KGS Spring '98 National Conference / March 28, 1998 / Seoul / Korea

군말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름 발생 사례
A Case Study on the Heaving of Piles due to Group Pile Installation

이명환[1], Myung-Whan Lee, 홍헌성[2], Hun-Sung Hong, 조천환[3], Chun-Whan Cho,
김성회[4], Soung-hoi Kim, 전영석[5], Young-Suk Jun

[1] 파일테크 연구소장, Research Fellow, Piletech Consulting Engineers
[2] 파일테크 사장, Principal, Piletech Consulting Engineers
[3] 파일테크 상무, Managing Director, Piletech Consulting Engineers
[4] 파일테크 차장, Senior Researcher, Piletech Consulting Engineers
[5] 파일테크 과장, Researcher, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : Since piles are designed conservatively, pile spacing of 2.0 2.5 times the pile diameter is not uncommon in Korea. When piles are driven into incompressible clayey soils as a group, the displaced soil due to pile penetration will cause lateral and upward movement of the adjacent already installed piles. The lateral and upward movement would cause detrimental effect to the pile, such as loss of bearing capacity and damage to the pile material. Identification of pile heaving depends mainly on level surveying, however, it is not easy to confirm the structural soundness of the heaved piles. In this study heaving of the piles was investigated by means of PDA. The results clearly indicated that some of the PHC piles were badly damaged due to group pile installation. It is thus concluded that PDA monitoring is necessary to investigate the pile heaving.

Key words : Group pile, Heaving, PDA, Tensile stress

1. 서 론

일반적으로 말뚝기초는 단말뚝(single pile)으로 사용되는 경우보다 군말뚝(group pile)을 형성하여 구조물의 기초로 사용되는 경우가 보편적이다. 특히 우리나라는 말뚝설계 내용이 보수적이기 때문에 말뚝간 간격이 말뚝직경의 2 2.5배 정도가 되는 설계 또한 많이 실시되고 있다.

말뚝간 간격이 좁아지게 되면 말뚝을 시공하는 데에도 많은 문제점이 발생하게 된다. 말뚝간 간격이 가까운 다수의 말뚝을 시공하게 되면 지반내에서 관입되는 말뚝 체적만큼 토사의 압축이 발생하게 된다. 만약 말뚝이 시공되는 지반조건이 느슨한 사질토이거나 압축성이 큰 점성토 지반이면 말뚝주변에 이들 토사가 압축될 수 있지만 조밀한 사질토 또는 비압축성(incompressible) 굳은 점토지반의 경우 말뚝관입으로 인한 체적변화는 토사의 이동으로 밖에는 소화될 수밖에 없게된다. 즉 말뚝이 관입됨에 따라 관입되는 말뚝 체적 만큼의 토사는 윗쪽 및 옆쪽으로 이동하게 되고 그에 따라 지표면의 솟아오름과 기시공된 말뚝의 휨 또는 솟아오름을 유발시키게 된다.

지금까지의 연구결과에 의하면 지표면의 솟아오름은 관입된 말뚝체적의 30 100 %에 해당되는 것으로 알려져 있으며(Hagerty and Peck, 1971) 그에 따라 기 시공된 말뚝에 다음과 같은 영향을 미치게 된다.

① 말뚝의 지지력 저하가 발생한다. 기 시공된 말뚝은 소정의 항타관리기준에 따라 소정의 지지력을 갖도록 시공되었다. 이 말뚝이 인접위치에서 새로운 말뚝이 관입됨에 따라 솟아오르면 말뚝의 선단부

하부를 느슨한 지반조건으로 바꾸어 주게되며 따라서 선단지지력이 크게 감소한다. 반면 주면마찰력은 큰 영향을 받지 않는다. 따라서 기 시공된 말뚝들이 선단지지력에 의존하는 선단지지 말뚝일 경우 말뚝의 지지력 저하문제가 심각하게 제기되며 따라서 재항타를 실시하여야 한다. 그러나 말뚝지지력이 주면마찰력이 위주가 되는 경우 지지력 저하는 크게 문제시 되지 않는다.

② 말뚝이 솟아오르는 과정에서 말뚝재료에 인장응력이 발생하여 말뚝재료가 파손될 수 있다. 이 문제는 지지력 저하 보다도 오히려 심각할 수 있다. 특히 말뚝재료가 인장응력에 약한 콘크리트일 경우 구조물 기초의 안전을 위협할 수도 있으며 따라서 말뚝 솟아오름을 확인하고 대책을 강구하여야 한다. 실제 기시공된 말뚝 인근에 새로운 말뚝을 항타할 경우 지반내의 토립자 이동은 그림 1과 같이 나타날 것으로 추정된다. 이 때 기 시공된 말뚝이 항타로부터 일정시간이 경과하여 상당한 set up효과가 발생하였다면 토립자 이동으로 인한 솟아오름에 저항하게 되며 이 과정에서 말뚝재료가 허용하는 범위보다 큰 인장응력을 유발시킬 수 있으며 그에 따라 말뚝재료가 파손될 수 있다.

이처럼 기초구조물에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 말뚝의 솟아오름 문제를 확인하고 대책을 수립하는 것은 실무적으로 용이하지 못하다. 말뚝의 솟아오름 확인은 대부분 측량에 의하게 되지만 현장 실무자들이 사전에 이를 예측하고 측량을 실시하지 못하면 간과해 버리기 쉽다. 그리고 일단 말뚝의 솟아오름을 확인한 경우에도 해당말뚝의 지지력과 건전도를 확인하기란 매우 어려운 실정이다. 각종 문헌자료에 의하면 솟아오름이 발생한 말뚝에 대하여 재항타를 실시하는 정도의 대책이 제시되어 있을 뿐이다 (Tomlinson, 1994).

솟아오름이 발생한 말뚝에 대하여 정재하시험을 실시하면 말뚝의 지지력은 확인할 수 있지만 군말뚝 시공으로 말뚝에 인장응력이 발생하여 말뚝이 파손된 건전도 문제는 해결되지 못한다.

본 연구사례에서는 군말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름 현상을 말뚝항타 분석기(PDA)를 사용하여 확인하였다. 조사결과 말뚝의 솟아오름으로 인한 말뚝의 지지력 저하 뿐만 아니라 말뚝재료의 파손 문제에 합리적으로 대처하기 위해서는 말뚝항타분석기를 사용한 조사가 필수적임을 알 수 있었다.

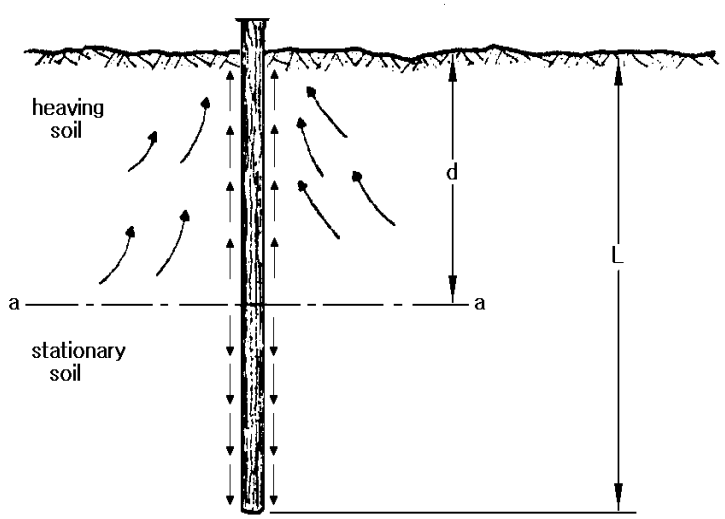

그림 1. 말뚝항타시 지반내의 응력 발생

2. PDA를 이용한 말뚝 솟아오름 확인

본 연구사례는 ○○지역에 고층아파트를 시공하는 과정에서 발생하였다. 말뚝이 시공된 지반조건은 지표면으로부터 -14.0 m까지 매립토층이 존재하며 그 하부에 N값이 17 30 정도의 견고한 점토층이 -25.0 m까지 나타난다. -25.0 m 아랫쪽으로는 N값이 50이상인 모래, 점토, 자갈, 호박돌 등이 혼재된 지층이 계속된다.

본 현장에서는 상부 매립토층에 자갈, 호박돌 및 전석 등이 혼재되어 있으며 현장 주변의 여건상 항타공법이 용인되지 못한 관계로 지표면으로부터 -14.0 m까지 선굴착(preboring)을 실시하였다. 선굴착 후 ø 450 mm의 PHC말뚝을 삽입하고 항타하는 공법을 채택하였다. PHC말뚝은 70 ton의 설계하중을 갖는 것으로 계획되었으며 말뚝간 간격은 말뚝직경의 2.5배가 되도록 배치되었다. 선굴착후 항타는 램 중량이 7 ton인 유압해머를 사용하였다.

말뚝의 시공관리 기준을 결정하기 위한 시항타 과정에서는 항타후 시간경과에 따른 set up효과가 비교적 양호하게 나타나는 등, 시공상 또는 말뚝의 지지력상 큰 문제는 발생하지 않았다.

그러나 본격적으로 군말뚝을 시공하게 됨에 따라 기시공한 말뚝들이 솟아오르는 현상이 나타나기 시작하였다. 말뚝의 솟아오름은 수준 측량기(level)를 사용한 측량 결과에서도 일부 확인할 수 있었으나 측량으로 확인되지 못한 말뚝들에서도 솟아오름이 발생하였을 가능성을 배제할 수 없게 되었다. 따라서 말뚝항타분석기(PDA)를 사용하여 말뚝 솟아오름을 확인하도록 하였다.

그림 2는 시험말뚝 1에 대한 동재하시험 결과를 나타내 주고 있다. 말뚝을 항타시공하면서 실시한 동재하시험 결과는 Davisson의 판정기준상 182.0 ton을 얻을 수 있었다. 항타후 1일이 경과한 시점에서 실시한 재항타 동재하시험 결과의 Davisson 판정기준은 244.5 ton이 되어 약 34 % 정도의 set up효과가 발생하였다. 이 시점에는 인접말뚝들이 아직 시공되지 않았으며 따라서 말뚝의 솟아오름도 발생하지 않았다. 그 후 인접말뚝들이 시공됨에 따라 약 15 mm 정도의 말뚝 솟아오름이 발생한 것으로 조사되었다. 말뚝 솟아오름이 발생한 후 실시한 동재하시험(항타후 4일 경과)결과는 그림 2에 나타난 바와 같다.

재항타 시험을 위한 첫번째 타격(BN 1)시 측정된 지지력은 Davisson의 판정기준상 139.5 ton이 되어 말뚝지지력이 크게 감소한 것으로 나타나고 있다.

그러나 본건 현장에서 기 실시한 다른 말뚝의 재하시험 결과에 의하면 시간이 경과함에 따라 말뚝지지력이 감소하는 relaxation 발생가능성은 극히 희박하여 타격을 계속하였다. 시험을 위한 타격을 8회 계속한 후에는 말뚝지지력이 원래상태와 근접하는 결과를 얻을 수 있었으며 이 결과로부터 이러한 지지력 감소는 말뚝의 솟아오름이 원인인 것으로 판단할 수 있었다.

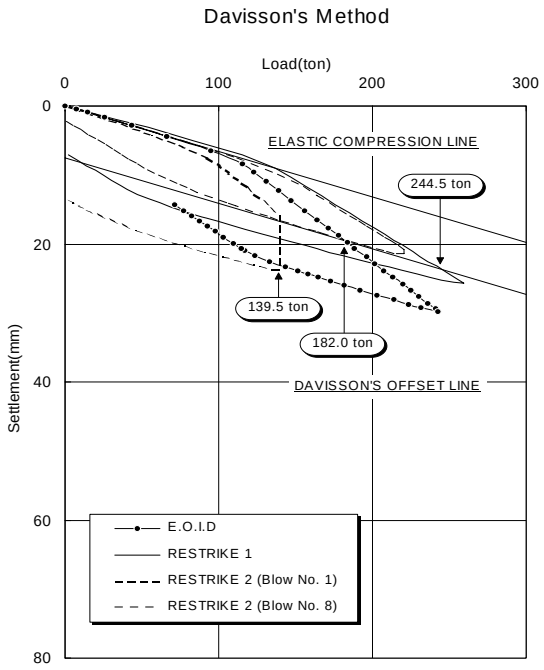

그림 2. 동재하시험 결과, 말뚝번호 1

말뚝의 솟아오름은 말뚝의 지지력뿐만 아니라 말뚝재료의 건전도에도 심각한 문제점을 유발시킨다. 말뚝재료의 건전도는 동재하 시험에서 BTA라는 값으로 표시된다. BTA는 동재하시험에 있어 말뚝의 상대적 변화를 나타내 주는 건전도 지수이다. 즉 BTA값은 손상을 입은 단면적의 원래 단면적에 대한 비율을 %로 나타내 주며 BTA값과 손상상태의 관계는 일반적으로 아래 표 1에 나타낸 기준을 적용하고 있다(Goble 등, 1996).

표 1. BTA와 손상상태의 관계

BTA값	말뚝 손상상태
100	정상(uniform)
80 100	약간손상(slight damage)
60 80	손상(damage)
60이하	파손(broken)

그림 3에 표시한 시험말뚝 2번의 재하시험결과는 말뚝 솟아오름을 보다 확실하게 시사해 주고 있다. 단독말뚝으로 시공되었을 때의 지지력은 Davisson의 판정기준으로 234 ton이었다. 이때 말뚝의 건전도를 나타내주는 지표인 BTA값은 83으로 약간의 손상이 발생하였으나 구조적으로 문제시 되지는 않을 정도이었다. 그러나 말뚝시공후 11일이 경과한 시점에는 주변에 군말뚝이 시공되었으며 이때 실시한 동재하시험 결과는 Davisson의 판정기준으로 148.8 ton의 지지력을 나타내 준다. 그 뿐만아니라 말뚝 건전도에 있어서도 말뚝두부로부터 16.0 m에서는 BTA값이 60, 말뚝두부로부터 23.6 m 위치에서는 BTA값이 71로 나타나 항타시에는 나타나지 않았던 구조적 결함이 나타나고 있다. 이는 군말뚝시공으로 인한 토립자의 상향이동으로 기시공된 말뚝에 인장응력을 유발시켜 말뚝재료가 파손된 것으로 판단될 수 있다.

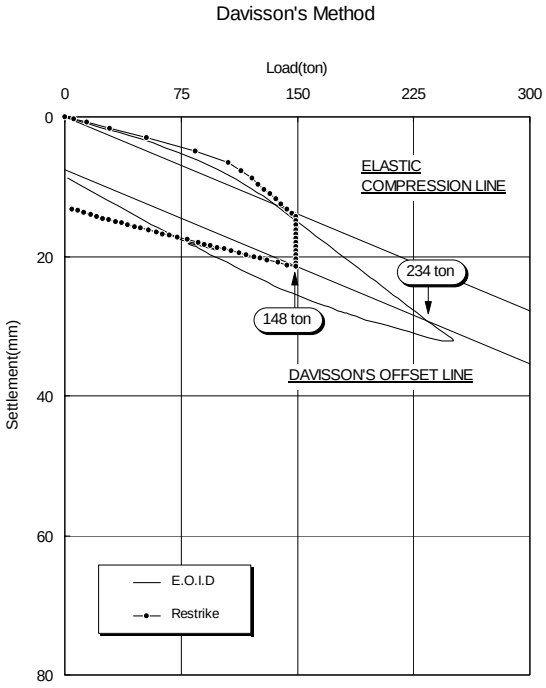

그림 3. 동재하시험 결과, 말뚝번호 2

그림 4의 시험말뚝 3번의 재하시험 결과는 재항타시 측정한 내용이다. 이미 군말뚝을 형성한 말뚝을 선정하여 동재하시험을 실시한 내용으로 BN1에서는 Davisson 판정기준이 140 ton이며 BTA는 10으로 말뚝이 완전 파손되었음을 알 수 있다. 그러나 BN3에서는 추가 타격으로 균열부가 봉합되어 건전도상 양호한 것으로 나타났으며 지지력도 Davisson 판정기준이 201 ton이 되었다. 그러나 타격을 계속하여 BN9에서는 지지력도 106 ton으로 낮아지고 건전도 지수 BTA도 30으로 다시 낮아지고 있다. 이는 일시적으로 봉합된 균열부가 계속되는 타격으로 파손되었다고 판단된다.

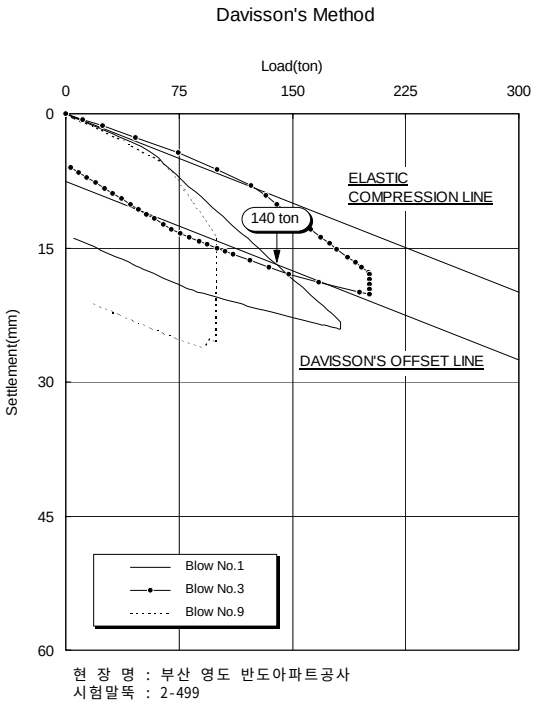

그림 4. 동재하시험 결과, 말뚝번호 3

3. 말뚝 솟아오름에 대한 대책

이상의 동재하시험결과에서 나타난 바와 같이 군말뚝 시공으로 말뚝의 솟아오름이 발생할 경우 지지력 저하뿐만아니라 콘크리트 말뚝에서는 말뚝재료의 파손까지도 발생할 수 있다.

실제로 본건 현장에서는 PHC말뚝의 중공부에 CCTV를 사용하여 조사해본 결과 동재하시험에서 추정한 바와 같이 말뚝재료가 균열 또는 파손된 것을 확인할 수 있었다. 그중 일부 말뚝은 전단파괴까지 발생하여 완전히 파손된 것을 확인할 수 있었고 대책이 강구되었다.

문헌에 의하면 이러한 말뚝 솟아오름에 대하여는 선굴착을 실시하여 지반내의 토사를 밖으로 배토시키는 방법, 말뚝간 간격을 넓게 재배치하는 방법 또는 말뚝 종류를 배토량이 적은 H말뚝 같은 것으로 변경하는 대책공법이 제시되어 있다.

본건 공사의 경우, 말뚝의 솟아오름을 감소시키기 위하여 ①선굴착 깊이를 지표면 -14.0 m에서 지표면 -24.0 m로 변경 ②말뚝의 지지력을 재평가하여 설계하중을 70 ton에서 90 ton으로 상향조정하여 말뚝간 간격을 넓게 해 주는 대책을 적용하였다.

이와 같은 대책을 적용해본 결과 말뚝의 솟아오름을 크게 감소시킬 수 있었으며 그 후 실시한 동재하시험결과 또한 설계하중 조건을 만족시킬 수 있었다.

4. 결론

본 사례연구에서는 군말뚝 시공으로 인한 기시공된 말뚝의 솟아오름을 PDA를 사용한 동재하시험으로 확인하였다. 일반적으로 군말뚝 시공으로 인한 말뚝의 솟아오름은 말뚝을 항타시공하면서 측량을 실시하여 확인하고 있다. 그러나 실제로 말뚝의 솟아오름 확인을 위한 수준측량은 보편화되어 있지 못하며 따라서 간과되기 쉽다.

일단 말뚝의 솟아오름이 확인된 경우에도 문제를 해결하는 방법으로는 솟아오른 말뚝을 재항타하는 방법이 거의 유일한 대책이었으며 재항타후 말뚝에 정재하시험을 실시하여 지지력 조건을 만족시키는지를 확인하는 정도이었다. 그러나 이와 같은 대책만으로는 말뚝 솟아오름으로 인한 말뚝재료의 파손 발생여부는 확인할 수 없으며 따라서 근본적인 해결방법이 되지 못하였다.

본 연구사례에서는 이와 같은 문제점을 보다 근본적으로 확인하고 대책을 수립하기 위하여 말뚝항타분석기(PDA)를 사용한 동재하시험을 실시하여 말뚝 솟아오름으로 인한 지지력 저하 문제뿐만 아니라 콘크리트 말뚝에 균열과 심한 경우 절단까지도 유발하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 동재하시험 결과는 말뚝중공부에 CCTV를 사용한 조사에서도 확인되었다. 이상의 연구결과를 종합할 때 군말뚝 시공시 말뚝 솟아오름이 우려될 때에는 단순히 측량 또는 정재하시험만으로 확인하는 것은 극히 위험할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 말뚝 솟아오름 문제를 해결하기 위해서는 PDA를 사용한 체계적인 검토가 필수적임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Goble Rausche Likins and Associates, Inc.(1996). "CAPWAP Introduction to Dynamic Pile Testing Method" pp5-5, 6
2. Hagerty, A. and Peck, R. B. (1971) "Heave and lateral movements due to pile driving, "Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, No.SM 11, pp.1513-1532.
3. Tomlinson, M.J.(1994) "Pile design and construction practice," E & FN SPON, pp. 411.