

항타분석기에 의한 말뚝시공관리 사례

CASE STUDIES ON THE CONSTRUCTION CONTROL OF PILE FOUNDATION BY PILE DRIVING ANALYZER

이 우 진, WOO-JIN LEE

공주대학교 공과대학 토목공학과, Dept. of Civil Engineering, Kongju National Univ., Kongju, Chungcheongnam-do

이 인 모, IN-MO LEE

고려대학교 공과대학 토목환경공학과, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Univ., Seoul

권 장 혁, JANG-HYUK KWON

삼성건설(주) 기술연구소, Institute of Technology, Samsung Engineering & Construction Co., Ltd.

최 유 중, YOO-JOONG CHOI

고려대학교 공과대학 토목환경공학과, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Univ., Seoul

SYNOPSIS : Two case studies on the application of Pile Driving Analyzer (PDA) are introduced. It is shown that the PDA and CAPWAP are effective tools for the construction control of pile foundations with minimum cost and time. The PDA and CAPWAP techniques are able to evaluate the performance of hammer and driving system; to check the stresses in the pile due to driving; to determine the damage of pile; to predict the ultimate bearing capacity of pile; to estimate the important soil parameters such as the soil resistance, quake, and damping etc.; and to provide the load - displacement curve from the simulated static load test. Theoretical backgrounds of wave mechanics is briefly reviewed and the methodology of construction control using the PDA is also discussed.

1. 서론

최근 급속한 산업발달로 경제규모가 확대됨에 따라 각종 건설을 위한 부지확보의 어려움으로 인하여 열악한 지반조건에서의 건설 활동이 증가하는 추세이며 이는 깊은기초의 수요를 더욱 가속화 시킬 전망이다. 그러나 많은 말뚝항타 현장은 부적절한 항타장비의 선정 및 항타관리의 어려움으로 인하여 문제점을 내포하고 있다. 항타장비는 장비생산자가 제공하는 도표에 의해 선택되는 경우가 많으며, 항타시 Hiley 등의 동적항타공식에 의해 계산된 지지력이 설계하중보다 크도록 최종관입량을 관리하는 방법이 일반적으로 쓰이고 있다.

이와같은 항타장비의 선정 및 항타관리 방법은 지반조건, 항타기의 거동, 항타기 및 말뚝의 쿠션재, 말뚝의 종류 등이 제대로 반영되지 않은 것으로 말뚝의 지지력 추정에 상당한 오차를 유발할 수 있다. 이러한 문제점 때문에 항타후 정적재하시험을 수행하여 말뚝의 지지력을 확인 하는 것이 일반적이다. 그러나, 정적재하시험은 많은 시간과 경비를 요하며, 전체 말뚝에 대하여 재하시험 할 수 있는 말뚝의 수가 제한되는 단점이 있다.

항타분석기 (Pile Driving Analyzer)는 항타로 인한 말뚝의 변위와 가속도를 항타즉시 분석하여 항타기의 효율적인 작동여부, 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력, 예상 지지력, 말뚝의 손상여부를 출력한다. 따라서 말뚝이 손상되지 않는 범위내에서 소정의 지지력을 얻을 수 있도록 항타관리가 가능하며 항타기의 효율 및 적절성을 판단하여 항타장비 및 항타시스템, 말뚝의 적절한 조합을 유도할 수 있다. 항타분석기는 파동방정식을 이용한 항타해석과는 달리 말뚝두부에서의 힘과 속도를 입력치로 사용하기 때문에 항타기의 모델링 또는 효율의 추정으로부터 생기는 오차를 제거하였다. CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program)은 항타분석기로 계산된 힘과 속도를 Wave Matching Technique으로 분석하여, 말뚝의 극한지지력, Quake 및 Damping 등을 추정하며, 이들을 이용하여 정적재하시험을 모사한 하중-변위 곡선, 주면마찰력의 분포 및 크기, 선단지지력을 예측한다.

파동방정식에 의한 말뚝 해석 프로그램 (WEAP), 항타분석기 (PDA), 정적재하시험을 적절히 조화하여 사용한다면 말뚝의 설계 및 시공성 향상, 시공관리 및 품질 향상, 공비절감 등 상당한 효과를 얻을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 항타분석기 및 CAPWAP의 이론적 배경을 논의하고 그동안 국내의 말뚝시공현장에 적용한 사례들을 소개하고자 한다.

2. 말뚝의 항타해석

1800년대 중반부터 전세계적으로 450개 이상의 동적 지지력 공식이 제안되어 왔으며 현재도 국내현장에서의 항타관리에 주로 사용되고 있다. 이 공식들은 항타기 해머의 에너지를 말뚝의 일과 관계 짓는 다음공식에 근거를 두고 있다.

$$W \times H = R \times S \quad (1)$$

여기서, W는 램의 무게, H는 램의 낙하고, R은 말뚝의 지지력, S는 항타시 말뚝의 관입량이다.

그러나, 동적 지지력 공식들은 항타시스템과 에너지 손실, 말뚝의 강성을 고려하지 않으며 흙의 저항이 일정하다고 가정한다. Hiley, ENR 공식 등 식(1)로 부터 파생된 항타공식들은 특정 지반 조건, 지역 및 시대의 항타관습으로 부터 형성된 Data Base에 근거하여 1960년대 이전에 개발된 공식들이 대부분이므로 항타현장의 지반조건, 말뚝종류, 항타기 등이 다른 경우에는 적용에 신중을 기해야 한다. 그러므로 현재의 국내현장과 같이 고강도 콘크리트 말뚝, 강관 말뚝, 디젤 항타기, 유압 항타기 등이 많이 사용되는 경우 동적 지지력 공식으로 말뚝의 지지력을 추정하는 것은 상당히 신뢰도가 떨어진다.

항타과정의 수치적 해법인 파동방정식에 의한 해석법은 Smith(1960)에 의해 최초로 소개되었다. 이 해석법에서는 항타기, 쿠션, 헬멧, 말뚝을 스프링으로 연결된 일련의 Rigid Mass로 고려하며, 말뚝 - 흙의 거동은 정적 저항을 위해 탄소성 스프링을, 동적 저항을 위해 선형 감쇄기를 각각의 말뚝 요소에 연결하여 모델링한다. 이들 정적 및 동적저항 모델 중 중요한 parameter는 quake, damping, 흙의 정적 저항력이다. 그 이후 파동방정식에 의한 항타해석용 프로그램이 계속 개선되어 왔으며 (WEAP, 1976; WEAP86, 1986; TTI, 1976; CUWEAP, 1987; GRLWEAP, 1991) 최근에 시판되고 있는 GRLWEAP은 545 종류의 항타기 모델링을 포함하고 있다. 파동방정식에 의한 항타해석은 동적 지지력 공식에 의한 항타관리 보다 훨씬 우월하지만, 항타로 인해 말뚝에 전달되는 가속도, 속도, 힘, 변위 등을 항타기, 쿠션, 헬멧의 모델링으로 부터 계산하므로 항타기의 실제거동과는 상이한 결과를 가져올 수 있다. 따라서 파동방정식에 의한 항타해석은 말뚝의 극한지지력 추

정보보다는 Parametric Study를 통한 항타장비 및 말뚝의 효율적인 선택을 위해 사용되는 것이 적절하다.

1964년 Goble 교수에 의해 Case Western Reserve University에서 시작된 연구는 항타해석을 통해 말뚝의 지지력을 예측할 수 있는 Case방법 (Goble 등, 1975)을 개발하였다. Case방법을 이용하기 위해서는 항타시 말뚝두부에서 힘과 속도를 측정하여야 하며, 이들 측정치를 이용하여 항타기 및 Driving System의 거동 (Likins, 1978), 말뚝의 항타응력 (Goble 등, 1980), 말뚝의 견전도 (Rausche 등, 1978), 말뚝의 지지력 (Rausche 등, 1985) 평가가 가능하다. 이들 분석결과는 항타즉시 항타분석기의 화면을 통해 관찰할 수 있다. 항타분석기는 WEAP해석과는 달리 말뚝의 두부에서 측정된 결과를 이용하므로 항타장비 및 항타시스템의 모델링으로 인한 오차를 제거하였다.

3. 항타분석기

3.1 구성 장비

항타분석기 및 측정장치들은 현장에서 일상적인 시험으로 쉽게 사용할 수 있도록 개발된 것으로 그림 1과 같이 구성되어 있다. 두쌍의 변형계(Strain Transducer)와 가속도계(Accelerometer)는 말뚝의 두부에 볼트로 고정되며 측정된 말뚝의 변형과 가속도는 힘과 속도로 변환되어 항타분석기의 화면에 항타와 동시에 나타난다. 변형계는 4개의 Resistance Foil Gages를 부착한 Frame으로 재사용이 가능하며, 가속도계는 Quartz Crystal로 구성된 Piezoelectric 방식이 보통 사용된다. 항타시 편타로 인해 동일단면에 다른 크기의 압축력 또는 변위가 발생하는 것을 감지하고자 말뚝주면의 180°방향에 한쌍씩의 변형계와 가속도계를 부착한다.

항타분석기는 변형계와 가속도계로 부터 측정된 아날로그 신호에 대해 Signal Conditioning을 실시하며, A/D 변환기를 통해 힘과 속도가 디지털 데이터로 변환된다. 이와함께 Case방법으로 추정된 각종 계산치를 힘과 속도와 함께 항타분석기 화면에 보여준다. 항타분석기는 약 36 가지의 Quantity를 계산하며 이들중 중요한 것들이 표 1에 나열되어 있다.

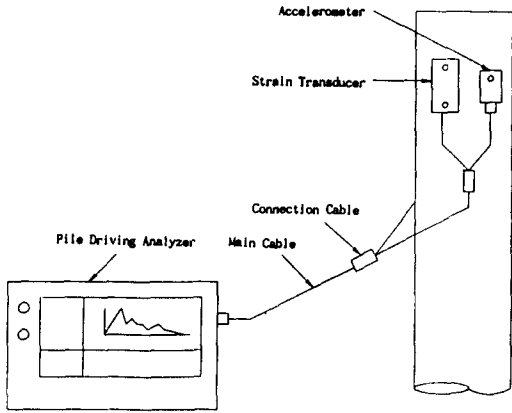


그림 1. 항타 분석기의 구성 (Schematic of PDA Set up)

표 1. 중요한 항타분석기 계산 출력치 (PDI, 1993)

출력치	내 용
CSX(FMX)	Gauge 위치에서의 최대 압축 응력 (최대 압축력)
CSB(CFB)	말뚝 선단부에서의 최대 압축 응력 (최대 압축력)
TSX(CTX)	말뚝에 작용하는 최대 인장 응력 (최대 인장력)
DMX	Gauge 위치에서의 최대 변위
EMX	Gauge 위치에서의 최대 항타 에너지
ETR	에너지 전달율
BTA	말뚝의 손상정도를 나타내는 건전도 지수
RTL	말뚝의 Total Resistance (정적+동적)
RSP(RP#)	Case방법에 의한 정적 극한 지지력 (RSP w/ JC=0.#)
RMX(RX#)	Case방법에 의한 최대 정적 극한 지지력 (RMX w/ J C=0.#)
RMN	Case방법에 의한 최소 정적 극한 지지력
RSU(RU#)	Early unloading을 보정한 정적 극한 지지력 (RSU w/ JC=0.#)
RAU	Case방법에 의한 선단 지지 말뚝의 극한 지지력

3.2. Proportionality

항타시 말뚝두부에 압축변형과 압축력이 발생한다. 이 힘은 다시 말뚝을 따라 아래방향으로 전달되면서 압축변형을 발생시킨다. 이때 압축변형으로 인하여 말뚝내에 변위가 발생하며, 말뚝내 어느 한 요소의 변위 속도를 Particle Velocity(V)라고 한다. 압축파 자체는 Wave Speed(C)로 말뚝을 통해 전파된다. 그림 2.에 보이는 바와 같이 시간 Δt 동안 압축파가 $\Delta L = (\Delta t) \cdot C$ 의 거리를 이동하며 이로인해 말뚝내의 A점에서는 δ 만큼의 변위가 발생한다. 변위 δ 로 인한 말뚝의 변형율은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{\delta}{\Delta L} = \frac{\delta}{\Delta t \cdot C} \quad (2)$$

이때, A점의 속도는

$$V = \frac{\delta}{\Delta t} \quad (3)$$

이고, 식(2)와 (3)으로부터 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\epsilon = \frac{V}{C} \quad (4)$$

식 (4)의 양변에 말뚝의 탄성계수(E)와 단면적(A)을 곱하면 식 (5)가 얻어진다.

$$F = \frac{EA}{C} V \quad (5)$$

식(5)는 항타분석의 기본이 되는 식으로, 비례계수 (EA/C)는 말뚝의 Impedance라고 한다. 윗식은 말뚝두부의 측정점에 Reflection wave가 도달하지 않는 한 유효하며 항타분석기로 측정된 속도에 말뚝의 Impedance를 곱한 값은 측정된 힘과 같아야 한다. 실제말뚝은 주면마찰이나 선단지지로 인한 Reflection Wave가 측정점에 도달하여 F는 증가하고 (EAV/C)는 감소하게 되므로 식 (5)는 성립하지 않게 된다. 주면마찰의 크기가 클수록 F와 (EAV/C)의 차이는 증가하며 선단지지말뚝은 그 차이가 작다. 일반적으로 말뚝의 두부에서 측정된 속도가 최대값에 도달할 때까지는 힘과 속도가 비례한다.

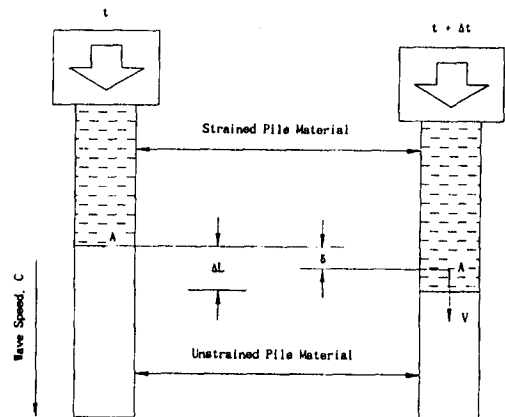


그림 2. Proportionality ($F=AEV/C$)

3.3. Case 방법

항타분석기는 1차원 파동전달이론으로 부터 전체저항 (Total Driving Resistance)과 정적저항(Static Resistance)을 계산한다. (Rausche 등, 1985; GRL, 1993) Case 방법의 기본이 되는 항타 저항력은 Rausche 등(1985)에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$RTL = \frac{1}{2} [FT1+FT2] + \frac{1}{2} \frac{AE}{C} [VT1-VT2] \quad (6)$$

여기서, RTL은 전체 저항력, FT1과 FT2는 각각 시간 t1과 t2에 말뚝두부에서 측정된 힘, VT1과 VT2는 각각 시간 t1과 t2에 말뚝두부에서 측정된 속도, AE/C는 말뚝의 Impedance이다. 일반적으로 시간 t1은 측정된 속도가 최대인 시간으로 하며 시간 t2는 시간 t1으로부터 (2L/C)가 경과한 시간을 말한다.

항타시 말뚝의 전체저항력, RTL, 은 정적저항력과 Damping으로 인한 동적저항력으로 구성된다. Case 방법에서는 동적저항력을 Case Damping Factor (J_c), 말뚝의 Impedance (EA/C), 말뚝 선단에서의 Particle Velocity (V_t)의 곱으로 정의하고 전체저항력으로 부터 동적저항력을 제거함으로써 말뚝의 정적저항력을 추정한다. (Rausche 등, 1985)

$$\begin{aligned} RSP &= RTL - J_c \frac{AE}{C} V_t \\ &= RTL - J_c [VT1(\frac{AE}{C}) + FT1 - RTL] \\ &= \frac{1}{2} (1 - J_c) [FT1 + VT1(\frac{AE}{C})] \\ &\quad + \frac{1}{2} (1 + J_c) [FT2 - VT2(\frac{AE}{C})] \end{aligned} \quad (7)$$

Case 방법은 항타와 동시에 말뚝의 예상지지력을 계산하므로 항타관리에 매우 편리하지만, 말뚝의 실제 지지력 추정시 Case Damping Factor, J_c , 를 경험적으로 가정하여야 하고 FT와 VT의 계산을 위해 시간 t1을 선택하여야 하는 등의 오차 유발 요인을 포함하고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 개발된 것이 CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) 방법이다.

3.4 CAPWAP 방법

CAPWAP 방법은 Case Western Reserve University에서 Rausche(1970)에 의해 최초로 개발되었으며 말뚝 항타 분석기로 얻은 힘과 속도의 기록을 이용해 시행오차법으로 경계조건 (말뚝 지지력, 흙의 저항 분포, Quake 및 Damping 특성)을 결정한다. 이 방법에서는 말뚝을 압축파의 이동 시간이 동일한 연속적인 Segment로 모델링하고, 가정된 경계조건을 이용하여 계산된 파를 측정된 파와 비교하면서 두 파형이 어느정도 일치될 때의 경계조건을 결정한다. 입력치로 사용되는 말뚝두부의 거동은 힘, Wave Down, 속도 등이며 이 경우 계산되는 출력치는 각각 속도, Wave Up, 힘이 된다. 계산된 파와 측정파를 일치시키기 위한 반복작업시 조정되는 Modeling Parameter중 대표적인 것은 Quake, Unloading Quake, 흙 및 말뚝의 Damping, Unloading Level, Reloading Level, Radiation Damping을 위한 Parameter, Plug Mass, 극한 지지력, 흙의 저항 분포 등이다. CAPWAP은 위에서 계산된 경계조건을 이용, 정적 재하 시험을 모사하여 말뚝의 두부에 하중을 작용시켜 말뚝의 관입과 이에 소요되는 흙의 정적 저항력의 관계를 얻을 수 있으며, 주변 마찰력의 분포를 제시한다.

그러나 CAPWAP 해석법은 다음과 같은 문제점도 가지고 있으므로 유의하여 사용해야 한다. 첫째, 항타로 인한 말뚝의 변위가 충분하지 않으면 CAPWAP은 지지력을 과소 평가하는 경향이 있다. 일반적으로 최소 2mm 이상의 최종관입이 발생하여야 적절히 지지력을 예측한다. 둘째, 어떤 입력파형 (힘, Wave Down, 속도)을 사용하느냐에 따라 추정되는 경계조건에 약간의 차이가 있다. 따라서 CAPWAP에 의한 해법에서, Unique Solution 여부에 의문이 있으며 사용자의 해석 및 숙련 정도에 따라 결과가 다를 수도 있다. 셋째, CAPWAP 해석 결과는 말뚝 항타 분석기로 측정된 시점의 말뚝 지지력을 예측하므로 Set-Up이나 Relaxation 효과를 고려할 수 없다. 다만, 일정한 시간이 지난 후에 Restrike를 함으로써 이 효과에 대한 고려가 가능하다.

4. 사례연구

본 논문에서는 2개의 국내현장에서 항타분석기로 말뚝시공관리를 실시한 사례를 소개하고자 한다.

4.1 YI 현장

본 현장은 아파트 기초 현장으로 지반은 지표로부터 약 4 - 10 m 깊이까지는 풍화토, 그 아래로는 풍화암으로 구성되어있다. 말뚝은 외경이 35 cm이고 두께가 6 cm인 PHC 말뚝으로 1본당 설계하중은 60 Ton이다. 아파트 단지가 도에서 지정한 문화재인 전통가옥과 6 m 정도의 거리에 인접한 관계로 항타시공성과 항타진동으로 인한 문화재에의 영향을 동시에 고려할 수 있는 시공법을 제시하여야만 하였다.

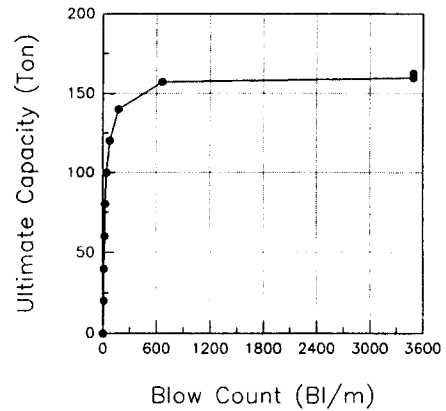


그림 3. CAPWEAP 해석 결과

4.1.1 시항타

기반입된 항타장비의 적절성을 판단하고 본시공의 기준을 제시하기 위해 유압항타기 (LS - 118RM, Ram Weight : 5 Ton)로 2본의 말뚝을 시항타하였다. 항타시 두부가 심하게 손상되고 관입 깊이에 비하여 과도한 항타 횟수가 요구됨을 관찰하였다. 시항타 말뚝의 CAPWAP 해석 결과는 표 2와 같다.

표 2. YI 현장의 시항타 말뚝 시험 결과

말뚝번호	관입깊이 (m)	극한 지지력 (Ton)	주면 마찰력 (Ton)	선단 지지력 (Ton)
0	4.8	149.2	44.2	105.0
1	7.0	175.1	72.0	103.1

표 2에서 보는 바와 같이, 0번 말뚝과 1번 말뚝의 극한 지지력은 안전율을 3.0으로 보았을때의 극한 지지력인 180 Ton에는 미치지 못하였다. 이는 항타시 과도한 말뚝 두부 파괴로 인한 에너지 전달 미흡으로, 기대 극한 지지력을 만족시키기에는, 말뚝의 관입이 충분하지 않았기 때문으로 판단된다.

그림 3은 0번 말뚝에 대해 CAPWAP 해석으로 구한 각종 Parameter를 이용, WEAP 해석을 실시하여 얻은 Bearing Graph이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 유압항타기에 의한 직항타의 경우에는 극한 지지력 180 Ton을 얻기 위하여 1200 blows/m를 훨씬 초과하는 과도하고 비합리적인 항타가 필요하다.

항타위치에 인접한 문화재의 항타 진동 영향을 평가하기 위해 문화재 내부 여러곳에 가속도계를 설치하고 항타 진동을 측정하였다. 측정 결과에 의하면 인접한 아파트 2개동에서 항타시 건물의 안정성에 문제가 야기될 수 있는 정도의 진동이 측정되었다.

시항타시 실시한 동재하 시험과 진동 측정 결과, 지지력 부족 및 진동문제로 인하여 본 현장에서 유압항타기를 이용한 항타말뚝 시공은 비합리적이라 판단하여 시공 방법을 SIP 말뚝 시공으로 변경하였다.

4.1.2 SIP 시공

SIP 공법으로 변경 시공시 풍화암층까지 오거링하면서 시멘트 페이스트와 흙을 섞어준 후 말뚝을 타설하였다. SIP 말뚝에 대한 항타분석기를 이용한 동재하 시험은 총 4본의 말뚝에 대하여 시공 후 1 - 5일이 경과한 뒤 실시하였다. 약 2.8 Ton의 낙하추를 처음에는 낮은 높이에서 낙하시켜 말뚝에 작용하는 최대압축응력을 관찰한 후 점차 낙하고를 증가시켜 타격하였다. 일반적으로 3 - 4 m 정도의 높이에서 말뚝의 최대압축응력은 약 400 - 450 kg/cm² 까지 도달하였으며 PHC 말뚝강도의 60 %인 480 kg/cm² 를 넘지 않도록 주의하였다. 이 현장의 시험 및 해석 결과는 표 3에 보인 바와 같다.

표 3. YI 현장의 SIP 말뚝 시험 결과

말뚝 번호	관입 깊이 (m)	극한 지지력 (Ton)	주면 마찰력 (Ton)	선단 지지력 (Ton)	비 고
2	7.5	187.1	88.8	98.3	시공 5일 후 시험
3	8.4	284.9	179.3	105.6	시공 5일 후 시험
4	8.5	190.2	60.5	129.7	시공 5일 후 시험
5	5.2	258.0	19.9	238.1	시공 당일 시험

윗 표에 나타난 바와 같이 시험된 4본의 말뚝 모두 설계하중 60 Ton에 대해 안전율 3.0 이상을 확보하고 있다. CAPWAP 해석에 의해 주면 마찰과 선단 지지를 분리 추정한 바에 의하면 시공 후 5일 정도 경과된 2, 3, 4번 말뚝은 약 100 - 130 Ton 내외의 균일한 선단 지지력을 보이나 주면 마찰력은 큰 차이를 보이고 있다. 이는 시멘트의 배합비, 시멘트 페이스트와 흙의 혼합, 주변 지반 조건, 시멘트의 양생정도 등에 의한 차이로 판단된다. 5번 말뚝의 경우 시공 당일 시험되었기 때문에 시멘트 페이스트가 양생되지 않아 주면 마찰이 무시할 만큼 적고 대부분의 지지력이 선단에서 발휘됨을 알 수 있다.

말뚝 주변에 타설된 시멘트 페이스트가 완전히 양생되기 전에 시험이 실시되었음을 고려한다면 말뚝의 실제 지지력은 표 3의 값보다 증가될 것으로 예상된다. 시공완료 후 주변의 말뚝 3본에 대해 정재하 시험을 실시한 결과 모두 극한 지지력이 180 Ton보다 큰 것으로 확인되어 전반적인 시공상태가 양호함을 알 수 있었으며 CAPWAP 해석 결과에 대한 신뢰성이 입증되었다.

4.2 DY 현장

본 현장은 아파트 기초 현장으로 지반조건은 지표에서 부터 약 7 - 8 m 정도의 깊이까지는 풍화토로 구성되어 있고 그 밑으로는 풍화암층이 존재하고 있다. 말뚝은 외경이 40 cm이고, 두께가 6.5 cm인 PHC 말뚝으로 SIP 공법으로 시공되었으며 설계하중은 70 Ton이다.

지지력 추정을 위하여 약 2.2 Ton의 낙하추로 재항타를 실시하였으며, 낙하고는 말뚝에 작용하는 응력을 관찰하면서 최고 약 4.5 m 정도까지 서서히 증가시켰다.

시공 완료후 1주일 이상 경과된 말뚝기초에 대해 총 15본의 말뚝을 항타분석기로 시험하여 지지력을 추정하였으며 그 해석결과는 표 4와 같다.

표 4. DY 현장의 SIP 말뚝 시험 결과

말뚝 번호	관입 깊이 (m)	극한 지지력 (Ton)	주면 마찰력 (Ton)	선단 지지력 (Ton)	허용 지지력 ¹ (Ton)	허용 지지력 ² (Ton)
67	6.4	190.7	117.9	72.7	63.6	71.4
85	7.2	250.2	92.7	157.5	83.4	89.6
82	7.2	110.3	88.9	21.3	36.8	42.7
134	7.2	130.3	72.7	57.6	43.4	48.3
234	9.3	160.7	92.7	68.0	53.6	59.7
194	7.3	260.8	126.0	124.8	86.9	92.0
165	7.2	166.0	98.1	67.9	55.3	61.9
18	7.0	205.9	129.2	76.7	68.6	77.2
30	7.0	207.2	147.0	60.2	69.1	78.9
154	7.0	134.3	91.9	42.4	44.8	50.9
155	7.0	195.7	87.8	107.9	65.2	71.1
170	7.0	140.6	125.3	15.3	46.9	55.2
393	11.5	264.0	157.4	106.6	88.0	98.5
4	7.5	226.9	102.4	124.4	75.6	82.4
56	6.3	161.0	127.8	33.2	53.7	62.2

허용 지지력¹ : 안전율 3.0

허용 지지력² : 주면 마찰에 대한 안전율 2.5, 선단 지지에 대한 안전율 3.0

표 4에 보는 바와 같이 극한 지지력은 110 Ton부터 260 Ton 정도까지 다양하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 그러나 주면 마찰력의 크기는 73 Ton에서 157 Ton 정도로 분포하며 평균적으로 100 Ton 내외로 선단 지지력의 변화(15.3 - 157 Ton)에 비하여 비교적 일정한 값을 보이고 있다. 주면 마찰력은 시멘트 페이스트 혼합의 불균일 및 시공의 불균일, 주변지반의 차이 등으로 인해 그 크기에 있어 약간의 차이를 가지는 것으로 보여지며, 선단 지지력은 선단부의 지지 정도에 따라 그 크기가 크게 좌우되는 것으로 판단된다.

결과적으로 본 현장에서 시공한 말뚝은 주면마찰력의 크기는 평균 100 Ton 내외로 상당히 큼을 알 수 있으며, 이는 일반적인 SIP 설계 통념인 선단지지말뚝으로 거동하는 것이 아니고, 오히려 주면마찰력이 주된 역할을 하는 것으로 결론 지을 수 있다. 다시 말하여, 선단부의 지지 정도는 천공한 소정의 깊이 부근에 말뚝 선단부가 위치하고 있는냐에 따라 결정되며, 많은 경우 선단부가 이

완되어 지지력 유발을 할 수 없는 것을 볼 수 있다. 이는 SIP 시공시 공벽의 안정성, 최종 경타, 시공 상태의 중요성을 나타낸다 하겠다. 현장의 지하수위가 높다는 점을 고려하면 시멘트 페이스트의 완전한 양생까지 상당한 시일이 소요될 것이므로 시간이 경과함에 따라 말뚝의 극한 지지력은 증가할 것으로 판단된다.

최근 말뚝의 주면 마찰력과 선단 지지력이 분리 가능한 경우 각각에 대한 안전율을 다르게 적용하는 방법이 많이 소개되고 있으며, 주면 마찰이 선단 지지보다 먼저 발휘됨을 고려하여 주면 마찰에 관한 안전율을 선단 지지에 관한 안전율보다 적게 쓰는 것이 일반적이다. 본 해석에서는 통합 안전율과 분리 안전율 개념을 이용하여 허용 지지력을 구하였다. 통합 안전율에 의한 허용 지지력은 일반적으로 사용되는 안전율 3.0을 적용하여 식(8)로 산정하였으며, 분리 안전율에 의한 허용 지지력은 주면 마찰에 관한 안전율을 2.5, 선단 지지에 관한 안전율 3.0을 사용하여 식(9)에 의해 구하였다.

$$Q_{allowable} = \frac{Q_{ultimate}}{3.0} \quad (8)$$

$$Q_{allowable} = \frac{Q_{skin}}{2.5} + \frac{Q_{tip}}{3.0} \quad (9)$$

여기서, Q_{skin} 은 극한 주면 마찰력, Q_{tip} 은 극한 선단 지지력이다.

시험말뚝의 허용 지지력은 표 4에 보인 바와 같이 분포의 폭이 넓으나 최소 허용 지지력에 가까운 설계하중으로 전체 말뚝을 재설계한다면 상당한 과다 설계가 될 것이다. 따라서 시험결과의 평균치를 산정한 후 이에 근접한 설계하중을 다시 결정하는 것이 적절한 방법으로 판단된다. 위와 같이 통합 안전율을 적용하는 경우와 분리 안전율을 사용하는 경우에 대해 표 4의 결과로부터 평균 허용 지지력을 계산하면 각각 62.3 Ton, 69.5 Ton을 얻는다.

동일한 현장에서 실시된 정재하 시험과 동재하 시험 곡선으로부터 추정한 60 Ton/본 하중 작용시의 말뚝 침하량은 표 5에 나타난 것과 같다. 표 5에서 알 수 있듯이 말뚝 한 본당 60 Ton의 하중이 작용하는 경우 대부분의 말뚝은 침하량이 1.7 mm 내지 3.0 mm로 상당히 작으며 3.3 mm - 4.0 mm의 침하를 보이는 말뚝은 총 20 본의 시험 말뚝 중 4본에 불과하다.

이를 근거로 하여 말뚝 1본당 설계하중을 60 - 65 Ton으로 재설계하면 지지력과 침하에 안전할 것으로 판단된다.

표 5. 60 Ton/본 작용시의 예상 침하량

말뚝 번호	동재하 시험									
	67	85	82	134	234	194	165	18	30	154
예상 침하량 (mm)	1.7	2.3	3.3	2.9	2.0	1.9	1.9	2.5	2.4	3.8

말뚝 번호	동재하 시험					정재하 시험				
	155	170	393	4	56	#1	#2	#3	#4	#5
예상 침하량 (mm)	1.9	2.4	2.7	2.0	2.0	4.0	3.5	1.7	2.0	3.0

* 정재하 시험 결과는 실측치임.

5. 결론

이상과 같은 사례 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 향타분석기를 장비조합의 적절성 및 과다용역여부, 극한 지지력 추정 등에 적용하여 효율적 향타관리를 도모할 수 있다.
2. 향타분석기를 이용하여 주면 마찰력과 선단 지지력의 값을 추정할 수 있으므로 분리 안전율을 적용할 수 있다.
3. 동재하 시험은 정재하 시험에 비해 짧은 시간과 저렴한 비용으로 많은 수의 말뚝을 시험할 수 있으므로 말뚝의 전반적인 시공상태를 판단할 수 있다.
4. 극한 지지력만을 추정하기 위하여 향타분석기를 사용하는 것은 시공관리 용도에 비해 상대적으로 신뢰도가 낮아 앞으로 많은 경험 및 사례분석이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 삼성건설(주) 기술연구소와 고려대학교 생산기술연구소간의 산학협동으로 수행된 것 입니다. 연구 수행중 협조해 주신 삼성건설(주) 기술연구소와 각 현장의 소장 및 공사과장님들께 감사드립니다.

참고문헌

이 우진, 이 인모, 최 유중, 이 정학, 김 병철, "말뚝항타 분석기를 이용한 말뚝기초의 시공관리 및 해석", 한국지반공학회 말뚝기초위원회 학술세미나, 1994

Goble, G. G., Likins, G. E., and Rausche, F., "Bearing Capacity of Piles From Dynamic Measurements-Final Report," Dept. of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1975.

Goble, G. G., and Rausche, F., "Wave Equation Analysis of Pile Driving - WEAP Program," Volume 1 through 4, FHWA IP-76-14.1 through IP-76-14.4, April 1976.

Goble, G. G., Rausche, F., and Likins, G. E., "The Analysis of Pile Driving, A State-of-the-Art," The 1st Seminar on the Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm, Sweden, 1980.

Goble, G. G., and Rausche, F., "Wave Equation Analysis of Pile Foundation - WEAP 86," Volume 1 through 4, FHWA Contract DTFH61-84-C-00100, March 1986.

Goble Rausche Likins and Associates, Inc., "GRLWEAP-Wave Equation Analysis of Pile Driving," Cleveland, Ohio, 1991.

Goble Rausche Likins and Associates, Inc., "CAPWAP-Case Pile

Wave Analysis Program," Cleveland, Ohio, 1993.

Hirsch, T. T., Carr, L., and Lowery, L. L., Jr., "Pile Driving Analysis of Wave Equation User's Manuals - TTI Program," Volume 1 through 4, FHWA IP-76-13.1 through IP-76-13.4, April 1976.

Likins, G. E., "Evaluating the Performance of Pile Driving Hammers," 4th PDA User's Seminar, Amsterdam, Holland, 1982.

PDI, "PDA-Pile Driving Analyzer," Cleveland, Ohio, 1993.

Rausche, F., "Soil Response from Dynamic Analysis and Measurements on Piles," Ph.D. Thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1970.

Rausche, F., and Goble, G. G., "Determination of Pile Damage by Top Measurements," Behavior of Deep Foundations, ASTM Symposium, Boston, Massachusetts, 1978.

Rausche, F., Goble, G. G., and Likins, G. E., "Dynamic Determination of Pile Capacity," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985.

Smith, E. A. L., "Pile Driving Analysis by the Wave Equation," Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 36, 1960, pp. 36-61.