大韓土木學會論文集
第13卷 第5號 · 1993年 11月
pp. 223~234

PHC 말뚝의 항타시공성 및 지지력에 관한 연구

Drivability and Bearing Capacity of PHC Pile Foundation

이명환* · 이인모** · 김상균***
Lee, Myung Whan* · Lee, In Mo** · Kim, Sang Gyun***

Abstract

The main characteristics of PHC piles is that silica material and autoclave curing technique are used when manufacturing to have higher strength than PC piles. In this paper, pile drivability and bearing capacity characteristics of the PHC piles are studied through numerical analysis based on wave propagation theory, driving records and pile load tests in situ. It is found that we can have higher bearing capacity by using the PHC piles rather than the PC on condition that the most effective driving equipment is chosen when driving the pile. In other words, since the PHC piles have higher resistance to driving energy, the heavier ram can be used in the driving process, which results in the higher bearing capacity.

요 지

일반 PC 말뚝과는 달리 제작시 실리카(silica) 재료를 사용하고 증기양생후 고온, 고압의 추가양생(autoclave curing)을 실시함으로써 말뚝자체의 강성을 높인 PHC 말뚝의 항타시공성과 지지력 특성을 파동이론에 근거한 수치해석과 실제현장에서의 항타기록 및 재하시험을 통하여 파악하였다. 임의의 지반조건에 대하여 항타장비에 따른 수치해석과 현장시험의 결과는 PHC 말뚝이 PC 말뚝에 비해 말뚝의 재질강도가 60% 정도 크므로 항타장비에 의해서 발휘되는 타격에너지에 대해 보다 큰 저항력을 가지기 때문에 설계지지력을 보다 크게 얻을 수 있으며 항타장비의 선정에 있어서도 보다 큰 효율을 지닌 장비의 선정이 가능하여 경제적인 항타작업을 수행하는데 유리함을 보였다.

1. 서 론

말뚝기초는 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 기초형식중의 하나로서 상부지층이 구조물로 인한 하중을 견디지 못할 경우 상부의 하중을 하부의 단단한 지반에 전달시키거나 흙과 말뚝의 접촉면에서 발생하는 마찰저항을 이용하여 구조물을 안전하게 지지하기 위해 사용된다. 이러한 말뚝기초를 설계함에 있어서 가장 중요한 것은 설계지지력의 결정인데 이것이 말뚝의 종류, 설계심도, 시공장비등의 선정에 기준이 될 뿐만 아니라 구조물의 안전과 전체공사비에 지대한 영향을 미치기 때문이다. 일반적으로 말뚝의 지지력은 지반의 지지력과 말뚝재료의 허용재질강도를 비교하여 낮은 값에 따라 결정된다. 그러므로 가장 이상적인 말뚝기초는 지반의

* 정회원 · (주)고려기초연구소, 소장
** 정회원 · 고려대학교 공과대학 토목환경공학과, 부교수
*** 정회원 · 고려대학교 공과대학 토목환경공학과, 석사과정

지지능력과 말뚝재료의 허용 재질강도가 일치하는 조건에서 가능하다. 그러나 상기의 조건에 의해 설계된 말뚝일지라도 시공시 항타장비의 타격력에 의한 말뚝의 파손여부에 대한 검토가 필요한데 이는 항타시 말뚝이 파손되면 장기허용하중이 감소되어 구조물의 안전에 문제가 되기 때문이다. 실제로 국내에서 빈번하게 사용되는 말뚝의 하나인 PC 말뚝(Pretensioned spun prestressed Concrete piles)의 경우 항타에 의한 타격 에너지를 극복하지 못하고 파손되는 경우가 적지 않았다.[2]

이와 같은 이유로 본 연구에서는 PC 말뚝에 비해 설계지지력을 크게 얻을 수 있고 항타에 의한 타격에너지에 보다 큰 저항력을 지닌 PHC 말뚝(Pretentioned spun High strength Concrete piles)을 사용할 경우의 항타시공성을 파전파이론에 근거한 수치해석을 하여, 극한지지력과 단위관입깊이에 필요한 항타수와의 관계 및 극한지지력 평가시의 특성을 분석하고, 특히 말뚝의 항타에 대한 저항력 등을 계산하여 이를 PHC 말뚝이 실제 시공된 현장에서의 항타측정과 재하시험결과에 의한 지지력 특성과 연계시켜 파악하여 추후 설계 및 시공시 경제적이고 효율적인 말뚝항타 작업을 실시하는데 이용이 되도록 하고자 한다.

2. 파동방정식에 의한 PHC 말뚝의 항타시공성 검토

2.1 파동방정식의 이론적 고찰

말뚝머리에 가해지는 충격에 의해 말뚝에 발생하게 되는 충격파의 진행에 의해 말뚝에 관성력과 변위가 생기게 되고 이러한 힘과 변위 그리고 말뚝의 주변 및 선단흙의 저항치를 고려하여 다음과 같은 파동방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho}\frac{\partial^2 D}{\partial X^2} \pm R$$

D: 말뚝의 축방향 변위
E: 말뚝의 탄성계수
ρ: 말뚝재료의 밀도
t: 시간
x: 진행파의 방향
R: 흙의 저항치

위와 같은 파동방정식은 말뚝에서의 응력의 변화로부터 말뚝의 변위와 시간 그리고 요소의 위치 사이의 관계를 결정하기 위해 초기조건과 경계조건을 사용하여 해를 구할 수 있다. 그러나 실제의 말뚝항타시에 말뚝과 항타장비 그리고 주변 흙의 성질에 관련된 여러 복잡한 인자들로 인해 이론해로서 말뚝의 파동방정식을 해석하기는 상당히 어려운 실정이다. 그러므로 파동방정식을 해석하는 방법으로 적용되고 있는 것은 실제의 말뚝을 유한한 요소로 나누어서 항타에 의한 충격파의 전달과정을 각 요소마다 시간별로 표시하여 변위와 응력등을 계산하고 극한지지력에 따르는 최종항타 관입량(set value) 등을 컴퓨터를 사용해서 해석하는 소위 수치해석 방법이다. Smith에 의해 제안된 이 방법은 항타시 장비의 조합성, 항타응력 및 지지력 등을 추정하기 위해 사용되어지며 컴퓨터 프로그램을 위한 모델링의 개략은 그림 1과 같다.[5]

그림 1에서 좌측은 실제 말뚝을 나타내고 우측은

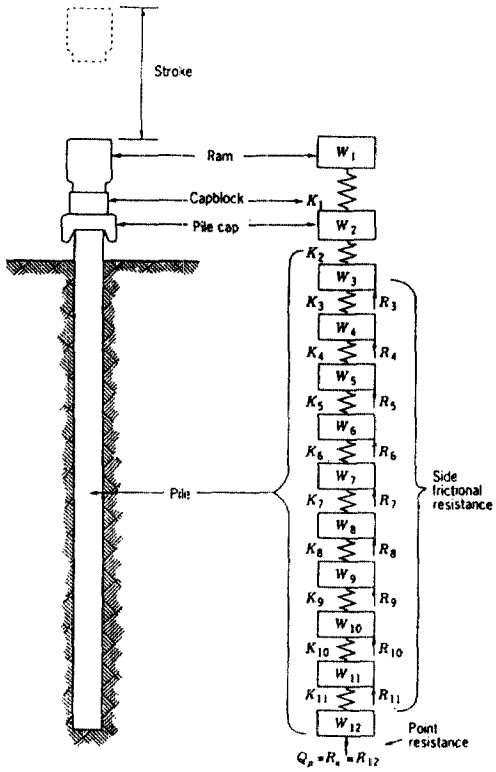


그림 1. 파동 방정식의 수치해석 기본 모델

컴퓨터 프로그램에 적합하도록 말뚝을 유한한 요소로 나누어서 이상화시킨 것으로 각 요소는 말뚝의 탄성을 나타내는 spring으로 연결되어 있다. 지표면 이하의 요소에 대해서는 말뚝자체의 spring 외에 기초지반의 저항을 나타내는 soil spring과 동적 상태의 하중에 대한 흙의 damping 효과를 나타내는 dash-pot를 합하여 저항치 R로 표시되어 있다. 말뚝선단에도 R이 표시되어 있는데 이는 항타시 말뚝선단에서 흙이 밀려나가면서 말뚝이 밑으로 관입되며 생기는 저항력을 나타내기 위한 것이다.

여기서 요소의 번호를 m, 시간간격을 Δt라고 하면 임의의 시간 t에서의 요소 m의 변위, 힘은 그림 2에서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$D(m,\ t)=D(m,\ t-1)+V(m,\ t-1)\Delta t \quad (1)$$

$$C(m,\ t)=D(m,\ t)-D(m-1,\ t) \quad (2)$$

$$F(m,\ t)=C(m,\ t)\cdot K(m) \quad (3)$$

$$R(m,\ t)=[D(m,\ t)-D'(m,\ t)]\cdot K'(m)[1+J(m)V(m,\ t-1)] \quad (4)$$

$$V(m,\ t)=V(m,\ t-1)+[F(m-1,t)-F(m,\ t)-R(m,\ t)]\cdot g\Delta t/W(m) \quad (5)$$

상기 식에 나타난 변수들은 일반 컴퓨터 프로그램 등에 사용되는 변수와 같으며 단일첨자로된 변수는 시간에 따라 변하지 않는 값이다. 각 변수와 첨자에 대하여 설명하면 다음과 같다.

m: 요소 번호
t: 시간 간격 번호(DT=t)
Δt: 시간 간격
D: 말뚝요소의 변위
C: 말뚝요소 사이의 순변위
W(m): 말뚝요소의 중량
R: 흙이 받는 힘
V: 말뚝요소의 속도
K: 말뚝요소 spring의 강성
K': soil spring의 강성
J: soil의 damping 값
F: 요소가 받는 힘
D': soil의 소성 변위

최초에 ram이 cap block에 떨어지는 순간에는 ram의 속도를 제외한 다른 요소의 속도와 변위 등은 영이며, 앞의 식 (1)에 의해서 말뚝요소 1의 변위가 생기고 (2), (3), (4), (5)식에 의해 각 말뚝요소의 새로운 속도가 계산되어 다시 (1)식으로 돌아간다. 계산은 모든 요소의 속도가 영이거나 마이너스이고 말뚝선단의 변위가 앞의 시간에서 구한 값보다 작은 경우 끝나게 된다. Wave equation에 의한 말뚝 선단의 변위를 시간에 따라 구하면 그림 3과 같게 된다.

이러한 파동방정식의 수치모형화는 참고문헌에 상세히 수록되어 있으므로 여기에서는 생략하며 본 연구에서 사용한 program은 현재 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 WEAP(Wave Equation Analysis for Pile)으로 이 프로그램은 미국의 케이스 웨스턴 대학에서 개발된 것이다.[7]

2.2 지반조건 및 입력자료

본 연구의 취지가 PHC 말뚝의 항타시공성을 파악하여 PC 말뚝과 비교검토하기 위한 것이므로 지

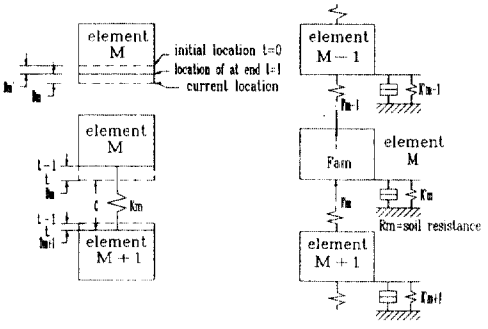


그림 2. 말뚝 요소에서의 힘의 평형

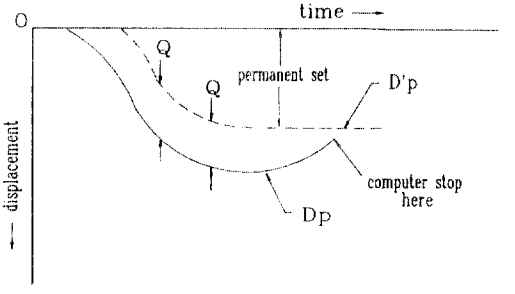


그림 3. 말뚝 선단에서의 시간-변위 곡선

반조건은 PHC 및 PC 말뚝에 대해서 같은 지반을 사용하였으며 항타장비로는 국내에서 가장 많이 쓰이는 디젤헤머(K-25 및 K-35)로 항타하는 경우를 비교하였다.

(1) 지반조건

본 연구에서 사용된 지반은 3장에서 PHC 말뚝의 지지력 특성을 파악하기 위해 말뚝항타측정 및 재하시험을 실시한 지역으로 서울지역 뿐만 아니라, 전국에서 가장 대표적이라 볼 수 있는 매립토/풍화토/풍화암의 지층구조를 이루는 단면을 선정하였으며 이의 주상도는 그림 4와 같다.

(2) 말뚝은 직경이 350 mm이고 지반에 11 m(N치 40 정도)까지 관입되는 경우로 하였으며 각 말뚝의 특성치를 표시하면 다음과 같다.

	- PHC 말뚝	- PC 말뚝
말뚝의 길이(m)	11	11
말뚝의 단면적(cm^2)	546.6	582.0
말뚝의 중량(kg/m)	140	151
prestress 도입시 탄성계수 (kg/cm^2)	350000	300000
압축파괴강도(kg/cm^2)	800	500
항타시 허용압축응력(kg/cm^2)	480	300

(3) 항타장비

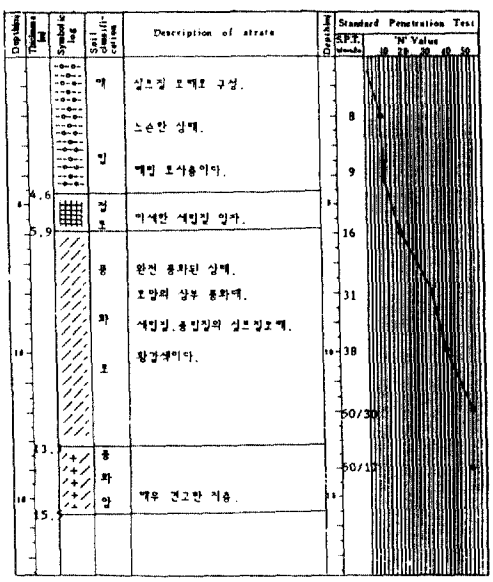


그림 4. 토질주상도

	- K-25	- K-35
cap의 중량(ton)	0.5	0.5
cap의 stiffness(ton/cm)	2409	2409
쿠션의 stiffness(ton/cm)	179	188
낙하고 (m)	2.2	2.2
헤머 효율	0.9	0.9

2.3 항타 시공성 검토

파동방정식을 이용한 예제해석을 통하여 구한 결과로서 극한지지력과 최종항타 관입량 사이의 관계를 나타내는 그림과 최종 항타관입량이 8 mm인 경우 말뚝에 유발되는 최대응력(maximum stress)은 그림 5, 6과 같다.

K-25와 K-35 항타장비를 입력자료로 실행시킨 결과를 나타내는 그림 5와 그림 6에 있어서 극한지지력은 PHC 말뚝과 PC 말뚝이 비슷한 값을 보였고 말뚝에 유발되는 최대응력은 PHC 말뚝이 PC 말뚝에 비해 약간 큰 값을 보이는데 이는 말뚝단

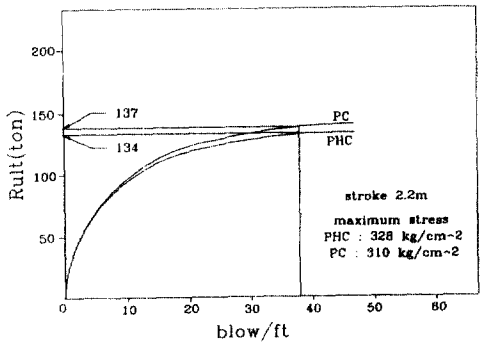


그림 5. 극한지지력과 최종항타관입량 곡선(K-25헤머)

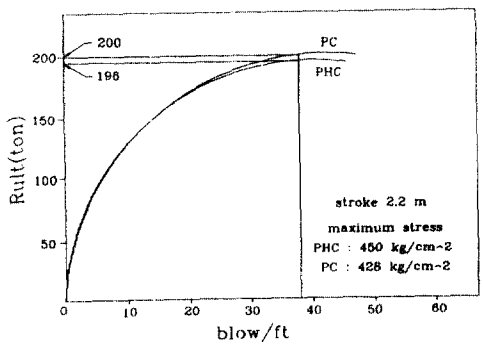


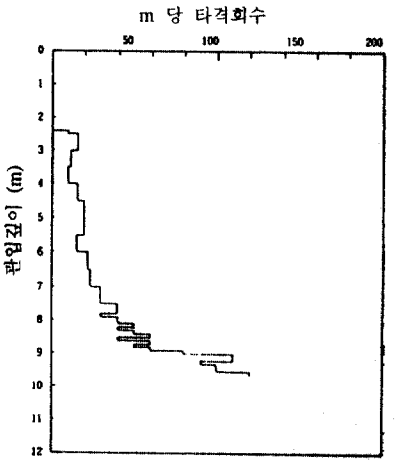
그림 6. 극한지지력과 최종항타관입량 곡선(K-35헤머)

면적의 차이로 인한 것임을 입력자료로부터 알 수 있다. 응력에 대한 안정성 검토에 있어서는 그림 5와 그림 6에서 PC 말뚝에 유발되는 최대응력이 허용응력(300 kg/cm^2)을 초과하여 말뚝항타시 타격에너지를 극복하지 못하고 파손될 우려가 있는 반면 PHC 말뚝의 경우 항타에 의한 최대응력이 허용응력(480 kg/cm^2)보다 작음을 알 수 있다. 다시 말하여, PHC 말뚝의 경우 K-25 장비를 K-35 장비로 바꾸어 항타작업을 시행할 때, 보다 큰 지지력을 얻을 수 있으며 말뚝에 유발되는 최대응력도 허용응력 이내의 값을 가지므로 효율적인 항타작업이 가능함을 알 수 있다.

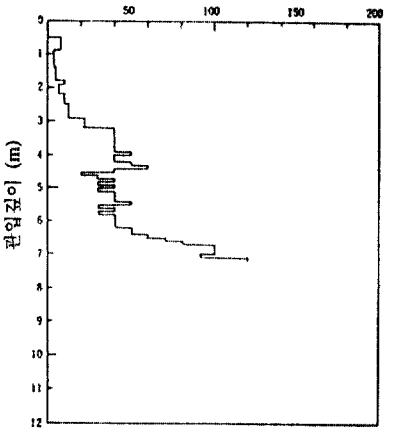
3. 항타시공된 PHC 말뚝의 지지력 특성

본 장에서는 실제 현장에서의 PHC 말뚝의 항타공법 적용성을 검토하기 위하여 그림 4와 같은 지반조건에서 말뚝의 항타측정 및 지지력검토를 수행하여 PC 말뚝과 비교하였다. PC 말뚝과 PHC 말뚝을 현재 국내에서 시공되는 시공기준을 수정없이 적용하였고 사용된 디젤헤머는 램중량 2.5 ton의 K-25 헤머였으며 말뚝은 직경 350 mm, 말뚝길이는 지반조건의 가변성을 감안하여 5－13 m의 말뚝들이 사용되었다. 항타시공성 비교를 위하여 총 100개의 PC 말뚝과 8개의 PHC 말뚝을 항타하였다. 그림 7의 (a)는 대표적인 PC 말뚝, (b)와 (c)는 PHC 말뚝의 항타기록을 나타낸다.

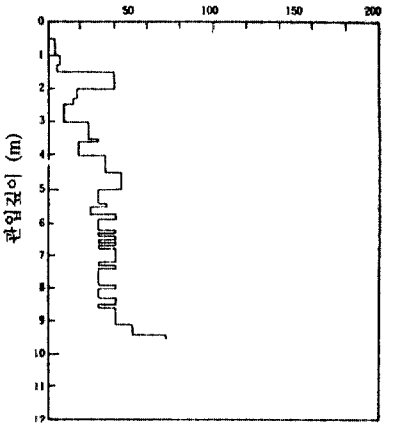
대체적으로 말뚝의 항타관입성(최종 타격당 말뚝 관입량)은 PC와 PHC의 경우가 거의 비슷한 수준에 머물고 있음을 알 수 있다. 항타관입성에 있어서는 거의 유사한 결과를 나타내고 있으나, 항타 후 말뚝의 상태에 있어서는 큰 차이가 있는 것으로 밝혀졌다. PC 말뚝의 경우 항타 정도에 따라 다소 차이가 있으나 0.5－1.5 m의 심한 두부손상이 일어났고(그림 8), PHC 말뚝의 경우에는 전혀 두부손상이 발생하지 않았다(그림 9). 이는 전장에서 수행한 파동방정식을 이용한 검토와 같은 결과를 보여준다. 즉, PC 말뚝은 같은 조건에서 과응력의 문제가 있다는 점이며 PHC 말뚝의 경우 재료강도가 800 kg/cm^{2}로 PC 말뚝에 비해 60% 증가되었기 때문에 over stress 문제를 극복할 수 있다는 것이다.



(a) PC 말뚝



(b) PHC #1 말뚝



(c) PHC #2 말뚝

그림 7. 말뚝항타기록(I)

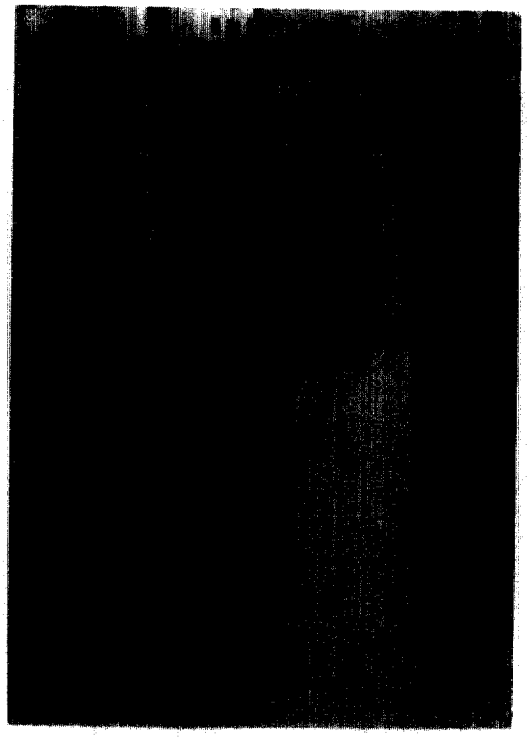


그림 8. 항타후의 PC 말뚝 두부상태

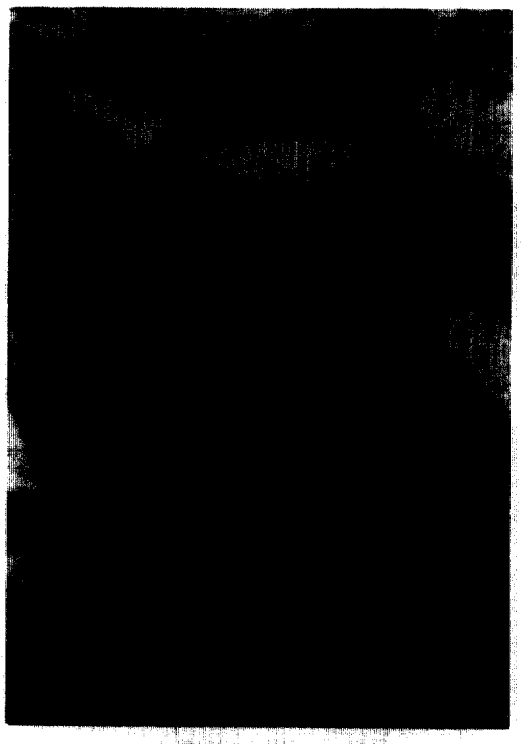


그림 9. 항타후의 PC 말뚝 두부상태

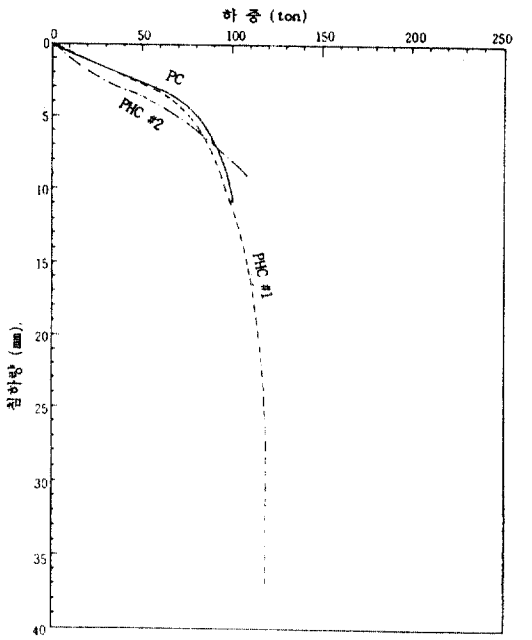
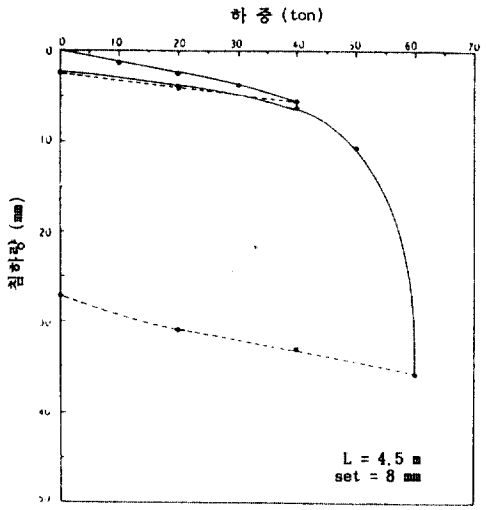


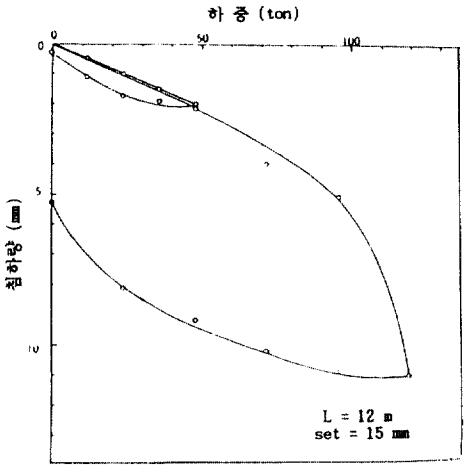
그림 10. PC 말뚝과 PHC 말뚝의 재하시험 결과비교(I)

그림 10은 그림 7의 (b), (c)에 표시한 항타기록을 갖는 PHC 말뚝의 재하시험 결과와 항타기록이 조사된 말뚝은 아니지만 같은 현장에서 실시한 PC 말뚝의 재하시험 결과를 나타낸다.

동일 현장에서 동일한 장비 및 시공법으로 시공된 PC 말뚝과 PHC 말뚝의 재하시험에 의한 극한지지력은 다소간의 차이가 나타나고 있지만 이는 말뚝 재료의 차이로부터 기인한 것으로는 판단되지 않는다. 이들 3개 말뚝 재하시험을 비교하여 볼 때 현행 국내 말뚝시공의 한계점과 개선할 점을 밝혀 보는 데서 오히려 유익한 결과를 기대할 수 있을 것이다. 말뚝의 지지력 계산시 일반적으로 사용되는 항타공식, 즉 최종 관입상태에서의 최종침하량에 의한 말뚝지지력 계산문제이다. PHC#1 말뚝의 최종 타격당 관입량은 8.3 mm이며 PHC#2 말뚝은 14.3 mm이다. 이를 항타공식을 적용하여 극한 지지력 계산을 하면 PHC#1의 지지력이 PHC#2의 지지력보다 크게 계산되어야 한다. 그러나 말뚝 재하시험 결과는 정반대의 극한지지력을 보여주고 있다. 이와 유사한 재하시험 결과는 그림 11의 비교에서도 나타나고 있다. 그림 11의 말뚝#1은 최종 타격당 관입량이 8 mm이며 말뚝#2는 15 mm이다.



(a) 말뚝#1의 재하시험 결과



(b) 말뚝#2의 재하시험 결과

그림 11. 최종타격당 관입량이 상이한 2개 말뚝의 지지력비교

재하시험 결과는 말뚝#2가 오히려 말뚝#1의 2배 이상의 극한지지력을 갖는 것으로 나타나고 있으며 그 원인은 말뚝길이(말뚝#1은 4.5 m, 말뚝#2는 12.0 m) 차이로 인한 주면마찰력의 차이에 있다. PHC#1 말뚝과 PHC#2 말뚝의 지지력 차이도 말뚝관입깊이 및 최종 지지층 이전의 지반조건 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이로부터 우선 알 수 있는 것은 말뚝설계의 문제점, 즉 말뚝 또는 지반의

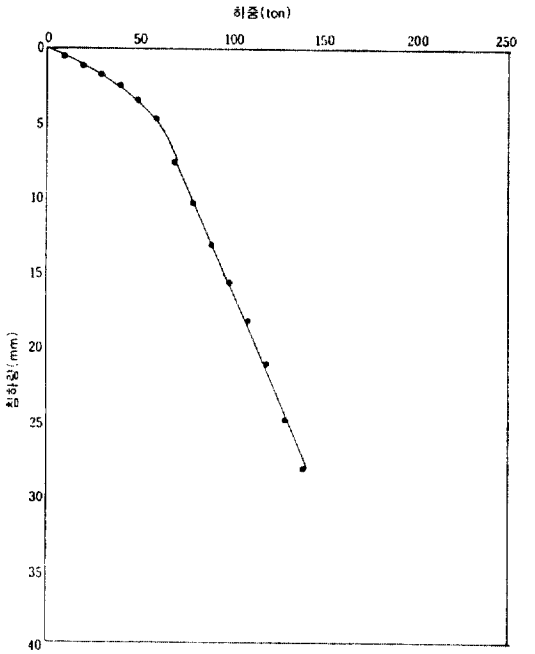


그림 12. 선굴착후 최종항타한 말뚝의 재하시험 결과

지지능력을 충분히 활용하지 못하는 원인은 말뚝 및 지반의 성능을 100%까지 활용할 수 있는 곳까지 말뚝이 항타되지 못하는데 있다고 할 수 있다. 그림 12는 동일현장에서 auger에 의한 선굴착 후 PC 말뚝삽입 및 drop 헤머로 최종 항타한 말뚝의 재하시험 결과이다.

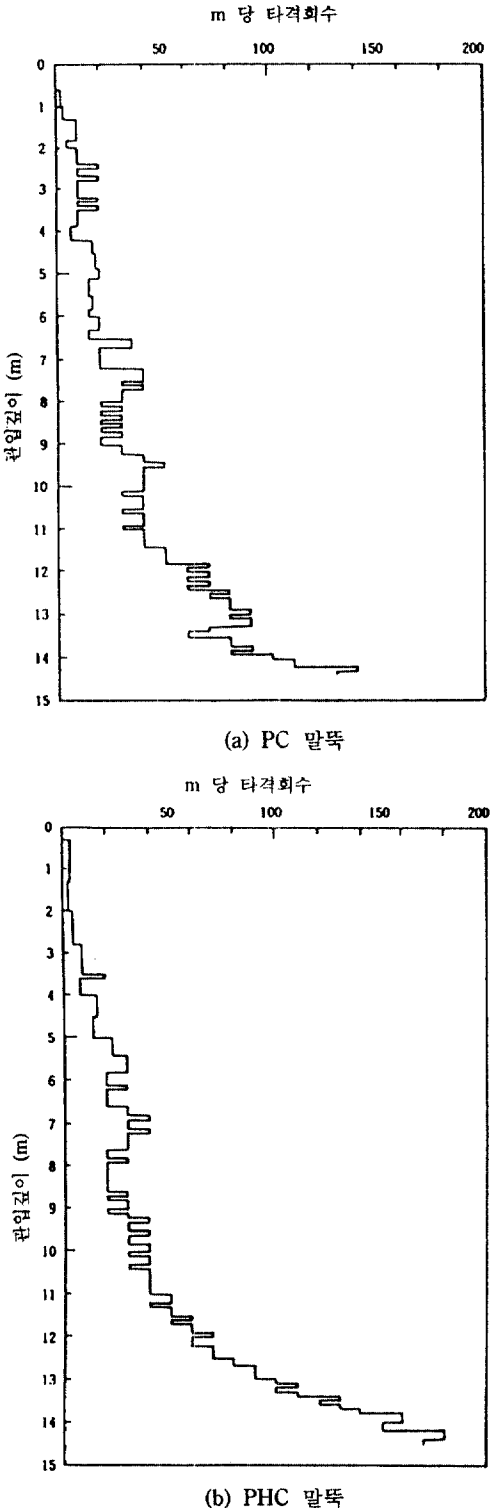
말뚝의 극한지지력은 항타된 PC 및 PHC 말뚝보다 월등하게 높은 값을 갖는다. 시험말뚝은 auger 선굴착 깊이 13.0 m, 말뚝삽입 후 최종 항타하였을 때의 관입깊이 13.0 m이며, 재하시험을 위한 반력말뚝(φ 406.4 mm 강관말뚝)은 10.5 m 정도의 관입이 가능하였다. 시공방법으로부터 유추하여 볼 때 시험말뚝의 주면마찰력은 극히 낮을 것으로 생각되며 말뚝지지력의 대부분은 선단지지력에 의한다고 판단된다. 재하시험이 실시된 동일현장에서 실시한 항타말뚝에 대한 SPLT(Simple Pile Loading Test) 결과는 말뚝의 극한 주면마찰력은 65 ton 이상이 되며, 따라서 항타말뚝의 선단부는 충분한 지지능력을 갖는 지지층까지 관입되지 못한 것으로 판단된다.[1] 이같은 결과는 말뚝재료의 성능이나 지반의 지지능력의 50−60% 만을 설계에서 사용하는 것이

며, 그 원인은 말뚝을 충분한 지지층까지 관입시키지 못한 때문으로 분석할 수 있다. 이처럼 말뚝을 충분한 지지력을 갖는 지지층까지 관입시키지 못한 원인은 PC 말뚝의 경우 항타로 인한 말뚝 두부의 파손이다. PHC 말뚝을 충분한 지지층까지 항타관입시키지 못한 이유는 PHC 말뚝의 두부에 있는 강판(steel plate)에 항타에너지가 직접 전달되어 그 반발력으로 디젤헤머의 램 반발고가 높아졌기 때문이었다.

말뚝을 보다 지지능력이 큰 지지층까지 관입시키기 위하여 PC 말뚝은 두부파손이 방지되어야 하며 PHC 말뚝은 항타에너지를 완충시켜 줄 수 있는 장치가 필요하다. 이러한 목적을 위하여 말뚝두부에 합판쿠션(cushion)을 사용하여 시험항타한 후 동일한 시험을 실시하였다. 시험말뚝은 직경 350 mm의 PC 및 PHC 말뚝이었으며 합판쿠션 4－5장을 충격완충재로 사용하였다. 말뚝의 길이는 15.0 m이며 항타장비는 램중량 2.5 ton의 디젤헤머가 사용되었다. 시험은 충주 새한콘크리트 공업(주) 공장 부지 내에서 실시되었다. 그림 13의 (a)는 PC 말뚝의 항타기록이며 최종 타격당 관입깊이는 8.0 mm 정도이다. 쿠션을 사용하였지만 최종 항타단계에서 약간의 두부손상이 발생하였다. 그림 13의 (b)는 PHC 말뚝의 항타기록이며 두부손상은 발생하지 않았으나 램의 반발고가 크기 때문에 최종 타격당 관입량이 5.8 mm 정도에서 항타를 중지하였다.

그림 14는 PC 말뚝과 PHC 말뚝의 재하시험 결과를 표시하였다. 항타기록의 차이에서도 이미 예견된 바이지만 PC 말뚝에 비하여 PHC 말뚝의 지지력은 약 20% 정도 증대되는 것으로 나타나고 있다. 이 결과로부터 말뚝의 설계지지력을 계산해 보면 60 ton 설계가 가능하다.

그러나 이를 말뚝 단위면적당 지지력으로 환산하면 62.4 kg/cm^{2}에 불과하며 외국의 설계기준이나 지반의 지지능력 및 말뚝재료의 허용값에 비하면 아직도 낮은 수준이다. 직경 350 mm인 PHC 말뚝에는 직경 230 mm의 중공부가 있으며 중공부를 제외한 콘크리트의 순단면적은 546.6 cm^{2}가 된다. PHC 말뚝은 고온고압의 autoclave 양생과정을 거쳐 압축강도가 800 kg/cm^2 이상이며, 일반 콘크리트 말뚝에서 적용하는 0.25 fc'을 그대로 적용할 경우



(a) PC 말뚝

(b) PHC 말뚝

그림 13. 말뚝항타기록(II)

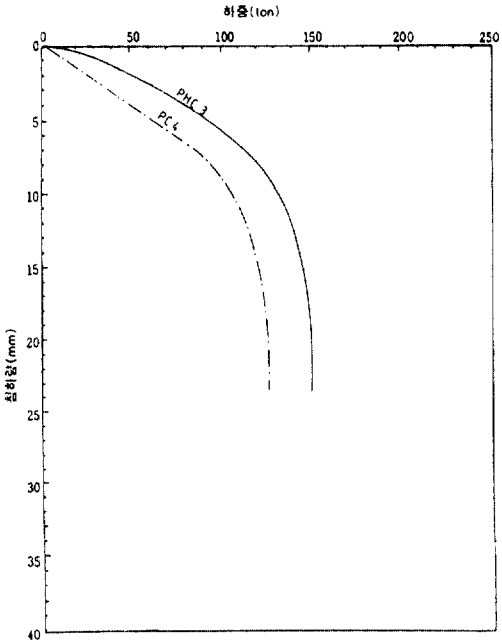


그림 14. PC 말뚝과 PHC 말뚝의 재하시험 결과(II)

말뚝설계에는 200 kg/cm²을 쓸 수 있다. 여기에 A type의 경우 유효 prestress 40 kg/cm²을 공제하면 실제 설계에 사용할 수 있는 압축강도는 160 kg/cm²이 된다. 이 값을 콘크리트 순단면적과 곱해주면 직경 350 mm PHC 말뚝의 설계하중은 87.5 ton이 된다. 합판쿠션을 사용하여 K-25 디젤헤머로 항타한 PHC 말뚝의 재하시험 결과는 앞에서도 설명한 것처럼 최대 60 ton의 설계가 가능한 것으로 밝혀졌다. 즉 말뚝재료가 갖고 있는 물리적 성질의 68.6% 만을 활용할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 말뚝재료가 갖는 물리적 성질을 최대한 활용하기 위해서는 말뚝을 보다 높은 지지능력을 갖는 지지층까지 깊게 관입시켜야 한다. PC 및 PHC 말뚝 재하시험 결과와 선굴착 후 최종항타 말뚝의 재하시험 결과로부터 말뚝을 보다 깊은 곳까지 관입시키면 지지력은 증대될 수 있음을 알 수 있었지만 가장 큰 문제점은 말뚝의(주면마찰력+선단저항)을 극복하여 말뚝을 소정의 지지층까지 관입시키는 것이다.

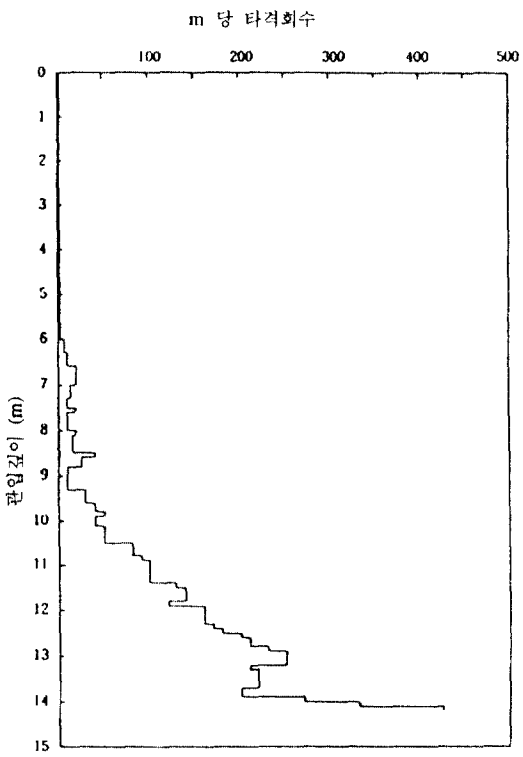
PHC 말뚝의 항타시공성 연구결과 및 항타측정 결과를 참조하여 충주 새한콘크리트(주) 공장부지내에서 K-35 디젤헤머를 사용한 시험시공을 실시하였다. 사용말뚝은 직경 350 mm의 PHC 말뚝이며 말뚝길이는 15.0 m, 그리고 말뚝두부에 합판 5장을 쿠션으로 사용하였다. 그림 15의 (a), (b)는 PHC 말뚝의 항타기록이며 최종 타격당 관입량은 약 3.0 mm 정도까지 말뚝 두부손상없이 항타되었다. 그림 15의 (c), (d)는 재하시험을 위하여 PHC 말뚝근처에 K-25 디젤헤머를 사용하여 항타한 PC 말뚝의 항타기록이다.

그림에서 나타나는 바와같이 최종 타격당 관입량은 10 mm 내외에 불과하며, 1 m 이상의 두부손상이 발생하였다. 항타기록을 비교한 결과 K-35 디젤헤머로 항타한 PHC 말뚝은 K-25 디젤헤머로 항타 가능한 깊이보다 대략 2.5 m 정도 깊은 곳까지 말뚝을 관입시킬 수 있었다. 그림 16에는 K-35 디젤헤머로 항타한 말뚝의 재하시험 결과를 나타내었다. 말뚝 재하시험 결과는 재하하중 145.3 ton까지 말뚝의 총 침하량이 10.59 mm에 불과하였으며 166.0 ton 재하시 총침하량은 12.27 mm에 달하였다. 그러나 166.0 ton 재하시 말뚝의 두부가 파손되어 더 이상의 재하는 불가능하였다.

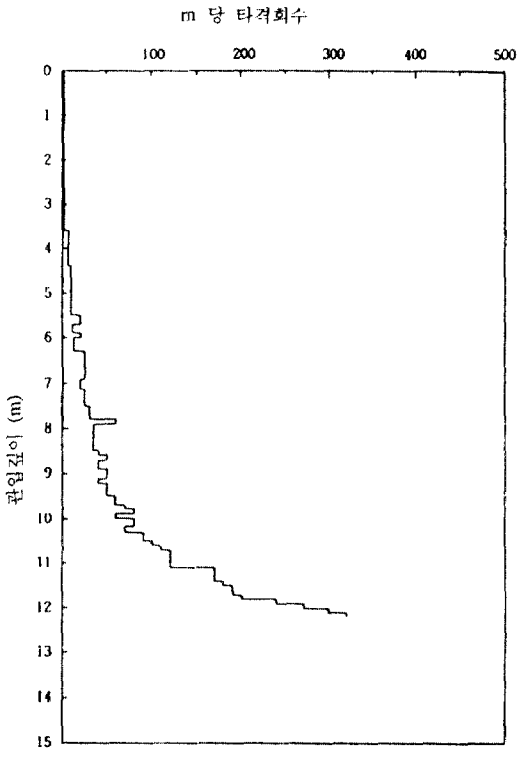
본 시험결과는 극한 지지력이 확인되지 못하여 부근에서 실시한 PC 및 PHC 말뚝 재하시험 결과를 참조하여 극한지지력을 유추하였다. 말뚝 재하시험 결과해석은 전침하량 기준(그림 17), B. Hansen의 판정법(그림 18), Davisson의 판정법(그림 19)등 해석법을 적용하였으며 S-log t(그림 20) 및 log P-log S(그림 21) 분석으로 항복하중 해석을 하였다. 분석결과 말뚝의 항복하중은 145 ton 이상이 되는 것으로 판단되며, 극한하중은 200 ton 정도인 것으로 판단할 수 있다. 이 결과로부터 말뚝의 설계하중을 결정하면 80 ton의 설계가 가능할 것으로 판단된다. 80 ton의 설계하중은 지반의 지지능력 및 재료의 허용 최대강도를 거의 100% 활용하는 수준이 되며, 따라서 경제적인 설계가 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

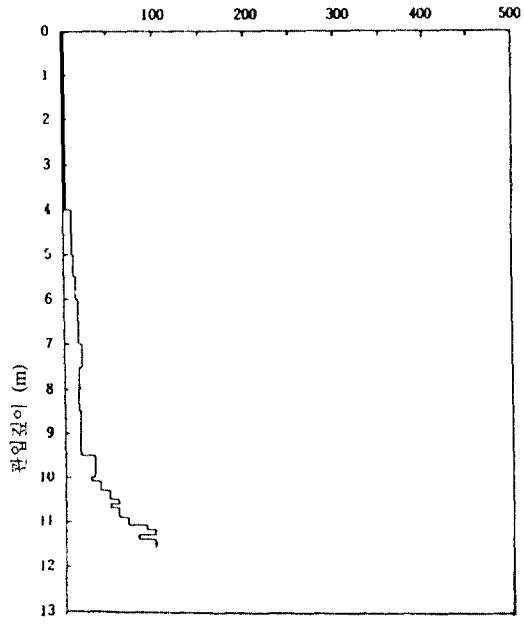
본 연구는 PHC 말뚝과 PC 말뚝에 대하여 파동방정식에 근거한 수치해석과 실제 항타측정 및 말뚝시공후 재하시험결과를 통하여 항타시공성과 지지력특성을 비교고찰하여 PHC 말뚝의 효용성을



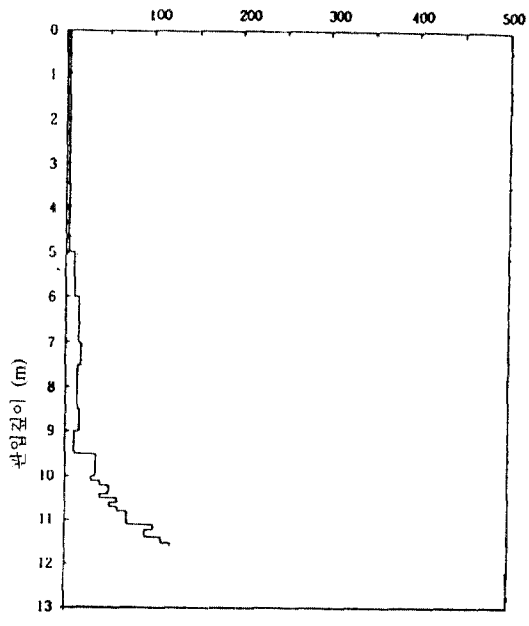
(a) PHC의 말뚝의 항타기록(K-35 헤머)



(b) PHC의 말뚝의 항타기록(K-35 헤머)



(c) PC의 말뚝의 항타기록(K-25 헤머)



(d) PC의 말뚝의 항타기록(K-25 헤머)

그림 15. PHC 말뚝과 PC 말뚝의 항타기록(III)

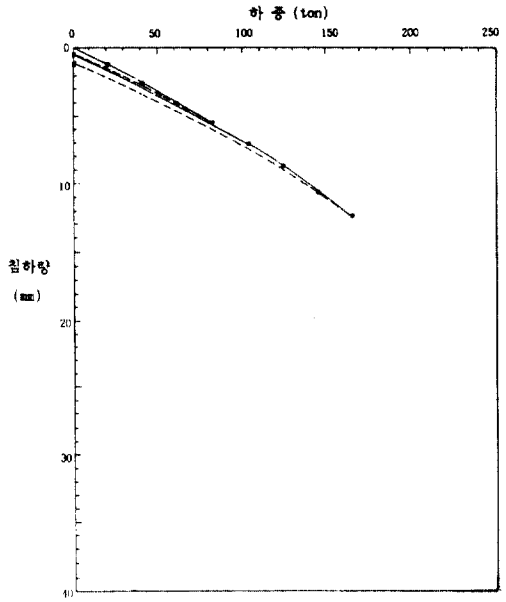


그림 16. PHC 말뚝의 재하시험 결과(III)

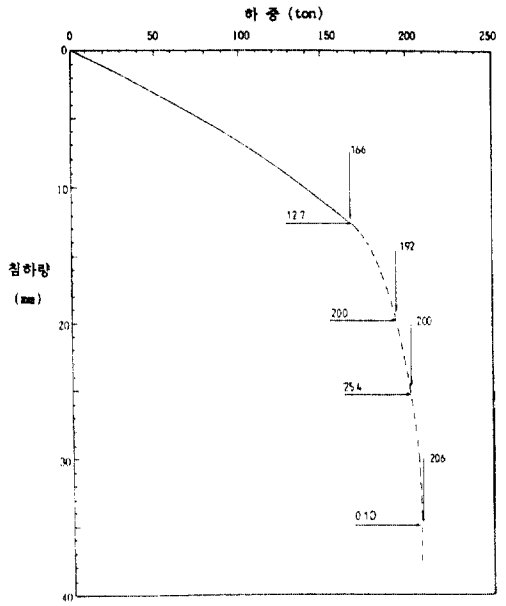


그림 17. 전침하량 기준

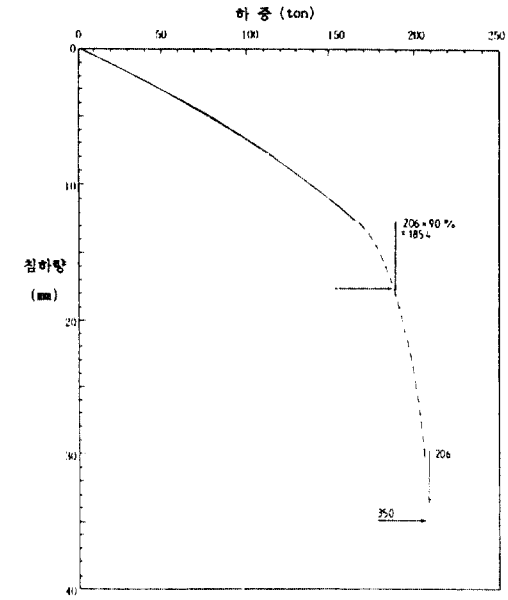


그림 18. B.Hansen의 판정법

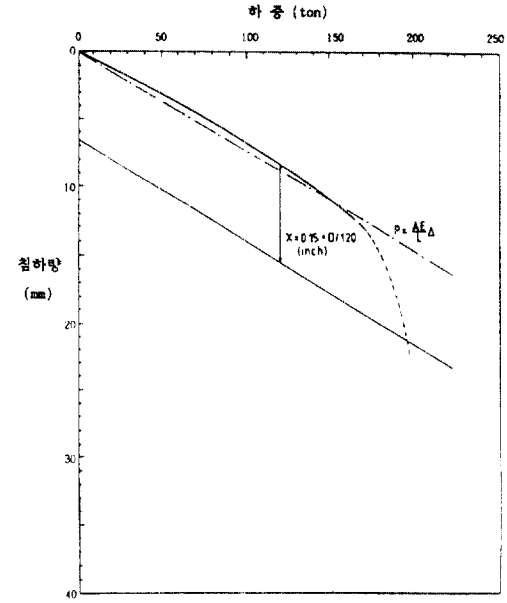


그림 19. Davisson의 판정법

연구한 것이다. 본 연구결과에 의하면 두 말뚝의 설계시공상의 근본적인 차이는 항타시공성이라고 볼 수 있다. 즉 소요의 깊이까지 말뚝이 박혀만 준다면 요구되는 지지력을 얻을 수 있으나, 말뚝이 선단 지지층에 관입되기도 전에 항타로 인한 과응력이 발생하여 말뚝 두부가 깨지는 등 손상을 입게 되면 더 이상 관입을 못하여 상대적으로 적은 극한지지력을 얻게 될 수 밖에 없다. 본 연구결과를 보면 PHC 말뚝은 말뚝에 유발되는 응력에 대한 저항성이 PC 말뚝에 비해 약 1.5배 정도 크므로 보다 큰 항

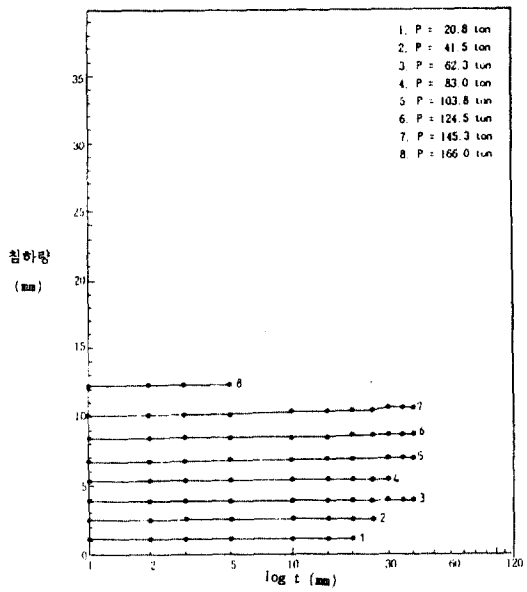


그림 20. S-log t curve

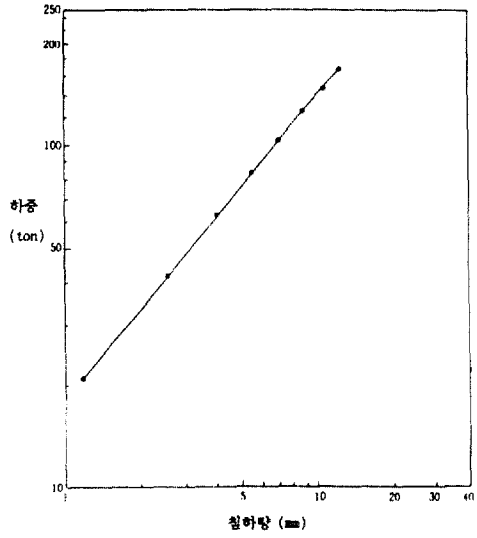


그림 21. log P-log S curve

타응력에도 over stress의 문제를 야기시키지 않을 수 있다. 다시 말해서 PC 말뚝에 소요되는 항타장비보다 한단계 큰 항타에너지를 발휘하는 항타장비를 선정하여 시공할 수 있을 것으로 판단되며 이때 말뚝은 더 깊게 관입되어 그만큼 큰 극한지지력을 가질 수 있는 것으로 판단되어 이러한 면에서 PC 말뚝보다 경제적이고 효율적인 항타작업을 실시할 수 있을 것으로 본다. 그러나 PHC 말뚝은 말뚝쿠션을 사용하지 않을 경우 큰 항타에너지에 의한 타격력으로 인해 ram의 반발고가 항타장비의 허용치를 초과하여 시공의 안전에 영향을 미치게 된다. 그러므로 국내의 항타말뚝설계의 수준을 높이기 위해서는 말뚝자체의 강성이 지반의 지지력과 일치하는 조건에서 최적의 장비선정 및 쿠션사용 등 적절한 시공관리를 실시하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 이명환. 이원제. 이장덕. 백세환. 김대영. 윤성진, "간편한 말뚝재하시험(SPLT)의 개요와 적용", 대한토질공학회지, 제6권, 제4호, 1990, pp. 53-64.
2. 이장덕, 이명환, "말뚝기초의 설계와 시공관리 개선방안", 연구보고서, 한국건설기술연구원, 1989, 277 pp.
3. 조서일. 박병찬, "말뚝박기에 대한 소고(I)", **대한토목학회지**, 제2권, 제3호, 1986, pp. 83-88.
4. Bowels, J.E., *Foundation Analysis and Disign*, 4th ed, McGraw Hill, Singapore, 1988, pp. 785-811.
5. Prakash, S. and Sharma, H.D., *Pile Foundation in Engineering Practice*, John Wiely & Sons, New York, 1990, pp. 235-253.
6. Poulos, H.G. and Davis, E.H., *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiely & Sons, New York, 1980, pp. 52-69.
7. U.S Department of Transportation Federal Highway Adminstration, Wave Equation Analysis for Piles, Arlington, 1980, pp. 14-47.

(接受 : 1993. 7. 27)