

## 항타 관입된 강관말뚝의 지지력 특성에 관한 사례연구

### A Case Study on Characteristics of the Bearing Capacity for Steel Pipe Piles installed by Driving

고용일<sup>1)</sup>, Yong-Il Koh, 정재성<sup>2)</sup>, Jae-Sung Chung, 최두호<sup>3)</sup>, Doo-Ho Choi, 김교익<sup>4)</sup>, Kyo-Ik Kim.

<sup>1)</sup> 한라건설(주) 기술연구소 차장, Deputy General Manager, R&D Center, Halla Eng'g & Const. Corp.

<sup>2)</sup> 한라건설(주) 기술연구소 대리, Assistant Manager, R&D Center, Halla Eng'g & Const. Corp.

<sup>3)</sup> 한라건설(주) 기술연구소 연구원, Researcher, R&D Center, Halla Eng'g & Const. Corp.

<sup>4)</sup> 한라건설(주) 토목부 부장 (현장소장), General Manager (PM), Civil Project Department, Halla Eng'g & Const. Corp.

**SYNOPSIS** : A lot of open-ended steel pipe piles are installed by driving. They have the advantages of being robust, capable of carrying high compressive loads when driven on to a hard stratum, and capable of being driven hard to a deep penetration to reach a bearing stratum, although they have the disadvantages such as high material cost, corrosion and so on. In this study, the characteristics of bearing capacities for open-ended steel pipe piles were analyzed, such as set-up and soil plug constructed in soft ground which residual soil or weathered rock exists in deep depth (35.0m~40.0m), and the more economical design procedure of pile foundation was studied. In addition, reliability and rational application method of pile driving formulas used as a means of site control when driving the working piles were discussed.

**KEYWORDS** : E.O.I.D.(End Of Initial Driving), Set-up, Soil plug, Pile driving formula

## 1. 개요

강관말뚝은 재료비가 비교적 고가이며, 부식에 대한 단점이 있지만, 깊은 지지층까지 재료의 파괴없이 관입할 수 있으며, 두부정리시 발생하는 잔여분의 재활용이 가능하고, 본당 지지력이 우수하다는 등의 장점이 있어 구조물의 기초로 많이 사용되고 있다.

본 사례는 지지층으로 판단되는 잔류토층 및 풍화암층이 지표면으로 부터 약 35.0m~40.0m 깊이에 존재하는 연약지반에 항타시공된 강관말뚝의 설계지지력 만족여부를 비롯하여 시간경과효과, 폐색효과 등 말뚝의 지지력특성을 알아보았으며, 보다 더 경제적인 말뚝기초 설계를 위한 방안을 검토해 보았다. 또한, 현재 대부분의 현장에서 말뚝의 시공관리 수단으로 많이 이용하고 있는 항타공식을 본 현장에 적용하여 그 신뢰성과 합리적인 적용방안에 대해 논하였다.

## 2. 지반조건

본 사례 현장은 준설매립에 의해 조성된 부지로서 지층분포는 지표면으로 부터 준설매립층, 해성퇴적

층, 풍화암, 연암등으로 구성된다. 준설매립층의 토질은 SM 또는 ML로 구분되며 두께는 약 3.5m~4.5m 정도이다. 해성퇴적층의 토질은 ML, CL, SM등이 교호하고 있으며, 그 깊이는 지표면으로 부터 약 35.0m~40.0m에 이르고 그 아래로 풍화암이 출현한다. 그림-1은 본 사례 현장에서 실시된 시추조사중 대표적인 것을 나타낸 것이다.

### 3. 강관말뚝의 시공조건

본 사례 현장에 시공된 강관말뚝(SPS400)은 직경  $\phi 406.4\text{mm}(t=12\text{mm})$ 와  $\phi 609.6\text{mm}(t=12\text{mm})$ 의 두 가지 종류로써 외부 Shoe 부착 방법으로 선단이 보강된 말뚝을 DKH유압해머로 항타관입하였다. 또한, 본 시공에 앞서 말뚝의 시공조건을 결정하기 위하여 시항타와 함께 동재하시험(E.O.I.D.)을 실시하였다.

항타말뚝에 대한 동재하시험방법의 적용은 단순한 지지력 확인차원이 아닌 항타시공관입성(Drivability), 해머성능, 말뚝재료의 건전성 등을 평가할 수 있다. 즉, E.O.I.D.시험을 통해 파악할 수 있는 대표적인 사항으로는 지반조건, 말뚝종류 및 항타기에 따라 설계지지력을 충족시킬 수 있는 낙하고의 결정, 최종항타관입량(Set Value)의 결정이며 특히, 항타시 말뚝재료의 허용항타응력을 초과하지 않은 범위내에서 항타가 실시되어야 한다. E.O.I.D.시험은 현장에 투입된 항타기 별로 각각 실시하여 최적의 시공이 이루어지도록 하였다. 표-1은 본 현장에 시공된 강관말뚝의 종류 및 E.O.I.D.시험에 의해 결정된 시공조건을 정리한 것이다. (시공조건은 시공초기에 투입된 항타기에 대해 시험한 결과임)

표-1. 강관말뚝의 종류 및 시공조건

말뚝 종류 (SPS400)		$\phi 406.4\text{mm}$ (12t)	$\phi 609.6\text{mm}$ (12t)
설계연직 지지력		980.0kN	1,470.0kN
말뚝재료의 허용지지력		1,607.2kN	2,440.2kN
선 단 보 강 외부 shoe부착 (External Stiffening Ring)			
시 공 조 건	항타장비	DKH-7 유압해머	DKH-10 유압해머
	램낙하고	1.1m	1.1m
	최종평균 관입량 (Set Value)	2.0~4.0mm	3.0~4.0mm
말뚝관입길이		31m~37m	30m~42m

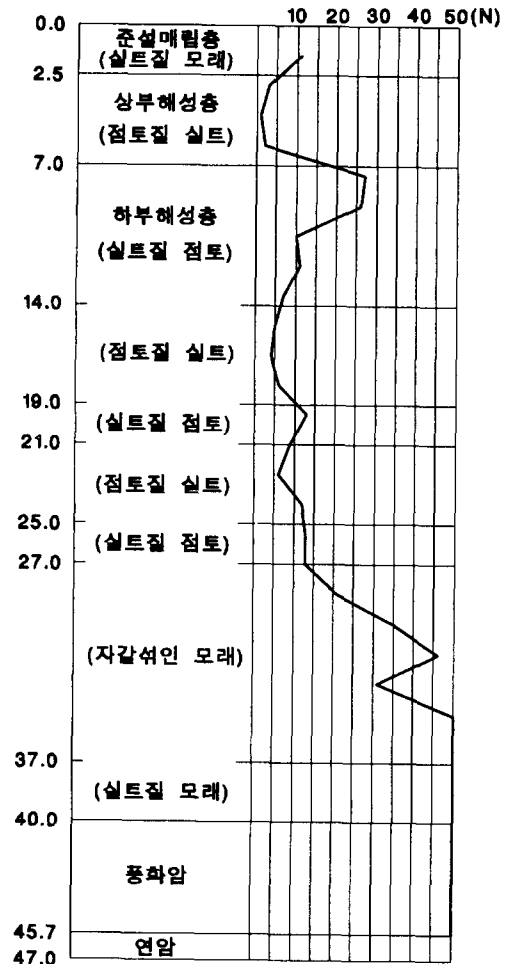


그림-1. 지반조건

## 4. 시험에 의한 지지력 특성평가

### 4.1 동재하시험 결과

본 현장에 타입된 말뚝들의 시공조건 결정, 항타기 성능평가 및 설계지지력을 만족하는지의 여부, 지지력특성 등을 평가하기 위해 동재하시험(E.O.I.D., RESTRIKE)을 실시하였다. 본 현장에서 실시된 여러 재하시험은 Working Pile에 대한 것으로서 말뚝의 극한하중을 확인하지는 못하였다.

동재하시험은 ASTM D 4945규정에 의해 실시하였으며, 허용지지력의 판정은 CAPWAP 방법으로 분석하여 구해진 모사 정적재하곡선(Simulated static pile load curve)에 Davisson 판정법을 적용하여 항복하중을 판정한 후 안전율 2.0을 적용하였다. 물론, 동재하시험 결과로 부터 허용지지력을 결정하는데 있어서 판정법 및 안전율 적용에 대해 많은 논란이 있어 이에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

표-2. a) 동재하시험 결과 ( $\phi$  406.4mm)

말뚝번호	관입깊이 (m)	시험종류	지지력(kN)			허용지지력 (kN)	기타
			주면	선단	전체		
a	34.7	E.O.I.D.	1,477.8	1,291.6	2,769.5	1,384.7	
		RESTRIKE	2,861.6	394.0	3,255.6	1,627.8	9일후
b	33.5	E.O.I.D.	798.7	1,357.3	2,156.0	1,078.0	
c	31.6	E.O.I.D.	501.8	1,916.9	2,420.6	1,210.3	
d	37.0	E.O.I.D.	603.7	1,997.2	2,600.9	1,300.5	
e	36.8	RESTRIKE	2,175.6	1,195.6	3,371.2	1,685.6	7일후
f	35.2	E.O.I.D.	626.2	1,960.0	2,586.2	1,292.6	
g	35.2	E.O.I.D.	938.8	1,388.7	2,327.5	1,161.3	
h	33.2	E.O.I.D.	715.4	1,911.1	2,626.4	1,313.2	
i	31.6	E.O.I.D.	1,480.8	999.6	2,480.4	1,239.7	

표-2. b) 동재하시험 결과 ( $\phi$  609.6mm)

말뚝번호	관입깊이 (m)	시험종류	지지력(kN)			허용지지력 (kN)	기타
			주면	선단	전체		
A	42.8	E.O.I.D.	2,117.8	1,214.2	3,332.0	1,666.0	
		RESTRIKE	3,243.8	981.0	4,224.8	2,111.9	9일후
B	31.3	E.O.I.D.	1,804.2	1,774.8	3,579.0	1,789.5	
C	30.5	E.O.I.D.	1,470.0	2,156.0	3,626.0	1,813.0	
D	31.7	E.O.I.D.	1,643.5	2,536.2	4,180.7	2,090.3	
E	35.0	E.O.I.D.	1,796.3	2,064.9	3,861.2	1,930.6	
F	34.8	E.O.I.D.	1,288.6	1,691.5	2,981.2	1,490.6	
G	35.4	E.O.I.D.	1,652.3	2,150.1	3,802.4	1,901.2	
H	32.1	E.O.I.D.	735.0	2,254.0	2,989.0	1,494.5	
		RESTRIKE	1,945.3	1,593.5	3,538.8	1,768.9	9일후
I	33.6	E.O.I.D.	2,242.2	1,599.4	3,841.6	1,920.8	
		RESTRIKE	5,395.9	724.2	6,119.1	3,059.6	8일후
J	30.5	RESTRIKE	2,439.2	1,589.6	4,028.8	2,013.9	10일후
K	24.2	E.O.I.D.	1,629.7	2,550.9	4,183.6	2,091.3	

표-2 a), b)는 시험결과를 말뚝직경별로 정리한 것으로 모든 시험말뚝들이 설계지지력을 만족하고 있는 것으로 판정되었다. 여기서, E.O.I.D.시험은 시공직후에 시행된 것이며, RESTRIKE시험은 시공 후 일정기간이 경과한 후에 시행한 것이다.

#### 4.2 지지력의 시간경과 효과

지반에 시공된 말뚝은 시간이 경과함에 따라 그 지지력이 변할 수 있다. 이는 말뚝시공시부터 간극수압, 지반응력, 흙의 구조 등이 시간에 따라 변하기 때문이며, 이로 인해 말뚝이 시공된 시점으로 부터 시간경과에 따라 지지력이 변화하는 것을 말뚝지지력의 시간경과효과라 한다. 시간경과에 의해 말뚝지지력이 증가하는 것을 Set-up 또는 Freeze라 하며, 감소하는 것을 Relaxation이라 한다. 지지력의 증가 또는 감소의 여부와 이들의 정량적인 량은 지반조건에 따라 다르며, 이는 시간경과별로 재하시험을 실시함으로써 알 수 있다.

본 사례에서는 E.O.I.D.시험과 RESTRIKE시험 결과로 부터 말뚝지지력의 시간경과효과를 알아보았다. 말뚝종류에 대하여 지지력 성분별로 증가비율을 구하여 표-3에 정리해 보았으며, 그림-2는  $\phi 406.4\text{mm}$  말뚝(표-2. 말뚝번호 a)의 E.O.I.D.시험과 RESTRIKE시험시 측정된 깊이별 주변마찰저항의 분포를 나타내 보았다.

표-3. 지지력 성분별 증가현황

말뚝 종류	지지력 성분	지지력 (kN)		증가 비율 (R/E)	말뚝 번호
		E.O.I.D.	RESTRIKE		
$\phi 406.4$	주면	1,477.8	2,861.6	1.94	a
	선단	1,291.6	394.0	0.31	a
	전체	2,769.5	3,255.6	1.18	a
$\phi 609.6$	주면	2,117.8	3,243.8	1.53	A
		735.0	1,945.3	2.64	H
		2,242.2	5,395.9	2.41	I
	선단	1,214.2	981.0	0.81	A
		2,254.0	1,593.5	0.71	H
		1,599.4	724.2	0.45	I
	전체	3,332.0	4,224.8	1.27	A
		2,989.0	3,538.8	1.18	H
		3,841.6	6,119.1	1.59	I

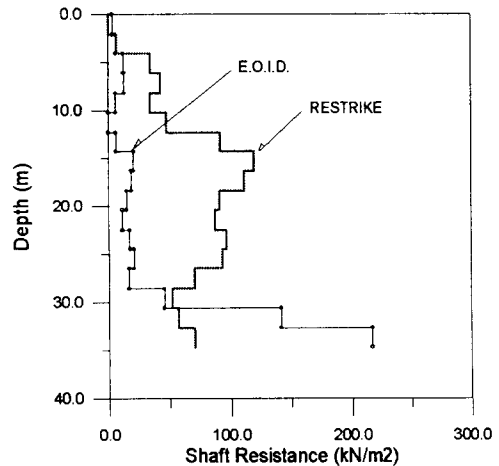


그림-2. 깊이별 주변마찰력 분포( $\phi 406.4\text{mm}$ 말뚝)

위 표-3에서 처럼, 시간경과에 따라 전체지지력(Total Resistance)은 1.18-1.59배 정도로 증가하고 있으며, 이와같은 지지력의 증가는 주변마찰력(Shaft Resistance)의 증가로 인한 것임을 알 수 있다. 주변마찰력의 증가량은  $\phi 406.4\text{mm}$ 말뚝은 1.94배,  $\phi 609.6\text{mm}$ 말뚝은 1.53-2.64배 정도이다. 이때, 선단지지력(Tip Resistance)의 경우는 감소현상이라기 보다는 Set-up에 의한 지지저항의 증가로인해 재항타 시험 당시의 타격에너지가 선단지지력 성분을 충분하게 측정하기에는 부족한 상태였음을 의미한다고 할 수 있다. 그림-2에서 RESTRIKE시험시 주면에서는 저항이 상당히 증가되어 있으나, 선단부분에서는 저항이 적게 측정되고 있는것도 위와 같은 이유라 할 수 있다.

여러 학자들의 연구결과에 의하면, 선단지지력은 초기항타시 값과 거의 일정한 값을 유지하는 것으로 밝혀졌으며 또한, 말뚝의 지지력은 시간경과에 따라 계속 증가하지는 않으며 일정값으로 수렴하는 것으로 알려져 있다.

### 4.3 설계 및 시공현황 분석

이 등(1996)에 의하면, 국내 여러 현장에서 시공된 229개소의 강관말뚝의 설계 및 시공자료를 조사 분석한 결과

① 국내 강관말뚝 설계는 재료허용하중대비 52.4%의 수준으로서 강관말뚝의 허용하중에 비해 낮은 설계가 이루어 지고 있다고 할 수 있으며,

② 시공결과는 재료허용하중 대비 76.8% 수준으로서

이 결과를 설계현황 52.4%와 대비하면 국내의 시공결과는 설계된 내역의 1.47배 수준으로 이루어지고 있는 것으로 나타나고 있다. 즉, 이 결과를 단순 적용하면 현재 시행되고 있는 것보다 최소 50%까지 향상된 수준으로 설계가 가능하다고 할 수 있겠다. 이와같은 말뚝설계 및 시공에 있어서 예산낭비를 줄이기 위해서는 말뚝재료 및 말뚝의 지지력에 대한 이해가 우선되어야 하리라 생각한다.

다음 그림-3은 본 현장에서 시공된 각 말뚝들의 재료허용하중과 설계하중, 그리고 동재하시험 결과에 의한 허용지지력을 비교해 본 것이다.

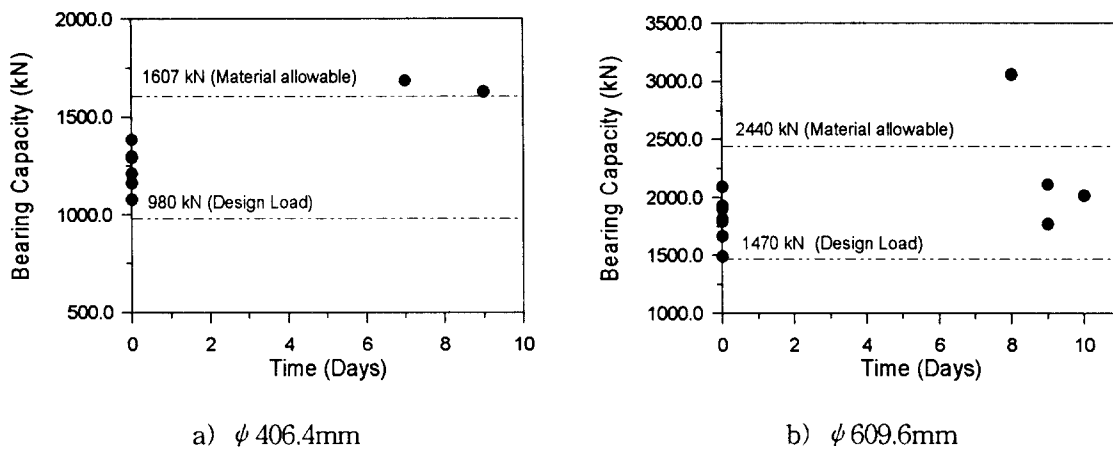


그림-3. 허용지지력 비교

본 현장의 경우,

① 설계는 재료허용하중 대비  $\phi 406.4\text{mm}$ 말뚝이 60.9%,  $\phi 609.6\text{mm}$ 말뚝이 60.2% 수준이며,

② 시공결과는 재료허용하중 대비  $\phi 406.4\text{mm}$ 말뚝이 101.2%~104.7%,  $\phi 609.6\text{mm}$ 말뚝이 72.5%~86.5% 수준으로서

$\phi 609.6\text{mm}$ 말뚝에 비해  $\phi 406.4\text{mm}$ 말뚝이 말뚝재료에 충족하는 시공이 이루어 졌다고 할 수 있으나, 두 종류의 말뚝 모두 설계하중은 과소하게 산정되었음을 알 수 있다.

이를 비교하면,  $\phi 406.4\text{mm}$ 말뚝은 설계내역의 1.6~1.7배,  $\phi 609.6\text{mm}$ 말뚝은 1.2~1.4배 수준 정도로 더 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

### 4.4 항타공식의 적용

말뚝의 연직지지력을 구하는 방법에는 정재하시험, 동재하시험, 정동재하시험, WEAP, 그리고 항타공식 및 정적지지력 공식등이 있으나, 이들중 특히 항타공식에 의한 방법은 이용의 편리성은 있으나 그 신뢰성에 있어서는 많은 의문이 제기되고 있다. 낮은 신뢰성에도 불구하고 대부분의 말뚝시공 현장에서 항타공식에 의한 시공관리가 이루어지고 있는 실정이므로 항타공식에 대한 기술자들의 올바른 이해로서 불합리성을 최소화 하여야 할 것이다.

항타공식은 지반조건, 말뚝종류 및 길이, 항타기 종류 및 항타효율 그리고 시공기술 등에 따라 큰 차이가 있을 수 있다. 즉, 대부분의 현장에서 시공관리기준으로 정해놓은 최종타격당 관입량(Set value)은