

PRD 공법을 이용한 매입말뚝의 지지력 특성

Bearing Capacity Characteristics of Drilled Shafts using Percussion Rotary Drilling

윤형준¹⁾, Hyeong-Joon Yun, 정국상²⁾, Kook-Sang Chung, 정상섭³⁾, Sang-Seom Jeong

- 1) 한용개발(주) 이사, Director, Han Yung Development Co., Ltd.
- 2) 한용개발(주) 대표이사, President, Han Yung Development Co., Ltd.
- 3) 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

개요(SYNOPSIS) The bearing capacity of drilled shafts that take excavation by Percussion Rotary Drilling (PRD) into consideration was evaluated using static and dynamic pile load tests. The emphasis was on quantifying the allowable bearing capacity and point load-transfer at the pile tip on seven instrumented steel piles.

Of the seven instrumented piles, five piles are placed to the bottom of the excavation by rotary and pushing into the final depth of the excavation, as opposed to the two driven piles.

Based on the results obtained, it is shown that the skin friction mobilized by PRD is much greater than point resistance, whereas in driven piles, the point resistance is greater than skin friction. It is also found that much greater pile capacity was proved in the case of drilled shafts, compared to the driven piles and thus, the excavation by rotary drilling gives reliable pile capacity required to design axially loaded piles.

주요어(Keyword) bearing capacity, drilled shafts, Percussion Rotary Drilling (PRD), skin friction,

1. 서론

지반 특성상 우리나라는 전형적으로 지표면에서부터 기반암까지의 깊이가 그리 깊지 않아 현재까지 양질의 기반암에 선단지지되는 항타말뚝기초를 많이 사용하고 있다. 그러나 최근에 각종 건설공사에 대한 소음 및 진동의 규제로 항타말뚝공사에 대한 민원이 끊임없이 제기되고 있을 뿐만 아니라 국토의 이용률이 점점 포화상태에 이르러 열악한 지반조건을 갖는 지역 내에서 대규모 말뚝기초의 활용이 증대됨으로 인해 말뚝공사의 주류를 이루고 있었던 항타공법이 점차 감소하고 있으며 이에 대한 보완으로 매입말뚝공법의 사용이 증대되고 있는 추세이다.

현재 국내의 매입말뚝 설계 및 시공, 품질관리에 대한 연구 및 이해는 부족한 상태에 있다. 이로 인하여 매입말뚝에 대한 설계지지력에 대한 확신이 부족하고, 시공 시 마무리항타로 인한 소음과 진동은 여전히 민원의 원인이 되고 있다.

최근 개발된 PRD(Percussion Rotary Drill)공법은 강관말뚝을 내부굴착과 함께 동시에 관입하는 공법으로 자갈전석층이 존재할 경우에도 관입이 가능하며, 특히 마무리 항타없이 회전압입으로 시공종료가 가능하여 매입말뚝 중에서도 저진동, 저소음 공법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 PRD공법을 이용한 매입말뚝의 지지력 특성을 동재하시험 및 정재하시험 결과를 통해 분석하였으며, 특히 시공종료방법이 지지력 특성에 미치는 영향을 중점적으로 연구하였다.

2. 매입말뚝공법

2.1 매입말뚝공법의 종류 및 특징

국내사회 여건의 변화와 국민의식 및 생활수준의 향상으로 건설 소음 및 진동에 대한 규제를 법으로 엄격히 제한하고 있어서 항타공법의 적용은 90년대 중반이후부터 크게 제약을 받아오고 있다. 그 결과

국내의 저소음·저진동 공법은 지반을 선굴착하고 기성말뚝을 삽입하는 선굴착 방법이 주로 사용되어 오다가 최근에 천공과 강관매입을 동시에 행하여 지중에 강관기초를 형성하는 PRD공법이 개발되어 적용되고 있다. 각 매입공법들의 장단점을 살펴보면 표 1과 같다.

표 1. 국내 매입말뚝의 종류와 장·단점

공법명	시공법	장·단점
SIP공법 (침설방식)	굴착공을 성형하고 시멘트 밀크를 주입한 후 말뚝을 삽입하고 고결.	소음 진동이 없음. 지반교란으로 지지력 저하.
SIP공법 (타격방식)	기본적으로 침설방식과 같으나 말뚝 삽입후 최종함다.	침설방식보다 지지력이 큼. 상당한 소음·진동 발생.
KSIP공법 (침설공법)	기존 SIP공법과 같으나 auger head 선단부 비트에 반구형 팁을 부착하여 천공면에 요철을 만들어 성형.	말뚝의 주면마찰력을 증대시킴.
나선돌기형	기존 SIP공법과 같으나 시멘트 밀크를 주입한 후 말뚝의 선단부에 돌기와 교반빔이 부착된 말뚝을 회전하면서 압입.	주면 마찰력 증대. 선단지지력 저하방지. 말뚝마다 선단부에 돌기와 교반빔이 부착된 말뚝을 제작하는 문제점.
선단 확대형	나선돌기형과 같으나 말뚝선단부에 확대구근을 성형하기 위한 확대날(expansible cutter)과 교반빔이 부착된 말뚝을 회전하면서 압입.	주면 마찰력의 증대. 선단지지력의 증가효과. 말뚝마다 확대날과 교반빔이 부착된 말뚝을 제작하는 문제점.
PRD공법	천공과 강관매입을 동시에 수행하여 지중에 강관기초 형성.	소음, 진동 영향 적음. 지지력 확인 용이 선단지지력 충분히 확보 가능(연압층까지 관입가능)

2.2 PRD공법

PRD 공법은 1980년경 일본에서 처음 시도된 말뚝 천공 매입공법으로 국내의 경우 1990년도에 처음 도입되었다. 그림 1은 PRD공법의 시공장비를 나타내며, PRD 전용장비에 의해 강관말뚝을 내부천공과 동시에 압입하므로써 말뚝을 설치한다. 이 공법은 1대의 장비로써 굴착과 말뚝매입을 동시에 수행하는 특징이 있고 강관내부를 굴착하는 air hammer는 선단에 특수 bit가 부착되어 있어서 천공시 토층에 크게 구애를 받지 않으며, 이로 인하여 천공시공 중 작업을 중단하는 경우가 극히 드물고 저소음, 저진동 공법으로 도심지 공사에 많이 사용되고 있다.

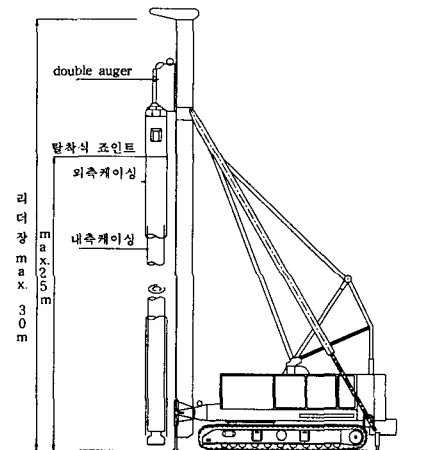


그림 1. PRD공법의 시공장비

3. 현장재하시험

PRD공법은 설계깊이에서 마무리항타 없이 기계 자중에 의해 말뚝을 1.0~2.0m정도 회전압입시킴으로 시공 종료가능하다. 이 경우 기존의 항타에 의한 시공종료방법과 비교하여 소정의 설계지지력이 발휘될 수 있는지 여부가 관심의 대상이다.

따라서 본 연구에서는 PRD 공법적용시 마무리항타 없이 회전압입방법으로 시공을 종료한 경우, 지지력 특성 및 소정의 설계지지력 발휘여부 파악을 위해 동재하시험 및 정재하시험을 수행하였다.

3.1 대상말뚝 및 지반조건

검토 대상말뚝은 포항시 ○○간 교량가설공사 현장에서 교량의 교대 및 교각의 기초로 사용된 총 7본의 말뚝으로, 모두 PRD공법에 의해 시공되었다. 시공종료방법으로는 표 2에 나타난 바와 같이 총 7본의 말뚝 중 5본은 시공장비의 자중을 이용한 회전압입방법에 의해 시공을 종료하였으며, 2본은 항타에 의해 선단지지층을 확인하는 방법으로 시공을 종료하였다.

표 2. 항타종료 방법

시공종료방법	회전압입방법	항타에 의한 선단지지층 확인방법
말뚝번호	case 1 ~ case 5	case 6 ~ case 7

시험말뚝의 제원 및 지반조건은 표 3과 같다. 말뚝의 재질은 강관(steel)이며, 직경은 대구경인 $\phi 812.8\text{mm}$ (5본)과 $\phi 1016\text{mm}$ (2본)의 두 종류이다. 지반조건은 대상말뚝이 모두 동일한 교량가설공사 현장내 교대 및 교각기초말뚝들이므로 지반층상이 유사하며, 점토 및 모래섞인 실트층이 대부분을 차지하였다. 깊이가 45m 근처에서 자갈층이 대략 2~5m 두께로 나타났으며, 그 아래에 연암층이 나타났다. 본 현장의 연암은 상층부가 완전 내지 보통이상으로 풍화된 이암으로 매우 약하였고 절리도 많이 발달되어 있었다.

표 3. 시험말뚝의 제원 및 지반조건

말뚝번호	직경/두께 (mm)	재질	말뚝근입깊이 (m)	지반조건	시공종료방법
case 1	$\phi 812.8/12$	강관	51.5	0~46m : 점토 및 모래질 실트층 46~48m : 자갈층 48~49.5m: 모래질 실트층 49.5m~ : 연암층	비항타 (회전압입방법)
case 2	$\phi 812.8/12$	강관	53.7	0~46m : 점토 및 모래질 실트층 46~48m : 자갈층 48~49.5m: 모래질 실트층 49.5m~ : 연암층	
case 3	$\phi 1016/16$	강관	53.5	0~46m : 점토 및 모래질 실트층 46~49.5m: 자갈층 49.5m~ : 연암층	
case 4	$\phi 1016/16$	강관	56.8	0~45m : 점토 및 모래질 실트층 45~50m : 자갈층 50m~ : 연암층	
case 5	$\phi 812.8/12$	강관	51.5	0~47m : 점토 및 모래질 실트층 47~48.5m: 자갈층 48.5m~ : 연암층	
case 6	$\phi 812.8/12$	강관	57.0	0~47m : 점토 및 모래질 실트층 47~52m : 자갈층 52m~ : 연암층	항타
case 7	$\phi 812.8/12$	강관	55.0	0~48m : 점토 및 모래질 실트층 48~50m : 자갈층 50m~ : 연암층	

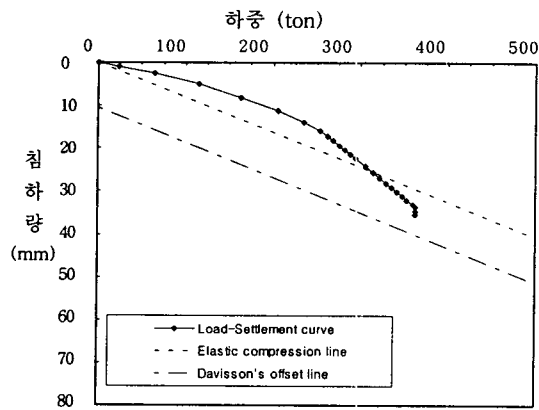
3.2 동재하시험 및 정재하시험

표 2에 나타난 바와 같이 case 1 ~ case 5는 회전압입방법에 의해 말뚝시공을 마무리한 경우이며, case 6, case 7은 항타로 시공을 마무리한 경우이다. 각 시공종료방법에 따른 지지력 특성파악을 위해 case 5를 제외한 6본의 말뚝을 대상으로 동재하시험을 실시하였다. 동재하시험 결과 산정된 허용지지력을 시공종료방법에 따라 서로 비교·검토하여 마무리항타를 하지 않고도 회전압입방법만으로 충분한 설계지지력이 얻을 수 있는지 여부를 검토하였다. 동재하시험에 비해 비용과 시간은 많이 소요되나, 가장 확실하게 지지력을 파악할 수 있는 정재하시험을 회전압입방법으로 시공을 종료한 말뚝 1본(case 5)을 대상으로 실시하였으며, 설계지지력 이상의 지지력을 얻을 수 있는지 여부를 파악하였다.

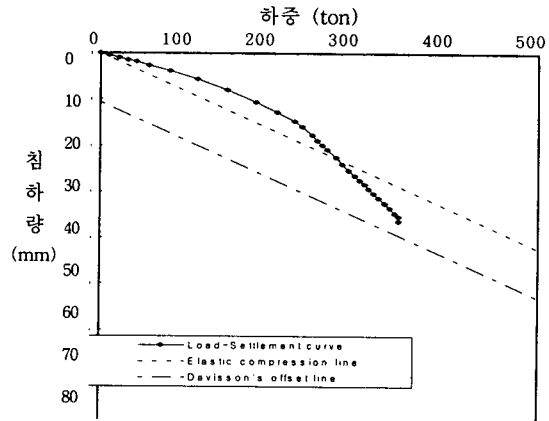
4. PRD공법 적용 말뚝의 지지력 특성 분석

4.1 시험말뚝의 지지력 판정

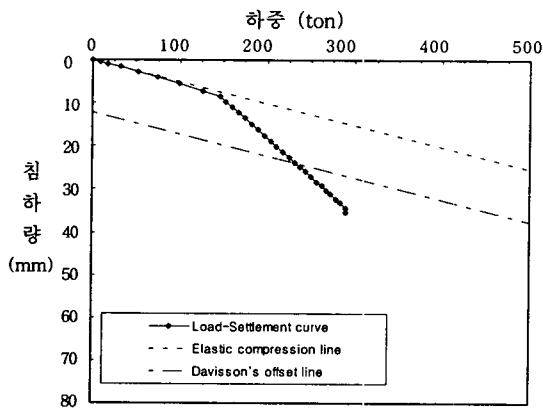
PDA결과 데이터를 이용하여 CAPWAP분석을 수행하였으며 이 결과를 바탕으로 안전율을 적용하여 허용지지력을 산정하였다. 그림 2는 총 6본의 말뚝에 실시한 동재하시험 결과 판정된 하중-침하량 곡선이며, Davisson 판정법을 적용하여 허용지지력을 산정하는 과정을 나타낸다.



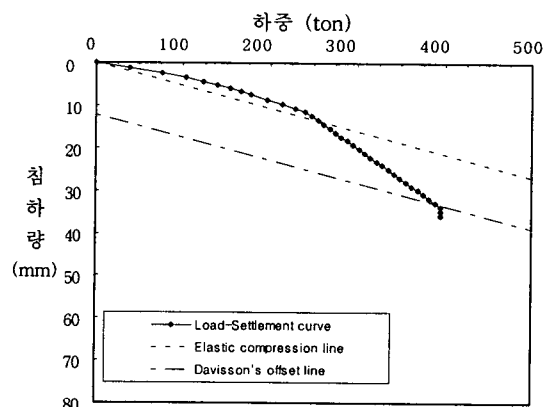
(a) case 1



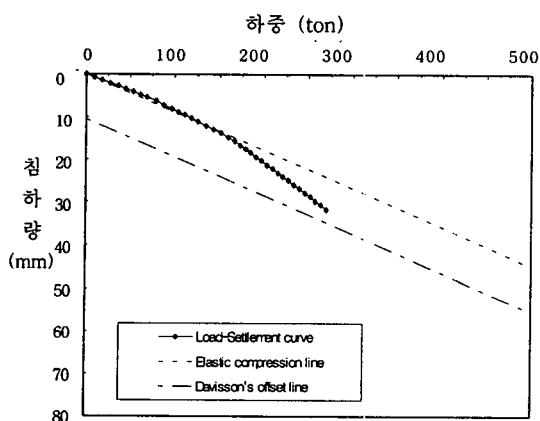
(b) case 2



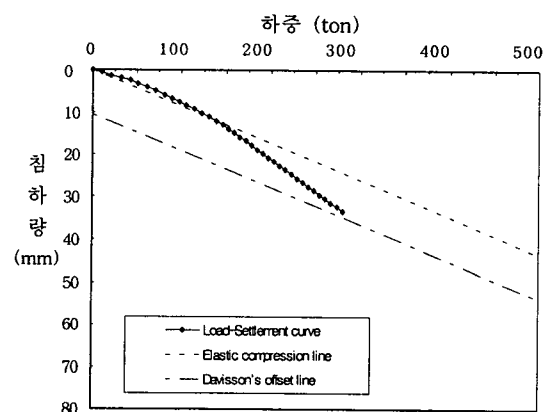
(c) case 3



(d) case 4



(e) case 6



(f) case 7

그림 2. Davisson 판정법에 의한 허용지지력 산정

이상 동재하시험 결과를 토대로 미국 FHWA와 Davisson판정법을 각각 적용하여 산정한 허용지지력과 설계지지력을 비교하여 표 4에 나타내었다. 허용지지력은 FHWA에서 제안한 방법보다 Davisson판정법을 적용한 경우에 일반적으로 더 큰 허용지지력이 산정되었다. 회전압입으로 시공을 종료한 말뚝(case 1~case 4)은 대체적으로 주면마찰력이 선단지지력보다 크게 나타났으며, 이와 반대로 항타로 시공을 종료한 경우(case 6, case 7)는 선단지지력이 주면마찰력보다 더 크게 나타났다. 이를 통하여 시공 종료방법이 말뚝의 거동형태에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

시공종료방법에 따른 허용지지력을 비교하기 위해 직경($\phi 812.8\text{mm}$)과 관입깊이(약 53m정도)가 비슷한 말뚝(case 1, case 2 과 case 6, case 7)들의 허용지지력을 서로 비교하였다. 직경은 모두 동일하며 관입깊이는 마무리 항타를 한 경우가 수m정도 길었지만, 동재하시험 결과 산정된 허용지지력은 오히려 회전압입에 의해 시공을 마무리 한 경우가 더 크게 산정되었다. 이를 통해 마무리 항타없이 기계자중으로 강관말뚝을 압입회전시켜 설계심도에 안착시키더라도 충분한 설계지지력을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

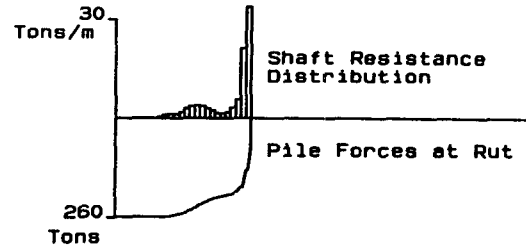
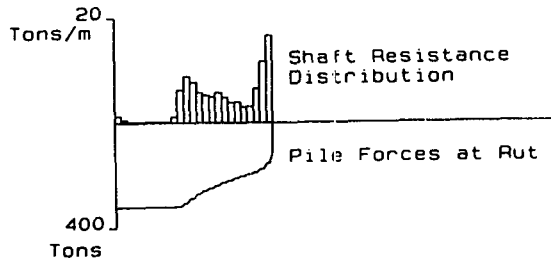
표 4. 지지력해석 결과

말뚝 번호	말뚝 길이 (m)	CAPWAP 방법						설계하중 (ton)	시공 종료 방법
		극한지지력 (ton)			Davisson 항복하중	허용지지력 (ton)			
		주면 마찰력	선단 지지력	전체 지지력		FHWA (FS=2.25)	Davisson (FS=2.0)		
case 1 ($\phi 812.8$)	51.5	232.2	131.4	362.6	362.5	161.1	181.2	112.1	비항타(회전 압입)
case 2 ($\phi 812.8$)	53.7	212.3	127.5	339.8	339.8	151.0	169.9	113.5	
case 3 ($\phi 1016$)	53.5	133.1	156.9	290.0	234.0	128.9	117.0	132.0	
case 4 ($\phi 1016$)	56.8	223.5	171.6	395.1	395.0	175.6	197.5	132.0	
case 6 ($\phi 812.8$)	57.0	125.9	155.5	281.4	281.4	125.1	140.7	116.0	항타
case 7 ($\phi 812.8$)	55.0	104.9	181.9	286.8	286.8	127.5	143.4	132.0	

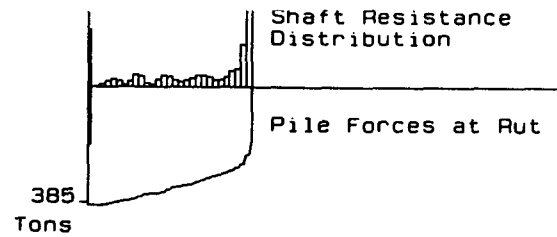
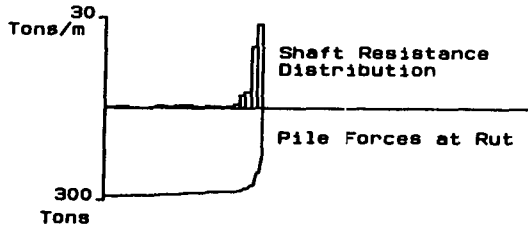
Case 3의 경우는 설계하중에 못 미치는 허용지지력이 계산되었다. 이는 지지되는 지반이 절리가 많고 약하여 충분한 지지력을 발휘하지 못하기 때문인 것으로 판단되었으며, 이로 인하여 대안으로 더 깊이 굴착하여 단단한 암반층에 선단부를 안착시키는 방법이 강구되었다. Case 7의 경우 FHWA방법으로 계산할 경우 허용지지력이 설계하중에 미치지 못하였으나 Davisson방법으로는 만족함을 알 수 있었다.

4.2 주면마찰력 분포

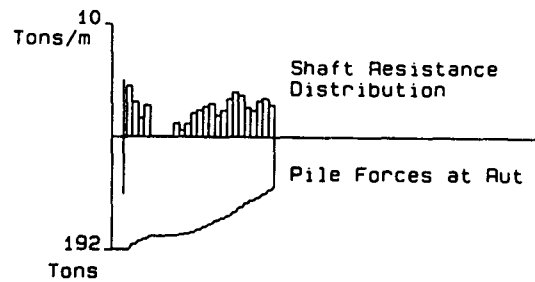
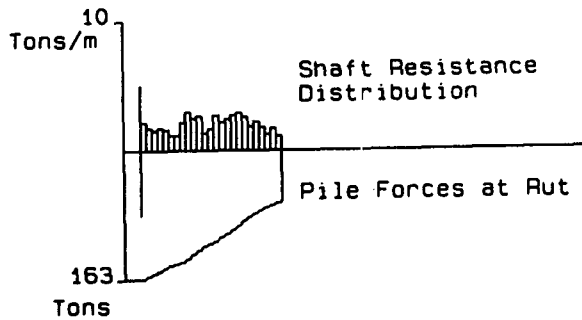
PDA결과 데이터를 이용하여 CAPWAP분석을 수행하였으며 이 결과를 바탕으로 안전율을 적용하여 허용지지력을 산정한다. PRD공법 적용말뚝의 동재하시험 결과 산정된 주면마찰력 분포도를 그림 3 및 표 5에 나타내었다. 그림 3에 나타난 바와 같이 회전압입에 의해 시공을 종료한 말뚝이 항타로 시공을 종료한 말뚝에 비해 선단부에서 더 큰 주면마찰력이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 회전압입에 의해 마무리되는 시공방법에 의한 영향으로 판단된다. 즉 내부오거에 의해 선굴착한 후 말뚝을 관입시키는 방법을 계속하다가 설계심도에 도달하면 내부오거를 제거하고 마지막으로 비트가 달린 말뚝을 약 1.0~2.0m 정도 회전시키면서 기계 자중의 중량으로 관입시키게 되는데, 기계의 중량이 약 60ton 정도 되므로 자중만으로도 충분히 설계 지점의 암반층에 안착시킬 수 있다. 이 과정에서 암반과 만나는 선단부의 주면에 매우 큰 주면마찰력이 발생하게 되며 이것이 말뚝 전체의 지지력에 큰 부분을 차지한다는 것을 알 수 있었다.



(a) case 1의 주변마찰력 분포(회전압입방법) (b) case 2의 주변마찰력 분포(회전압입방법)



(c) case 3의 주변마찰력 분포(회전압입방법) (d) case 4의 주변마찰력 분포(회전압입방법)



(e) case 6의 주변마찰력 분포(항타방법) (f) case 7의 주변마찰력 분포(항타방법)

그림 3. 시공종료방법에 따른 주변마찰력 분포

표 3에 나타난 말뚝 중 case5의 경우는 정재하시험 대상말뚝이다. 말뚝의 직경은 $\phi 812.8\text{mm}$, 관입깊이는 51.5m이며 시공종료방법은 회전압입방법을 사용하였다. 회전압입방법으로 시공을 종료하더라도 충분한 지지력을 얻을 수 있음을 동재하시험결과를 통해 확인하였으나, 정재하시험을 통해 보다 신뢰성있는 지지력을 산정하였다.

본 시험에서 최대계획하중은 설계하중(131.0ton)의 200%인 262.0ton까지 시행하였다. 재하시험 결과 그림 4에 나타난 바와 같이 175ton까지 포물선을 그리며 침하하였으며, 200ton부터 262.0ton까지는 직선 형태로 침하하였다.

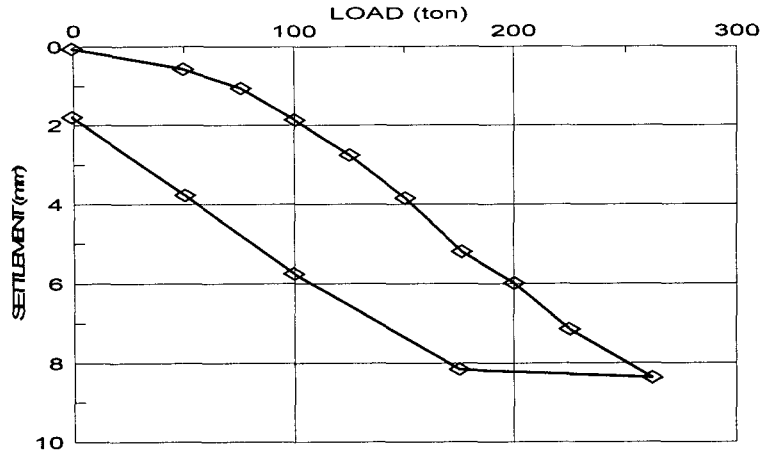


그림 4. 정재하시험의 하중-침하량 곡선

설계하중의 200%인 262ton까지의 침하량이 8.4mm로 측정되었으며 이때의 시간당 침하량이 200ton부터 감소하여 침하량이 점차 안정상태로 되어 실질적으로 항복상태까지 도달하기는 어렵다고 볼 수 있으며 하중을 완전히 제거한 후의 잔류침하량이 1.7mm로 측정되었으며 이 결과를 국외의 규정치를 적용하여 허용지지력 및 안전율을 검토하였다.

시험결과 분석은 P-S곡선법, log P-log S곡선법, S-log t법, P- $\Delta S / \Delta (\log t)$ 곡선법, 전침하량 및 잔류침하량 분석법등을 이용하였으며 그 결과를 표 5, 표 6에 나타내었다.

표 5 항복하중에 의한 결과분석

대상말뚝	분석방법	재하시험		안전율	허용지지력 (ton)	판정
		재하최대하중 (ton)	침하량 (mm)			
case5	P-S곡선법	262.0	8.4	2.0	131.0	131.0ton ↑
	log P-log S곡선법	262.0	8.4	2.0	131.0	
	S-log t법	262.0	-	2.0	131.0	
	P- $\Delta S / \Delta (\log t)$ 곡선법	262.0	-	2.0	131.0	
비고	시험장치 및 현장여건등을 고려하여 설계하중의 200%까지 시험을 실시하였다.					

표 6 전침하량 및 잔류침하량 기준에 따른 재하시험 결과분석

기준명 또는 제안자	침하량 (mm)	안전율 (허용지지력 산정시)	판정	비고
Terzaghi and Peck	25.4	1.5	131.0ton ↑	262.0ton 재하시 전체침하량 8.4mm
Woodward(1972)	12.7~25.4	1.5~2.0	131.0ton ↑	262.0ton 재하시 전체침하량 8.4mm
일본 토질공학회	25.0	2.0	131.0ton ↑	262.0ton 재하시 전체침하량 8.4mm
기준명 또는 제안자	잔류침하량 (mm)	안전율 (허용지지력 산정시)	판정	비고
미국 보스톤 건축기준	12.7	2.0	O.K	시험후 완전제하한 후의 잔류침하량 1.7mm
Woodward(1972)	12.7	2.0	O.K	시험후 완전제하한 후의 잔류침하량 1.7mm
일본 건축 기초구조 설계기준	D의 2.5%	23.0	O.K	시험후 완전제하한 후의 잔류침하량 1.7mm

회전압입방식으로 마무리를 한 말뚝을 대상으로 한 정재하시험 결과 설계하중인 131.0ton이상의 허용 지지력을 나타내었다. 이를 통해 마무리 항타 없이 기계 자중으로 말뚝을 회전압입시켜 말뚝시공을 마무리 한 경우에도 설계지지력 이상의 지지력이 발현됨을 알 수 있었다.

5. 결론

퇴적이암층에 설치한 PRD공법 적용 말뚝 7본 중 시공기기 자중에 의한 회전압입방법으로 시공을 마무리한 경우(5본)와 항타에 의해 시공을 마무리 한 경우(2본)을 대상으로 동재하시험 및 정재하시험을 수행하여 허용지지력을 산정하였다. 본 대상말뚝의 재하시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 회전압입으로 시공을 종료한 말뚝은 대체적으로 주변마찰력이 선단지지력보다 크게 나타났으며, 이와 반대로 항타로 시공을 종료한 경우는 선단지지력이 주변마찰력보다 더 크게 나타났다. 이를 통하여 시공종료방법이 말뚝의 거동형태에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.
2. 직경이 같고 지반특성 및 관입깊이가 비슷한 말뚝들을 대상으로 동재하시험을 수행하여 허용 지지력을 산정한 결과, 회전압입에 의해 시공을 마무리 한 경우가 오히려 항타로 마무리 한 경우보다 비교적 큰 허용지지력이 산정되었다. 또한 회전압입말뚝을 대상으로 정재하시험을 수행한 결과 설계지지력 이상의 허용지지력을 가짐을 알 수 있었다. 이를 통해 마무리 항타 없이 강관말뚝을 회전압입시켜 설계심도에 안착시키더라도 충분한 설계지지력을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
3. 주변마찰력의 분포는 말뚝 선단부에 위치한 이암층에 집중하여 나타났으며, 특히 회전압입에 의해 시공을 마무리 한 경우가 항타로 시공을 마무리 한 경우에 비해 더 큰 주변마찰력이 선단부에서 발생하였다. 이는 회전압입으로 마무리 한 경우는 지지되는 암반층에 마지막으로 약 1.0~2.0m 정도 시공기계의 자중을 이용해 회전압입시키는 과정에서 선단부의 주변에 더 큰 주변마찰력이 발생함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 건설부, 구조물 기초 설계기준, 1986, pp.187-309.
2. 대한주택공사 부설 주택연구소, 말뚝의 저소음·저진동 시공법에 관한 연구, 1996.
3. 백규호, 오성남, "나선돌기형 선국착 말뚝 공법의 지지력 특성", '96년 가을학술발표회 논문집, 1996, pp.295-302.
4. 이명환, 홍현성, 이원제 (1994), "말뚝기초의 최적설계", Keynote Lecture, 한국지반공학회 '94가을학술발표회 논문집, pp.68-69.
5. 정상섭, 항타시공관리를 통한 말뚝기초의 설계지지력 예측기법 개발, 1997, pp.69-81.
6. Cheek, J. R., "Analytical Methods to Predict Pile Capacities", *Behavior of Deep Foundations*, ASTM STP 670, 1961, pp.199-208.
7. Fellenius, B. H., "The Analysis of Result from Routine Pile Load Test", *Ground Engineering*, Vol. 13, No. 4., 1980.
8. Goble Rausche Likins and Associates, Inc., *CAPWAP-CASE Pile Wave Analysis Program*, Cleveland, Ohio, 1993.
9. Rausche, F., Gobel, G. G., and Likins, G. E., "Dynamic Determination of Pile Capacity", *Journal of Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 111, No. 3, 1985, pp.367-383.
10. Van Impe, W. F., "Deep Foundations on Board and Auger Piles" BAPIII, *Proc. of the 3rd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations*, 1998, 526p.