

부마찰력 고려시 동재하시험결과를 이용한 말뚝의 허용지지력 평가(I)

Application of Dynamic Pile Load Test for Determination of Allowable Bearing Capacity Taking Negative Skin Friction into Account(I)

이명환¹⁾ : Lee, Myung Whan 홍헌성²⁾ : Hong, Hun Sung 이장덕³⁾ : Yi, Chang Tok

조천환⁴⁾ : Cho, Chun Whan 이원재⁵⁾ : Lee, Won Jae

- 1) 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.
- 2) 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.
- 3) 파일테크 이사, Manager, PILETECH consulting engineers.
- 4) 파일테크 이사, Manager, PILETECH consulting engineers.
- 5) 파일테크 부장, Manager, PILETECH consulting engineers.

SYNOPSIS : In the estimation of negative skin friction(nsf), the determination of nsf prone zone is necessary. It is usual to assume the zone based on SPT N values. However, the determination of the zone is not always clear for the practicing engineers and improper determination of the nsf zone would result in serious problem. In this paper a method based on PDA analysis is proposed for the determination of nsf zone.

1. 서 론

근래에 들어 국내에서도 연약지반 조건에서의 건설공사 물량이 증가하고 있으며 이러한 경우 기초형식은 말뚝기초가 가장 보편적으로 채택되게 된다. 따라서 종래의 말뚝기초 설계시 지지력이 가장 중요한 고려사항이었으나 연약지반의 경우에는 지지력 문제보다도 부주면 마찰력이 주된 설계하중 결정요소가 되는 경우가 많이 나타나고 있다. 최근의 경험에 의하면 말뚝관입깊이가 70 m에 달하는 지반조건도 나타나고 있으며 예상되는 부주면 마찰력의 크기가 설계하중의 2 배 이상이 되는 경우도 발생하고 있다.

부주면 마찰력이 예상되는 지반조건에서 말뚝기초의 설계하중을 결정하는 데에는 ① 부주면 마찰력 발생구간의 예측 ② 예상되는 부주면 마찰력의 크기 예측 ③ 양의 주면마찰력과 선단지지력의 예측의 3가지 과정을 검토한 후 최종설계를 확정하게 된다. 이러한 3가지 과정중 ② 부주면 마찰력의 크기와 ③ 양의 주면마찰력과 선단지지력의 크기 예측은 많은 연구실적이 있고 각종 설계기준상 관련 규정이 비교적 잘 정비되어 있기 때문에 실무 설계상 큰 문제점은 없다. 반면 ① 부주면 마찰력 발생구간의 예측에 대해서는 국내외의 각종 설계기준상 실무자들이 참고할 수 있는 자료는 거의 없는 실정이다.

국내에서는 표준관입시험 N값을 기준으로 하여 N=6이하인 연약암밀층을 부주면마찰력 발생가능 구간으로 보아 설계하는 것이 보편화되어 있다. 이와 같은 부주면 마찰력 발생구간 예측은 일본의 실무 설계 예로부터 원용하고 있는 것으

로 판단된다. N값을 기준한 부주면 마찰력 발생구간 예측방법은 연약지반 지층조건이 분명하고 그 하부에는 현저하게 양호한 지반조건이 나타나는 대부분의 전형적인 해안매립지 같은 곳에서 적용하는 데 문제가 없다. 그러나 지층구성이 단순하지 않거나 연약지층이 국부적으로 산재할 경우 그리고 지반조건이 불균질할 경우 실측된 N값만으로 부주면 마찰력 발생여부를 예측하는 것은 전체 구조물의 안전으로 볼 때 매우 위험할 수 있다.

1994년부터 국내에서 본격적으로 적용되기 시작한 말뚝항타분석기(PDA, Pile Driving Analyser)를 사용한 동재하시험 적용의 주된 목적은 말뚝의 지지력 측정 및 항타장비의 적합성, 말뚝의 견전도 평가 등이다. 동재하시험 결과는 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Programme) 분석을 통하여 신뢰도 높은 말뚝지지력 평가를 할 수 있으며, 주면마찰력의 분포 및 크기와 선단지지력의 크기를 분석할 수 있게 해준다. 연약지반 조건에서 시공된 말뚝의 동재하시험 결과를 분석해 보면 주면마찰력의 분포로부터 연약지층을 역으로 유추할 수 있다. 또 이러한 원리를 이용하면 지반조사시 발견하지 못하였던 얇은 연약지층이나 국부적으로 산재한 연약 암밀층까지도 찾아낼 수 있으며, 따라서 상부 구조물의 안전을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

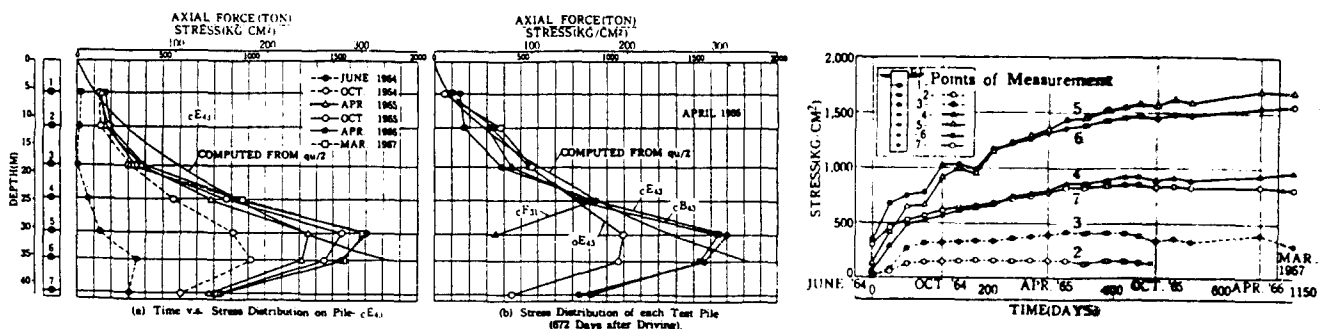
본 논문에서는 실제 시공사례를 중심으로 하여 동재하시험으로부터 부주면 마찰력 발생구간을 예측할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 부주면 마찰력과 양의 주면마찰력의 특성

부주면 마찰력은 연약암밀층 상부에 매립한 성토하중으로 연약암밀층이 장시간에 걸쳐 암밀침하 함으로써 말뚝의 변위보다 큰 값의 지반하향 변위가 발생하는 경우에 발생하는 것으로 알려져 있다. 이 밖에 연약지층 하부에서의 지하수 양수에 의하여 상부연약지층을 침하시키는 현상(Endo et al, 1969), 상재하중이 없는 상태에서 말뚝항타로 인해 야기된 과잉간극 수압의 소산(Fellenius and Broms, 1969), 간극수압의 변화가 없는 상태에서의 연약지층의 2차암밀(Secondary consolidation)효과(Walker and Darvall, 1973)등에 의해서도 발생한다.

부주면 마찰력의 발생원인은 이와 같이 다양하지만 모두 연약암밀 가능 지층에서 1차 암밀 또는 2차 암밀의 결과로 발생한다는 점은 동일하다. 즉, 부주면 마찰력의 발생은 장기간에 걸쳐 나타나는 현상이며, 이 기간은 연약암밀층의 두께, 암밀특성에 따라 결정된다. 일반적으로 부주면 마찰력이 문제가 되는 현장조건은 암밀층의 두께가 15 m 이상되는 경우이며, 이러한 지반조건에서 부주면 마찰력이 충분히 나타나는데까지는 상당히 긴 기간이 요구된다. 따라서 동재하시험을 시간간격을 두고 장기간에 걸쳐 계속 실시하면 이론상 신뢰도 높은 부주면 마찰력 측정이 가능하지만 이와 같은 현장실증시험은 현실적으로 거의 불가능하다.

[그림 1]은 Endo et al(1969)의 측정결과로 말뚝이 항타된 1964년 6월부터 장기간에 걸쳐 부주면 마찰력이 증가하고 있음을 보여주고 있다.

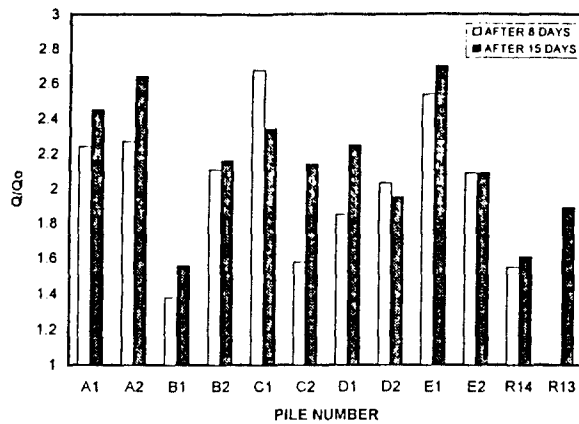


[그림 1] 장기간에 걸친 부주면 마찰력 측정결과(Endo et al, 1969)

반면 양의 주변마찰력에 대하여는 근래에 들어 동재하시험 기법의 발달로 활발한 연구가 진행되어 종래의 개념을 상당부분 수정할 수 있는 새로운 사실들이 알려지게 되었다. Schmertmann(1991)이 개념을 정립한 토질역학에서의 시간경과 효과, 점성토 및 사질토 지반에서의 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화(Svinkin et al, 1994)와 국내에서도 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화문제가 본격적으로 연구되었다(이원제 등, 1995).

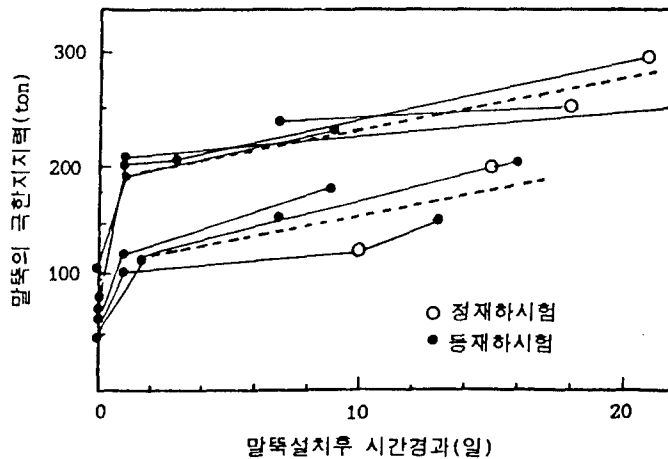
이들 연구결과에 의하면 말뚝의 양의 주변마찰력 또한 항타로부터 경과한 시간에 따라 상당히 큰 증가가 발생하는 것으로 보고되고 있다. 시간경과에 따른 양의 주변마찰력 변화는 아직까지 분명한 원인이 규명되지 못한 상태로 다분히 비과학적인 ageing effect로 설명되고 있으며, 지반조건에 따라 현저한 차이가 있는 것으로 이해되고 있다. 또 경우에 따라서는 시간이 경과함에 따라 지지력이 증가하지 않는 경우도 조사되고 있으며 문헌에 의하면 시간경과에 따라 지지력이 오히려 감소하는 경우도 있을 수 있다(Yang, 1970).

그러나 국내의 경우 대부분의 지반조건에서 정도상으로는 차이가 있지만 말뚝의 양의 주변마찰력은 항타한 시점으로부터 경과한 시간에 따라 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. [그림 2]는 국내에서 조사한 결과로 항타시점으로부터 8일 및 15일이 경과하였을 때의 말뚝지지력 증가를 나타내주고 있다.



[그림 2] 시간경과에 따른 말뚝지지력 증가(이원제 등, 1995)

국내외의 연구결과들에 의하면 시간경과에 따라 말뚝의 양의 주변마찰력이 증가하는 경우 그 증가는 비교적 단기간에 현저하게 나타나는 특징을 갖고 있다. [그림 3]에는 이와 같은 지지력 증가양상을 잘 나타내 주고 있다(Fellenius et al, 1989).



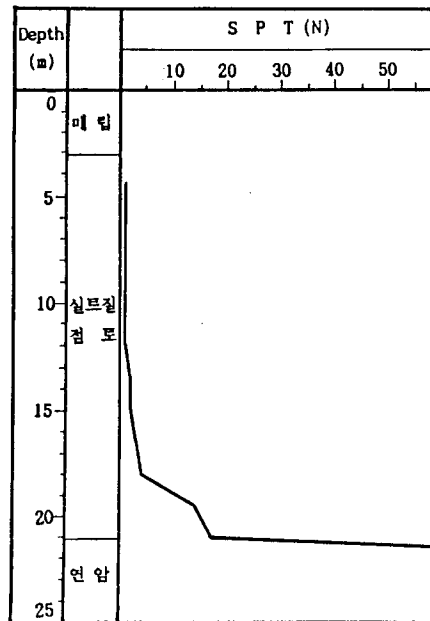
[그림 3] 시간경과에 따른 말뚝지지력 증가(Fellenius et al, 1989)

이상의 논의를 종합해 볼 때, 우리가 설계시 고려하여야 할 부주면 마찰력은 과잉간극수압의 발생 및 소산, 1차압밀, 2차압밀 등의 결과인 바 장기간에 걸쳐 그 값이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 반면 양의 주면마찰력은 그 원인이 아직 규명되지 못하였으나 비교적 단기간 내에도 현저한 증가양상을 갖는다고 볼 수 있다. 이와 같은 부주면마찰력과 양의 주면마찰력의 특성을 이용하면 항타된 말뚝에 항타시 동재하시험(EOID, End of initial driving)과 일정한 시간이 경과한 후 재항타 동재하시험(Restrike)을 실시함으로써 부주면 마찰력 발생구간을 판별할 수 있을 것이다.

물론 이 방법은 양의 주면마찰력이 단시간 내에 현저한 증가를 나타내 주는 조건이 만족되는 경우에 국한하여 적용할 수 있다는 한계가 있다. 그러나 한정된 위치에서 실시되고 타격에너지 효율상의 문제(이명환 등, 1991)등 많은 오차요인을 갖고 있는 표준관입시험 결과만으로 부주면 마찰력 발생구간을 예측하는 데에서 발생할 수 있는 위험요소를 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

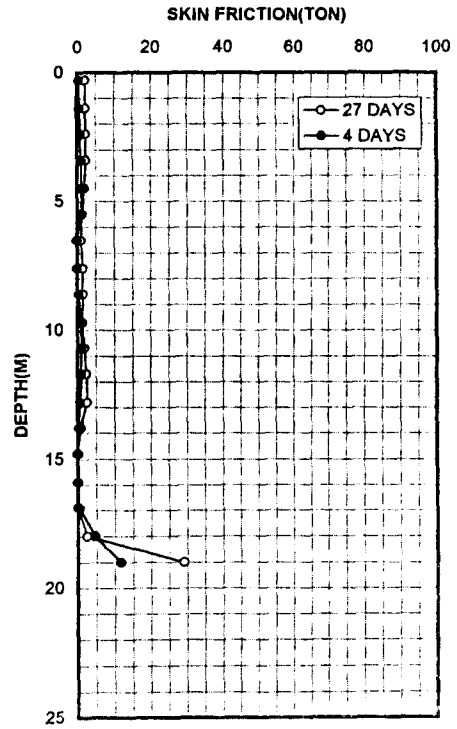
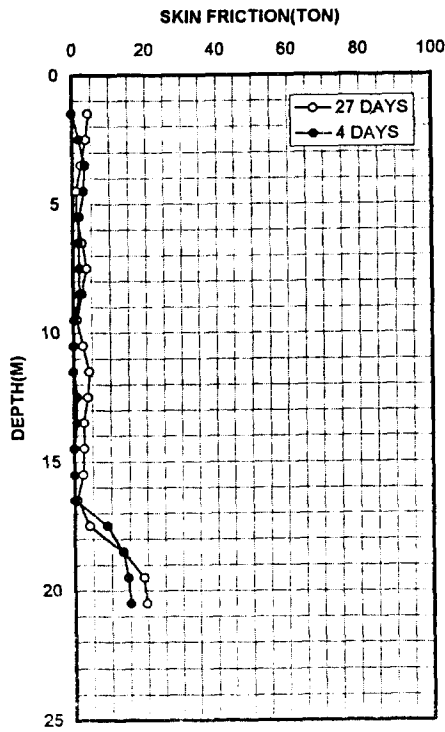
3. 동재하시험방법에 의한 부주면 마찰력 구간 예측

[그림 4]와 같은 연약지반조건은 우리나라의 전형적인 해안매립지의 조건을 나타내 준다. 지표면으로부터 -18 m깊이 까지 N값으로 볼 때 연약압밀층으로 구분할 수 있는 지층이 있고 그 하부에는 N값이 증가하여 양의 주면마찰력 구간으로 볼 수 있는 하중지층이 나타난다.



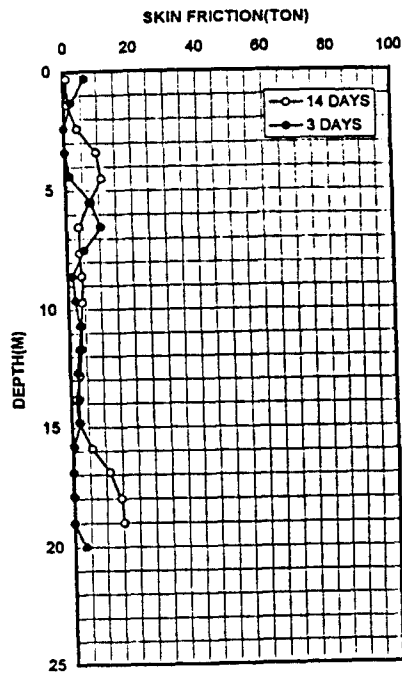
[그림 4] 지 반 조 건 (I)

이와 같은 지반에 ϕ 500 mm의 PHC말뚝을 K35 디젤해머를 사용하여 항타시공 하였다. [그림 5]~[그림 7]은 항타완료 후 3~4일 경과시 측정된 동재하시험 결과와 상당한 시간경과후의 결과를 나타내 주고 있다. 3개 시험말뚝의 주면마찰력 분포는 대체로 유사하지만 부주면 마찰력 발생구간은 약간씩 상이하게 평가된다. 3개 시험말뚝 모두 연약압밀지층으로 구분할 수 있는 구간에서는 시간경과에 따라 주면마찰력 증가가 거의 없거나 아주 낮은 반면 하부지층에서는 상당히 큰 주면마찰력 증가를 확인할 수 있다.



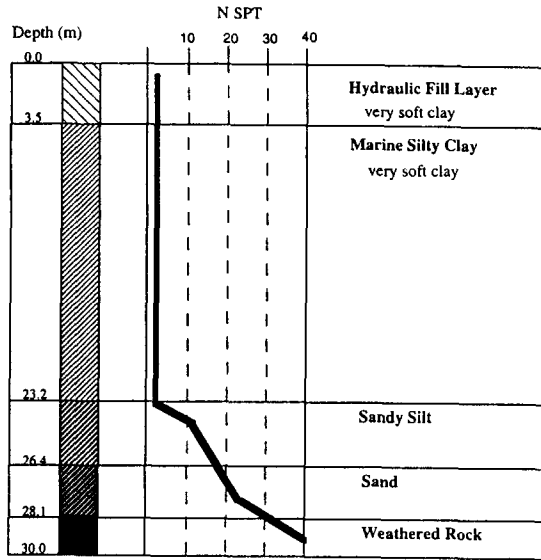
[그림 5] 동재하시험결과 주변마찰력 분포(시험번호 1)

[그림 6] 동재하시험결과 주변마찰력 분포(시험번호 2)

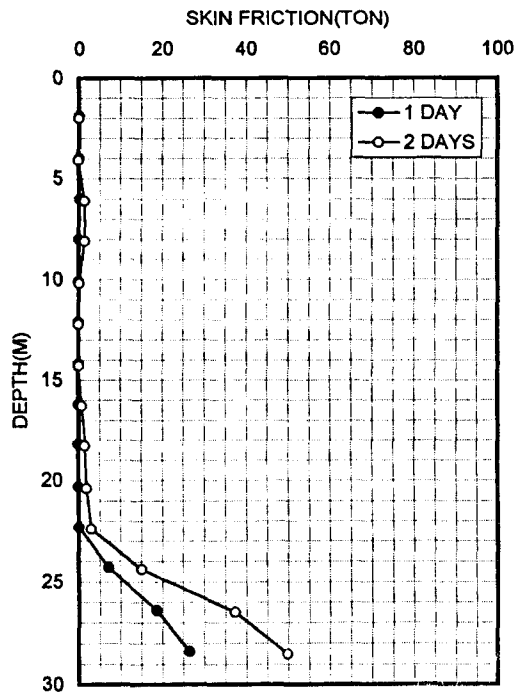


[그림 7] 동재하시험결과 주변마찰력 분포(시험번호 3)

[그림 8]과 같은 연약지반 조건에서 ϕ 500 mm의 PHC말뚝을 항타시공하였다. 연약지층의 깊이는 N값을 기준으로 할 때 -23.2 m까지이며 항타시 동재하시험(EOID)분석결과 [그림 9(a)]에서도 동일한 결과를 판정할 수 있었다. [그림 9(b)]는 항타후 2일이 경과한 후 실시한 동재하시험 결과이다. 이 결과에 의하면 연약지층에서도 약간의 주변마찰력 증가가 나타났으나 양의 주변마찰력 구간에서는 현저한 증가가 나타났음을 알 수 있다.



[그림 8] 지 반 조 건 (Ⅱ)

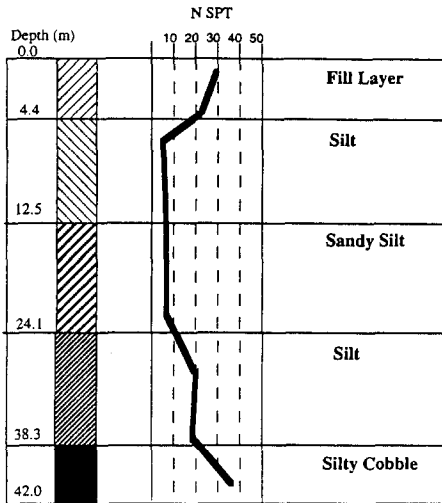


[그림 9] 동재하시험결과 주변마찰력 분포(시험번호 4)

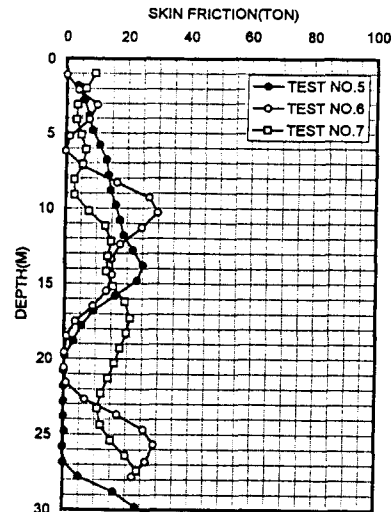
앞에서 설명한 [그림 4] 및 [그림 8]과 같은 경우는 연약지반 조건 및 부주면 마찰력 발생구간 예측에 큰 문제가 없는 경우이다. 이는 연약지반의 N값이 하부의 하중지지층과는 현저하게 차이가 있기 때문이며 이와 같은 지반조건에서는 위치에 따라 약간의 부주면 마찰력 발생구간이 차이가 있는 정도를 확인할 수 있었다.

그러나 [그림 10]과 같은 지반조건일 경우 어느 깊이까지를 연약지반으로 판정하여야 할 것인지가 문제가 된다. 이 현장에서는 부주면 마찰력 등 문제해결을 위하여 paper drain공법으로 연약지반처리를 이미 실시하였으며 [그림 10]의 지반 조사는 연약지반 처리이전에 실시된 내용이다.

[그림 10]과 같은 지반조건에 ϕ 609.6 mm \times 10 mm(thk) 강관말뚝을 K45 디젤해머로 향타하였다. 동재하시험은 향타 후 1~3.5개월이 경과한 후 3개소에 대하여 실시하였다. 3개소의 동재하시험결과 분석은 [그림 11]에 표시하였다.



[그림 10] 지 반 조 건 (Ⅲ)



[그림 11] 동재하시험결과 주면마찰력 분포

동재하시험 결과에서 나타난 바와 같이 시험번호(5)에서는 -19.8 m부터 -26.8 m까지 7 m구간에서 주면마찰력이 거의 나타나지 않고 있다. 시험번호(6)에서도 -18.5 m부터 -21.6 m구간까지 주면마찰력이 거의 나타나지 않고 있다. 반면 시험번호(7)에서는 이와 같은 구간이 나타나지 않고 있다.

이 결과로부터 시험번호(5) 및 시험번호(6)에서는 심각한 부주면 마찰력 문제가 발생할 수 있음을 유추할 수 있으며 시험번호(7)에서는 부주면 마찰력 문제가 우려되지 않을 수 있다고 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 조사결과 한정된 위치에서 실시한 지반조사 결과를 근거로 하여 연약지반처리를 실시하여 지층변화에 효과적으로 대처하지 못한 때문으로 추정되었다. 더구나 paper drain시공시 장비의 한계로 충분히 깊은 곳까지 시공이 되지 못한 것이 결정적인 원인이 되었다. 이 현장은 그후 심각한 부등침하 현상이 발생하였다.

4. 결 론

본 논문에서 설명한 바와 같이 소수의 한정된 위치에서 실시한 지반조사 결과만으로 부주면 마찰력 발생을 예측하는 것은 한계가 있다. 연약지반에서 말뚝기초를 시공할 때에는 반드시 향타시와 일정한 시간이 경과한 후 동재하시험을 실시하여 그 결과를 분석함으로써 신뢰도 높은 부주면 마찰력 발생구간이 예측되어야 한다. 특히 지반조사 내용만으로 부주면 마찰력 발생을 예측할 수 없는 경우에도 CAPWAP해석 결과로부터 연약지반을 확인함으로써 축조되는 구조물의 안전을 도모할 수 있다.

참고문헌

- 1) 이원제, 전영석, 홍현성, 이명환(1995), " 시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력변화 연구 ", 한국지반공학회 '95 봄 학술발표회논문집, pp.69-90.
- 2) 이명환, 강인탁, 이원제, 김영진 등(1991), " 실측에 의한 표준관입시험 함마의 낙하속도 분석 ", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.689-692.
- 3) Endo, M., Minou, A., Kawasaki, K. and Shibata, T.(1969), " Negative skin friction acting on steel pipe piles in clay ", Proc. 7th ICSMFE. Vol.2, pp.93-98.
- 4) Fellenius, B.H. and Broms B.B.(1969), " Negative skin friction for long piles driven in clay ", Special session No. 8, 7th ICSMFE.
- 5) Fellenius, B.H., Riker, R.E., O'Brien, A.J. and Tracy, G.R.(1989), " Dynamic and static testing in soil exhibiting set-up ", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.115, No.GT7, pp.984-1001.
- 6) Schmertmann, J.H.(1991), " The mechanical ageing of soils ", The 25th K. Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.GT9, pp.1288-1330.
- 7) Svinkin, M.R., Morgano, C.M. and Morvant, M.(1994), " Pile capacity as a function of time in clayey and sandy soils ", Proc. of Int.Conf.on PDF, Brouges, Belgium.
- 8) Walker, L.K. and Darvall, P.Le.P.(1973), " Dragdown on coated and uncoated piles ", Proc. 8th ICSMFE. Vol.2.1, pp.257-262.
- 9) Yang, N.C.(1970), " Relaxation of piles in sand and in organic silt ", Journal of soil mechanics and foundation engineering, ASCE, Vol.96, SM2, pp.395-409.