

## 동재하시험을 이용한 항타시공관리 적용사례 Case Study on the Application of Dynamic Pile Testing

홍헌성<sup>1)</sup>, Hun-Sung Hong, 이명환<sup>1)</sup>, Myung-Whan Lee, 조천환<sup>1)</sup>, Chun-Whan Cho, 이원제<sup>1)</sup>, Won-Je Lee, 황천복<sup>1)</sup>, Chun-Bok, Whang

<sup>1)</sup> (주)파일테크, Piletech Consulting Engineers.

**SYNOPSIS** : Dynamic Pile Load Test using PDA(Pile Driving Analyzer) has been developed to determine pile load capacity, and to estimate pile integrity, hammer performance. In this paper the applied cases of PDA test for quality control of pile installation, especially large and long pile, are discussed. From field measurements and analyses the dynamic test was recognized as a useful test method.

**Key words** : PDA(Pile Driving Analyzer), Dynamic Pile Load Test, Hammer performance, CAPWAP Capacity.

### 1. 서 론

구조물 기초형식으로서 말뚝기초를 시공하는 방법은 크게 항타에 의한 타입시공과 선굴착후 말뚝을 삽입하고 시공하는 매입공법으로 구분할 수 있다. 타입시공방법을 채택하는 경우에는 소정의 관입심도와 설계지지력을 확보하는 데에 말뚝종류와 해머선정의 적정성이 가장 중요한 요소로 작용하게 된다. 특히 이와같은 항타말뚝에 관하여는 그간의 시공실적과 경험을 토대로 나름대로 시공관리 기준을 설정하여 현장에서 적용하고 있지만 근래에 활성화되어 가고 있는 정재하시험이나 동재하시험 등의 확인 시험결과 및 보고에 의하면 과잉설계나 과잉시공 등 비경제적이고 불안정한 항타말뚝시공이 여전한 것으로 나타나고 있다.

이러한 불합리한 항타말뚝시공의 미비점을 개선하기 위한 방법이 많이 제안되고 문헌들에 보고되고 있지만 국내 말뚝시공현장에서는 아직도 상당부분 구태를 벗지 못하고 단순 경험에만 의존하여 항타공정을 진행함으로써 시공종료후에 보수·보강작업에 의한 공비의 과다지출, 공기지연 등 불합리한 시공을 개선하지 않는 기초시공현장이 상존하고 있다.

그러나 최근에는 이와 같은 개선 사항의 인식이 높아지고 또한 구조물의 중요도를 충분히 감안함으로써 정상적인 항타말뚝시공 현장이 점차 늘어가고 있어 매우 고무적인 상황이라 할 수 있다. 특히 동재하시험의 활용범위가 단순한 설계지지력 확인 차원에서 벗어나 시험방법 본래의 적용성을 충분히 이용하기 시작하였다는 점은 경제적이고 합리적인 항타시공의 주요한 바탕이 되고 있다고 생각된다.

본 논문에서는 항타시공되는 말뚝기초 중 장대말뚝에 대하여 파동이론에 근거한 시공중 및 시공후 동재하시험 결과를 기초로 적정한 항타장비 선정과 시공관리 기준을 설정, 합리적인 시공관리로 안전한 기초구조물의 건설을 도모하였던 사례를 제시함으로써 말뚝기초의 시공품질 향상을 도모하기 위한 동재

하시험의 유용성과 실무활용성을 제고하고자 하였다.

## 2. 항타시공관리

일반적으로 항타말뚝을 시공하기 위한 최적의 시공해머를 선정하는 방법은 그림 1.과 같은 과정을 거치는 것이 바람직하다.

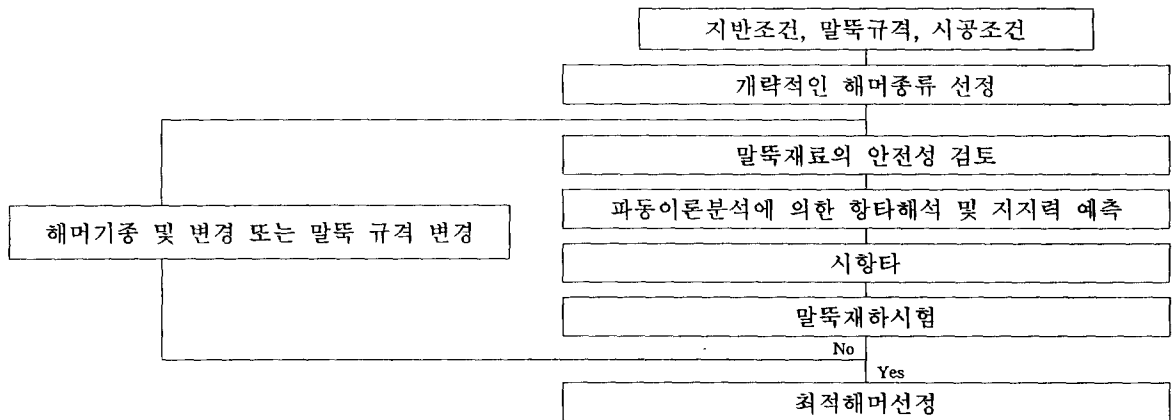


그림 1. 항타말뚝 시공을 위한 최적해머선정 흐름도

그림 1.의 선정과정 중 개략적인 해머종류 선정과 과동이론분석에 의한 항타해석 및 지지력 예측과 관련한 구체적 방법들은 각종문헌이나 논문(이명환 등, 1996) 등에 잘 나타나 있으며, 이들 전체과정 중 기존의 정재하시험(Static Pile Load Test) 방법을 적용하여 선정된 해머에 의한 시공 결과를 확인하고 적정해머를 변경/선정하였던 사례연구(이명환 등, 1994)들이 보고된 바 있다.

본 사례연구에서는 최적의 해머선정과 아울러 말뚝의 지지력, 말뚝재료의 타격에 의한 건전성 여부를 판정하기 위해 PDA(Pile Driving Analyzer)를 사용한 동재하시험을 항타시공 도중 및 종료직후, 일정시간 경과조건 등에서 실시함으로써 본시공에 대한 적절한 항타관리 기준을 제시하였던 사례를 살펴 보았다.

표 1.에는 사례분석의 대상이 된 2개 현장의 항타시공 현황을 주요항목별로 나타내었다.

표 1. 항타시공 현황

CASE No.	기초구조물 종류	말뚝종류	설계하중	관입깊이	해머종류	지반 조건	시험종류
PT1	교량기초	φ 800×13 thk 강관말뚝	127 ton	51.0 ~ 59.5 m	YBH-12유압해머 (램중량 12.0 ton)	그림 2	EOID & RSTR
PT2	건물기초	φ 609.6×12 thk 강관말뚝	150 ton	32.0 m	BSP-9 유압해머 (램중량 9.0 ton)	그림 3	EOID & RSTR

註) EOID(End of Initial Drive) : 말뚝 항타도중 또는 항타종료 직후 수행하는 시험이며 항타시공 관입성(Driveability)과 말뚝의 선단지지력을 측정함으로써 말뚝의 시공관리 목적에 사용된다.

RSTR(Restrike) : 재항타 시험을 뜻하며, 말뚝시공 후 일정한 시간이 경과한 후 실시하는 시험으로서 지반의 set-up 효과의 확인과 함께 말뚝의 허용지지력 산정을 목적으로 함.

표 1.의 내용중 관입깊이는 동재하시험의 대상이 되었던 시험항타 말뚝의 대표적인 값의 범위를 나타낸 것이며, 지반조건의 경우도 시험항타 말뚝의 위치와 가장 근접하거나 현장의 대표성을 갖는 지층조건을 도시하였다.

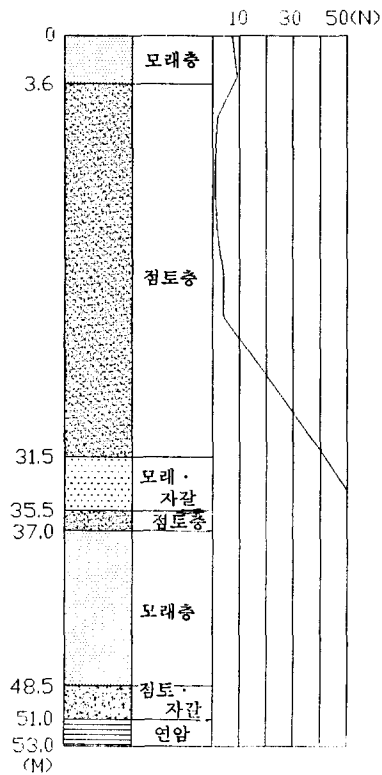


그림 2. 토질주상도(PT1)

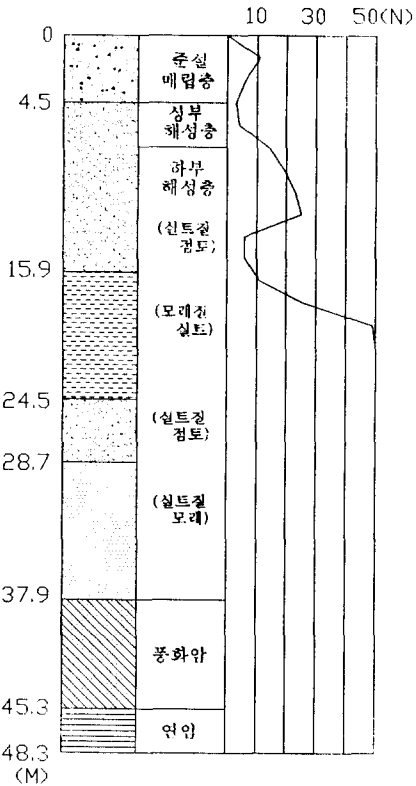


그림 3. 토질주상도(PT2)

### 3. 사례분석

앞의 표 1.에 요약한 시공상황에 대하여 「① 시험항타 → ② 항타중 동재하시험 → ③ 항타종료직 후 동재하시험 → ④ 일정시간 경과후 동재하시험 → ⑤ 시공장비의 적정성 판단 및 허용지지력 판단 → ⑥ 결론」의 순서로 동재하시험방법을 적용하였던 사례를 CASE No.별로 기술하면 다음과 같다.

#### 3.1 CASE No-PT1

본건 현장은 램중량 12 ton의 유압해머를 사용하여 낙하고 1.2 m 높이로 타격당 최종관입량이 「8 mm/타격」에서 「1.0 mm/타격」으로 관입저항이 증가하는 과정에서 EOID시험 및 RSTR시험을 실시함으로써 지지력 및 시공관리기준을 제시하였던 사례이다.

표 2.는 측정 및 분석결과를 요약한 것이며 그림 4. 및 그림 5.에는 CAPWAP분석에서 도출되는 하중-침하량곡선과 PDAPLOT(PDA를 사용하여 측정된 각종항목을 관입깊이나 항타회수와 관계로 도시하여줌으로써 항타시공관입성을 분석할 수 있는 도식화된 프로그램) 도시결과를 나타내었다.

강관말뚝의 허용타격응력은 항복강도(2400 kg/cm<sup>2</sup>)의 90%인 2160 kg/cm<sup>2</sup>이며, 그림 5.의 평균 1600 kg/cm<sup>2</sup>로 측정된 CSX(게이지 위치에서의 최대압축응력) 값과 비교하면 아직 타격응력에 충분한 여유가 있어 과잉항타의 문제가 전혀없음을 알 수 있으며, 측정된 타격에너지와 시공해머의 정격 최대에너지인 14.4 ton-m(=12 ton×1.2 m)와의 비(比)인 해머효율(에너지 전달효율)은 60%정도임을 알 수 있다. 한편 그림 4.의 하중-침하량 관계곡선을 시험시기별로 비교할 때 시간경과에 의한 지지력의 set-up효과를 확인할 수 있으며 이는 허용지지력 판정에 중요한 요소가 됨을 볼 수 있다. 이상의 시험결과를 토대로 본건 현장의 본시공에서는 타격당 최종관입저항이 「5 mm/타격」일 때 항타를 종료하는 것으로 시공기준을 제시하였고 이에 따라 안전하게 설계지지력을 확보할 수 있었다.

표 2. 동재하시험 결과(PT1)

시험 말뚝 번호	시험 구분	관입 깊이 (m)	타격당 관입량 (mm)	CAPWAP분석결과 및 Davisson관정법에 의한 항복하중(ton)	예상 최대부주면 마찰력 (ton)	허용지지력 (안전율 2.0)	타격에너지 (ton-m)	
							말뚝 두부	선단부
NO215	E.O.I.D	48.0	5.0	360.0	17.7 (말뚝기초 검토의견서 근거)	171.1 ton	8.75	0.99
		51.0	8.0	284.0		133.1 ton	9.09	1.32
	Restrike (4일경과)	51.0	1.0 이내	460.0		221.1 ton	8.34	0.34

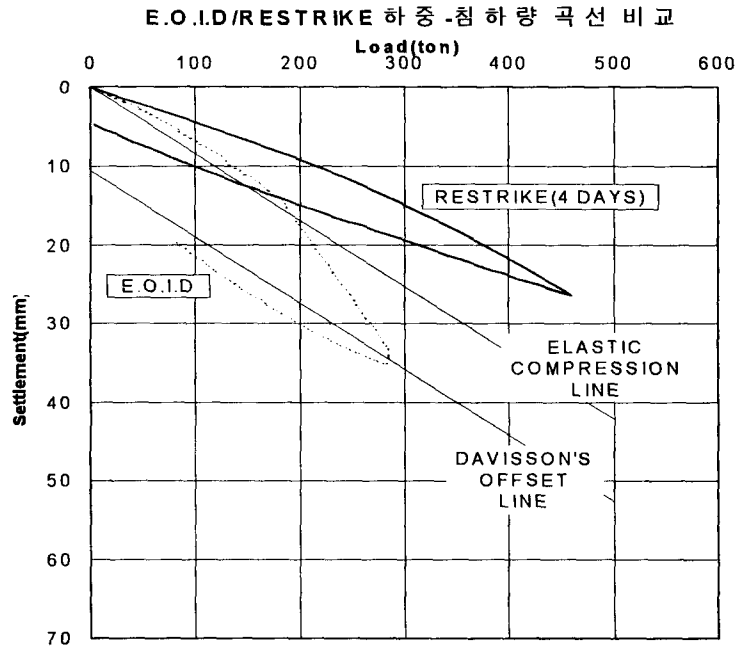


그림 4. 시간경과에 따른 침하거동 변화(PT1)

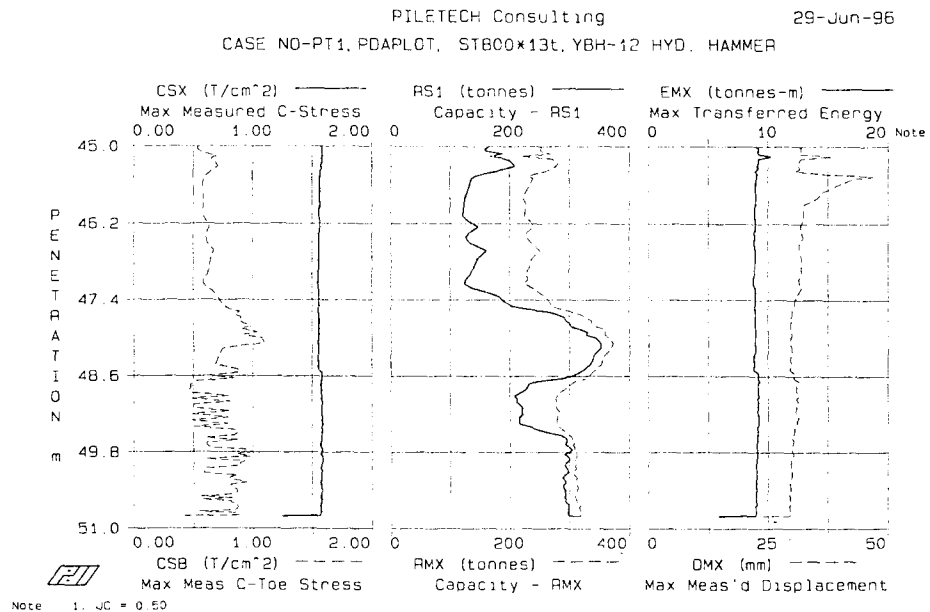


그림 5. PDAPLOT 결과(PT1)

### 3.2 CASE No-PT2

본건 현장은 주어진 해머조건과 최종 관입량 조건을 기준으로 소정의 설계지지력, 특히 선단지지력을 확보할 수 있는지에 대한 검토를 위해 시항타도중 및 재항타시험을 수행하였던 예이다. 측정결과에 대한 지지력 분석(CAPWAP해석)은 표 3.에 나타내었으며 그림 6. 및 그림 7.에는 각각, EOID 결과 및 9일 경과후의 침하거동 변화 양상과 EOID시험결과에 대한 PDAPLOT를 도시하였다. 표 3.에서 보는 바와 같이 시항타 당시 측정된 선단지지력은 230 ton으로서 설계서에서 요구하는 400 ton(정적지지력 공식에 의한 선단지지력 계산값)에는 미치지 못하는 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 EOID 결과는 물론 RSTR 시험결과에서 보듯이 허용지지력은 설계하중인 150 ton을 확보함으로써 말뚝의 설계과정의 오류, 지지 메카니즘의 이해에 대한 개선과 인식이 필요함을 시사하는 사례였다.

한편, 침하거동(그림 6.)을 살펴볼 때 시간경과에 따른 set-up효과를 확인할 수 있었으며 시공관입성을 파악할 수 있는 그림 7.을 살펴볼 때 해머성능, 말뚝재료의 건전도에 이상이 없음을 알 수 있다. 이에 따라 시항타 당시의 해머조건 및 관입량 기준으로 향후 항타시공을 진행시킬 수 있었던 사례였다.

표 3. 동재하시험 결과(PT2)

No.	시험번호	CAPWAP분석결과 및 Davisson판정법에 의한 항복하중 판정결과(ton)				허용지지력 (안전율 2.0)	비고
		주면마찰력	선단지지력	전체지지력	항복하중		
1	HJ-1	75.0	230.0	305.0	305.0	152.5 ton 이상	EOID
	HJ-1R	198.5	162.6	361.1	361.1	180.5 ton 이상	RESTRIKE

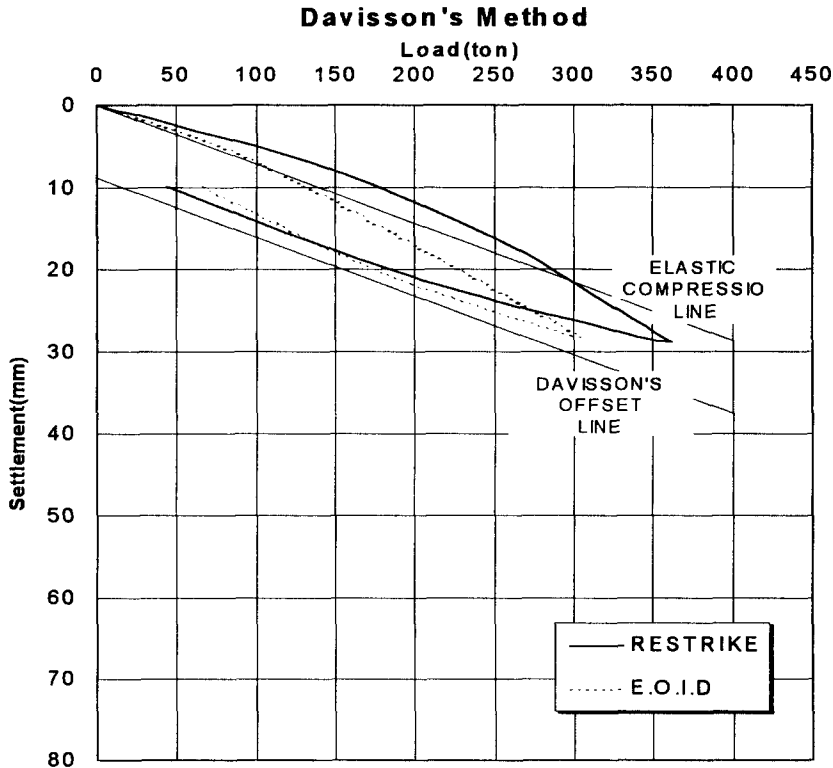


그림 6. 시간경과에 따른 침하거동 양상변화(PT2)

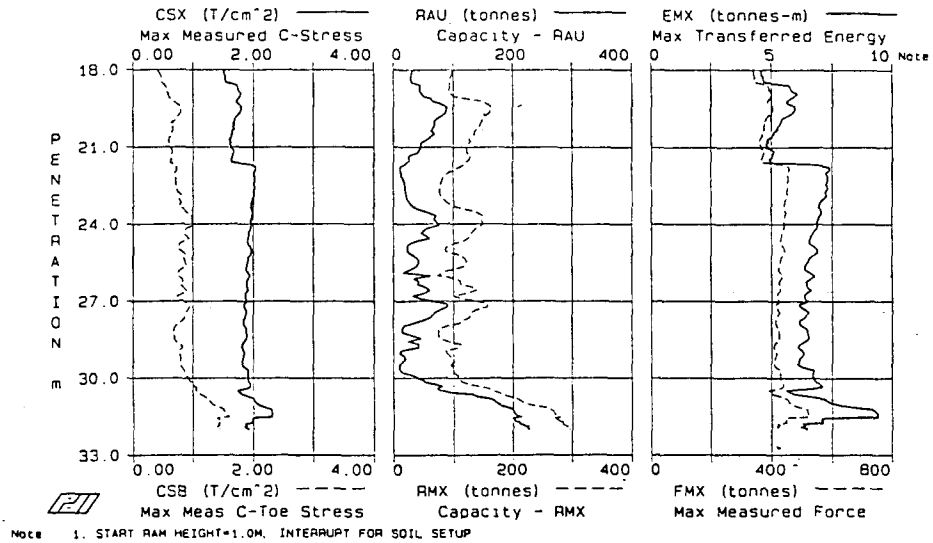


그림 7. PDAPLOT 결과(PT2)

#### 4. 결론

말뚝기초 시공의 궁극적인 목적은 소정의 설계하중을 안전하게 전달하고 과도한 침하발생으로 상부 구조물의 변형이나 파손을 초래하지 않도록 합리적으로 시공하는 데 있다.

앞에서 살펴본 항타말뚝에 대한 동재하시험방법의 적용은 단순한 지지력확인 차원이 아닌 항타시공 관입성(Drivability), 해머성능, 말뚝재료의 건전성 등을 종합적으로 평가하여 시공할 수 있음을 보여주는 시공절차상의 중요한 항목이라고 판단된다.

따라서 동재하시험의 활용분야를 넓게 가질 수 있음을 인식하여야하며 WEAP해석에 의한 예비시공, 시항타 과정에서의 시험수행, 시간경과후의 재항타시험, 본 항타말뚝에 대한 지지력확인 시험 등을 순차적으로 실시한다면 성공적인 말뚝시공의 근간이 될 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 이명환(1996), "항타말뚝의 시공관리 방안", 말뚝기초 국제학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 한국지반공학회, pp.3~24.
2. 이명환(1994), "말뚝기초의 최적설계(특별강연)", 한국지반공학회 창립 10주년 기념 및 '94 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp60~76.
3. 이명환, 홍헌성, 이원제, 전영석(1994), "항타시공성을 고려한 강관말뚝의 설계하중 결정", 한국지반공학회 말뚝기초위원회 학술세미나, 한국지반공학회, pp71~90.
4. 조천환, 이명환, 홍헌성, 이장덕, 이원제, 엄재경(1996), "건축구조물 말뚝기초의 지지력 미달 원인 및 보강", '96 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp133~144.