면마찰력은 서로 다른 값을 나타낸다고 제안하였다. 이와 같은 맥락으로 무리말뚝에 작용하는 부주면마찰력 또한 각각의 말뚝에서 서로 다른 값을 나타낼 것이라 판단되며, 이 점에 착안하여 본 연구를 진행하게 되었다.

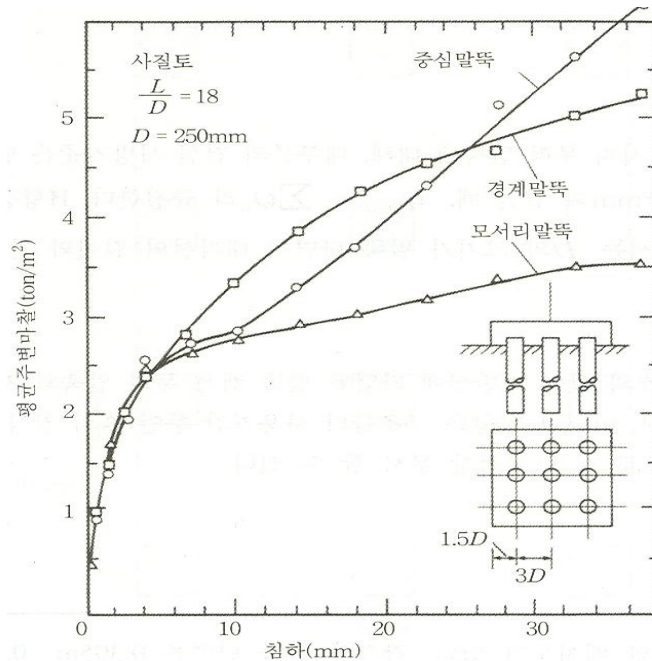


그림 1. 말뚝의 위치에 따른 평균주면마찰력 (Liu et al.(1985))

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

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-pull게이지를 사용하였다. 그리고 지반특성을 알아보기 위하여 입도분포, 액성한계, 소성한계 등 기본 물성시험과 압밀계수를 측정하기 위한 압밀시험을 실시하였다. 시험지반의 성형은

#40번째로 채가름 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 #40번째로 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	ML

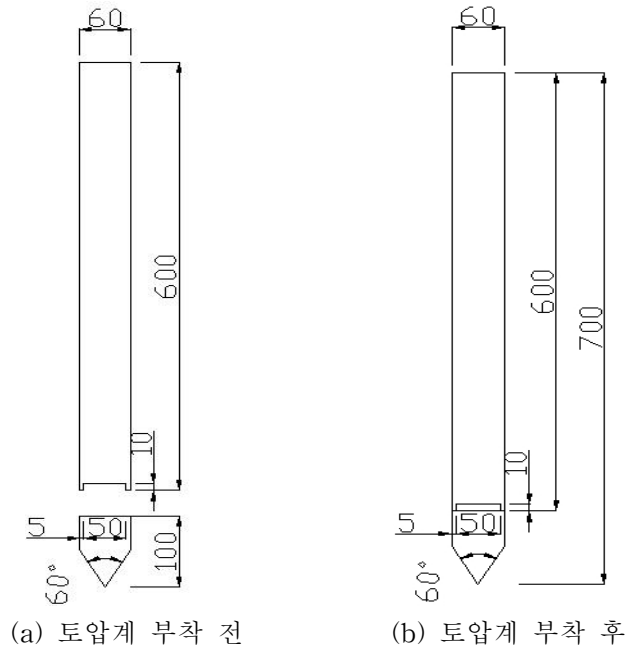
3.2 시험장비

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 형겅이나 수건 등을 이용하여 흡수시켰다.

계측용 모형말뚝은 그림 2와 같이 제작하였다. 말뚝의 직경은 6cm, 길이 70cm, 두께0.5cm이며, 부주면마찰력측정용 토압계를 부착하기 위하여 말뚝의 선단부로부터 상부 10cm 위치를 절단하여 말뚝두부와 분리하였으며, 절단면에 너비 5cm, 높이 1cm의 흙을 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, LVDT, 스트레인게이지, 온도계 등을 준비하였다. 토압계는 각각의 말뚝에 1개씩 부착하였고, 선단부에서 상부10cm 높이에 부착하였다. LVDT는 토조의 전면부와 후면부에 각각 1개씩 설치하였으며, 스트레인게이지는 중앙말뚝, 측면말뚝, 모퉁이말뚝 중 각각의 대표말뚝(0번말뚝, 4번말뚝, 7번말뚝)을 정하여, 3개씩 부착하였다. 그리고 스트레인게이지는 온도에 민감하게 반응하기 때문에 적정온도의 유지여부를 확인하기 위하여 온도계를 LVDT와 마찬가지로 토조의 전면부와 후면부에 각각 1개씩 설치하였다.



(a) 토압계 부착 전 (b) 토압계 부착 후
그림 2. 계측용 모형말뚝

3.3 시험계획

본 연구를 수행하기 위하여 연약지반이 넓게 분포하며 지리적으로 가까운 목포지역에서 시료를 채취하였고, 원지반강도의 회복을 위하여 소정의 기간 동안 교반시킨 후 토조에 투기하였다. 높이100cm의 토조에 55cm 높이까지 연약지반으로 채운 후 그림 2에서 설명한 바와 같이 계측기가 설치된 모형말뚝을 토조의 바닥까지 타입하였다. 이때 연약지반의 표면에는 스트레인게이지의 온도영향을 측정하기 위한 온도계를 설치하였다.

그리고 말뚝의 타입이 완료된 후 하중재하수단으로 연약지반 위 13cm정도 높이까지 모래를 채워서 압밀을 유도하였고, 압밀이 진행되는 과정에서 발생하는 간극수압은 상향배수만을 채택하였으므로 모래를 통하여 배출된 연약지반의 간극수압은 마른형짚을 이용하여 제거하였다.

말뚝의 타설과 모래를 이용하여 하중재하까지 마친 후에 조성지반의 침하량을 측정하기위한 LVDT를 설치하였다. 그리고 4시간간격으로 측정을 시작하여 결과 값들을 정리하였다.



그림 3. 모형시험의 입면도

3.4 모형말뚝 타입

무리말뚝에 작용하는 위치별 부주면마찰력을 확인하기 위하여 토조와 모형말뚝을 제작하였으며, 계측기를 각각의 모형말뚝에 설치하였다. 계측기가 설치된 모형말뚝을 조성된 지반에 타입하는 순서는 대한주택공사에서 실시한 모형시험에 착안하여 그림 4와 같이 타입하였다. 말뚝을 타입할 때, 고무망치를 이용하여 토압계 및 여러 계측기에 가해지는 충격을 최소화 하였으며, 수평계를 이용하여 말뚝의 수평을 맞춰가며 타입하였다. 그리고 말뚝중심간의 간격은 직경의 5배이하에서는 부주면마찰력 감소현상이 있음을 제시한 정상섭(1993)의 연구결과를 토대로 2.5D(15cm)로 유지하여 말뚝을 타입하였다.

무리말뚝의 각 명칭은 그림 4에서 0번을 중앙(center)말뚝으로 1,3,5,7번을 측면(side)말뚝으로 2,4,6,8번을 모퉁이(corner)말뚝으로 각각 명칭하였고, 스트레인게이지는 0번, 4번, 7번말뚝에 각각 3개씩 부착하여 말뚝두부변위를 측정하였다.

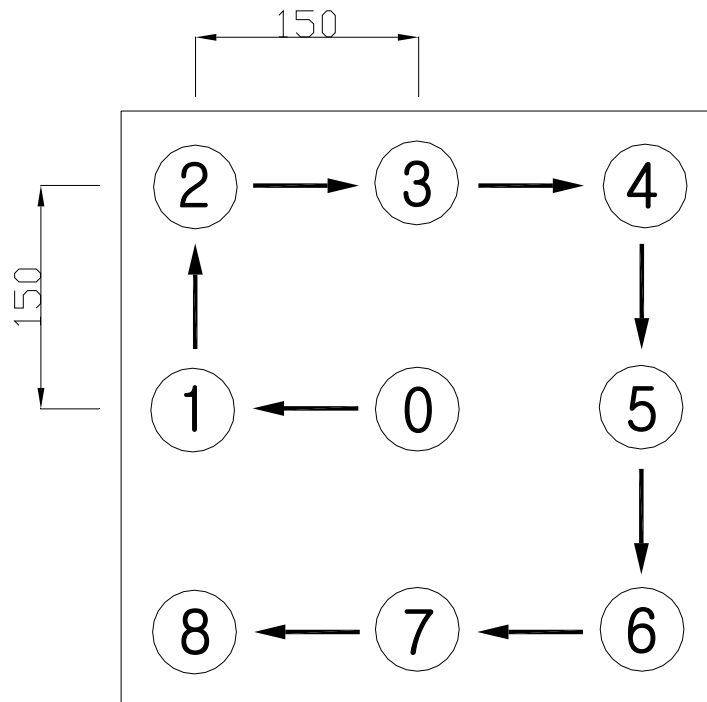


그림 4. 모형말뚝의 타입순서 및 간격

4. 시험결과 및 분석

부주면마찰력의 크기를 측정하기 위하여 토압계를 설치한 3×3 무리말뚝에서의 부주면마찰력을 4시간 단위로 측정하였으며, 이를 그림 5와 같이 도시하였다.

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 부주면마찰력은 대부분의 말뚝에서 시험시작 후 16시간까지 급격히 상승하는 양상을 보였으며, 그 이후에는 점차 안정되면서 완만히 상승하는 양상의 그래프를 보였다.

부주면마찰력의 크기를 비교해보면 7번말뚝과 8번말뚝이 7.78kg, 6.45kg으로 가장 큰 부주면마찰력 값을 나타내었고, 1번, 2번, 5번, 6번, 3번, 4번, 0번말뚝 순서로 3.9kg~4.98kg 범위의 비슷한 값을 보였다.

이때 실험지반의 초기높이는 55cm에서 10일이 경과 된 후에는 0.52cm가 침하된 54.48cm로 침하발생량이 상당히 적은 것을 알 수 있다.

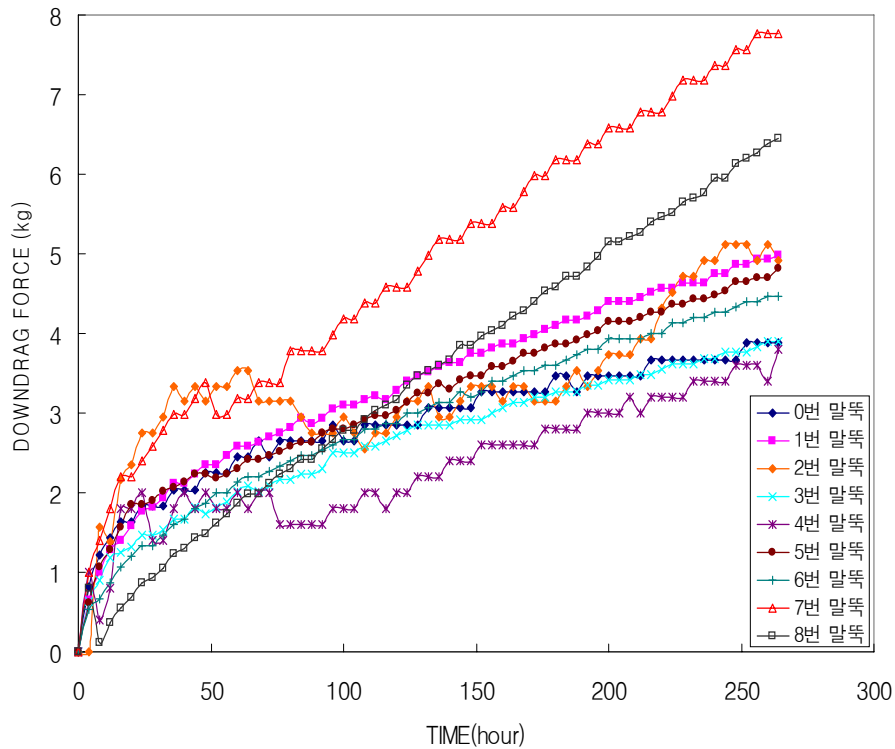


그림 5. 시간에 따른 무리말뚝의 부주면마찰력

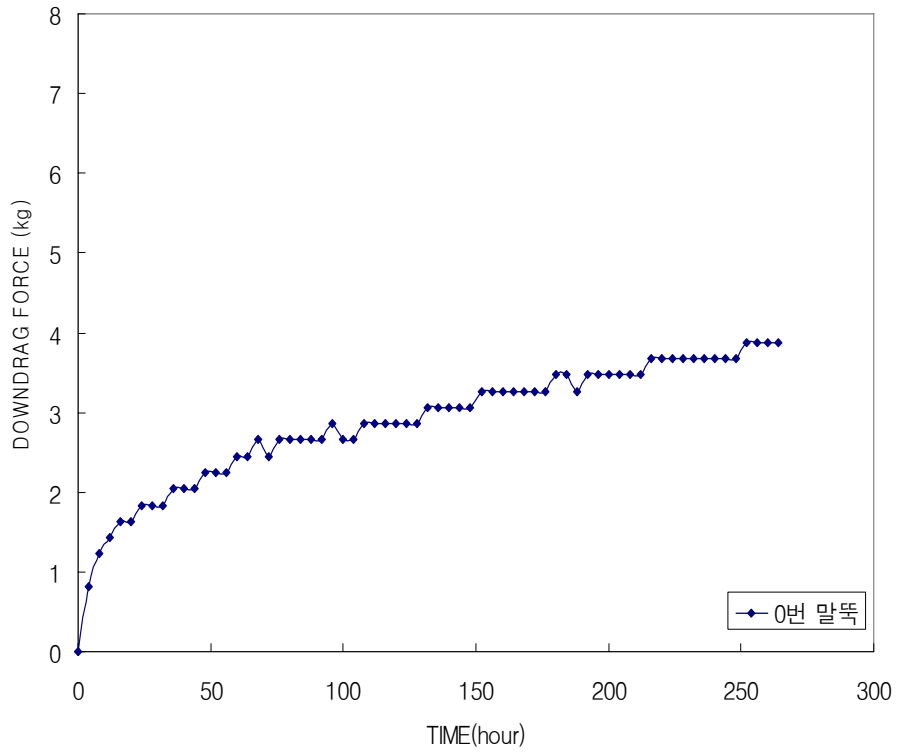
다음으로 무리말뚝의 중앙, 측면, 모퉁이말뚝간의 부주면마찰력의 크기를 비교하기 위하여 각각에 해당하는 말뚝을 따로 모아 평균선 그래프를 그림 6과 같이 도시하였다.

중앙말뚝은 그림 6-(a)에서 보는 바와 같이 측정시작 16시간동안 1.63kg까지 급격한 증가를 보인 이후에 기울기가 0에 가까운 곡선으로 계속 증가하다가 측정시작 11일 후에는 3.8kg의 부주면마찰력을 나타내었다.

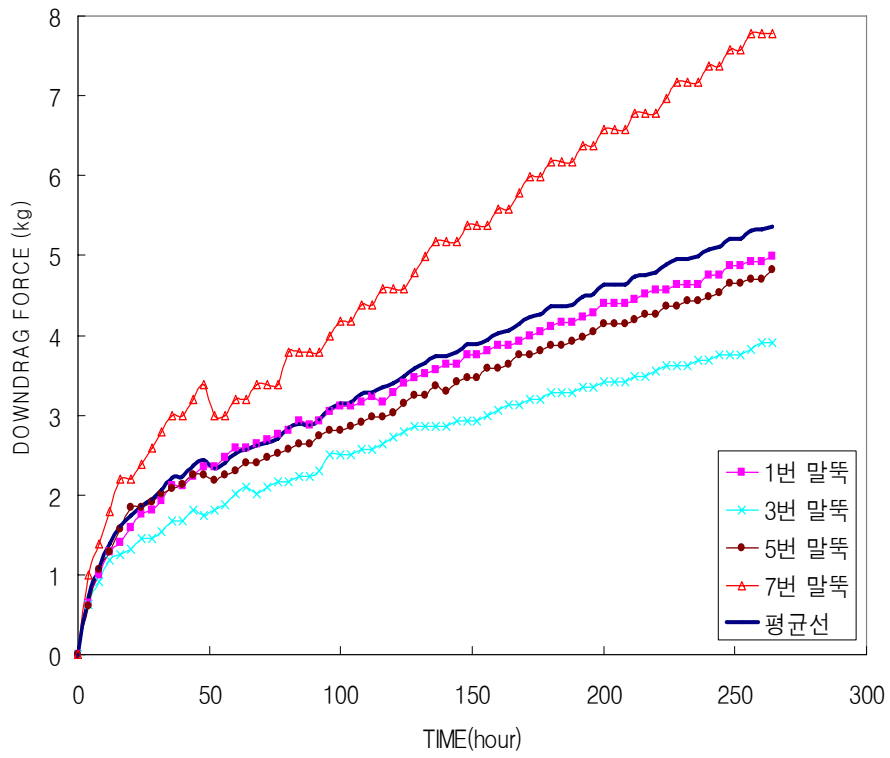
측면말뚝만을 모아 놓은 그림 6-(b)에서 1번말뚝은 4.98kg, 3번말뚝 3.90kg, 5번말뚝 4.82kg, 7번말뚝 7.77kg의 부주면마찰력 값을 나타내었다. 모든 말뚝에서 급격한 상승 후에 완만히 상승하는 양상을 보였으며, 중앙말뚝 보다 급한 기울기를 나타내며 상승하였다.

모퉁이말뚝만을 모아놓은 그림 6-(c)를 보면 2번말뚝은 4.91kg, 4번말뚝 3.80kg, 6번말뚝 4.46kg, 8번말뚝 6.45kg의 부주면마찰력 값을 나타내었다. 6번과 8번말뚝은 중앙, 측면말뚝과 같이 꾸준히 상승하는 양상을 보인 반면에 2번과 8번말뚝은 75시간까지 상승과 하강을 반복 한 뒤 다시 상승하는 양상의 그래프를 보였다. 각 그래프의 기울기는 중앙말뚝과 측면말뚝의 중간정도의 기울기였다.

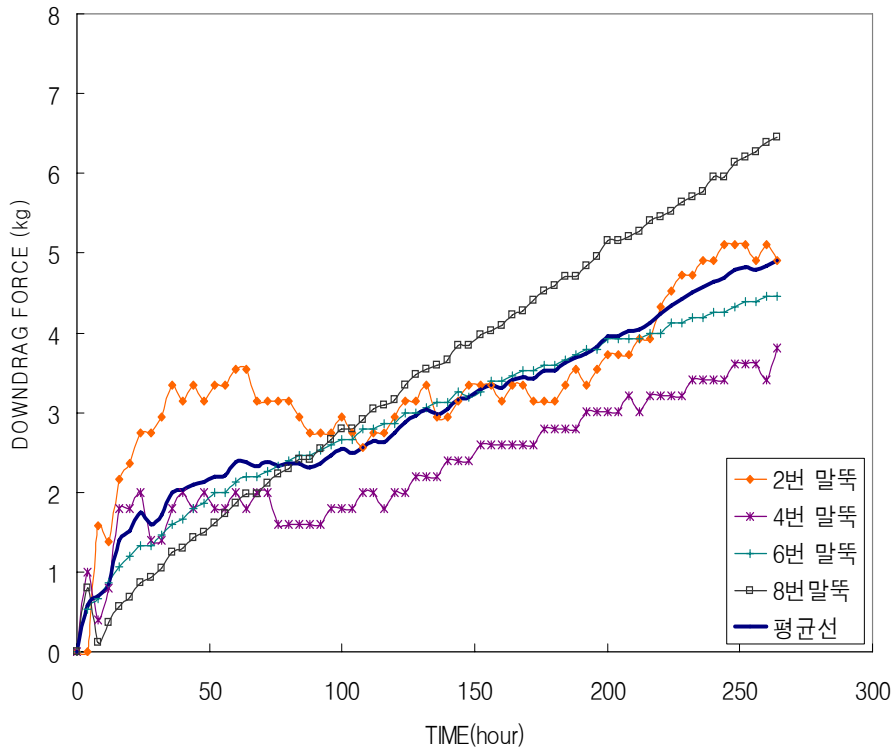
마지막으로 각 말뚝의 평균선 그래프만을 모아 놓은 그림 6-(d)의 그래프를 보면 중앙말뚝은 11일이 경과한 시간까지 3.8kg의 하향력을 나타내는 반면 측면말뚝은 같은 시간동안 평균 5.4kg, 모퉁이말뚝은 평균 5.0kg의 부주면마찰력을 나타내었다. 시험시작 후 70시간까지 비슷한 양상을 보이며 증가하다가 이후에 측면말뚝이 다른 말뚝에 비해 큰 값을 보이여 상승하였고, 대략 160시간 이후에는 모퉁이말뚝 또한 중앙말뚝보다 큰 값을 보이여 상승하였다. 중앙말뚝의 기울기가 측면말뚝과 모퉁이말뚝의 기울기에 비해 좀 더 완만한 양상을 나타내는 것으로 보아 측면말뚝과 모퉁이말뚝의 부주면마찰력은 중앙말뚝의 부주면마찰력에 비해 더 커질 것으로 예상된다.



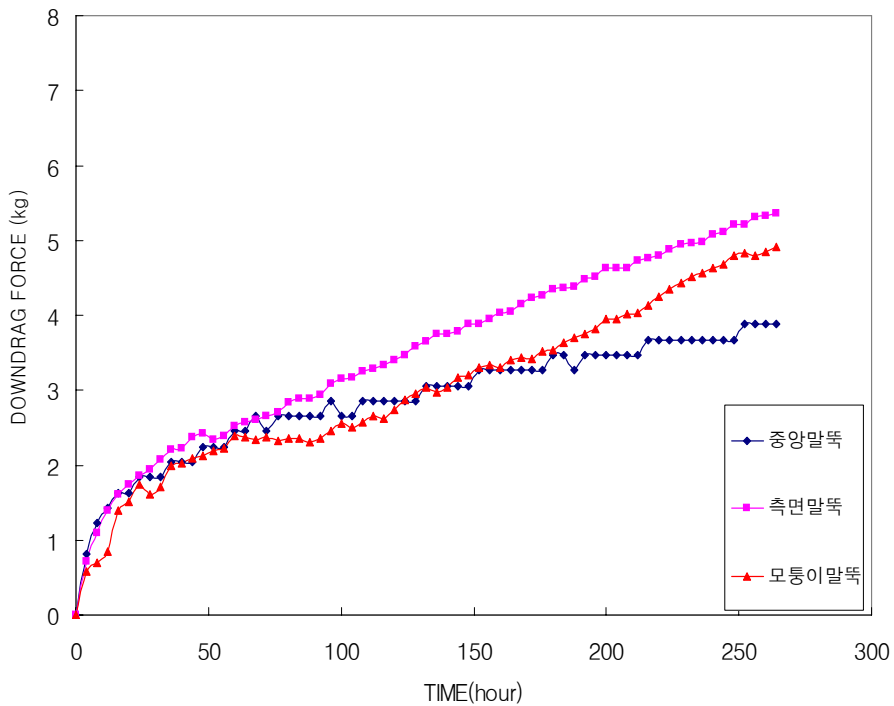
(a) 중앙말뚝



(b) 측면말뚝



(c) 모퉁이말뚝



(d) 평균선 그래프

그림 6. 각 말뚝의 평균선 그래프 도출

측정된 데이터에서 7번말뚝과 8번말뚝의 부주면마찰력 값이 다른 말뚝보다 유난히 큰 값을 나타내는 이유로 측면말뚝과 모퉁이말뚝에서 가장 큰 부주면마찰력 값(7번, 8번말뚝)과 가장 작은 부주면마찰력 값(3, 4번말뚝)을 제외하고 얻은 평균선 곡선을 그림 7에 도시하였다.

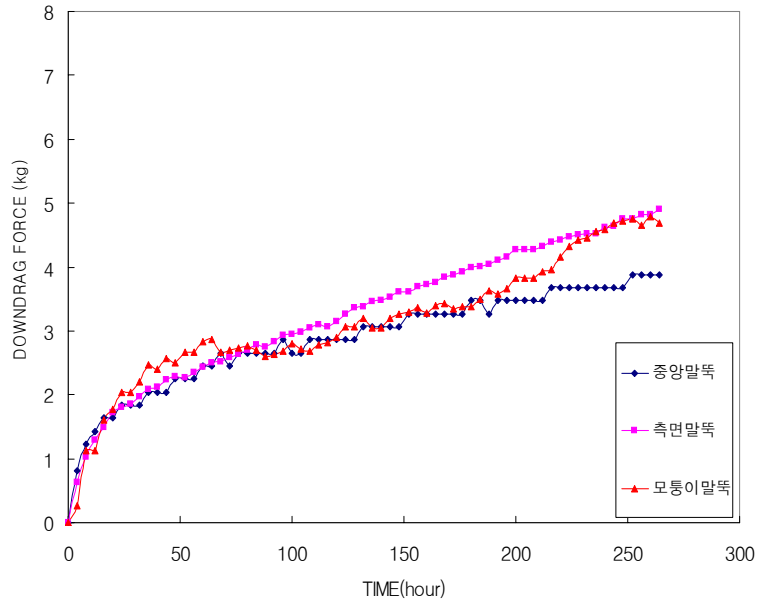


그림 7. 각 말뚝에서 최대값과 최소값을 제외한 평균선 그래프

중양말뚝은 3.8kg, 측면말뚝은 0.5kg이 감소한 4.90kg, 모퉁이말뚝은 0.32kg 감소한 4.68kg의 부주면마찰력 값을 나타내었다. 그림 6-(d)와 비교했을 때 최대값과 최소값을 뺀 측면말뚝과 모퉁이말뚝 모두 상대적으로 작은 값을 나타내어 중양말뚝과의 차이가 줄었으며, 측면말뚝과 모퉁이말뚝의 차이는 0.4kg에서 0.22kg으로 거의 비슷한 값을 보였다.

다음으로 본 연구를 수행하여 얻은 결과 값과 최대·최소값을 빼고 얻은 보정 값, 그리고 주택공사에서 실시한 모형시험의 결과 값을 그림 8에 도시하여 서로 비교분석 하였다.

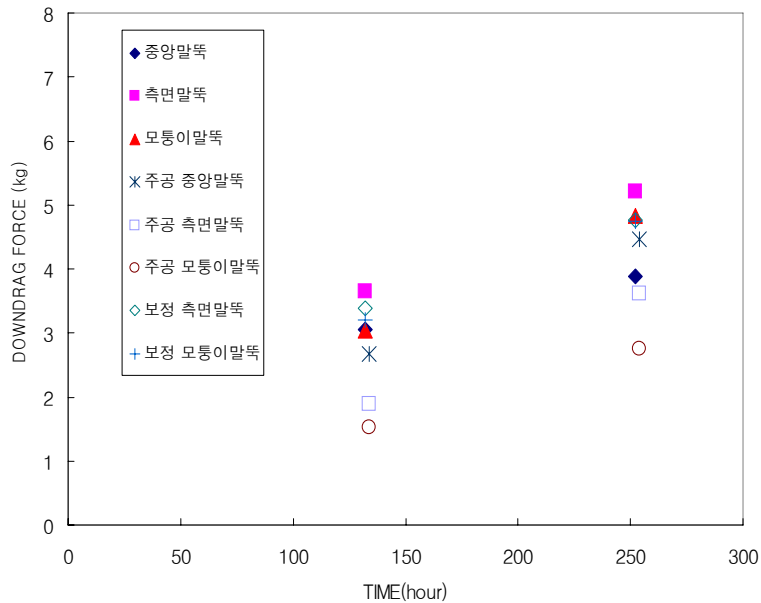


그림 8. 결과 값 비교

측정 후 약 5일이 경과한 후 주택공사 보고서에서 중양말뚝은 2.67kg, 측면말뚝 1.90kg, 모퉁이말뚝 1.52kg의 부주면마찰력 값을 나타내었고, 약 10일이 경과했을 때는 4.47kg, 3.61kg, 2.76kg의 값을 나타내었다. 같은 기간 동안에 측정된 본 연구의 결과 값과는 부주면마찰력의 크기 면에서 큰 차이를 보이지는 않았지만, 조금 작은 값들을 나타내었다. 그리고 측면말뚝, 모퉁이말뚝, 중양말뚝 순으로 큰 부주면

마찰력을 보이던 연구 값과는 달리 주공 보고서에서는 중앙말뚝, 측면말뚝, 모퉁이말뚝의 순으로 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

서두에도 언급했듯이 주택공사보고서에서는 정해진 심도에 작용하는 부주면마찰력을 측정한다는 것에 중점을 두었으므로 전체적인 그래프의 양상은 비교하기가 어려웠다.

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 초기높이는 55cm에서 10일이 경과 된 후에는 0.52cm가 침하된 54.48cm로 침하발생량이 상당히 작은 것을 알 수 있었다.
- 2) 대부분의 말뚝에서 부주면마찰력이 16시간까지 급격한 상승을 이루다가 그 이후 점점 안정세를 보이며 완만히 상승하는 양상의 그래프를 나타내었다.
- 3) 각 위치별 평균선을 구하여 부주면마찰력의 크기를 비교한 결과 시험 시작 후 60시간까지는 중앙말뚝, 측면말뚝, 모퉁이말뚝 모두 유사한 양상을 보였지만 그 이후에는 조금씩 다른 양상을 나타내었다.
- 4) 시험말뚝의 위치별 부주면마찰력의 크기는 측면말뚝, 모퉁이말뚝, 중앙말뚝 순으로 크게 나타났다.
- 5) 각 말뚝의 최대값과 최소값을 제외하고 분석한 결과 역시 측면말뚝, 모퉁이말뚝, 중앙말뚝 순으로 부주면마찰력의 크기가 크게 나타났지만, 그 차이가 많이 줄어들었다.
- 6) 대한주택공사에서 실시한 모형시험과의 비교에서 부주면마찰력의 크기는 비슷하게 나타났지만, 4)에서 언급한 내용과는 달리 중앙말뚝, 측면말뚝, 모퉁이말뚝 순으로 큰 값을 보였다.

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. 임종석(1987), “말뚝의 부주면마찰력에 관한 모형실험 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