

## 무리말뚝 시공의 영향

### The effect of group pile installation

이명환<sup>1)</sup>, Myung-Whan Lee, 홍헌성<sup>2)</sup>, Hun-Sung Hong, 김성회<sup>3)</sup>, Sung-Hoi Kim, 전영석<sup>3)</sup>, Young-Suk Jun

<sup>1)</sup> (주)파일테크 연구소장, Research Fellow, Piletech Consulting Engineers

<sup>2)</sup> (주)파일테크 대표이사, President, Piletech Consulting Engineers

<sup>3)</sup> (주)파일테크 부장, Manager, Piletech Consulting Engineers

**SYNOPSIS** : Most of the piles are designed as group piles. In certain geotechnical environments, the installation of group piles causes heaving of the already installed piles. The unfavorable effects of pile heaving on pile bearing capacity have been well known to field engineers. However not many engineers pay enough attention to this subject. According to our recent researches, not only the bearing capacity but also the pile material could be seriously damaged due to the installation of nearby piles, especially with the cases of precast concrete piles. When the pull-out force due to installation of neighboring piles acting on the already installed precast concrete pile exceeds the shaft friction, pile heaving occurs. At the same time, if the pull-out force exceeds the allowable tensile strength of the precast concrete pile, tensile failure is inevitable, which is critical for the pile integrity. In other cases the pile material was not damaged but serious relaxation occurred as the results of pile heaving. In this paper, the pull-out mechanism due to the installation of group piles is explained.

**Key words** : Group pile, Pile heaving, Pull-out force, Relaxation, Pile bearing capacity, PDA, Set up

## 1. 서 론

우리나라 뿐 아니라, 어디에서나 실제 말뚝기초는 무리말뚝조건으로 설계되고 또 거기에 맞추어 시공된다. 무리말뚝조건으로 말뚝을 시공하는 경우에는 기 시공된 말뚝 가까이에서 새로운 말뚝이 설치되는 영향으로 지반조건상 변화를 피할 수 없다. 무리말뚝 시공으로 나타나는 일반적인 문제점으로는 말뚝의 경사(傾斜), 말뚝 솟아오름을 들 수 있겠다. 일반적으로 말뚝 솟아오름(heaving)이 발생할 때의 대처는, 솟아오름 양이 일정한 값을 초과하는 경우 해당 말뚝을 재항타하여 원래 깊이까지 관입시키는 방안이 적용되는 것으로 알려져 있다. 그림 1은 무리말뚝 시공으로 인한 흡입자의 이동을 나타낸 것이다.

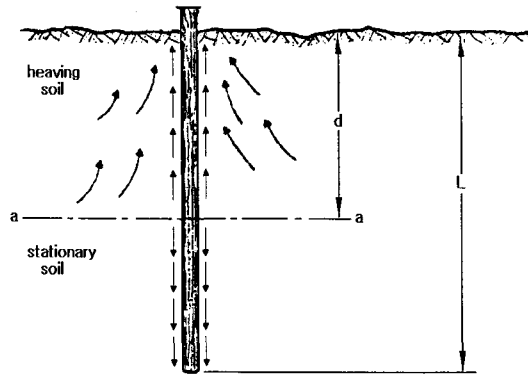


그림 1. 인근 말뚝 시공으로 인한 흡입자의 이동

국내에서 시행되는 거의 모든 말뚝 공사가 무리말뚝 조건으로 건설되지만, 실무적으로 무리말뚝 시공으로 인한 문제점을 확인하고 시정하는 경우는 그리 많지 않은 것이 우리의 현실이다. 다행히 최근 일부 기관에서 무리말뚝 시공으로 인하여 발생하는 문제점에 대하여 새로운 인식을 하고, 반드시 확인하도록 시공관리 기준을 재정비하기도 하였지만, 대부분의 발주자들은 이러한 문제점이 있는지조차 인식하지 못할 정도로 무관심한 것으로 보인다.

이 주제에 대해서는 국내에서도 몇 차례 사례가 발표되기도 하였지만, 아직까지도 실무기술자들에게는 생소한 분야인 것이 분명하다. 말뚝재료의 특성상 강말뚝에서는 말뚝 솟아오름이 발생할 경우, 단순히 재항타를 한다는 대책이 실효를 거두기도 한다. 그렇지만 재료의 물리적 특성상 인장력에 대해서 극히 낮은 저항력을 갖는 PC 및 PHC말뚝에서는 솟아오름으로 인하여 말뚝재료가 열화(劣化)되거나 파손되는 사태로까지 발전하기 일쑤이다. 또 경우에 따라서는 시간경과에 따라 말뚝의 지지력(선단지지력)이 감소하는 relaxation현상으로 발전하기도 한다. 본 논문에서는 무리말뚝 시공으로 인하여 발생하는 말뚝 지지력 감소현상과 건전도 손상에 대하여, 발생하는 메커니즘을 설명하였으며, 한정된 것이기는 하지만 몇몇 사례를 소개하였다.

## 2. 무리말뚝 시공으로 인한 문제점 발생

무리말뚝 시공으로 말뚝 솟아오름이 발생한다는 것은 무리말뚝 시공으로 인하여 기 시공된 말뚝에 작용하는 인발력이 해당 말뚝의 주변마찰력보다 큰 경우이다. 따라서 말뚝 솟아오름의 발생은 인발력과 주변마찰력을 비교함으로써 그 발생 여부를 가늠할 수 있다. 그렇지만 이는 어디까지나 표면적인 비교이며, 여기에 말뚝재료가 허용하는 인장저항력이 제삼의 요소로 추가 고려되어야 한다(그림 2).

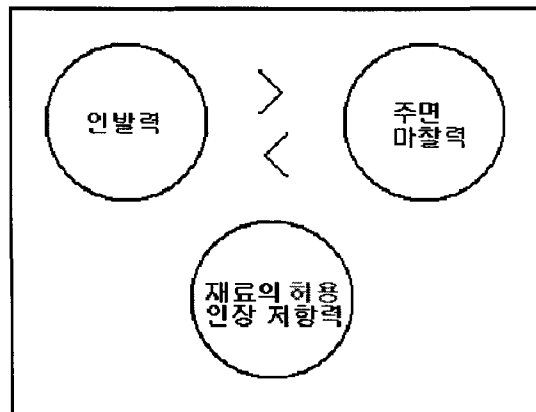


그림 2. 말뚝 솟아오름 발생 조건

인발력, 주변마찰력 및 말뚝재료의 허용 인장저항력, 이 3가지 요소의 크기에 따라 발생하는 현상이 각각 상이하다.

① 인발력 > 주변마찰력 > 재료의 허용 인장저항력

이 경우에는 말뚝 솟아오름이 발생하기 전에 말뚝재료의 인장파괴가 발생한다. 일반적으로 국내에서 사용하는 원심력 콘크리트말뚝에서 콘크리트는 단기간의 조건(예를 들면 항타 타격력)에서는 약간의 인장항타응력에 저항할 수 있지만, 말뚝 솟아오름 현상 같은 종류의 인발력에는 저항할 것으로 기대할 수 없으며, 인발력에 저항할 수 있는 부분은 PC강선 밖에는 없다고 보아야 할 것이다. 보통 지반 조건에서 일반적으로 사용하는 A종(프리스트레싱 40kg/cm<sup>2</sup>) PHC말뚝의 경우 재료의 허용인장력은 매우 낮은 수준이다. A종 ø400mm 말뚝의 경우, 허용인장력은 27.4ton, ø500mm의 경우에도 42.2ton에 불과하다. 이보다 인발력이 크면 말뚝의 파손이 발생하며, 이는 구조물 기초로서는 실격을 의미한다.

② 재료의 허용인장력 > 인발력 > 주변마찰력

이 경우에는 말뚝 솟아오름이 발생한다. 말뚝이 솟아오름에 따라 당연히 말뚝 선단부가 관입되었던 위치에는 공간(void)이 형성될 것이다. 일반적으로 이런 경우에는 말뚝을 솟아오른 것보다 깊은 곳까지 재항타(restrike)하는 대책을 시행하면 말뚝 지지력도 문제가 없는 것으로 알려져 있다. 그렇지만 말뚝 선단부 하부에 공간이 형성되는 과정에서 예상치 않은 문제가 발생할 수도 있으며, 이는 relaxation현상으로 발전할 수도 있다.

③ 재료의 허용인장력 > 주변마찰력 > 인발력

이 경우에는 말뚝 솟아오름이 발생하지 않으며 문제될 일이 없다.

④ 주변마찰력 > 인발력 > 재료의 허용 인장저항력

이 경우에는 말뚝 솟아오름은 발생하지 않을 것이다. 하지만 말뚝의 부위별로 말뚝재료의 인장파괴가 발생할 가능성은 배제할 수 없을 것이다. 또는 말뚝의 상향 변위가 발생하지는 않지만 지속적인 인장응력이 가해짐으로써 재료에 피로(fatigue)현상과 유사한 좋지 못한 영향을 줄 수 있는 가능성도 배제할 수 없다.

결국 문제가 되는 경우는 ①과 ② 및 ④의 세 가지 경우일 것이다. 논리적으로 이러한 구분을 할 수는 있지만, 실제 현장에서 벌어지는 무리말뚝 시공으로 인하여 나타나는 현상을 명백하게 판단하는 것은 매우 난해한 주제이다. 왜냐하면 그러한 사태가 발생할 경우, 충분한 원인 규명을 실시해야함에도 불구하고, 공기(工期)의 압박 또는 기타 다른 이유로 인하여, 제대로 된 규명이 이루어지지 못하는 경우가 비일비재하기 때문이다.

실제로 본 논문에 소개하는 사례들도, 충분한 원인규명이 되지 못하였다는 결함이 있다. 분명 문제점이 노출되었음에도 불구하고 안전율(安全率)이라는 것에 기대를 한다든지, 아니면 다른 이유로 충분한 조사가 이루어지지 못하였다. 따라서 이 내용만으로는 논문의 완성도 충족요건을 만족하지 못하는 상태에서 종료되었지만, 이 주제가 상부 구조물에 미치는 영향이 지대하기 때문에, 충분하지 못한 상태임에도 불구하고 소개하기로 하였다. 이를 계기로 무리말뚝 시공으로 인한 문제점이 본격적으로 기술자들의 관심을 얻고, 체계적으로 연구, 규명될 수 있는 계기가 될 수 있다면 자료를 발표하는 소기의 목적은 달성된 것으로 기대한다.

### 3. 말뚝재료 파손 사례

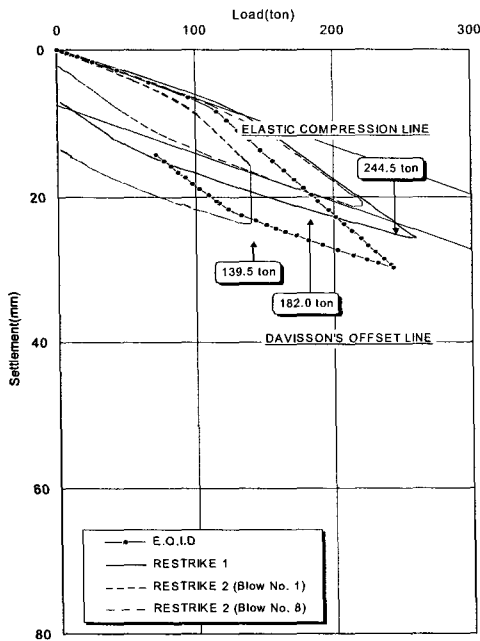


그림 3. 말뚝지지력의 변화

이러한 현상은 말뚝 솟아오름으로 인하여 말뚝재료에 인장파괴(끊어짐)가 발생하였고, 이에 따라 말뚝이 상·하로 분리되었음을 유추하게 해주는 증거이다. 이후 8회의 타격을 가함에 따라 끊어진 상태가 일시적으로 봉합되었다고 추측해 볼 수 있다. 그림 4 : 이러한 추측을 더욱 분명하게 확인해 주는 시험 결과이다.

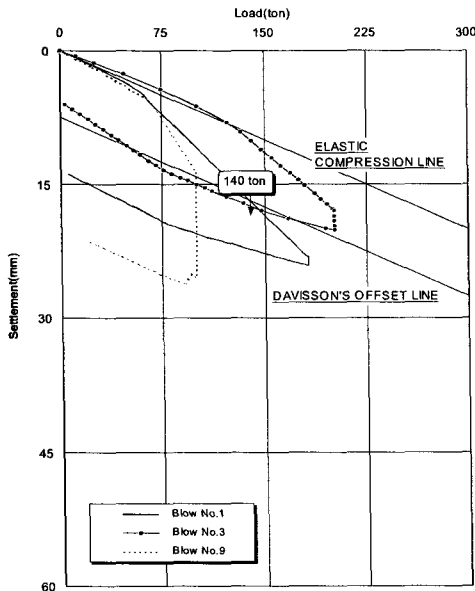


그림 4. 말뚝지지력의 변화

이러한 경우는 국내에서도 몇 차례 소개된 바 있다. 그림 3은  $\phi 450\text{mm}$  PHC말뚝을 14m까지 선굴착을 시행한 다음 약 30m 정도까지는 항타공법으로 시공한 말뚝에 대한 내용이다(이명환 등, 1998). 말뚝을 항타할 때 실시한 동재하시험 결과는 Davisson의 판정기준 지지력이 182.0ton이었으며, 1일이 경과하여 시행한 재항타 동재하시험에서는 244.5ton으로 약 34% 정도 지지력이 증가하였다. 그 후 무리말뚝 시공이 이루어졌는데, 그 과정에서 시험말뚝에는 15mm 솟아오름이 발생하였다. 이 공사에서 말뚝간격은 말뚝직경의 2.5배였다.

말뚝 솟아오름이 발생한 다음, 항타 시점으로부터는 4일이 경과한 상태에서 시행한 재항타동재하시험 결과는, 시험을 위한 첫 타격(Blow No. 1)에서는 Davisson의 판정기준지지력이 139.5ton으로 크게 감소하였다. 이후 말뚝에 몇 차례의 타격을 가하였는데, 8회 타격을 가한 상태에서는 원래 상태(1일 경과한 상태)에 근접하는 지지력을 나타내 주었다.

이 자료는 무리말뚝 시공으로 솟아오름이 발생한 말뚝에서 실시한 동재하시험 결과인데, 시험을 위한 첫 번째 타격시 Davisson의 판정 기준 지지력은 140ton이었지만 건전도지수(BTA)가 10으로 완전 파손된 상태를 나타내 주었다. 3번째 타격에서는 지지력 값이 201ton이 되었으며 일시적으로 건전도지수도 양호한 것으로 나타났다. 그러나 9번째 타격에서는 지지력은 106, 건전도 지수는 30으로 다시 낮아짐을 나타내 준다.

이 사례에서 나타나는 바와 같이 무리말뚝 시공으로 말뚝에 가해지는 인발력이 말뚝재료가 허용하는 인장저항력보다 큰 경우에는 말뚝이 절단되는 사고가 발생한다. 이러한 동재하시험 결과를 토대로 한 유추는 그 후 해당 말뚝에 폐쇄회로TV 카메라를 삽입하고 촬영을 한 내용에서도 확인되었다. 이 사례로부터 무리말뚝 시공으로 말뚝 솟아오름이 발생하는 경우, 종래 믿어왔듯이 단순한 재항타를 실시하는 대안은 자칫 말뚝재료의 완전 파쇄를 유발할 수 있으며, 따라서 방지되어야 함을 알 수 있었다.

아울러 이러한 무리말뚝 시공으로 인한 문제점에서는 신뢰할 수 있는 동재하시험이 필수적이라는 것도 확인할 수 있었다.

#### 4. 지반조건의 열화(劣化) 사례

이런 경우는 이전에도 많이 발생하였을 것으로 추측된다. 실제로 무리말뚝 시공으로 인하여 말뚝 솟아오름이 발생하는 경우의 대안, 예를 들면 5mm이상의 솟아오름이 발생하면 재항타를 실시하도록 한다는 기준은, 강말뚝의 경우로 보자면 큰 무리가 없다. 강말뚝의 경우 인장저항력이 크기 때문에 무리말뚝 시공으로 인하여 재료손상이 발생할 가능성은 거의 없다고 보아도 좋을 것이다. 그러기에 종래 강말뚝을 주로 사용하는 발주자가 적용하였던, 무리말뚝 시공으로 비롯하는 문제에 대해서는 단순 재항타 대책을 적용하여도 큰 문제가 없었던 것이 아닐까 추측되는 것이다. 그러나 최근의 한 사례에서 나타난 현상을 보자면, 이러한 조건의 경우에도 단순 재항타로 모든 문제점이 해결되지 못할 수도 있다는 것을 알게 되었다.

실제로 이러한 상황이 발생하였던 사례를 소개하기로 한다. 그림 5와 같은 지반조건에  $\phi 400\text{mm}$ 의 PHC말뚝을 직항타공법으로 시공하는 공사에서 발생한 예이다.

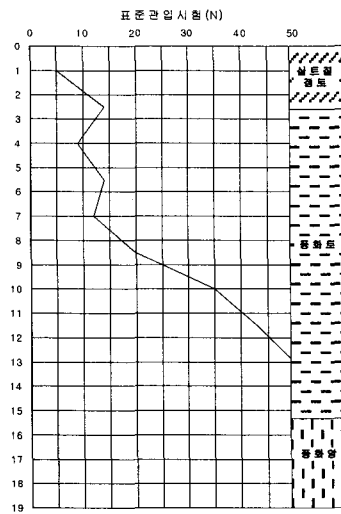


그림 5. 지반조건

이 공사에서는 말뚝의 설계하중을 결정하기 위하여 시험시공을 실시하였다. 시험말뚝은 램중량이 7ton인 유압해머를 사용하여 N값이 50인 지지층까지 직항타하여 관입시켰다. 시험시공시 동재하시험(EOID, end of initial driving)을 실시하였으며, N값이 50인 지지층까지 말뚝을 관입시킨 말뚝담게 비교적 양호한 지지력을 얻을 수 있었다. 최종 설계하중은 시간경과효과를 감안하여 결정하기로 하였기 때문에 항타 후 1일이 경과한 시점에 재항타 동재하시험(Restrike)을 실시하였다. 또한 동재하시험을 보완하기 위하여 정재하시험도 실시하기로 하고, 정재하시험 실시를 위하여 시험말뚝 주위로 6개의 반력말뚝을 역시 항타공법으로 시공하였다.

반력말뚝을 시공하는 과정에서 시험말뚝이 8mm 솟아오름이 발생한 것을 발견하였다. 당연히 그 상태에서 재항타 동재하시험을 실시하여 지지력을 측정하여야 했지만, 그 상태에서는 동재하시험을 실시하지 않았으며, 시험말뚝을 원래 관입된 깊이보다 22mm 더 항타 관입시킨 상태에서 동재하시험을 실시하였다. 여기에 대해서는 별도의 논문에서 그렇게 조사가 진행된 과정의 개요를 설명하였으며, 본 논문에서는 이를 생략하였다.

이러한 조건으로 재항타 동재하시험을 실시한 결과를 분석한 내용에 의하면 주변마찰력은 약간 증가하였으나, 선단지지력은 약간 감소한 것으로 분석되었다. 그렇지만 정작 문제는 항타 후 2일이 경과한 시점에 실시한 정재하시험으로 표면화되었다. 시험말뚝은 153ton의 재하하중에서 전침하량이 96mm, 순침하량도 85mm가 되는 문자 그대로의 극한과파가 확인되었다. 이 내용은 그림 6에 나타내었다.

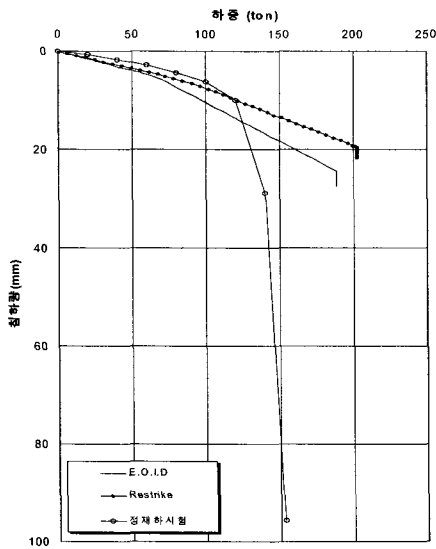


그림 6. 재하시험 결과의 비교

이 사례의 경우, 발생한 문제점 규명을 위하여 만족할만한 조사가 시행되지 못하였다. 따라서 저자들이 서술하는 내용들은 상당부분 추측일 수 있다. 그렇지만, 이미 반력말뚝을 시공할 당시 솟아오름이 발생한 그 상태에서는 말뚝 지지력이 항타시보다 감소한 것은 분명하다. 더구나 이 문제의 심각성을 더해 주는 부분은 말뚝이 솟아오른 것보다 더 깊은 곳까지 추가 항타를 실시하였음에도 불구하고 그림 6에 나타난 것처럼, 그 상태에서도 분명한 relaxation이 나타났다는 점이다. 이 현상에 대해 다음과 같은 추론을 해 보았다(그림 7 참조).

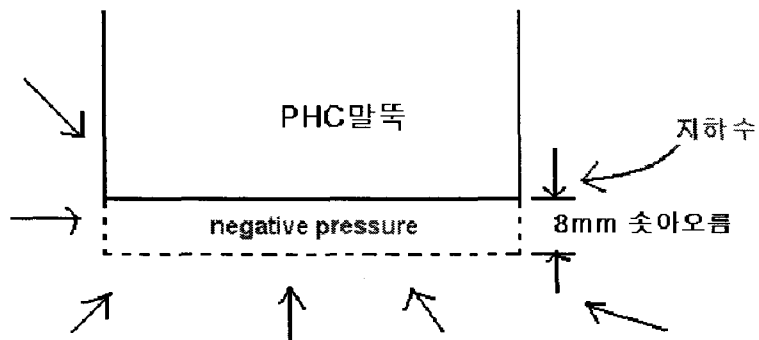


그림 7. relaxation 발생원인 추정

《무리말뚝을 항타함으로써 시험말뚝의 솟아오름이 발생하였다. 말뚝이 8.0mm 솟아오름에 따라 말뚝 선단부 하부에는 공간이 형성되는데, 솟아오름의 영향으로 이 공간에는 부압(負壓, negative pressure)이 형성될 수 있다. 부압이 형성됨에 따라 말뚝 주위 지하수계(地下水界)에 영향이 확산되고, 그 공간으로 지하수 유입이 급격히 진행된다. 급격한 지하수 유입으로 말뚝 선단부 하부 지반조건은 매우 심한 정도로 열화(劣化)하며, 그 결과 선단지지력이 감소한다.》 이 추론이 정당한 것인지 그렇지 못한 것인지는, 현재의 조사 내용만으로는 알 수가 없다. 하지만 유감스럽게도 더 이상의 조사는 시행되지 못하였다.

## 5. 말뚝재료의 열화(劣化) 사례

이 사례는 대규모 건축물 기초에서 조사된 것이다. 대표적인 지반조건은 그림 8에 나타내었다.  $\phi 600$  mm의 PHC말뚝을 말뚝직경의 2.5배 간격으로 배치한 상태에서 램 중량이 10ton인 유압해머를 사용하여 직항타 공법으로 말뚝을 시공하였다. 말뚝의 설계하중은 위치에 따라 일정하지 않으며 90~110ton 정도였다. 이처럼 무리말뚝을 촘촘하게 시공하는 과정에서 말뚝 주변 지반의 용기가 발견되었다. 이 공사에서는 동재하시험을 실시한 말뚝에 대하여 7일이 경과한 시점에 실시한 정재하시험 결과를 비교하는 과정에서 시간이 경과함에 따라 말뚝의 지지력이 감소하는 현상(relaxation)이 발생한다는 문제점이 제기되어 조사를 시작하게 되었다. 그렇지만 이러한 분석은 사실상 동재하시험이 적절하지 못한 상태에서 시행되고, 분석된 때문인 것으로 밝혀졌으며, 여기에 대해서는 별도의 논문에서 설명하기로 한다. 이 현상을 조사하기 위하여 현장 시험시공을 실시하였다.

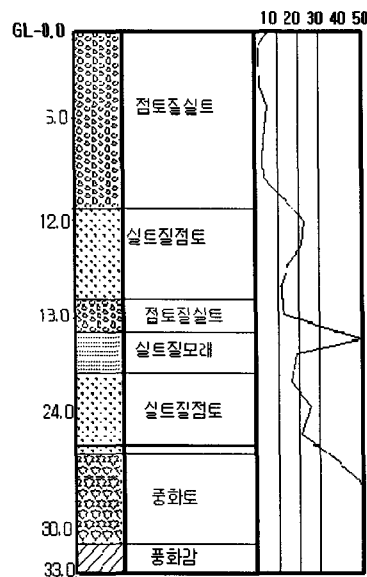


그림 8. 지반조건

그림 8과 같은 지반조건에 설계된 내용과 같이 시험말뚝들을 시공하였다. 시험시공에서는 무리말뚝 시공으로 인한 영향을 보기 위하여 무리말뚝 조건이 만족되도록 여러 개의 말뚝들을 시공하였다(그림 9 참조). 시험말뚝들을 시공한 다음 다른 말뚝들을 시공하는 과정에서 시험말뚝들에는 대략 10mm 정도의 말뚝 솟아오름이 발생하였다. 말뚝들을 시공하는 당시에는 항타시 동재하시험(EOID)을 실시하였고, 7일이 경과한 시점에 재항타 동재하시험(Restrike)을 실시하였다. 7일이 경과하는 동안 말뚝의 지지력 감소(relaxation)가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

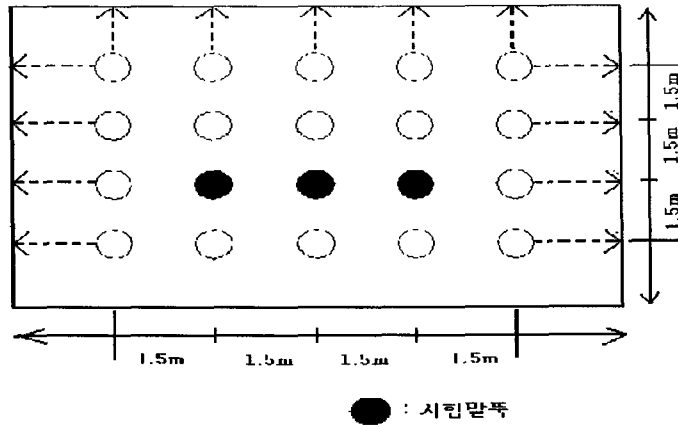


그림 9. 시험말뚝 배치도

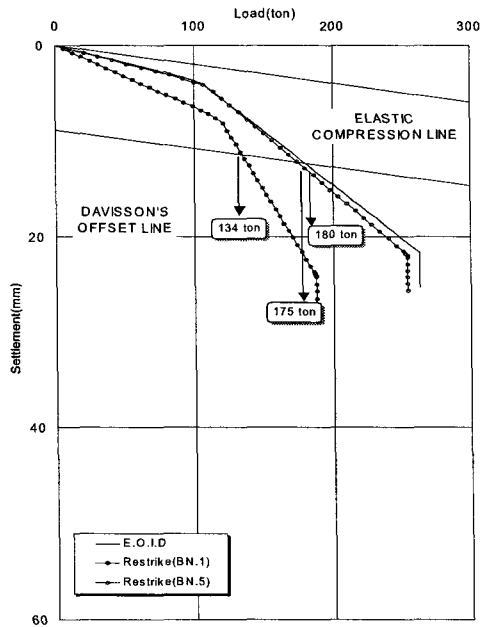


그림 10. 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화

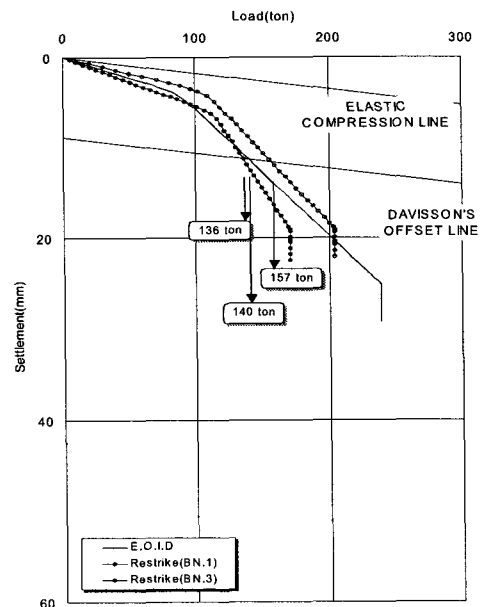


그림 11. 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화

그림 10의 내용을 보면, 항타시 지지력은 Davisson의 기준으로 180ton이었지만, 7일 경과 후 재항타 시험에 의한 지지력은, 첫 번째 타격(BN.1)에서는 134ton으로 크게 감소하였다. 시험을 위하여 타격을 계속한 결과, 추가 관입으로 5번째 타격(BN.5)에서는 175ton으로 지지력이 다시 회복하고 있음을 알 수 있다. 그림 11은 약간 상이한 지지력 변화를 나타내 준다. 항타시 Davisson 기준으로 140ton이었으나, 7일이 경과한 다음 첫 번째 타격(BN.1)에서는 136ton으로 약간 감소하였고, 타격(BN.3)에서는 157ton으로 오히려 지지력이 증가한 것을 나타내 준다. 이 시험결과, 하중-침하량 관계에서 흥미로운 점은 항타시보다 주변마찰력이 약간 증가한 것을 알 수 있었는데, 이는 전형적인 set up현상을 나타내 준다. 그렇지만 선단지지력은 감소하였다는 것을 알 수 있으며, 전형적인 relaxation의 예로 볼 수 있다.

이러한 말뚝 지지력 감소는 새삼스러운 사건이 아니다. 여기서 중요한 사건은 7일이 경과하는 사이에 말뚝 재질에 심각한 변화가 발생하였다는 점이다. PHC말뚝은 KS규격에 의거, 콘크리트의 압축강도가 800kg/cm<sup>2</sup> 이상이어야 한다. 지금까지의 국내 경험에 의하면 콘크리트의 탄성계수 E는 400,000kg/cm<sup>2</sup> 정도이며, 거기에 따라 동재하시험에서 적용하는 응력파의 속도(wave speed)는 4,000m/sec를 적용하는



데 문제가 있었던 경우는 거의 경험하지 못하였다. 그런데 이 경우의 동재하시험을 CAPWAP방법으로 분석하는 과정에서, 예상하지 못하였던 어려움이 발생하였다. 분석의 어려움의 원인을 추적해 본 결과, PHC말뚝재료의 응력파의 속도가 표준값보다 매우 큰 폭으로 감소하였다는 것을 발견하게 되었다. 표 1은 본 사례의 현장의 PHC말뚝의 응력파의 속도 측정결과이다. 공교롭게도 제조업체별로 서로 상이한 결과가 얻어졌다. 공통적인 현상으로는 항타시 말뚝재료의 응력파의 속도보다 무리말뚝으로 시공한 다음 재항타시 응력파의 속도가 감소하는 현상을 확인할 수 있었다.

표 1. 응력파의 속도 측정결과

번호	응력파의 속도(m/sec)		비고
	EOID	Restrike	
1	3,900	3,800	A회사 제품
2	4,000	3,800	A회사 제품
3	4,000	3,800	A회사 제품
4	3,550	3,400	기타 제품
5	3,800	3,650	기타 제품
6	3,600	3,450	기타 제품

이에 현장에 반입된, 아직 항타를 실시하지 않은 말뚝들에 대하여 응력파의 속도를 측정해 본 결과, 일부 말뚝들의 응력파의 속도가 표준값 4,000m/sec에 못 미치는 것을 확인할 수 있었다.

이 사례 역시 충분한 원인규명이 이루어지지 못하였다. 그렇지만 말뚝재료의 응력파의 속도가 무리말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름을 겪으면서 감소하는 현상은 분명한 것으로 판단된다. 앞의 그림 6의 사례에서도 이러한 현상이 나타났지만, 본 논문에서는 설명하지 않았다.

이러한 현상은 아직까지 충분한 조사가 시행되지 못하였다. 그렇지만 이런 현상들이 구조물의 안전에 미칠 수 있는 영향은 실로 심각하다고 판단된다. 다만 현재의 상황에서는 무리말뚝 시공으로 말뚝 솟아오름이 발생하는 과정에서의 말뚝재료 인장이 말뚝의 파손까지 유발하지 않은 경우에도 이러한 재료의 열화현상을 유발하였으며, 그것이 응력파의 속도 저감으로 나타난 것으로 유추할 수 있을 뿐이다.

## 6. 맺는 말

무리말뚝 시공으로 인하여 말뚝 솟아오름이 발생한다는 주제는 이미 오래 전부터 알려진 사실이다. 그렇지만 그런 사태에 대해서는 《말뚝 솟아오름이 5mm를 초과하는 경우, 원래 관입깊이까지 말뚝을 재항타한다》는, 다소 막연한 대책이 있었을 뿐이다. 이 같은 대책은 말뚝재료가 허용하는 인장 저항력이 큰 말뚝일 경우에는 큰 문제가 없을 것으로 여겨져 온 것도 사실이다.

물론 무리말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름의 원인인 인발력이 말뚝재료가 허용하는 저항력보다 큰 경우에는 말뚝재료 파손이 발생하기 때문에 정밀한 동재하시험을 실시하고, 적절한 대책을 강구해야 한다는 것도 그리 잘 알려져 있지는 못한 상태이다. 하지만 본 논문에서 보고하는 것과 같은 사례는 저자들이 과문(寡聞)한 탓인지는 모르겠으나, 아직까지 유사한 사례를 발견하지 못하였다. 그렇지만 이 사례가 시사해 주는 바는 실로 중요하다고 하지 않을 수 없다. 그렇지만 그러한 현상이 나타나는 분명한 원인규명은 아직까지 시행되지 못한 아쉬움이 있다. 향후 보다 정밀한 연구가 요구된다 할 수 있겠다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(2003), “구조물기초설계기준 해설”, pp27~pp281
2. 이명환, 홍현성, 조찬환, 김성희, 전영석.,(1998) “균말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아 오름 발생사례”, 한국지반공학회 봄 학술 발표회 논문집, pp173~pp178