

## PRD 강관 말뚝의 연직지지력 특성에 관한 사례 연구

### Case Study on the Characteristics of Vertical Bearing Capacity for Steel Pipe Pile Installed by PRD

최용규<sup>1)</sup>, Yongkyu Choi, 정창규<sup>2)</sup>, Chang-Kyu Jung, 정성기<sup>3)</sup>, Sung-Gi Jung, 김동철<sup>4)</sup>, Dong-chul Kim  
정태만<sup>4)</sup>, Tae-Man Jung

- 1) 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept of Civil & Envir. Engrg, Kyung Sung University
- 2) 부산광역시 건설본부 과장, Manager, Construction Headquarter, Pusan Metropolitan City
- 3) 동아대학교 대학원 박사과정, Ph. D, Student, Dept of Civil Engineering, Dong-A University
- 4) 경성대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept of Civil Engineering, Kyung Sung University

**SYNOPSIS** : Construction case of PRD (Percussion Rotary Drill) pipe pile and matters to be attended in construction of PRD pile were reviewed. The compressive and uplifting static pile load tests for PRD piles were performed and, also, analysis by Pile Driving Analyzer was done. Based on these results, bearing components in each resisting part (that is; steel toe, external skin, and internal skin) were measured separately. The measured resisting force was compared to the value calculated by the estimated formula. The pile capacity was mobilized in steel toe area and the external skin friction and the internal friction were not produced. Thus, it could be considered that toe of PRD pile should be supported in hard bearing stratum (for example, the fresh soft rock).

**Key words** : PRD (Percussion Rotary Drill) Pile, Pile capacity, Base resistance, Internal frictional force, Hard bearing stratum

## 1. 서 론

설계상의 오류와 변경설계되어 선정된 PRD 시공 말뚝의 적용상 난점등으로 인하여 ○○교 재가설 공사 현장에서 발생된 문제점을 해결하는 과정에서 PRD 시공된 말뚝의 시공 사례, PRD 공법 적용 시 유의해야 할 사항과 발생 가능한 문제점들, 그리고 PRD 말뚝의 연직 지지력 특성등에 대해 고찰해 보았다.

PRD 강관 말뚝에서는 축하중전이의 측정을 위한 축하중 계측장치의 설치가 불가능하였으므로 압축 정재하시험, 인발정재하시험 그리고 PDA (일명 동재하시험)를 실시하였으며, 이들 말뚝재하시험 결과로부터 PRD 시공된 말뚝의 각 지지부에서 발휘될 수 있는 지지력을 분리하여 측정하였다. 측정된 지지력

값과 비교하여 PRD 시공된 강관말뚝의 연직지지력 특성을 규명하였다.

## 2. PRD시공법의 개요

PRD (Percussion Rotary Drill) 시공장비는 말뚝관입기 (Pile driver), 도우넛 오거 (Doughnut Auger), 공기압축기, 선단에 비트가 부착된 강관말뚝, 공기해머, 그리고 발전기 등으로 구성되어있다. 여기서, 강관말뚝의 선단에는 굴착용 비트를 용접하기 위하여 말뚝의 강재 두께 보다 두꺼운 강재 원환 (두께 : 19mm, 길이 : 38mm)을 용접하였다. 이 강재 원환의 내경은 말뚝내경과 동일하였으나 외경이 말뚝의 외경보다 두꺼워 시공상 문제를 야기 시킬 수 있는 가능성을 내포하고 있었다. PRD말뚝 시공순서를 간단하게 설명하였다. 먼저, 시공할 강관말뚝이 충분히 들어갈 수 있도록 Pilot 강관을 지중에 관입시킨후 관내도를 제거하였다. PRD 시공 중에는 말뚝의 연결이 곤란하므로 시공전에 충분한 길이 (본 현장의 경우 약 30m)를 확보하여야 하며 말뚝선단에는 굴착용 비트가 부착된 강재 원환이 용접되어 있어야 한다. 강관말뚝은 Pilot 강관 내에 삽입하고 도우넛 오거를 시공할 강관 내부에 넣은 후 말뚝 관입기로써 말뚝의 상단을 튼튼하게 고정시켰다. 말뚝관입기를 들어올려 말뚝시공 위치에 둔 후 공기해머와 도우넛오거로 지반을 천공하고 관내도를 지상으로 불어 올리면서 강관말뚝을 지중으로 관입시켰다. 이때, 도우넛오거 하부지반을 압축공기로 파쇄시키면서 불어내더라도 풍화암이나 연암등과 같이 지반이 단단한 경우에는 강관말뚝 강재부 하부까지는 천공하지 못하므로 굴착비트를 선단에 용접시킨 강관말뚝을 회전하면서 강관말뚝을 지반속에 관입시켰다. 이때, 선단에 용접된 원환이 말뚝의 외경보다 크므로 강관말뚝 외주면과 주변지반과는 접촉되지 않고 분리되어 있는 상태이거나 주변 지반이 붕괴되어 접촉되더라도 외주면 마찰력을 기대하기는 곤란할 것으로 보였다 (그림 1 참조). 그림 1에는 연암부에 최종 관입된 강관의 상태에서 볼 수 있듯이 파쇄된 연암조각은 압축공기에 의해 지표면까지 불려 올라오지 못하였으며, 말뚝시공을 종료한 후에 강관말뚝의 선단부에 최대 2m까지의 파쇄된 연암 조각이 잔류하는 것을 확인하였다. PRD 시공장비를 제거한 후 압축공기를 주입하여 파쇄된 연암조각을 지표면까지 불어 올리려고 하였으나 실패하였다.

말뚝의 관입을 종료한 후 말뚝항타기를 이용하여 강관말뚝을 항타하여 최종 관입량이 0.1~0.7mm까지 될 때까지 관입시켰다. 여기서, 연암에의 항타관입량은 0.1mm에도 미치지 못할 것으로 예상되지만, 실제 경우의 항타관입량은 0.1~0.7mm인 것으로 보아 그림 1(b)에 나타낸 것과 같이 도우넛오거에 의해 굴착되지 못한 선단지반의 일부또는 파쇄된 연암조각 잔류층만을 강관선단두께부가 관입해 들어간 것으로 판단되었다.

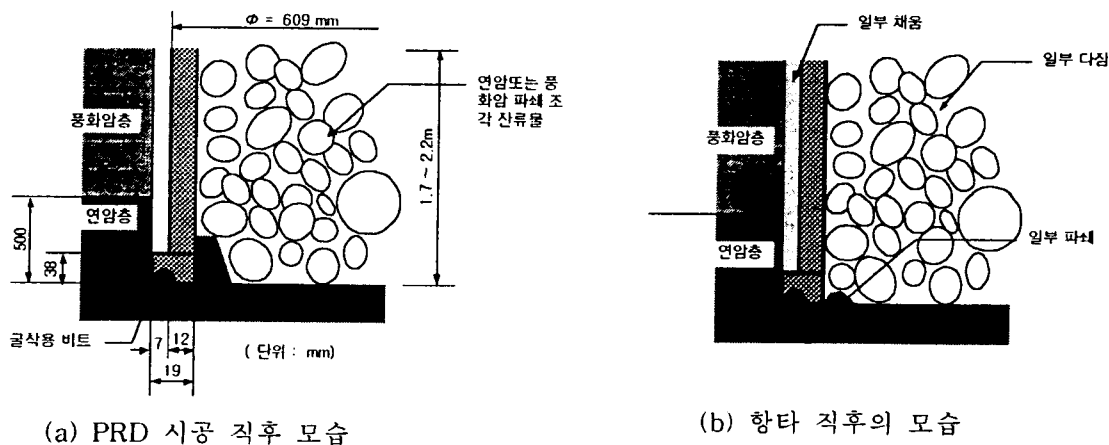


그림 1 PRD시공말뚝의 선단부 모습

### 3. 말뚝재하시험 및 결과

#### 3. 1 사례선정 및 설계개념상의 오류

○○교 재가설공사 현장의 P6교각기초말뚝을 사례로 선정하였으며 선정된 교각의 시추주상도를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 풍화암층이 매우 깊으며 풍화암층내에 암맥과 암상조각이 부분적으로 분포하고 있었다. 그러나, 설계에서는 강관말뚝 ( $\phi = 609\text{mm}$ ,  $t = 12\text{mm}$ )을 항타시공하도록 하였으며, 말뚝의 선단을 연암층에 0.5m 만큼 관입시키도록 하였다. 또한, 말뚝의 극한 지지력은 관내토의 폐색을 고려한 전폐쇄단면적 (A)과 말뚝선단하부 연암의 일축압축강도 ( $q_u$ )를 직접 이용하여 산정하였으며, 외주면 마찰력을 무시한 선단지지말뚝으로 설계하였다.

시공중 항타강관말뚝공법의 적용이 불가능한 것으로 판단하여 연암층까지 관입시킬 수 있는 공법인 PRD 시공법에 의한 매입말뚝 (Bored pile)의 개념으로 설계변경하였다. 이때, PRD 시공에 의하여 강관말뚝 관입후 콘크리트 속채움을 하여 전폐쇄단면적을 사용할 수 있도록 하였다.

이러한 설계 단계와 설계변경단계에서 여러 가지 다음과 같은 오류를 초래하였다.

① 시공 불가능한 말뚝시공법의 선정 : 풍화암층이 20m정도로 깊게 분포하고, 암맥과 암상조각이 부분적으로 분포하고 있어 항타관입이 불가능하며, 특히 연암층에 0.5m 항타관입은 만족시킬 수 없는 설계조건이었다.

② 말뚝의 극한 지지력 산정상의 오류 : 말뚝의 선단 지지력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_u = q_p \cdot A_p \quad (1)$$

$$= q_{u(d)} (N_\phi + 1) \cdot A_p \quad (1-1)$$

$$= \frac{1}{5} q_{u(lab)} (N_\phi + 1) \cdot A_p \quad (1-2)$$

여기서,  $q_p$  = 말뚝선단하부 암반의 단위 선단 지지력

$$q_{u(d)} = \text{공시체 직경이 1m 이상인 암석에 대한 일축압축강도} = \frac{1}{5} q_{u(lab)}$$

$$N_\phi = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$\phi$  = 배수마찰각

$A_p$  = 말뚝 선단 단면적

식 (1)과 (1-2)에서 살펴 볼 수 있듯이  $q_p$ 는 암석의 일축압축강도인  $q_{u(lab)}$ 과 동일한 것으로 될 수 없음에도 불구하고  $q_p$ 를  $q_{u(lab)}$ 으로 하여 선단지지력을 산정하였다. 또한, 채취된 시료에 대한 실내 실험을 수행하지도 않고 문헌상에 있는 연암의 일축압축강도의 최소치를 이용하여 계산하였다.

③ 외주면 마찰력의 무시 : 항타 개단 말뚝의 경우에는 하중의 대부분이 외주면 마찰력에 의해 지지될 수 있으므로 외주면 마찰력을 무시한 설계는 말뚝의 실제 거동을 전혀 고려하지 못한 설계이다. 따라서, 말뚝의 하중지지거동을 고려하여 설계하기 위하여 축하중 전이의 측정은 반드시 수행되어야 할 것이다.

④ PRD 시공상의 난점 : PRD 시공과정에 대한 설명에서도 언급하였듯이 말뚝의 외경보다 큰 원환이 말뚝선단에 용접되어 있어 말뚝의 외주면 마찰력이 전혀 발휘될 수 없었으며 파쇄된 풍화암과 연암조각들을 지표면 밖으로 불러 올리지 못하여 강관 내부에 1.7 ~ 2.2m의 슬라임을 잔류시켜 강관 내부에 콘크리트 속채움을 하더라도 강관 내부의 선단폐색이 가능할 수 없을 것으로 판단되었다.

공사명	강동교 재가설공사			공번	BH-6(P-6)	시료 ○ U.D ● S.P.T ● CORE ○ DIST
위치	부산광역시 강서구 강동동 - 봉림동			날짜	1997. 9. 26	
굴착심도	30.10 m	시추기	YT-200	시추구경	60 mm	
표고	-0.15 m	시추방법	ROTARY	담당자	김경서	

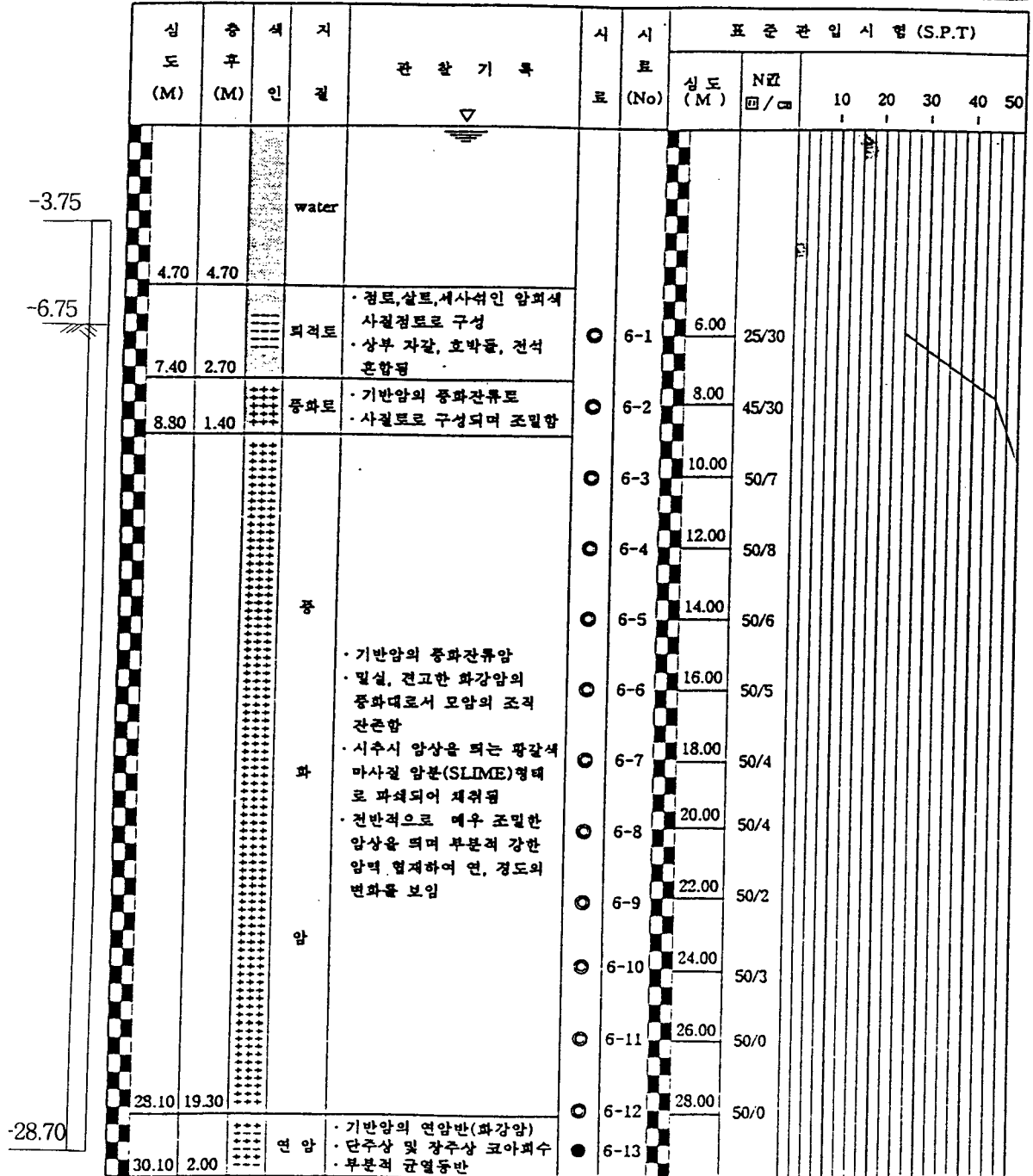


그림 2. 대표적인 지반주상도 (6P)

### 3. 2 말뚝재하시험 수행 결과

설계상의 오류와 변경설계에서 채택된 PRD 시공상의 문제점등으로 인하여 시공된 강관말뚝의 안정성(지지력과 침하)이 크게 우려되는 상황이었다. 따라서, PRD 시공된 강관말뚝의 안정성을 확인하기 위하여 말뚝재하시험을 수행하였다. 여기서, PRD 말뚝시공시 강관말뚝을 회전시켜 관입시키고 강관내부에서도 우넛오거로 굴착해 내어야 하므로 강관말뚝에 축하중 계측장치를 설치하는 것은 불가능하여 하중전이를 직접 측정하는 것은 극히 곤란하였다. 따라서, 압축정재하시험과 인발정재하시험을 수행하여 선단지지력과 주변마찰력을 분리하였다. 또한, PDA를 수행하였다. 수행된 말뚝재하시험들의 구체적인 계획을 표 1에 나타내었다.

표 1. 정재하시험과 PDA로 부터 구한 지지력

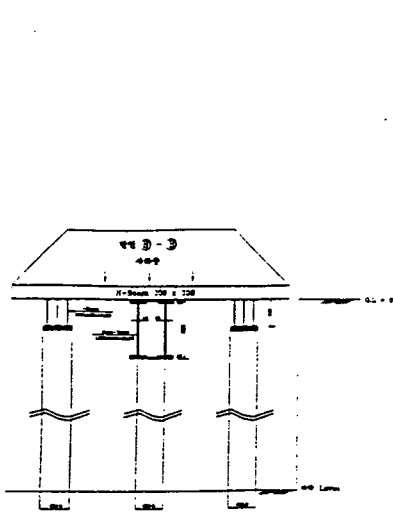
시험방법	극한지지력 (톤) (선단력/마찰력)	항복지지력 (톤) (선단력/마찰력)	허용지지력(톤) (선단력/인발력)	안전율
정재하시험	? (?/55*)	260 (215/45**)	130 (112/18***)	극한 : 3.0 항복 : 2.0
PDA	496 (361/135)		198 (144/54)	2.5

시공된 강관말뚝들은 말뚝기초 위에 확대기초를 설치하기 위하여 두부정리하여 절단되었으므로 말뚝재하시험을 위하여 용접하여 지표면 상부까지 연장시켰다. 압축정재하시험과 인발정재하시험의 개요를 그림 3에 나타내었다. 압축정재하시험에서는 상재된 사하중의 제한으로 인하여 최대 400톤까지 재하하였으며, 극한하중까지 재하할 수 없었으나 항복하중은 측정할 수 있었다. 인발정재하시험에서는 반력말뚝재하방식을 사용하였으며 210톤까지 재하하였는데, 극한인발지지력을 구할 수 있었다. 그림 4에는 압축정재하시험, 인발정재하시험, 그리고 PDA에서 구한 말뚝머리하중-침하량 관계를 도시하였다. 여기서, PDA의 경우에는 선단지지하중과 마찰지지하중을 분리하여 도시하였다.

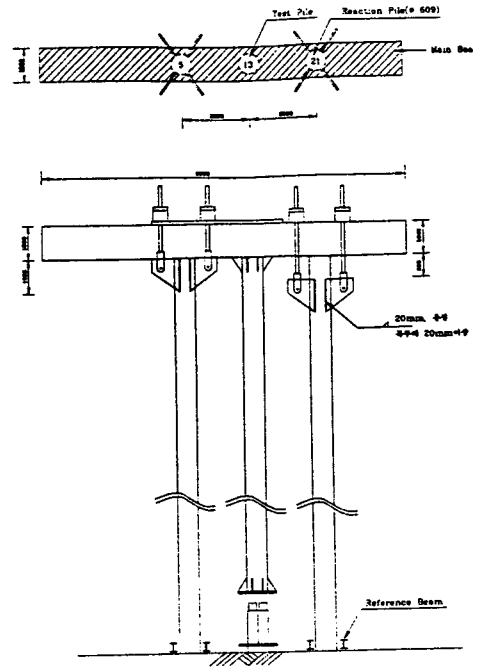
### 4. PRD말뚝의 연직지지력 특성

그림 4에서 말뚝의 연직극한 (또는 항복)지지력과 허용지지력을 결정하였으며 선단지지력과 마찰지지력을 분리하였다. 정재하시험의 경우에는 인발지지력을 마찰지지력과 동일한 것으로 가정하였으며, PDA의 경우에는 해석에 의하여 분리하였다. 말뚝정재하시험과 PDA로 부터 구한 지지력을 표 2에 나타내었다. 그림 4에서 PDA로 구한 침하량은 다소 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 지지력도 다소 큰 값을 나타내었다.

그림 4에서 정재하시험 결과를 토대로 PRD 시공된 말뚝의 허용지지력을 130톤으로 결정하였으며, 선단지지력과 마찰력을 각각 112톤과 18톤으로 결정하였다. 말뚝기초의 허용선단지지력과 허용외주면마찰력은 말뚝선단이 관입된 지반 (연암)의 일축압축강도를 이용하여 계산하였는데, 채취된 연암의 최소 일축압축강도는  $600\text{kg}/\text{cm}^2$ 이었으며, 내부마찰각은  $45^\circ$ 로 가정하였다 (Goodman, 1980). 선단지지력은 말뚝선단 강재부에서만 발휘된다고 가정하였으며, 말뚝선단 강재부의 허용선단지지력은 식 (1)에 의해 계산된 극한지지력에 안전율 (F.S. = 3.0)을 적용시켜 구하였다. 극한주면마찰력은  $q_{u(lab)}$ 의 15%만 발휘되고 이 마찰응력은 선단원환링과 연암사이의 마찰면에서만 발휘된다고 가정하여 구하였다. 계산된 허용선단지지력과 마찰력은 각각 99톤과 22.5톤이었다. 따라서, 허용선단지지력에서 선단 강재부의 지지력을 감하여 관내토 폐색력을 12톤으로 구하였으며, 전체 폐색단면적 ( $0.27\text{m}^2$ )에 대한 관내토 폐색률은 1.6%였다.

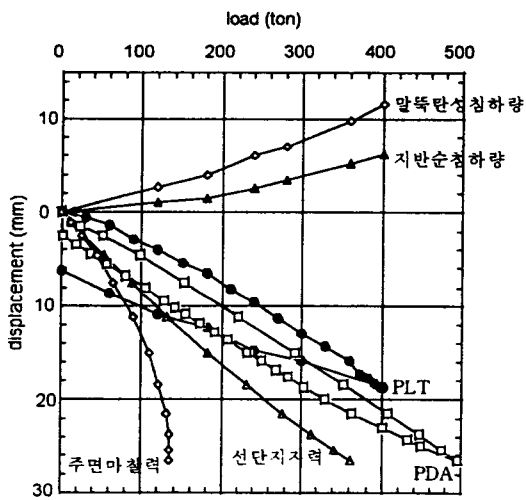


(a) 압축정재하시험

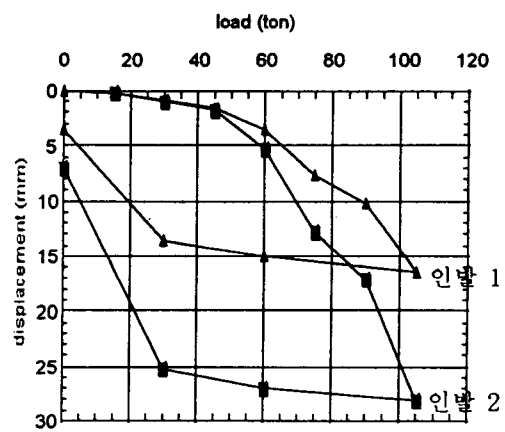


(b) 인발정재하시험

그림 3. 정재하시험의 모습



(a) 압축정재하시험과 PDA 결과



(b) 인발정재하시험의 결과

그림 4. 말뚝재하시험결과

표 2. 수행된 말뚝재하시험 개요

말뚝재하시험	시험말뚝 기호	말뚝제원	선단부슬라임 높이 (m)	최종항타관입량 (mm)	시험수행시기 (설치후경과 기간, 일)	목 적
압축정재하시험	P6-13	$\phi = 609\text{mm}$ $t = 12\text{mm}$ $l = 22.0\text{m}$	2.08	0.3	90	지지력 측정
인발정재하시험	P6-21		1.85	0.1	100	주면마찰력 측정
인발정재하시험	P6-5		1.85	0.4	100	
PDA	P6-24		1.70	0.4	80	지지력예측

- \* 인발재하시험에서 구한 극한인발력
- \*\* 인발재하시험에서 구한 항복인발력
- \*\*\* 55/3와 45/2중에서 작은 값

선단원환링의 외주면과 연암부사이의 마찰면에서 계산된 허용마찰력만으로도 말뚝재하시험에서 측정된 허용주면마찰력을 초과하고 있는 실정이므로 말뚝외주면과 지반사이에서는 마찰력이 전혀 발휘되고 있지 않은 실정이다. 따라서, PRD공법에 의해 시공된 말뚝은 선단에 부착된 원환링의 외경이 말뚝의 외경보다 크게 제작되어 말뚝외주면과 주변 지반과는 완전하게 분리되어 있는 상태이거나, 말뚝최종항타시에 약간의 흙부스러기들이 분리된 틈새를 채우고 있는 상태로 볼 수는 있으나 마찰력은 전혀 발생되고 있지 않는 것으로 판단되었다. 따라서, PRD 시공된 개단말뚝은 선단 강재 두께부의 선단지지력에 의존하는 선단지지말뚝으로 거동하는 것으로 판단되었다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 선단하부지반과 강관말뚝재료의 동시항복이 유발될 수 있을 것으로 예상되었으므로 강관말뚝내부에 콘크리트 속채움을 실시하였다. 콘크리트 속채움은 강관말뚝의 과도한 탄성변형을 감소시키는 역할을 할 수 있었으며, 강관내부에 잔류하는 파쇄된 암석부스러기를 제거할 수 없었으므로 지지력 증가와는 무관하였다. 즉, 강관내부선단에 풍화암과 연암의 파쇄조각들이 2m정도 잔류하고 있어 관내부 폐색을 기대할 수 없었으므로 전폐쇄단면적을 사용할 수 없었다. 따라서, 그림 4와 선단 지지력 계산에서도 확인할 수 있었듯이 PRD시공된 말뚝은 선단지지 말뚝으로 거동하였으며, 선단 강재부에서만 지지력이 발휘될 수 있었다. 따라서, 강관말뚝의 선단을 연암에 확실하게 지지시켜야 할 것으로 판단되었다.

## 5. 결론 및 제언

설계에서의 오류, 설계변경되어 시공된 PRD 말뚝의 시공상의 난점등을 고찰하였으며, PRD 시공된 강관말뚝의 연지지력특성을 고찰하였다. 본 연구의 결론 및 제언을 다음과 같다.

- 1) 현장의 지반조건에 시공 불가능한 말뚝시공법의 선정, 말뚝의 극한 지지력 산정상의 오류, 그리고 외주면마찰력의 미고려등과 같은 설계상의 오류와 PRD 시공법의 적용상의 이해부족등으로 현장에서 애로가 발생하였다.
- 2) PRD 시공된 강관말뚝은 선단지지말뚝으로 거동하였으며 말뚝의 선단강재부에서만 선단지지력을 발휘하였다. 외주면마찰력을 거의 기대할 수 없었으며, 강관 내부에 콘크리트 속채움을 하더라도 내부선단부에 굴삭슬라임이 약 2m정도 잔류하여 관내도 폐색을 기대할 수도 없었다.
- 3) 선단지지지반과 말뚝재료의 동반항복이 유발되었다. 따라서 선단지지지반의 충분한 강도를 확보하기 위하여 연암지반에 지지시켰으며, 강관말뚝의 과도한 변위를 방지할 수 있도록 콘크리트 속채움을

하였다.

4) PRD 시공된 말뚝의 경우, 주변마찰력이 발휘되지 않아 말뚝의 탄성변형이 과도하게 발생할 수가 있을 것으로 예상되었으므로 콘크리트 속채움을 실시하였으며 이는 지지력 증진과는 무관하였다.

## 참고문헌

1. (주)동아지질 (1998), “말뚝정재하시험보고서 (강동교 재가설공사),” GTE-보고-98646, 1998.12.
2. (주)동아지질 (1998), “말뚝동재하시험보고서 (강동교 재가설공사),” GTE-보고-98644, 1998.11.
3. 부산광역시 건설안전관리본부 (1996), “강동교 재가설공사 실시설계보고서,” 삼안기술공사, 1996.12.
4. Das, B.M. (1995), “*Principles of Foundation Engineering*,” 3rd ed. PWS Publishing Co, PP. 524-525.
5. Goodman, R.E. (1980), “*Introduction to Rock Mechanics*,” John Wiley & Sons, New York.