합리적인 항타시공 관리방안
A Propoal for an Appropriate Quality Control of Driven Piles

이 명환[1], Myung-Whan Lee, 홍 헌성[2], Hun-Sung Hong, 조 천환[3], Chun-Whan Cho

[1] (주)파일테크 연구소장, Principal Researcher, Piletech Consulting Engineers
[2] (주)파일테크 사장, Principal, Piletech Consulting Engineers
[3] (주)파일테크 상무, Director, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : Pile driving technique has been regarded as the most reliable way of constructing deep foundations. Engineers have long believed that the quality of the installed piles is a simple function of the set values which can easily be obtained from the field pile driving records. Consequently most of the local building codes are based on the dynamic formula. However it has been proven that the quality of the driven pile is influenced not only by the set values but also by various factors, such as hammer performance, helmet characteristics, time dependent geotechnical characteristics of the site, etc., from the results of various researches made during the last two decades. In this paper an appropriate quality control scheme has been proposed by taking various influencing factors into consideration.

Key words : driven piles, quality control, dynamic formula, time dependent geotechnical characteristics of site, hammer performance

1. 서 론

근래에 들어 말뚝기초를 항타 시공하는 과정에서 발생하는 지반진동과 소음 등 건설공해로 인하여 항타공법의 적용이 크게 위축되었다. 그러나 항타공법은 지금까지 개발된 다른 어떤 공법들 보다도 가장 확실한 지지력을 확보할 수 있으며 시공관리가 용이하고 경제성 또한 가장 우수한 장점을 갖고 있는바, 아직도 국내 말뚝기초 시공의 상당부분을 차지하고 있다. 또한 국내에서 항타공해 발생시 대안으로 채택되고 있는 선굴착 공법이나 SIP 공법과 같은 저공해 말뚝공법의 경우에도 지지력 확보를 위하여 대부분 최종항타과정을 시행하고 있기 때문에 넓은 의미에서는 이들 저공해말뚝 공법들도 항타공법의 범주에 속한다고 볼 수 있다. 따라서 선굴착 공법을 포함한 거의 모든 기성말뚝의 시공관리는 항타공법의 원리를 토대로 하고 있다고 볼 수 있겠다. 항타공법의 시공관리는 대부분의 기술자들이 익히 잘 알고 있는 것으로 인식하고 있으나 실제 많은 공사에서 적절하지못한 시공관리로 인하여 심각한 문제점들이 발생하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 국내의 시공사례를 중심으로 하여 항타공법으로 시공된 말뚝의 품질에 영향을 미치는 요소들을 분석해 보았다. 분석 결과 항타공법으로 시공된 말뚝의 품질은 말뚝재료의 구조적 특성, 해머의 특성, 항타부속장비의 특성, 최종 타격당 관입량, 지반조건에 따른 시간경과효과, 무리말뚝 시공조건 등에 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 따라서 항타시공 되는 말뚝의 품질을 확보하고 경제적인 말뚝기초 공사를 하기 위해서는 이들 각종 영향요소들을 적절히 고려한 합리적인 시공관리 방안이 정립되어야 한다. 그러나 우리나라에서 실무에 적용되는 대부분의 시방서 또는 시공 지침서에는 이들 다양한 영향요소들이 반영되고 있지 못한 실정이다. 그 결과 국내에서 시행되는 말뚝공사에서는 상당히 많은 부실사례가 발생하고 있으며 공사비의 낭비 또한 심각한 실정이다. 본 논문에서는 이들 다양한 영향요소들을 고려한 합리적인 시공관리 방안을 제시하였다.

2. 말뚝품질에 영향을 미치는 요소들

시공된 말뚝이 설계된 조건을 만족시키기 위해서는 말뚝의 지지력이 설계하중을 지지할 수 있어야 하며 시공된 말뚝상태가 구조적으로 건전한 상태를 유지하여야 한다. 이를 역으로 설명하면 말뚝이 설계조건을 만족시키지 못하는 경우는 지지력 부족 또는 말뚝재료 손상을 의미한다. 그러나 실제 현장에서 시공되는 모든 말뚝의 지지력과 건전도를 직접 판단하는 것은 실무적으로 사실상 불가능하였기 때문에 항타기록을 토대로한 간접적인 추정에 의지할 수밖에 없었다. 항타기록을 토대로한 말뚝품질추정 방법의 대표적인 것으로는 항타공식을 들 수 있다. 주지하다시피 항타공식의 결과는 말뚝의 지지력만으로 표시되며 따라서 지금까지의 품질관리는 지지력측면이 위주가 되었다. 그러나 최근의 연구결과에 의하면 말뚝의 품질은 지지력 뿐만 아니라 건전도에도 크게 영향을 받는 것으로 나타나고 있어 단순히 항타기록만으로 시행되는 말뚝품질관리에 일대 변화가 요구되는 시점이다. 본장에서는 말뚝의 지지력 및 건전도에 영향을 미치는 제반 요소들을 설명하였다. 그러나 지면이 제약되어 있는 관계로 세부적인 내용을 설명하지는 못하였고 각요소들을 개략적으로 언급하기로 하였다.

2.1 항타장비의 규격

말뚝의 지지력은 타격에너지에 거의 비례한다. 따라서 높은 에너지를 가하면 큰 지지력을 얻을 수 있지만 말뚝재료의 허용범위를 초과하는 타격에너지는 재료 손상을 초래한다. 재료 손상을 방지하기 위하여 작은 에너지를 가하면 항타 시공관입성이 저하되어 기대하는 지지력을 얻을 수 없다. 결국 최적 항타장비는 타격에너지로 기대할 수 있는 지지력과 말뚝재료의 파손방지 그리고 항타 시공관입성 모두를 고려 하여야 한다. 그러나 현재 국내의 항타장비 선정 관행은 대부분 일본의 기준을 적용하고 있으며 이들 기준들은 대부분 말뚝직경과 관입깊이 정도만을 고려하였기 때문에 현실성이 결여되었다. 항타장비 선정의 영향을 설명하기 위하여 그림 1과 같은 지반에 ϕ609.6×12.0mm 강관말뚝(SPS400)을 여러 가지 해머로 항타하는 경우에 대하여 파동이론분석을 실시해 보았다. 분석결과는 표 1에 나타난 것과 같이 지지력에 있어 큰 차이를 나타내고 있다.

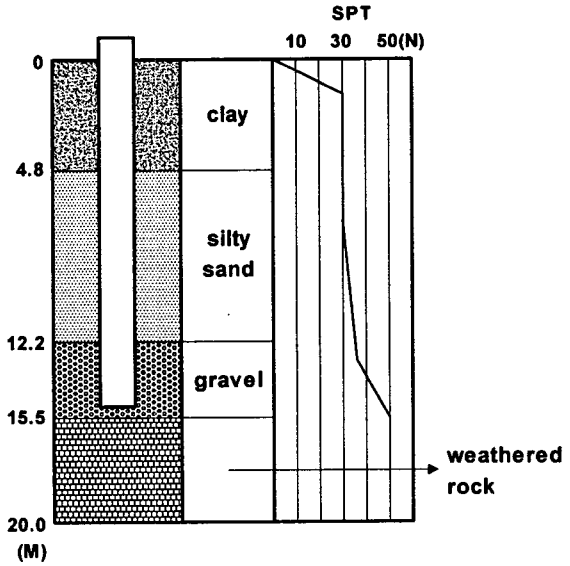

그림 1 지반조건(Ⅰ)

표 1 파동이론분석결과

해 머	SPS400		SPS490	
	설계하중(t)	판정기준	설계하중(t)	판정기준
K25	104.0	항타시공성의 제약	104.0	항타시공성의 제약
K35	149.0	항타시공성의 제약	149.0	항타시공성의 제약
K45	143.0	항타응력상 제약	166.0	항타시공성의 제약
KB60	98.0	항타응력상 제약	209.0	항타시공성의 제약
KB80	86.0	항타응력상 제약	204.0	항타응력상 제약
HH5	132.0	항타시공성의 제약	132.0	항타시공성의 제약
HH7	164.0	항타시공성의 제약	164.0	항타시공성의 제약
HH9	149.0	항타응력상 제약	1920	항타시공성의 제약
HH11	128.0	항타응력상 제약	222.0	항타시공성의 제약
HH14	138.0	항타응력상 제약	233.0	항타응력상 제약
HH16	122.0	항타응력상 제약	196.0	항타응력상 제약

2.2 말뚝의 특성

말뚝의 항타결과는 말뚝재료+지반조건+장비조건 으로 나타난다. 동일한 지반조건에 동일한 항타장비를 사용하더라도 말뚝재료조건에 따라 기대할수 있는 지지력은 상이하다. 그림 1의 지반조건에 동일한 규격(φ609.6×12.0mm)의 SPS490 재질의 강관말뚝을 항타하는 경우의 파동이론분석 결과는 표 1에 표시한 것과 같이 SPS400 강관말뚝과는 상이하다. 말뚝재질외에 말뚝벽체 두께, 선단부 폐색여부, 폐색정도 및 형태 등에 따라서도 나타나는 지지력은 상이하다.

2.3 말뚝-지반 상호작용 요소

항타장비선정 및 항타시공 관입성 분석을 위하여 파동이론분석은 필수적이며 최근의 말뚝기초 설계 및 시공계획 수립에 많이 적용되고 있다. 파동이론분석을 위해서는 조사된 지반조사 내용으로부터 입력자료를 추정한다. 대표적인 입력자료로는 말뚝조건(규격, 재질), 항타장비조건(규격, 낙하고, 해머효율), 지지력구성조건(선단지지력, 주면마찰력), 지반조건(주면마찰력분포, damping, quake) 등이 된다. 각종 파동이론분석 프로그램중 전세계적으로 가장 많이 적용되는 GRLWEAP프로그램의 경우 이중 상당부분은 프로그램내에 내장되어 있으나 분석기술자가 입력하여야 하는 자료들도 있다. 이들 입력자료들의 신빙성 여부에 따라 분석결과는 영향을 받게 된다. 입력자료의 영향을 알아보기 위하여 그림 2와 같은 지반에서 램중량이 7ton인 유압해머로 몇가지 규격의 말뚝을 항타하는 경우의 파동이론분석을 시행하고 실제 시공결과와 비교해 보았다(표 2).

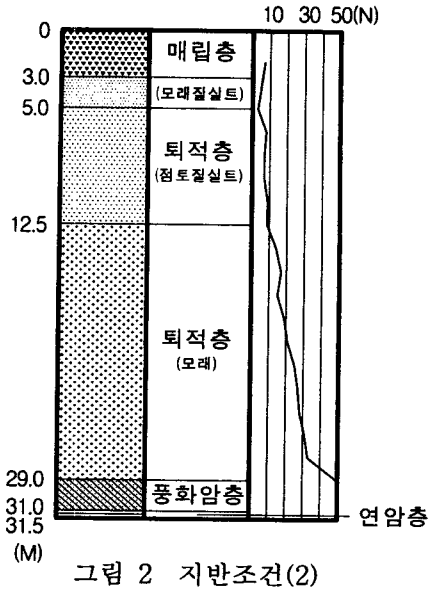

그림 2 지반조건(2)

표 2 입력자료에 따른 파동이론분석결과와 시공결과의 비교

말뚝종류	파동이론분석						시공결과		
	SF/EB	Q_{toe}	Ru (kN)	σ_{cmax} (MPa)	σ_{tmax} (MPa)	BPM	Q_{toe}	BPM	R_u(kN)
PHC400	30/70	D/120	2100	39.245	7.396	167.5	D/27	250	2059
		D/60	2100	36.921	5.012	196.5			
		D/30	2100	31.777	2.275	267.0			
ϕ406×12t	30/70	D/120	2400	240.360	49.814	267.7	D/53	333	2333
		D/60	2400	221.007	23.649	415.4			
		D/30	2400	207.468	7.701	569.7			
ϕ406×12t	40/60	D/120	2400	228.227	46.466	258.4	D/53	333	2333
		D/60	2400	213.910	26.764	369.6			
		D/30	2400	207.758	12.439	382.2			
H300×300 ×15×15	40/60	D/120	2500	214.302	41.871	277.7	D/59	333	2471
		D/60	2500	203.999	23.458	396.1			

표 2의 분석은 여러 가지 중요한 내용들을 시사해 준다. 분석자의 판단에 따라서는 허용 인장응력초과 또는 허용 압축응력초과로 인한 말뚝손상까지도 예상할 수 있으나 실제 이러한 현상은 나타나지 않았다. 항타시공 관입성에 있어서도 예상과 실제간에 차이가 있을 수 있다. 여러 가지 입력요소들은 모두 중요한 영향을 미치며 그중에서도 toe quake의 영향이 치명적임을 알 수 있다. 따라서 합리적인 시공계획을 수립하기 위해서는 이러한 입력요소들에 대한 경험이 필수적이며 가급적이면 시험시공을 실시하여 입력요소를 검증할 필요가 있다.

2.4 해머성능

말뚝재료+지반조건+장비조건을 모두 고려하고 상당한 경험이 있는 기술자가 파동이론 분석을 시행하였다 하더라도 실제 말뚝을 항타할 경우 예상하지 못하였던 상황이 발생할 수 있다. 가장 대표적인 요인으로는 해머의 성능이 예측과 상이한 문제점이다. 그림 3은 우리나라에서 가장 많이 사용되고 있는 DKH7 유압해머의 효율을 나타내 주는데 해머별로 상당히 큰 성능 차이가 있음을 알 수 있다. 해머효율

은 이처럼 각 장비간에만 나타나는 것이 아니라 동일 해머에서도 나타날 수 있다. 그림 4는 K25 디젤해머를 동일 현장에서 2일간 측정한 결과인데 효율 차이가 심각하게 나타남을 알 수 있다. 해머성능은 장비의 노후정도, 하루중 작업시점, 해머쿠션의 상태, 디젤해머에서 타격전 폭발(preignition) 발생여부 등에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 반드시 시공 초기에 PDA를 사용하여 해머성능을 검증하여야 하며 시공도중에는 일정한 시간간격을 갖고 주기적으로 PDA를 사용하여 해머성능을 확인할 필요가 있다.

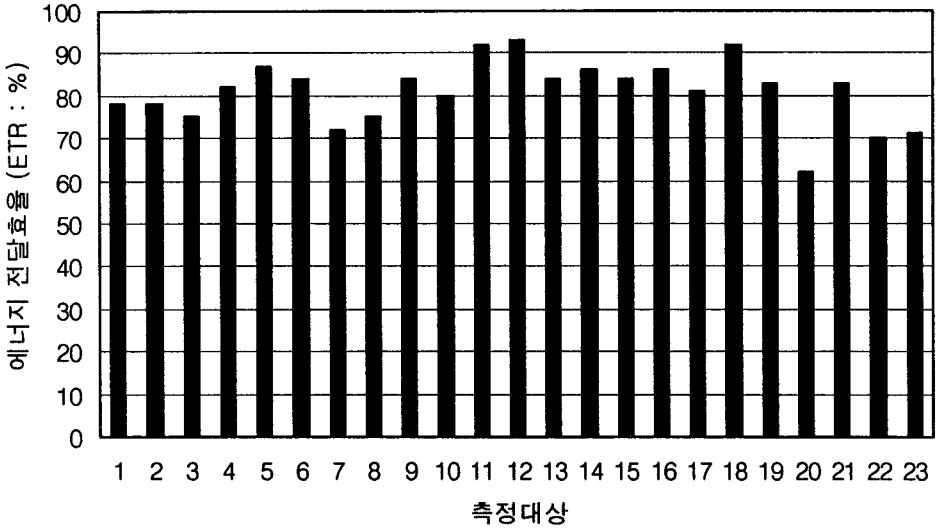

그림 3 해머효율 측정사례(1)

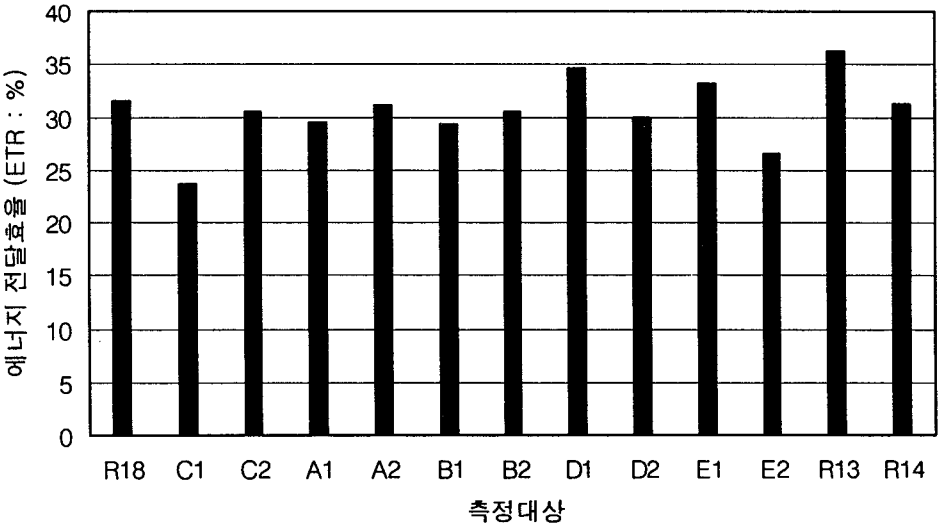

그림 4 해머효율 측정사례(2)

2.5 편타발생

말뚝이 지반내에 충분한 지지력을 갖는 깊이까지 관입되기 위해서는 항타 에너지가 말뚝단면 전체에 균등하게 전달되어야 한다. 만약 편타가 발생하면 말뚝단면중 일부분에는 다른부분에 비하여 높은 응력이 발생하게 되며 따라서 말뚝이 충분한 지지력을 갖는 지층까지 관입되기 전에 말뚝재료 파손이 발생하게 된다. 그림 5는 편타가 발생하여 말뚝재료가 파손된 경우의 PDAPLOT을 나타내 준다. 말뚝재료에 발생하는 압축항타응력의 평균값(그림에서 실선으로 표시)은 PHC말뚝 재료의 허용범위 480kg/cm^{2}미만

으로 유지되고 있으나, 측정된 최대 압축항타응력(그림에서 점선으로 표시)은 재료의 허용범위를 초과하였고 결과적으로 말뚝재료가 파손되었다. 이같은 편타는 항타용 크레인 자체의 기울어짐, 항타기리더의 수직도 불량, 말뚝의 수직도 불량 등 시공 세부사항에 기인한다. 때로는 시공 세부사항이 양호하여도 편타가 발생하기도 하는데 이는 해머쿠션의 불량 때문인 경우가 많이 있다. 따라서 말뚝을 항타하기 전에 반드시 항타용 캡을 분해하여 해머쿠션이 양호한지 여부를 확인할 필요가 있다.

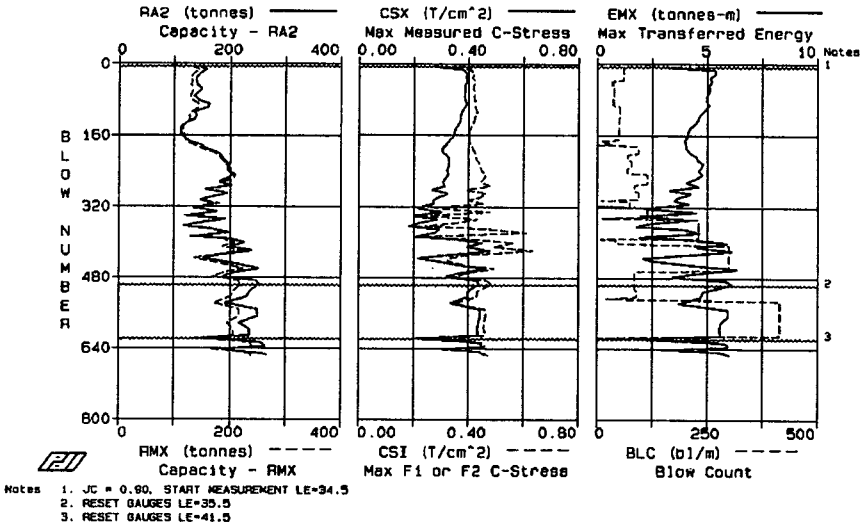

그림 5 PDAPLOT

2.6 연약지반에서 과잉 인장 항타응력 발생

연약지반에서 기성말뚝을 항타할 때에는 항타 미케니즘상 인장 항타응력이 발생할 수 있다. 이는 앞서 예시한 파동이론분석에서도 예측할 수 있으며 항타시 PDA시험을 실시하여 확인할 수 있다. 강재말뚝의 경우에는 큰 값의 인장 항타응력이 발생하더라도 문제가 없으나 기성 콘크리트 말뚝에서는 말뚝재료가 허용하는 범위보다 큰 인장응력이 발생하면 말뚝재료가 파손되며 따라서 엄격히 방지되어야 한다. 우리나라에는 아직까지 기성 콘크리트 말뚝의 인장 항타응력에 대한 허용 범위가 규정되지 못하고 있다. 그간 국내에서의 경험에 의하면 미국 FHWA에서 적용하고 있는 아래와 같은 공식의 적용이 타당한 것으로 판단된다.

$$\sigma_{ta} = 0.025 \times \sigma_c'^{\,0.5} + \sigma_{ce}$$

여기서 σ_{ta} : 말뚝재료의 허용 인장 항타응력 (t/cm^2)

σ_c' : 기성 콘크리트 말뚝재료의 압축강도 (t/cm^2)

σ_{ce} : 기성콘크리트 말뚝재료의 프리스트레싱 크기 (t/cm^2)

실제로 연약지반이 깊게 발달한 지반조건에서 기성콘크리트 말뚝을 항타시공할 때 과잉 인장 항타응력 발생으로 말뚝이 파손되는 경우도 많이 발생하고 있다. 과잉 인장 항타응력이 발생할 때는 아래와 같은 조치를 순차적으로 취하여 대처한다. 각 단계별 조치를 취할 때에는 PDA 시험을 실시하여 인장 항타응력을 확인하여야 한다.

① 해머의 낙하고를 낮춘다.

② 램중량이 무거운 해머로 변경하고 낙하고를 낮춘다.

③ 말뚝쿠션을 보강한다.

④ 말뚝재료를 프리스트레싱이 큰 B종 또는 C종으로 변경한다.

2.7 시간경과효과

과거에도 점성토 지반에서는 말뚝을 항타한 후 경과한 시간에 따라 지지력이 변화한다는 것은 잘 알려져 있었던 사실이다. 반면 사질토 지반에서는 토질역학 이론상 이러한 지지력 변화는 없다는 것이 정설로 인정되었다. 그러나 1990년대에 들어서면서 사질토에서도 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화가 나타난다는 것이 알려지게 되었으며(Skov and Denver,1988/ Svinkin 등,1994), 현재는 말뚝지지력 현상들 중 가장 치명적인 영향을 미치는 요소로 인정되고 있는 부분이다. 국내에서도 시간경과효과는 이미 여러차례 연구 보고되었다(이명환등,1994/ 이원제등,1995/ 천병식등,1998). 시간경과효과는 말뚝의 지지력 뿐만아니라 말뚝의 항타 시공관리에도 치명적인 영향을 미친다. 시간경과에 따라 지지력이 크게 증가하는(set up) 조건에서 항타시 지지력 확보만을 염두에 두고 무리한 타격을 계속하면 말뚝재료의 파손이 발생한다. 반대로 시간경과에 따라 지지력이 감소하는 조건(relaxation)에서 항타시 지지력조건만을 만족시킨 상태에서 시공을 종료하면 장기적으로 지지력 미달이 나타나게 된다. 따라서 합리적인 항타 시공관리를 위해서는 시간경과효과를 필히 감안하여야 한다.

2.8 무리말뚝 항타의 영향

앞에서 설명한 내용들은 모두 외말뚝의 시공과 관련한 내용들이다. 그러나 실제 현장에서 말뚝은 무리말뚝으로 시공되며 무리말뚝 항타시 부수적으로 문제점들이 발생하게 된다. 무리말뚝 항타로 인한 문제점은 이명환등(1998)의 논문에 설명되어 있다. 무리말뚝 항타시에는 기시공된 말뚝의 솟아오름(heaving)을 유발할 수 있으며 그결과 기시공된 말뚝의 지지력 저하가 나타나게 된다. 말뚝 솟아오름은 지지력저하 뿐만 아니라 말뚝이 솟아오르는 과정에서 기시공된 말뚝재료에 인장응력을 발생시키고 기성콘크리트 말뚝의 재료파손을 유발 시키기도 한다. 따라서 무리말뚝을 항타 시공할 때에는 반드시 이효과를 확인하여야 한다. 과거 시공관행에서는 단순히 솟아오른 말뚝을 재항타 하는 것으로 이 문제를 대처하였으나 단순 재항타 만으로는 인장응력 발생으로 인한 말뚝재료 손상을 해결할 수 없으며 반드시 PDA시험을 실시하여 대책을 수립하여야 한다.

3. 합리적인 항타 시공 관리방안

제 2장에서 설명한 바와 같이 말뚝의 항타 시공과정에서는 매우 다양한 요소들이 말뚝품질에 영향을 미친다. 이와같이 복잡한 내용들을 단순히 항타기록에 의한 최종 타격당 관입량만으로 파악하는 것은 사실상 불가능 하다. 즉 합리적인 항타 시공관리를 위하여 어떤 항타공식을 사용하는 것이 바람직하다는 논의는 무의미 하다. 그리고 항타 시공되는 많은 말뚝들중에서 극히 일부만을 선택하여 재하시험을 실시하고 품질을 확인하는 것 또한 큰 의미를 부여하기 어렵다. 특히 많은 경우 말뚝재하시험 방법으로 정재하시험이 기술자들에게 선호되고 있으나 기대할 수 있는 결과는 하중-침하량을 토대로 한 지지력 정보 뿐이며 말뚝재료의 건전도 정보는 확인할 수 없다는 한계가 있다. 또한 제 2장에서 설명한 다양한 요소들에 대한 판단도 불가능 하다. 따라서 합리적인 항타 시공관리를 위해서는 본논문에서 설명한 다양한 요소들을 모두 고려한 새로운 관리방안이 적용되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 이명환, 홍헌성, 이원제 (1994), "말뚝기초의 최적설계," 특별강연, 한국지반공학회 '94년도 가을학술발표회 논문집, pp.60-76.
2. 이명환, 홍헌성, 조천환, 김성회, 전영석 (1998), "군말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름 발생 사례," 한국지반공학회 '98 봄 학술발표회 논문집, pp.173-178.
3. 이원제, 전영석, 홍헌성, 이명환 (1995), "시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력 변화 연구," 한국지반공학회 '95년도 봄 학술발표회 논문집, pp.69-90.

4. 천병식, 조천환, 이명환 (1998), "시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력증가," 한국지반공학회 '98 가을학술발표회 논문집, pp.191-198.
5. Skov, R. and Denver, I.I. (1988), "Time-dependence of bearing capacity of piles," Proceedings of the 3rd International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles," BiTech Publishers, Ottawa, pp.879-888.
6. Svinkin, M.R., Morgano, C.M. and Morvant, M. (1994), "Pile capacity as a function of time in clayey and sandy soils," Proceedings of the 5th International Conference on Piling and Deep Foundations, Bruges, paper 1.11.