

항타말뚝의 시공관리방안

(A proposal for an appropriate quality control of driven piles)

이명환(Lee, M. W.)
파일테크

요 약

(ABSTRACT)

Precast pile driving has been regarded as the most desirable way of installing deep foundations among various techniques available in Korea. The bearing capacity of the driven pile is known to be influenced by many factors such as geotechnical characteristics of the site, piling equipment conditions, pile drivability, elapsed time after driving, etc. Hence in order to fulfill the design requirement, an appropriate quality control scheme is a must. However, in Korea, irrational pile driving guidelines based on outdated pile driving formulae are still prevailing. In this paper, a rational proposal is presented. The proposed quality control scheme considers pile drivability, time effect, monitoring of pile driving, pile loading test, etc.

1. 서론

근래에 들어 말뚝의 항타로 인한 지반진동, 소음 등의 문제가 말뚝공법 선정에 결정적인 영향을 미치는 사례가 증가함에 따라 항타공법 적용은 점차 감소하고 있다.

그러나 시공되는 말뚝의 지지력 측면과 경제성을 고려할 때, 아직까지도 항타말뚝은 주변여건이 허락할 경우 가장 확실하고 경제적인 깊은 기초 공법이라는 데는 이의가 없는 실정이다.

따라서 공익성이 중요시 되는 기반시설물 기초와 신개발지에서는 아직도 많은 물량의 말뚝이 항타 시공되고 있다. 예를들면 고속철도공사, 신공항 건설공사, 대규모 임해 공업단지에서의 공장 기초, 신도시에서의 고층주택공사 등에서의 깊은 기초공사는 대부분 항타공법이 적용되고 있다.

항타공법으로 시공되는 말뚝의 지지력 연구는 토질·기초 공학에서 가장 오랜 역사를 갖고 있는 분야중 하나이며, 그간 수많은 연구가 수행되어 왔다. 이러한 연구는 크게 나누어 토질역학 이론을 바탕으로 한 정역학적 말뚝지지력 연구와 말뚝을 항타할 때 항타에너지와 말뚝의 지반내 관입 양상을 토대로 한 동역학적 말뚝지지력 연구로 크게 대별할 수 있다.

이와 같은 오랜기간 동안의 연구 성과는 항타 시공된 말뚝의 지지력에 대한 이해를 증진시키는 데 큰 도움이 된 것은 사실이다. 그러나 현재까지 밝혀진 항타 말뚝 지지력의 실상은 지반조건, 말뚝재료조건 및 항타장비조건외의 복합적인 결과에 따라 결정되며 각 조건들은 다시 수 많은 영향 요소들에 따라 변화하는 것으로 밝혀지고 있다.

정역학적 말뚝지지력은 참고문헌⁽¹⁾에 설명한 바와 같이 종래의 소성이론 해석에 근거하여 흙의 내부마찰각(ϕ')만의 함수로 표시되던 단순한 개념보다는 지반의 압축특성이나 지중응력 크기에 따

른 내부마찰각의 변화가 중대한 영향을 갖는 것으로 해석되는 공동확장이론 적용이 더욱 타당한 것으로 발전되었다.

동역학적 말뚝지지력 분야에서도 종래의 최종타격당 관입량, 리바운드 값 및 겉보기 타격에너지의 단순한 조합이라는 개념에서 말뚝의 항타시공 관입성(drivability), 말뚝에 실제로 전달되는 타격에너지 개념이 더욱 중요한 입력 변수로 취급되게 되었다.

특히 최근의 연구결과에 의하면 점성토 지반 뿐만 아니라 사질토 지반에서도 항타말뚝의 지지력은 시간경과에 따라 변화하는 가변적인 값이라는 사실⁽²⁾⁽³⁾이 입증됨에 따라 동역학적 말뚝지지력의 근본 개념을 수정하여야 할 뿐만 아니라 토질역학 이론에 근거한 고전적인 정역학적 지지력 이론까지도 수정되어야 할 필요성을 제기해 준다.

항타말뚝 지지력에 대한 이와 같은 연구성과가 알려지게 됨에 따라 실무에서도 말뚝의 설계 및 품질관리에 대한 기준의 변화가 나타나고 있다. 미국 연방도로국(FHWA)에서는 종래 말뚝시공관리의 기본이었던 항타공식에 의한 지지력 추정이나 품질관리는 적용되지 못하게 하고 파동이론 분석과 동재하시험에 의한 관리를 권장하는 것으로 시방서 내용을 수정하였다⁽⁴⁾.

최근 국내에서도 이와 같은 합리적인 항타말뚝 지지력 관리 방안이 거론되고 있으며 일부 공사에서 채택되기도 하였으나 아직도 대부분의 공사관리는 종래의 항타공식에 의하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 국내 공사에서 아직도 대중을 이루고 있는 항타공식에 의한 말뚝 품질관리의 문제점을 분석해 보고 합리적인 항타말뚝 시공관리 방안을 제안하였다.

2. 항타공식에 의한 말뚝시공관리

말뚝을 항타시공하여 항타된 말뚝이 소정의 지지력을 갖고 있는지를 확인하는 것은 시공된 구조물의 안전확보를 위하여 필수적인 과정이다. 이와 같은 목적을 위하여 일찍부터 개발된 방안은 말뚝을 항타하면서 가해진 타격에 의해 말뚝이 얼마만큼 지반내에 관입되는지를 측정하여 말뚝의 지지력을 추정하는 소위 항타공식을 이용하는 것이다.

현장에서는 말뚝이 소정의 지지력이 발휘할 수 있도록 시공관리하기 위해 항타공식을 이용하여 계산한 타격당 관입량을 말뚝의 종류(강관 또는 콘크리트 말뚝) 및 규격(직경 및 길이)과 항타기의 종류(디젤 및 유압해머, 램의 무게 등)별로 관리 기준치로써 제시하고 있는 경우도 있다.

항타공식에 의한 말뚝 품질관리는 현장에서 간단히 적용할 수 있다는 장점이 있지만 기본 가정 및 항타공식의 신뢰도, 항타기 에너지 효율, 가정치의 입력 등에 의문점이 있기 때문에 확인 시험 없이 이를 시공관리 기준으로 하는 경우는 문제가 있다.

항타공식(pile driving formula)의 원리는 가해진 에너지(input energy)가 말뚝 선단부 하부의 지반 저항(end bearing resistance)과 말뚝 벽면과 이를 둘러 싸고 있는 주변 지반간의 마찰저항(side friction resistance)의 합으로 저항된다는 개념이다.

현재까지 제안된 1000가지 이상의 항타공식의 원리는 모두 이러한 기본 개념에 입각하여 고안되었으며, 이론적 해석 결과를 실제 말뚝 재하시험 결과와 연계하여 매개변수를 설정하는 과정으로 공식을 완성하고 있다.

항타공식의 신뢰도를 저하시키는 원인은 여러 가지가 있을 수 있다. 그 중에서도 가장 중요한 것은 ① 항타장비의 에너지 효율 문제와 ② 말뚝지지력의 시간경과에 따른 변화를 들 수 있겠다.

항타공식을 적용하여 말뚝의 지지력을 계산할 때 확보할 수 있는 데이터는 가해진 에너지와 관련해서, 램(ram)중량 및 낙하고 자료와 지반의 저항 관련 데이터는 측정된 타격당 관입량(set value)과 리바운드(rebound) 값이다.

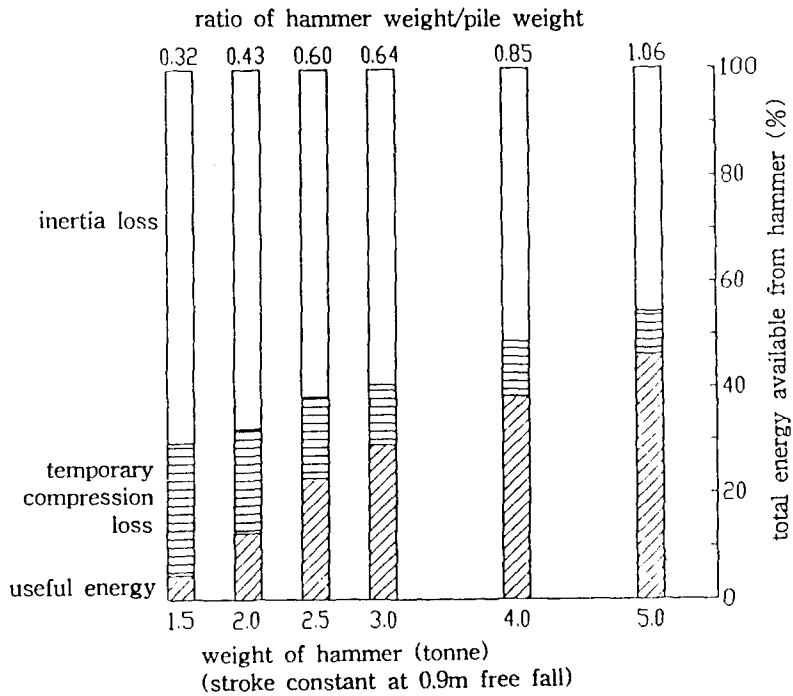
항타공식을 사용하여 말뚝의 지지력을 신빙성있게 계산하기 위해서는 이들 데이터들의 신뢰도가 확보되어야 한다. 그러나 실제로 최근 이들 데이터의 신뢰도에 대한 연구가 수행된 결과에 의하면 그 신뢰도는 극히 낮은 것으로 밝혀지고 있다.

2.1 항타장비의 에너지 효율문제

말뚝을 관입시키기 위해 가해진 에너지 부분에 대하여 수행된 연구결과에 의하면 실제로 말뚝에 전달되는 항타에너지는 종래의 항타공식에서 가정하고 있는 단순한 공식들과는 크게 상이하다. 일반적으로 항타공식에서 채택하고 있는 에너지 개념은 [램중량(w) × 낙하고(h) × 해머의 효율(e_h)] 의 비교적 단순한 값으로 가정하고 있다. 이는 중량 w의 램이 높이 h에서 자유낙하하는 에너지에 해머 구조상 불가피한 효율 저하를 감안한 값을 항타에너지로 보는 개념이다.

[그림 1] 은 Packshaw의 연구 결과⁽⁵⁾로 실제로 발생한 에너지중 내부적 손실(inertia loss), 말뚝재료 및 지반의 일시적 압축으로 인한 에너지 손실(temporary compression)과 실제로 말뚝이 지반내에 관입되는데 사용된 유효 에너지(useful energy)의 측정 결과를 나타내 주고 있다. 이 결과에 의하면 가해진 타격에너지중 실제 말뚝의 관입에 사용되는 에너지는(해머중량/말뚝중량) 비율이 높을수록 증가하며, 그 비율이 낮을 경우에는 전체 발생된 에너지중 극히 일부분만이 말뚝의 관입에 사용된 것을 알 수 있다.

[그림 1] 은 자유 낙하하는 드롭해머(drop hammer)에 대하여 연구한 결과이며 실제 말뚝의 항타에 사용되는 디젤해머(diesel hammer) 또는 유압해머(hydraulic hammer)의 경우에는 해머자체의 기계장치와 작동 과정상 발생하는 불가피한 에너지 손실이 추가되어 그 양상이 더욱 복잡하게 된다.

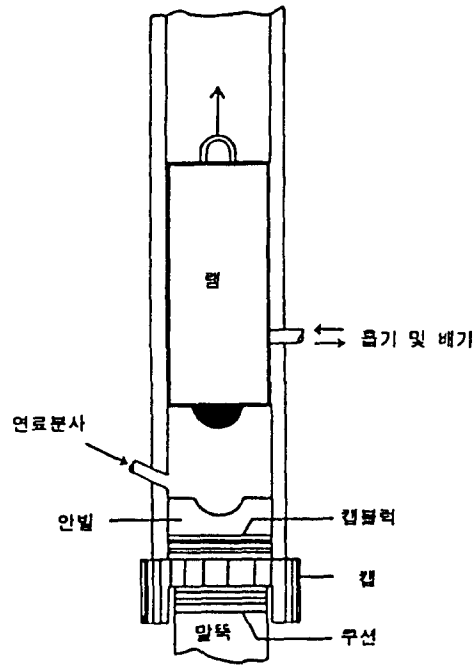


[그림 1] 해머중량, 말뚝중량 변화에 따른 타격에너지의 손실

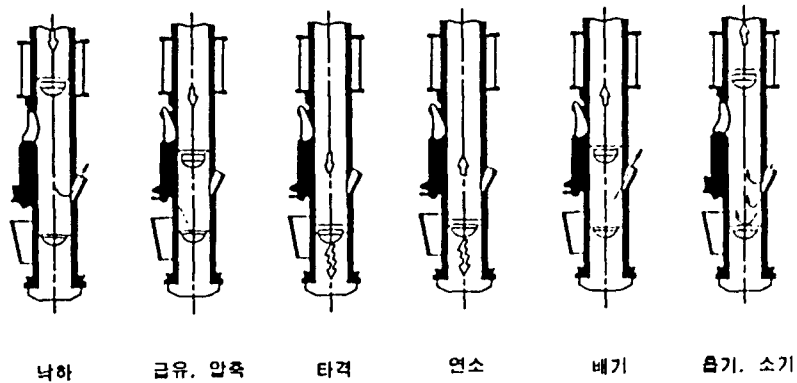
디젤해머의 작동 원리는 [그림 2]에 표시한 바와 같다. 항타 작업을 시작하기 위하여 인위적으로 램을 끌어올린 후 자유낙하 시키며 이 때 해머 실린더 하부에 있는 연료 분사구를 통하여 디젤연료를 분사해 준다. 자유낙하하는 램이 흡기·배기구를 통과하여 아랫쪽으로 접근하면 해머의 실린더 내부는 완전히 밀폐된 공간이 형성되게 된다. 완전히 밀폐된 공간 내부에는 공기와 분사된 디젤 연료로 충전되어 있으며 따라서 낙하하는 램은 [공기 + 디젤연료] 혼합물을 압축하게 된다. 낙하하는 램이 이 압축 [디젤연료 + 공기]의 저항을 극복하고 안빌(anvil)에 도달하면 타격이 발생하게 되고 그 타격은 지반의 저항으로 램이 반발하는 작동의 원동력이 된다. 또한 이 순간 압축된 연료에 점화가 되어 [지반의 반발력 + 연료의 연소폭발력]의 힘으로 램이 튀어 오르게 되는 것이 디젤해머의 작동 원리이다.

디젤해머의 항타는 이와 같은 해머 작동의 각 과정에서의 조건에 따라 항타에너지 효율이 크게 차이를 나타내주게 된다. 램낙하와 연료의 압축과정에서는 실린더의 밀폐 정도에 따라 타격력이 좌우된다. 연료 압축을 양호하게 해주기 위해서는 램과 실린더 내벽간의 공간이 최소화 하여야 하며 이를 위하여 램에는 강제 피스톤링이 장치되어 있다. 이 피스톤 링은 해머의 사용에 따라 마모하며 따라서 피스톤링을 교환한 후 작동시간이 경과함에 따라 밀폐 정도가 변화하게 된다. 이 때 실린더 내부공간의 밀폐 정도에 따라 [디젤연료 + 공기]의 압축저항 값이 차이가 나타나며 따라서 타격에너지의 손실도 차이가 나타나게 된다.

실린더 내벽과 낙하하는 램 외벽간의 마찰력 또한 중요한 에너지 손실 요인이 된다. 또한 연료의 압축 정도에 따라 폭발력에도 차이가 발생하며 램의 반발되는 높이에 영향을 주게되어 결국 에너지 효율에 영향을 미치게 된다.



(a) 구조

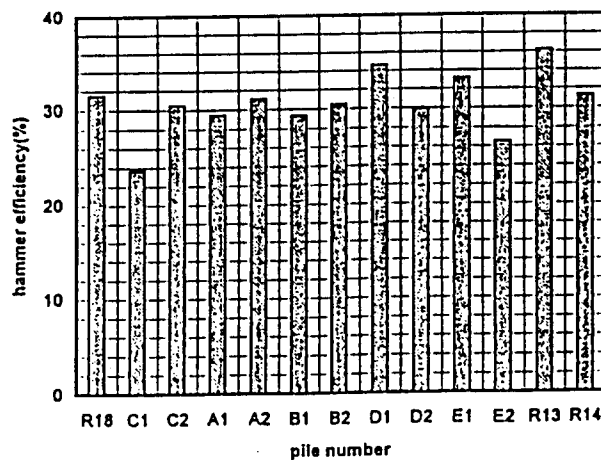


(b) 작동원리

[그림 2] 디젤해머의 구조 및 작동원리

이밖에 연료압축, 연소, 타격 과정에서 해머의 에너지 효율에 영향을 주는 주요 인자로는 연료의 분사량과 온도조건 등이 있다. 여기서 온도조건은 항타작업 초기에는 주로 대기온도에 영향을 받지만 어느정도 항타가 진행된 후에는 연소과정에서 발생하는 폭발열로 인하여 해머자체가 과열되고 이에 따라 냉각수의 과열 및 점화시각의 변화로까지 발전할 수 있다. 특히 점화시각이 해머 과열로 인하여 앞당겨 지면 타격이전에 폭발이 발생할 수 있다. 특히 점화시각이 해머의 과열로 인하여 앞당겨 지면 타격 이전에 폭발이 발생할 수도 있으며 이는 해머의 에너지 효율을 저하시키는 주된 원인이 되기도 한다. 또 해머쿠션, 말뚝쿠션 등도 말뚝에 전달되는 에너지 값에 영향을 미치는 요소로 작용한다.

이와 같은 디젤해머의 작동 특성을 모두 감안한 에너지 효율 값(e_h)을 결정하는 것은 현실적으로 거의 불가능하다. 실제로 디젤해머를 사용하면서 말뚝에 가해진 에너지를 측정된 결과는 이와 같은 설명을 잘 입증해 주고 있다. [그림 3]은 국내에서 연구한 내용으로 동일한 현장내에서 K25 디젤해머를 사용하여 ϕ 400 mm PHC말뚝 및 ϕ 406.4 mm 강관말뚝을 항타하며 측정된 에너지 값을 나타내 주고 있다⁽⁶⁾.



[그림 3] K25디젤해머의 항타에너지 효율

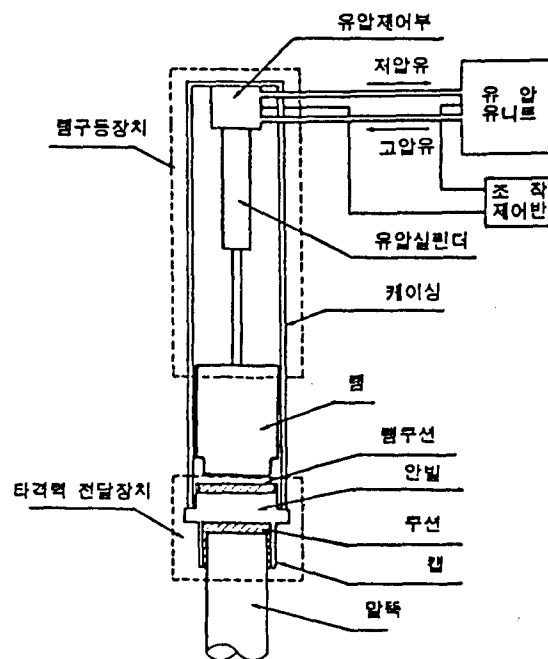
[그림 3]의 측정 결과는 동일지역에서 2일간에 걸쳐 작업하는 과정에서 조사한 내용으로 말뚝 길이는 14 m 정도로 일정하였다. 그러나 항타 순서에 따라 측정된 에너지 효율은 크게 상이함을 알 수 있으며 평균 측정값(30.6 %)을 기준으로 할 때 변화 범위는 ± 20 %정도가 됨을 알 수 있다. 이와 같은 에너지 효율 변화는 주로 대기온도 변화(새벽의 항타와 한낮의 항타시 차이)와 해머의 과열정도 등에 기인한 것으로 판단된다.

디젤해머가 이와 같은 구조상의 기계적 특성으로 인하여 에너지 효율 가변성이 큰데 비하여 유압해머는 비교적 단순한 구조를 갖고 있어 에너지 효율의 변화가 심하지 않은 것으로 알려져 있다.

[그림 4] 는 유압해머 중 가장 간단한 단동식(single acting) 해머의 구조를 나타내 주고 있다. 유압해머에서는 램을 들어올리는데 유압을 사용하기 때문에 기계적 실린더 대신 유압실린더가 사용되며 따라서 램과 실린더의 기계적 마찰은 발생하지 않는다. 또 일정한 유압을 사용하며 일정한 높이를 유지해주기 때문에 낙하고에 대한 불확실성이 배제될 수 있다.

그러나 실제로 유압해머를 사용한 항타에서 에너지를 측정해 본 결과 유압해머의 에너지 효율은 타격력 전달장치의 구조, 그중에서도 특히 램쿠션과 말뚝쿠션에 크게 영향을 받는 것으로 판단되며, 장비의 종류(제작사)에 따라서도 큰 차이가 나타나고 있어 유압해머의 에너지 효율을 획일적으로 규정하는 것은 현실적으로 불가능하였다.

이상에서 설명한 바와 같이 항타공식 적용을 위한 장비의 에너지 효율 문제는 그 값을 특정의 어떤 값으로 확정할 수 없는 것이 현실이다. 즉 항타공식에 의한 말뚝지지력 산정의 기본이 되는 유효에너지 값을 정량적으로 계산에 적용할 수 없기 때문에 이를 특정의 어떤 값으로 가정한 항타공식에 의한 지지력은 현실성을 갖을 수 없다.



[그림 4] 유압해머의 구조

2.2 말뚝지지력의 시간 경과에 따른 변화

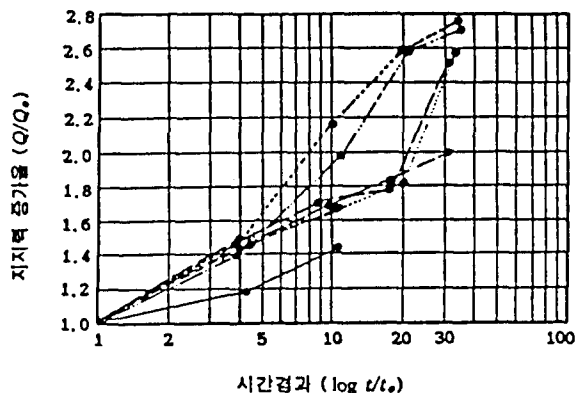
말뚝이 지반내에 항타시공되면 말뚝의 항타관입에 따라 지반은 극심한 변화를 겪게 된다. 지반 변화의 주요내용은 지반응력변화, 간극수압변화, 흩구조변화 등 다양하며 이와같은 변화는 말뚝이 설치된 시점으로부터의 시간 경과에 따라 다시 변화하게 된다.

이에따라 말뚝의 지지력은 말뚝이 설치된 시점으로 부터 경과한 시간에 따라 변화한다. 이와 같은 사실은 일찍부터 알려져 왔으나 이를 실증하기 위해서는 여러가지 지반조건에서, 시간경과에 따라 말뚝지지력을 확인할 수 있어야 한다. 그러나 동일 말뚝에 대하여 연속적으로 시간과 비용이 소요되는 정재하시험을 실시하는 것이 용이하지 않으며, 재하과정에서 항복 또는 극한상태에 도달할 경우의 영향 또한 무시할 수 없는 등의 문제로 이 부분의 실증 연구는 부진한 상태였다. 이에따라 실무에서는 시간 경과에 따른 말뚝지지력 변화를 설계지지력 산정에 고려할 수 없었다.

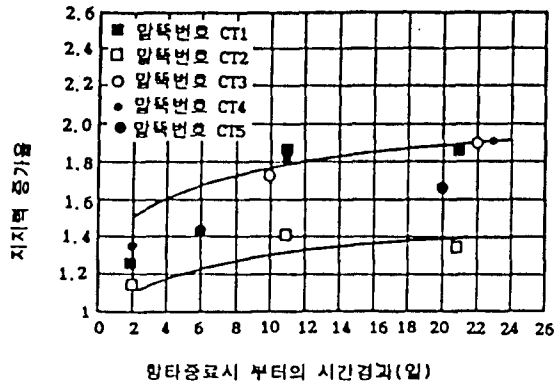
최근의 말뚝동재하시험(Dynamic Pile Loading Testing)과 관련한 측정기술, 해석의 발달은 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화 연구에 결정적인 도구를 제공하여 주었으며, 실증 연구 또한 활발히 수행될 수 있는 계기를 마련하여 주었다.

시간 경과에 따른 말뚝지지력 변화 연구 결과에 의하면 말뚝지지력의 변화폭은 이전에 생각하였던 것보다 훨씬 큰 것으로 나타나고 있으며, 지반조건에 따라서는 말뚝지지력에 영향을 미치는 다른 어떤 요소보다도 중요한 것으로 판단된다.

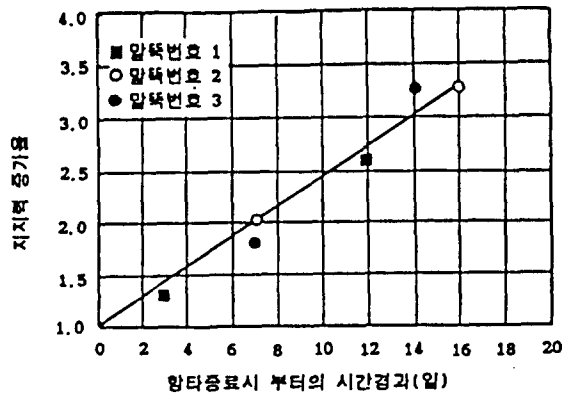
[그림 5] 는 점성토 지반에서의 시간 경과에 따른 말뚝지지력 변화 측정사례이다. 사례에 따라 최장 35일간 3~10배 이상 말뚝지지력이 증가한 것으로 나타나고 있다. [그림 6] 은 포화 사질토 지반에서 측정된 결과로 지지력 증가율은 최장 23일간 1.4~1.9배로 증가하고 있다. [그림 7] 에 나타난 불포화 사질토 지반에서의 시간 경과에 따른 말뚝지지력 증가는 포화 사질토 지반에서 보다 현저하여 최장 16일까지 3배이상 증가한 것으로 나타나고 있다.



[그림 5] 점성토지반에서의 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화



[그림 6] 풍화 사질토지반에서의 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화



[그림 7] 불포화 사질토지반에서의 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화

외국의 시공사례에서 나타난 이러한 말뚝지지력 현상을 국내에서도 규명하기 위하여 대규모 시험공이 실시되었다. 지반조건은 매립토층, 풍화 화강토층, 풍화 화강암층으로 이루어진 지반에 $\phi 406.4 \text{ mm} \times 9 \text{ mm(t)}$ 의 강관말뚝과 $\phi 400 \text{ mm}$ PHC말뚝을 K 25 디젤해머로 항타하였다. 말뚝의 관입깊이는 14 m정도이며 항타시 및 항타로 부터 8일, 15일 및 38일 경과시에 동재하시험을 실시하였다. 항타종료시 실시한 동재하시험 결과는 앞의 [표 1]에 표시하였다.

항타후 8일 및 15일에 실시한 재항타 결과는 [표 2]와 [표 3]에 요약하였다. 항타후 8일의 재항타 결과에 의하면 말뚝지지력은 항타시보다 1.38~2.68배(평균 1.93배) 증가하였으며 이러한 지지력 증가는 주로 말뚝의 주변마찰력 증가에 기인한다.

[표 1] 항타종료시 동재하시험결과와 항타공식에 의한 말뚝지지력 비교

시험일자 : 1994. 8. 28.

PILE		극한지지력(PDA) (ton)			극한지지력(항타공식) (ton)	
NO.	TYPE	주 면	선 단	전 체	HF	ENR
A1	PHC 400	42	68	110	168	193
A2	PHC 400	72	52	124	187	237
B1	PHC 400	147	32	179	262	347
B2	PHC 400	94	35	129	202	221
C1	PHC 400	93	23	116	171	181
C2	PHC 400	113	42	155	212	249
D1	PHC 400	82	62	144	232	318
D2	PHC 400	95	34	129	152	167
E1	PHC 400	61	52	113	202	318
E2	PHC 400	94	41	135	178	198
R13	ST 406.4×9 t	149	36	185	262	383
R14	ST 406.4×9 t	173	39	212	225	299
R18	ST 406.4×9 t	104	69	173	255	393

[표 2] 항타후 8일후에 실시한 재항타 결과

시험일자 : 1994. 9. 5.

PILE		극한지지력 (ton)		
NO.	TYPE	주 면	선 단	전 체
A1	PHC 400	208	38	246
A2	PHC 400	246	35	281
B1	PHC 400	200	47	247
B2	PHC 400	226	46	272
C1	PHC 400	255	56	311
C2	PHC 400	199	46	245
D1	PHC 400	193	73	266
D2	PHC 400	215	47	262
E1	PHC 400	250	37	287
E2	PHC 400	265	18	283
R14	ST 406.4×9 t	314	15	329

[표 3] 항타후 15일후에 실시한 재항타 결과

시험일자 : 1994. 9. 12.

PILE		극한 지지력 (ton)		
NO.	TYPE	주 면	선 단	전 체
A1	PHC 400	222	48	270
A2	PHC 400	256	71	327
B1	PHC 400	225	55	280
B2	PHC 400	250	29	279
C1	PHC 400	176	96	272
C2	PHC 400	271	61	332
D1	PHC 400	294	30	324
D2	PHC 400	204	47	251
E1	PHC 400	260	45	305
E2	PHC 400	258	25	283
R13	ST 406.4×9 t	250	100	350
R14	ST 406.4×9 t	291	50	341

항타후 15일에 실시한 재항타 결과에 의하면 말뚝지지력은 항타시 대비 1.61~2.70배(평균 2.16 배)증가한 것으로 나타나고 있으나, 타격에너지가 충분하지 못하여 만족할 만한 선단지지력이 발휘되지 못한 점을 감안하면 이 보다는 다소 높은 지지력 증가가 나타난 것으로 해석할 수 있다.

이와 같은 말뚝지지력 증가율은 [그림 6] 및 [그림 7] 에 표시한 외국에서의 사질토지반에서 측정된 말뚝지지력 증가율과 거의 일치하는 것을 알 수 있으며 지지력 증가의 대부분이 초기 1주일 정도에 나타난 것으로 판단할 수 있다.

항타후 38일에는 충분한 지지력 유발을 시킬 수 있는 타격에너지로 재항타할 경우 말뚝재질의 파괴응력을 초과하는 문제가 발생하였다. 따라서 항타후 38일에 실시한 재항타는 강관말뚝인 시험말뚝 R13과 R14에 대하여만 실시하였으며 이들 말뚝에 대한 CAPWAP분석은 [표 4] 에 요약하였다.

[표 4] 항타후 38일에 실시한 재항타 결과

PILE		CAPACITY(PDA)			Jc : RMX
No.	TYPE	주 면	선 단	전 체	
R13	ST 406.4 × 9 t	387	26	413	0.00
R14	ST 406.4 × 9 t	331	207	538	0.00

이들 2개의 시험말뚝의 시간 경과에 따른 지지력 변화를 살펴보면 [표 5] 와 같이 요약할 수 있다.

[표 5] 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화

	R13			R14		
	주 면	선 단	전 체	주 면	선 단	전 체
항 타 시	149	36	185	173	39	212
7일	265	18	283	314	15	329
15일	250	100	350	291	50	341
38일	387	26	413	331	207	538

[표 5] 에서 나타난 바와 같이 본건 시험의 경우 말뚝의 지지력에 비하여 시험하는 타격에너지가 충분치 못하여 선단지지력의 규명이 충분치 못하였다. 그러나 본 측정결과 만으로 볼 때 주면마찰력은 항타시 대비 2.6배와 1.91배 증가하였으며 선단지지력의 증가도 나타나고 있음을 알 수 있다.

이상에서 알아본 바와 같이 국내에서 실시한 연구결과에서도 항타 후 시간 경과에 따라 말뚝의 지지력이 크게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 지지력 변화율은 말뚝에 따라 상당히 차이가 있는 것으로 나타나고 있다. 본건 현장외의 타지반조건에서 실시한 유사한 시험에서도 말뚝지지력의 시간 경과에 따른 변화가 조사되었으나, 이들로 부터 일관된 관계식을 도출하기 위해서는 앞으로 많은 연구가 되어야 할 것이다.

3. 합리적인 항타관리방안

앞의 제2장에서 설명한 것처럼 항타공식을 적용하여 말뚝의 지지력을 산정하는 것은 불가능 함을 알 수 있었다. 따라서 현행과 같이 최종관입량 및 리바운드 값만으로 항타말뚝의 품질을 관리하는 것은 심각한 오류를 발생시킬 수 있으며 시정되어야 한다.

항타시공된 말뚝의 지지력을 항타기록에 의하여 추정하는 것은 현재의 기술수준(state-of-the-art)으로는 가능하지 않다. 현재까지 개발된 여러 가지 말뚝지지력 산정방법들은 [지반조건 + 말뚝재료조건 + 항타장비 조건] 의 복합적인 조건들의 종합적인 결과인 말뚝지지력을 합리적으로 규명하기에는 역부족이며 따라서 말뚝지지력은 말뚝재하시험을 통하지 않고는 확신할 수 없는 것이 현실이다.

그러나 현실적으로 시공되는 모든 말뚝에 대하여 말뚝재하시험을 실시할 수는 없다. 현실적으로 가능하면서도 어느 정도의 신뢰도를 확보할 수 있는 방안은 있을 수 있지만 아직까지 시공되는 모든 말뚝의 품질을 만족시킬 수 있는 방안은 존재하지 않는 실정이다.

따라서 외국에서의 항타말뚝에 대한 시공관리 방안들을 참고로 하여 국내에서 적용할 수 있는 항타말뚝 품질관리 방안을 제시하기로 한다.

항타시공되는 말뚝의 지지력은 [지반조건 + 말뚝재료조건 + 항타장비조건] 등에 의한 항타 시공관입성(drivability)에 직접적인 영향을 받는다. 따라서 항타 시공되는 말뚝의 지지력을 유추하기 위해서는 반드시 항타 시공 관입성 분석이 필요하다

항타 시공 관입성 검토는 파동이론을 적용하여 분석할 수 있으며, 파동이론 분석은 WEAP (Wave Equation Analysis of Pile driving) 프로그램을 사용하여 실시한다. WEAP 프로그램은 일반적인 컴퓨터 프로그램으로도 수행할 수 있으나, 이 분야에 오랜 경험과 knowhow를 갖고 있는 미국 GRL사에서 개발한 GRLWEAP 프로그램이 가장 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있으며 또 실무에서 가장 널리 적용되고 있다.

파동이론 분석의 원리는 말뚝을 항타할 때 발생하는 충격파가 유한한 요소로 나누어진 말뚝의 각 요소에 전달되는 과정을 컴퓨터 프로그램으로 해석하는 기법이다. 이 때 말뚝과 접하고 있는 지반에서의 저항을 수치화하여 충격파의 전달 과정을 각 요소마다 시간별로 표시, 변위와 응력을 계산하고 극한지지력에 따르는 최종 항타 관입량까지 계산할 수 있는 수치해석 방법이다. 즉 말뚝을 지반내에 관입하는 전 과정을 컴퓨터에서 재현하는 것이다.

파동이론 분석에 따라서 항타장비의 세부조건, 말뚝의 조건 및 지반조건들이 입력변수로 필요하게 된다. 이와같은 파동이론 분석이 신뢰도를 갖기 위해서는 항타장비의 에너지 효율, 지반의 탄성변형량(quake), 흙의 damping 값, 주면마찰력의 분포 및 전체지지력에 대한 비율 등 경험적인 입력변수 값들이 신뢰성이 있어야 한다.

이와 같은 측면에서 과거 30여년간의 방대한 자료 조사와 경험을 바탕으로한 GRLWEAP 프로그램이 여타 WEAP 프로그램보다 적용성이 높은 것은 당연하다고 할 수 있겠다.

GRLWEAP 프로그램의 해석결과는 극한 지지력, 말뚝에 발생하는 압축항타 응력, 인장응력 및 최종 항타관입량 등으로 표시된다. 이 결과들을 활용하면 항타장비 규격, 적절한 항타시공 관리 기준 및 설계하중의 크기 등을 합리적으로 결정할 수 있다.

국내에서도 GRLWEAP 프로그램을 적용하여 말뚝 해석을 실시한 결과 종래 경험에만 의존하였던 항타장비 선정방식 보다 합리적인 장비를 선정할 수 있었다.

또한 파동이론 분석 결과에 의한 최종 항타 관입량 및 그 때의 말뚝 지지력 계산결과는 말뚝 재하시험 결과와 비교해 볼 때 종래의 항타공식으로 추정한 결과에 비하여 훨씬 양호한 것으로 나타나고 있다.

일부 시공사례 연구에서는 말뚝재하시험 결과와 대비해 볼 때 10 ~ 20 %의 차이를 갖는 우수한 분석결과를 얻을 수 있다.

그러나 파동이론 분석은 근본적으로 지반조사 내역으로 부터 가정된 지반조건과 GRLWEAP프로그램에 내장되어 있는 항타장비 조건을 컴퓨터로 재현(simulate)하여 말뚝의 항타과정을 검토한 것이다. 따라서 파동이론 분석결과가 신빙성을 갖기 위해서는 입력데이터의 신뢰도가 확보되어야 한다.

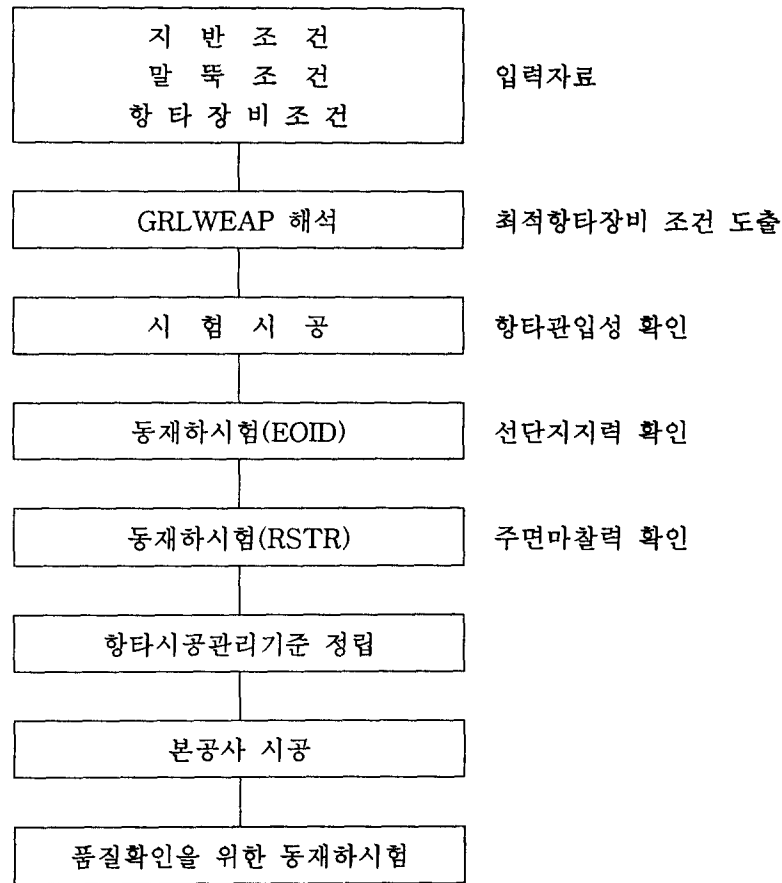
그러나 한정된 위치에서 실시하는 지반조사 내용은 실제 말뚝이 항타되는 지반조건과 차이가 있을 수 있다. 또 GRLWEAP프로그램에 내장되어 있는 항타장비 조건은 수많은 현장 데이터를 취합한 대표값인 바 실제 시공 조건과는 상이할 수 밖에 없다. 특히 항타용 해머의 에너지 효율은 장비의 상태 및 쿠션재의 조건 등에 따라 변화하는 값인 바 실제와는 상이할 수 있다. 여기에 시간 경과에 따른 말뚝지지력 변화는 아직까지 사전에 예측할 수 없는 변수 요인이기 때문에 이론적 분석으로 실제 말뚝의 지지력을 예측하는 데 절대적인 장해요건으로 작용할 수 밖에 없는 실정이다.

파동이론 분석은 이와 같은 이론 해석의 한계를 갖고 있지만, 종래 말뚝직경 및 관입깊이만을 고려하여 경험적 방법으로 실시하던 항타장비 선정과 항타공식을 적용한 말뚝지지력 산정방법보다 월등히 양호한 항타예측을 할 수 있는 장점이 있다. 그렇다고 해서 파동이론 분석만으로 말뚝의 지지력을 산정하는 것은 실제와는 차이가 있을 수 밖에 없는 바, 파동이론 분석의 적용은 초기의 항타장비 선정 과정으로 국한하는 것이 바람직하다.

그리고 실제 말뚝의 설계지지력 확보를 전제로 한 항타시공 관리 기준은 실제 시공과정중 동재하시험을 실시하여 정립하는 것이 필요하다.

항타 시공관리 기준 정립을 위하여 실시하는 동재하시험은 반드시 ① 항타시 시험(EOID, End Of Initial Driving)과 ② 재항타 시험(RSTR, restrike)의 2단계 과정을 거치도록 하여야 한다. 왜냐하면 말뚝을 항타한 후 상당한 시간이 경과한 상태에서 동재하 시험을 실시하면, 많은 경우 시간경과에 따라 증가한 주면마찰력 성분으로 인하여 시험을 위해 가해준 에너지 만으로는 선단지 지지력을 확인할 수 없기 때문이다. 즉 항타시 시험에서 선단지 지지력을 확인하고 일정한 시간(1주일 정도)경과 후 실시하는 재항타 시험으로부터 증가된 주면마찰력을 측정하여 말뚝의 전체지지력은 2단계의 시험 결과를 합성하여 유추하는 방법으로 설계지지력 확보를 위한 항타 시공관리 기준을 정립하는 방안이 바람직하다.

이상의 논의를 요약해 보면 현재의 기술수준에서 가장 바람직한 항타말뚝의 시공관리 방안은 아래와 같이 제안할 수 있겠다.

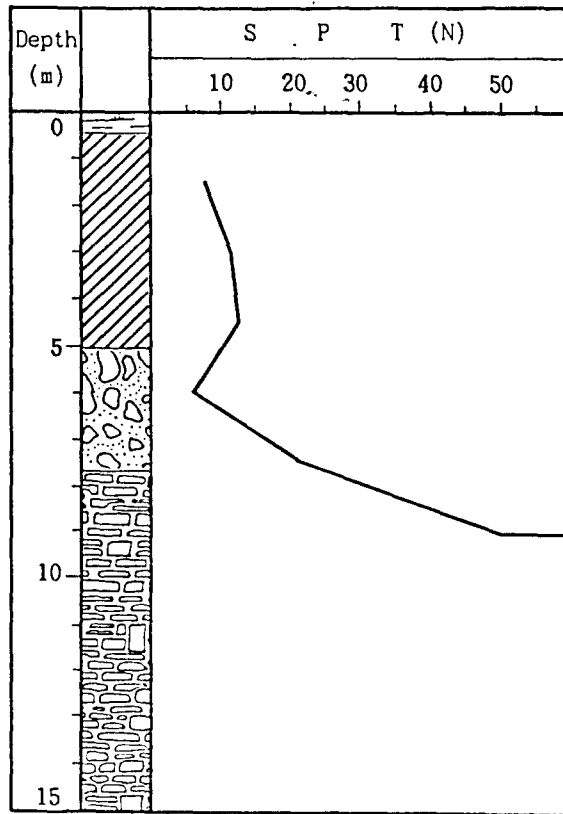


4. 사 례

앞에서 설명한 바와 같이 항타말뚝의 시공에는 말뚝지지력과 관련한 여러가지 영향요소들에 대한 충분한 검토와 그를 바탕으로한 품질관리 계획 수립이 필수적이다. 본 장에서는 국내의 항타말뚝 시공과 관련한 몇가지 사례를 소개함으로써 지금까지 논의된 내용을 보충하기로 하였다.

4.1 사례 I

본건 공사의 지반조건은 [그림 8] 에 나타난 바와 같다. 지표면으로 부터 얇은 매립층이 있고 그 하부에 N값이 10미만인 점성토층이 5 m 깊이까지 발달해 있다. 점성토층의 아랫쪽에는 -7.7 m까지 모래자갈층이 존재하는데 N값은 5 ~ 20정도이다. 모래 자갈층 하부에는 풍화암층이며, N값은 풍화암층 상부(-7.7 m)에서는 20정도이지만 -9.0 m 깊이에서는 N = 50인 조밀한 상태가 된다.



[그림 8] 지반조건 I

본건 공사에는 ϕ 400 mm PC말뚝이 54 ton의 설계하중을 갖는 것으로 설계되었다. 시공장비 선정은 GRLWEAP해석 등 항타시공성에 대한 분석이 없이 과거의 경험에 의존하여 K25 디젤해머가 사용되었다. 여기서 중요한 사항은 현재 국내의 공사현장에서 통용되고 있는 감리업무 수행 지침에 의하면 말뚝의 최종 타격당 관입량 관리는 지반조건, 말뚝종류, 항타장비에 관계없이 2 mm/타격 미만이 되어야 한다는 조건이 적용된 사실이다.

실제 말뚝항타는 최종타격당 관입량만이 품질관리의 기준이 된 상태에서 수행되어 말뚝두부가 심하게 손상된 정도까지 관입되었다. 그러나 현장에서 실시한 정재하시험 및 동재하시험 결과는 설계하중 54 ton에 크게 미달하는 30 ton 정도에 불과하였다.

이에 본건 현장에서 과연 말뚝의 항타과정이 적절하였는지에 대하여 GRLWEAP해석을 실시하여 분석하였다. GRLWEAP 해석결과는 [그림 9]에 표시하였다.

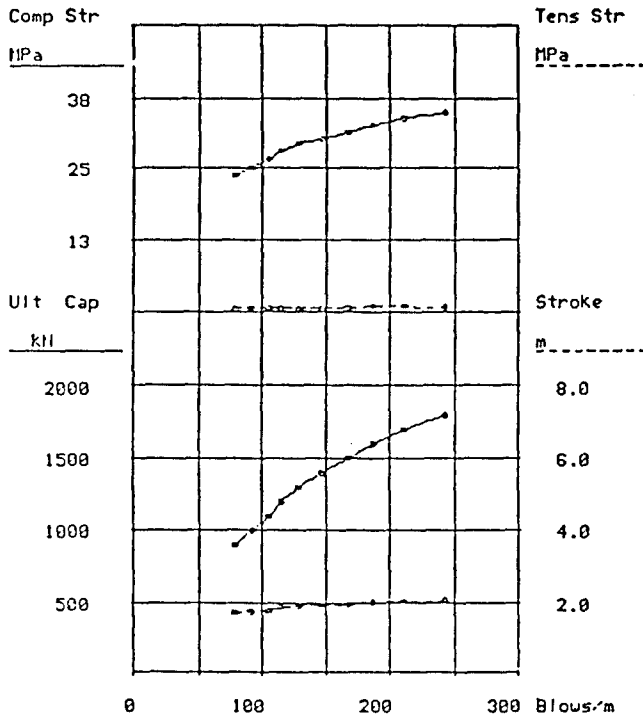
GRLWEAP 해석 결과에 의하면 본건 현장에서 K25 디젤해머를 사용하여 항타할 경우 예상할 수 있는 최대 말뚝지지력은 1300 KN 정도인 것으로 나타나고 있다. 이는 말뚝 재료에 발생하는 최대 항타 압축응력값이 28.990 MPa인 사실로부터 판단 하였으며 그 때의 타격당 관입량은 7.6 mm(BPM=131.7)정도인 것으로 분석되었다.

No.	Ultimate Capacity KN	Max C. Stress MPa	Max T. Stress MPa	Blow Count BPM	Stroke m	Energy KN-m
1	900.0	23.866	.477	79.4	1.71	21.09
2	1000.0	25.100	.741	92.3	1.76	20.50
3	1100.0	26.840	.565	102.9	1.83	20.44
4	1200.0	28.025	.482	116.4	1.86	19.87
5	1300.0	28.990	.467	131.7	1.87	19.27
6	1400.0	30.241	.508	146.6	1.93	19.11
7	1500.0	31.449	.649	165.6	1.96	18.68
8	1600.0	32.634	.905	188.9	1.98	18.23
9	1700.0	33.796	.878	212.2	2.04	18.21
10	1800.0	34.807	.731	242.1	2.07	17.96

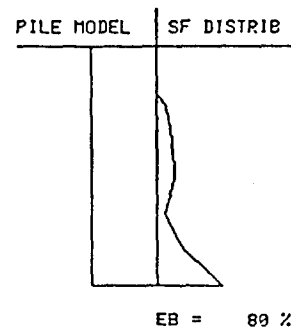
PILETECH Consulting Engineers

GRLWEAP(TM) Version 1.993-1

94 12 23



KOBE K 25
Efficiency 0.720
Helmet 9.33 KN
H Cushion 3062 kN/mm
P Cushion 264 kN/mm
Q = 2.540 3.330 mm
J = 0.160 0.500 s/m
Pile Length 10.00 m
P-Top Area 765.76 cm²



[그림 9] GRLWEAP 해석결과

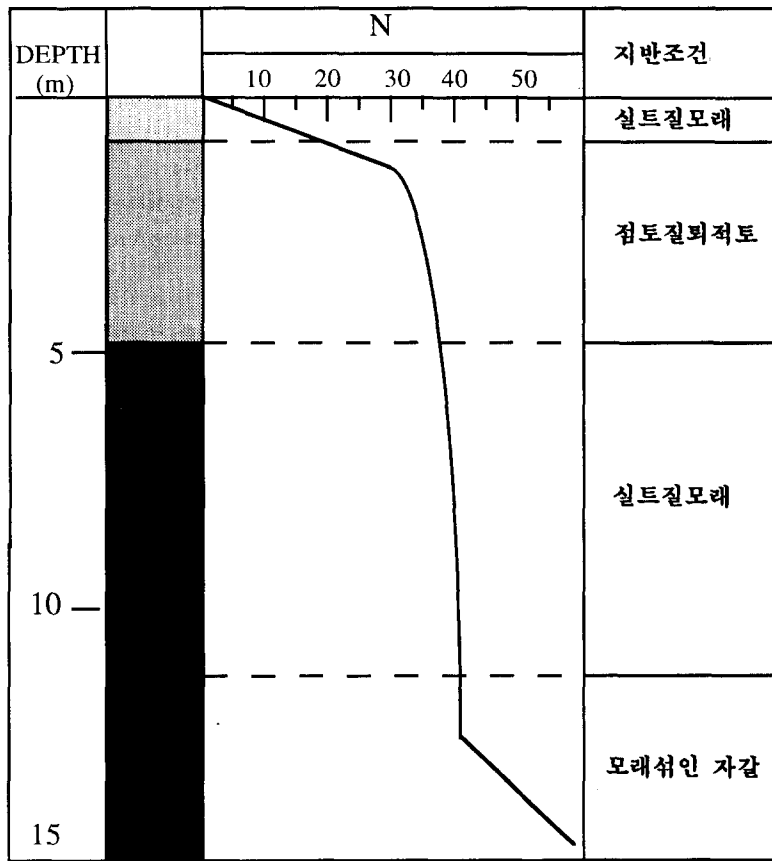
GRLWEAP 분석 결과인 1300KN(132.7 ton)의 극한 지지력과 말뚝재하시험 결과인 30 ton 정도의 허용지지력 간에는 차이가 있으며 이는 주로 PC말뚝의 항타시 쿠션을 사용치 않은 때문으로 판단된다.

본 사례에서 알 수 있는 바와같이 항타분석 없이 과거의 경험만으로 항타장비를 선정하고 더구나 2 mm/타격 이라는 근거없는 항타시공 관리기준을 적용할 경우 심각한 문제점을 야기할 수 있다.

이와 같은 문제점은 본 시공사례에 국한 된 것이 아니라 국내의 경우 이와같은 시공관리가 폭 넓게 만연되어 있다는 점이 더욱 큰 문제점으로 조속히 시정되어야 함을 알 수 있다.

4.2 사례 II

본건 공사는 그림 10과 같은 지반조건에 $\phi 609.6 \text{ mm} \times 12 \text{ mm(t)}$ 강관말뚝을 시공하여 134 ton의 설계하중을 갖는 것으로 설계하였다.



[그림 10] 지반조건(III)

말뚝의 단면적은 225.3 cm^2 이며, 말뚝관입깊이는 15 m정도로 예상된다. 본 공사에서는 과거의 경험을 근거로하여 K 35 디젤해머가 사용되었으나 지지력 미달이 발생하여 K 45를 사용하기도 하였다. 말뚝재하시험 결과는 [표 6] 에 요약하였다.

[표 6] 말뚝재하시험 결과 요약(Ⅲ)

판정기준 \ 시험번호		허 용 지 지 력(ton)		
		1	2	3
극 한 하 중 기 준		86	-	-
항 복 하 중 기 준	S-log t	-	134	168
	log P-log S	82	125	151
	dS/d(log t)-P	88	125	145
순 침 하 량 기 준	0.25 inch	80	134	156
	말뚝직경 × 2.5 %	102	151 ↑	168 ↑
Davisson의 판정법		84	133	154

주 : 1. ↑표시는 시험결과로부터 추정된 값 이상이 되는 경우임

2. 시험번호 1 및 2는 K 35 디젤해머 향타

3. 시험번호 3은 K 45 디젤해머 향타

본 공사에서 실시한 시험번호 1의 말뚝지지력은 설계된 134 ton에 크게 미달되는 것으로 나타났다. 시험번호 1의 말뚝은 K 35디젤해머를 사용하여 정상적인, 최종 타격당 관입량이 2 mm정도인 상태로 향타 되었다.

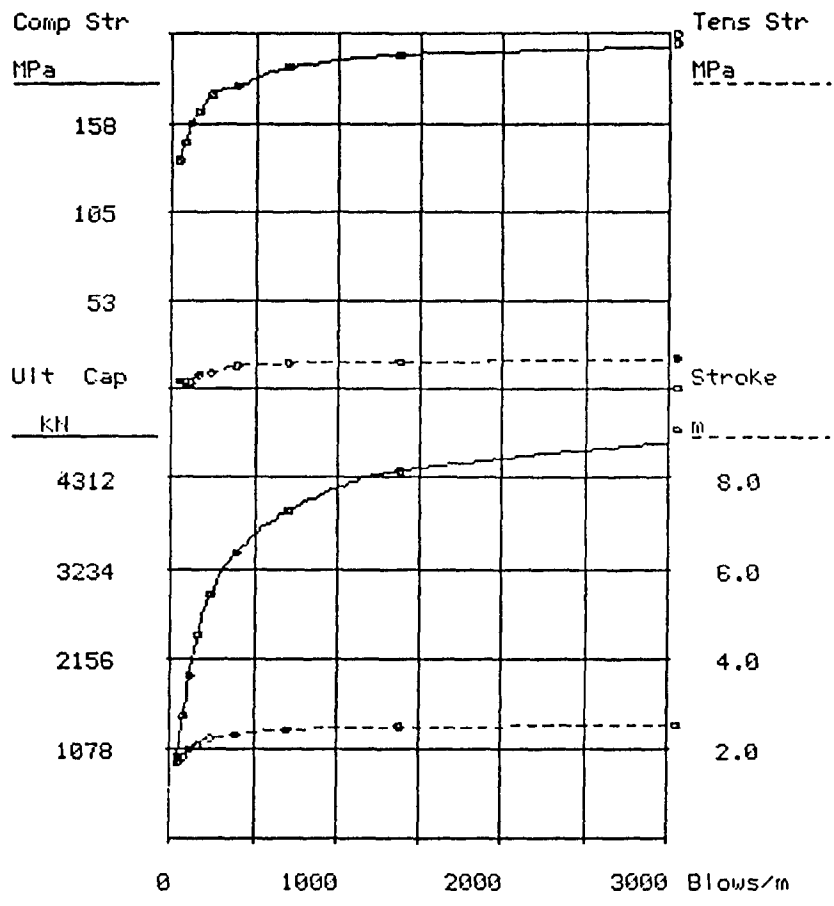
시험번호 2의 말뚝은 K 35디젤해머를 사용하였지만 무리한 정도로 심한 향타를 실시하였으며 말뚝재하시험 결과는 설계하중과 거의 일치하는 허용지지력을 얻을 수 있었다. 그러나, 이 경우 이와같은 시공은 실무적으로 거의 불가능한 정도이며, 따라서 K 45디젤해머를 사용하여 시험번호 3의 말뚝을 시공하였다.

K 45 디젤해머로 향타된 말뚝은 [표 6] 에 나타나고 있는 것처럼 양호한 지지력을 얻을 수 있었다.

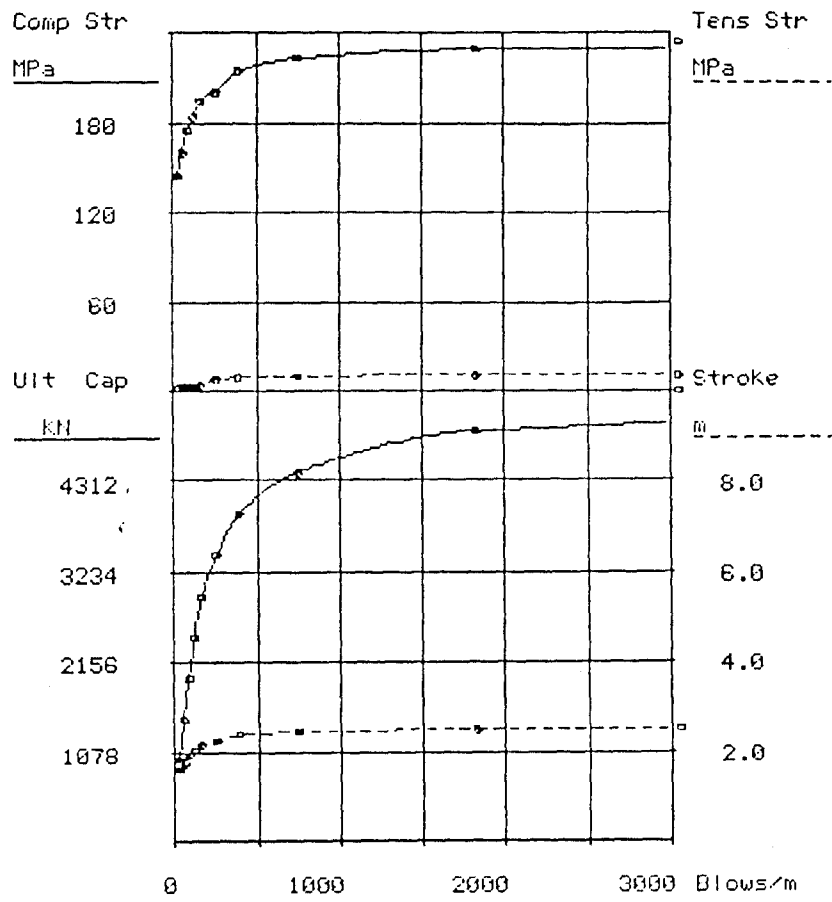
본 공사에서 K 35디젤해머를 사용했을 경우의 WEAP해석은 [그림 11] 과 같다. 정상적인 향타(BPM=394.2)일 경우 예상 극한지지력은 3433.5 KN(350 ton)정도가 되며 따라서 적정설계하중은 117 ton 정도가 되어 재하시험 결과와 거의 일치하고 있다.

그러나 134 ton의 설계하중을 K 35디젤해머로 만족시키기 위해서는 BPM이 702.2이상이 되어야 함을 알 수 있다. 이때 향타로 인한 과응력 문제는 발생하지 않는다.

같은말뚝을 K 45디젤해머로 향타했을 경우는 [그림 12] 와 같은 WEAP해석이 가능하다.



[그림 11] WEAP분석결과 - K-35 디젤해머



[그림 12] WEAP분석결과 - K-45 디젤해머

이 경우에도 과응력은 발생하지 않지만 BPM=392.1(최종타격단 관입량=2.6 mm)에서 요구되는 극한지지력을 얻을 수 있고 따라서 시공상 큰 문제없이 공사를 진행시킬 수 있다.

본 사례에서 나타난 바와 같이 합리적인 항타해석 없이 과거의 경험만을 근거로 하여 항타작업을 할 경우 지지력 미달 등 예상치 못한 문제점에 봉착하여 전체 공사에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

5. 결 론

국내에서 아직도 많이 적용되고 있는 항타공법을 합리적으로 관리하기 위해서는 아래와 같은 사항에 유의하여야 한다.

- (1) 항타장비는 반드시 [지반조건 + 말뚝조건 + 항타장비조건] 을 모두 고려한 파동이론 분석 결과를 참조로 하여 선정한다.
- (2) 항타공식만으로 말뚝의 지지력을 산정하는 것은 불가능하다. 따라서 항타 시공관리 기준 마련을 위해서는 반드시 동재하시험을 실시하여 해당 현장 조건에 맞는 관리 기준을 정립하도록 한다.
- (3) 항타관리기준 설정을 위한 동재하시험은 항타시 시험과 항타후 일정한 시간이 경과한 시점에 서의 재항타시험을 모두 실시하여 그 결과를 중첩하여 타당한 관리 기준을 도출하도록 한다.

참고문헌

1. 이명환(1989), "공동확장 개념에 의한 사질토에서의 말뚝의 선단지지력 해석," 대한토질공학회지 Vol. 5, No.1, pp.35-46.
2. 이원제, 전영석, 홍헌성, 이명환(1995), "시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력 변화 연구," 한국지반공학회 '95 봄학술 발표회 논문집, pp.69-89.
3. Svinkin, M. R., Morgano, C. M. and Morvant, M.(1994), "Pile capacity as a function of time in clayey and sandy," Proceedings of the 5th International Conference on Piling and Deep Foundations, Bruges, paper 1. 11.
4. Federal Highway Administration(1986), "Manual on Design and Construction of Driven Pile Foundations."
5. Packshaw, S.(1951), "Pile driving in difficult conditions, " ICE Introductory Notes.
6. 이명환, 홍헌성, 이원제(1994), "말뚝기초의 최적설계," Keynote Lecture, 한국지반공학회 '94 가을 학술 발표회 논문집, pp.60-76.