

# 서해대교 연속교구간 현장타설말뚝의 지지력 검증을 위한 동적재하시험 및 수평검측비파괴시험에 대한 소개

## Dynamic Load Test and Crosshole Logging Test on Cast-in-Placed Concrete Pile at Seohae Grand Bridge Project



홍 경 선\*

### 1. 서 론

현장타설말뚝은 지반에 구멍을 뚫고 그 구멍속에 철근 및 콘크리트를 넣어서 땅속에서 양생 제작하는 말뚝을 말한다. 이 말뚝은 시공중에 공벽의 붕괴, 말뚝하단지반의 피압수에 의한 보일링, 굴착기계를 들어 올릴 때의 흡입력에 의한 하단지반의 느슨해짐, 바닥에 침전되는 슬라임때문에 품질이 저하되기 쉬우므로 특별한 시공관리가 요구된다.

서해대교 육상부 현장타설말뚝은 설계하중이 620 톤이나 되는 대형말뚝이며 말뚝의 지지력을 확인하기 위해서는 말뚝재하시험을 시행하는 것이 가장 확실한 방법이다. 말뚝재하시험에는 정적재하시험(static load test), 동적재하시험(dynamic load test), 그리고 정동재하시험(Static load test)의 3가지가 있다. 이중 재하시험에 있

이 가장 신뢰할 수 있는 방법은 정적재하시험이나 비용이 많이 들고 시험에 많은 시간이 소요된다. 동적재하시험은 해양구조물의 기초말뚝 등 장시간의 시험이 어려운 지역에서 정적재하시험대신 시행할 수 있고, 육상에서는 정적재하시험과 병행하여 말뚝의 지지력을 추정할 수 있다. 정동재하시험은 최근에 개발된 시험방법으로 동적재하시험의 장점을 살리면서 정적재하시험과 거의 유사한 시험 결과치를 얻을 수 있다고 한다.

여기서 소개하고자 하는 시험방법은 동적재하시험으로 이 시험은 말뚝 타격시 발생하는 충격과 진동에 대한 파동방정식을 이론적 근거로 하여 미국 오하이오주의 Case Western 대학에서 1964년에 개발되었다. 이 시험은 말뚝에 변형과 충격과 전달속도 측정장치를 설치한 후 말뚝두부에 Drop Hammer를 자유낙하시켜 타격하는 과정에서 측정되는 변형과 응력파를 말뚝타입해석기(pile driving analyzer)를 이용하여 해석하고 그 결과로부터 말뚝의 지지력, 말뚝에 전달되는 응력

\* 대림산업(주) 서해대교 현장, 계장

분포, 말뚝에 발생하는 압축력과 인장력, 응력과 전달속도 등의 자료를 얻을 수 있다.

수평검측공시험(crosshole sonic logging test)은 현장타설말뚝, 지하연속벽 등의 지중콘크리트 구조물의 품질검사에 사용되는 방법으로 사전에 콘크리트속에 강관을 매설하여 일정한 기간이 경과한 후에 발신기(source probe)와 수신기(receiver probe)를 인접한 튜브에 각각 넣고 발신기에서 초음파를 송신하고 수신기에서 이를 수신하여 두 probe 사이의 콘크리트 품질상태를 파악하는 시험방법이다.

아래에 기술된 동적재하시험에 대한 내용은 재하시험을 수행한 과일테크사의 시험보고서를 정리한 것임을 첨언한다.

## 2. 동적재하시험

### 2.1 개요

본 동적재하시험 (dynamic load test)은 대림산업(주)에서 시행중인 서해대교 건설공사 육상부 말뚝기초 (Pier 17)의 설계허용지지력을 확인하기 위해 실시되었으며 그 개요는 다음과 같다.

#### ① 공사 개요

- 시 점 : 경기도 평택군 포승면 내기리
- 종 점 : 충청남도 당진군 송악면 복운리
- 서해대교  
연 장 : 7,310M  
폭 원 : 31.41M  
교량형식 : 사장교 (990M), 장경간 콘크리트 BOX교(500M), PC BOX연속교 (5,820M)

#### ② 시험방법 : 항타분석기(PDA)를 이용한 동적재하시험 (dynamic load test)

#### ③ 시험일자 : 1994년 8월 18일

#### ④ 시험개소 : 2개소

#### ⑤ 시험말뚝개요

#### ⑥ 시험장비 및 기구

- 항타분석기(PDA : pile driving analyzer) :  
美 Pile Dynamics Inc.社 제작
- 가속도계(accelerometer) : piezoelectric

### Type

- 변형률계(strain transducer)
- 시험용 해머 : 14ton Drop 해머 사용 (300 ton Crane 부착)

시험말뚝번호	Pile No.3	Pile No.8
위 치	서해대교 Pier No.17	
규 격	φ1500mm 현장타설 콘크리트 말뚝	
설 계 하 중	620 ton	
관 입 길 이	26.1m	14.5m
시 공 방 법	RCD	
시 공 일 자	1994년 4월 18일	1994년 5월 19일
지 반 조 건	유점 시추주상토 참조	

### 2.2 재하시험 방법

본 재하시험은 ASTM (American Standard Test Method) D4945-89 규정의 동적재하시험 (high-strain dynamic test)방법에 준하여 실시하며 이를 개략적으로 설명하면 다음과 같다.

#### 2.2.1 배 경

말뚝을 항타관입하면서 발생하는 타격당 관입량을 이용하여 말뚝의 지지력을 계산하는 방식, 즉 항타공식에 의한 지지력 산정방법은 말뚝 흠의 시스템을 극히 단순화시켜, 신뢰성 측면에 커다란 문제를 안고 있었다.

이러한 항타공식의 한계를 극복하기 위하여 1930년대부터 항타시 말뚝두부에서 직접 힘을 이용하여 말뚝의 지지력을 추정할 수 있는 방법이 연구되어 오다가 1960년대 중반부터 미연방도로국(federal highway administration)의 지원을 받아 case institute of technology에서 말뚝항타시 측정된 힘과 가속도를 이용하여 말뚝의 지지력 뿐만 아니라, 해머의 성능, 말뚝의 항타응력 그리고 말뚝의 손상정도까지 평가할 수 있는 시스템인 PDA (pile driving analyzer)를 개발하기에 이르렀다. 이러한 시스템을 이용한 지지력 결정방법을 동적재하시험(dynamic load test)이라 한다.

#### 2.2.2 기본이론

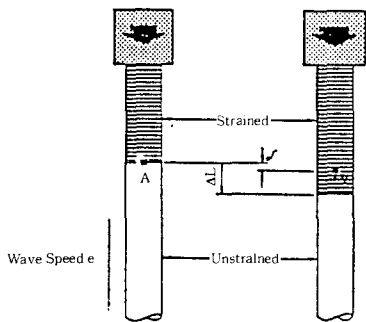
본 시험방법은 항타분석기 (pile driving anal-

zyzer)를 사용, 향타로 인한 말뚝의 변형률과 가속도에 관한 데이터를 측정하여 해머의 효율, 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력, 말뚝의 지지력 등을 결정하는 방법으로서 그 기본이론은 다음과 같다.

어떤 질량을 갖는 물체 또는 해머가 말뚝두부를 타격하는 경우 (단, 이 말뚝은 어떠한 저항력도 받고 있지 않으며 단면적이 일정한 것으로 가정) 그림 1에서 보는 것처럼 말뚝두부는 압축상태에 놓이게 되며 이로인해 압축변형( $\epsilon$ )과 압축력( $F$ )이 발생한다. 이 힘( $F$ )은 다시 말뚝을 따라 아래방향으로 전달되면서 인접한 말뚝입자를 차례로 압축하게 된다. 말뚝재료가 압축됨에 따라 말뚝입자들은 변위를 일으키며 이러한 말뚝입자의 변위속도를 입자속도 (particle velocity,  $V$ )라고 부른다.

질량  $m$ 을 갖는 말뚝의 한 입자가  $\Delta t$ 의 시간동안 어떤 크기의 변위속도  $V$ 를 갖게되면 이 입자는 가속되어 관성력 ( $V/\Delta t$ )  $\cdot m$ 을 유발하게 된다. 이 관성력은 압축력과 균형을 이루게 되는데 말뚝의 입자들이 가속화되기까지에는 얼마간의 시간이 소요되므로 변형 (strain)은 어떤 속도  $C$ 로 이동하게 되며 이를 파의속도 (wave speed)라 부른다.

그림 1에서 보는 바와 같이 타격으로 인해 발생한 파가 시간  $\Delta L$ 거리만큼 이동하였다면,  $\Delta L$ 은 다음 식 (1)로 표현할 수 있다.



$$\Delta L = \Delta t \cdot C \quad (1)$$

$$\Delta L = c\Delta t$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{\Delta L} = \frac{\delta}{c\Delta t}$$

$$\frac{\delta}{\Delta t} = V(\text{particle velocity})$$

$$\epsilon = \frac{V}{C}$$

$$\epsilon E = \sigma = \frac{VE}{C}$$

$$\epsilon EA = F = \frac{VEA}{C}$$

그림 1 힘( $F$ )과 속도( $V$ )의 비례관계

이러한 파의 전파에 따른 어떤 점에서의 말뚝입자 A의 변위량을  $\delta$ 라 하면 변형률( $\epsilon$ )은 식 (2)로 구할 수 있다.

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

식 (1)을 식 (2)에 대입하면 식 (2)는 식 (3)이 된다.

$$\epsilon = \frac{\delta}{\Delta t \cdot C} \quad (3)$$

한편, 입자 A는  $\Delta t$ 의 시간동안  $\delta$ 만큼 이동하였으므로 식(4)로 표현되는 입자속도 (particle velocity)  $V$ 를 갖는다.

$$v = \frac{\delta}{\Delta t} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)로부터 식 (5)를 얻을 수 있다.

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

식 (5)의 양변에 말뚝의 탄성계수 ( $E$ )와 단면적 ( $A$ )를 곱하면 식 (6)이 얻어진다.

$$F = \frac{EA}{C} V \quad (6)$$

식 (6)은 PDA를 이용한 동적해석의 기본이 되는 식으로, 비례계수  $EA/C$ 를 말뚝의 임피던스 (impedance)라고 한다. 윗식으로 부터 말뚝내 어느 한점에서의 힘은 동일한 점에서의 입자속도에 비례한다는 것을 알 수 있으며 이를 힘과 속도의 비례관계(proportionality)라 규정한다.

그림 2에서 보는 바와 같이 PDA는 말뚝두부에서 약 2D되는 지점에 부착된 변형률계 (strain

transducer)와 가속도계 (accelerometer)를 이용하여 측정된 변형률과 가속도로 부터 각각 독립적으로 F와 V를 얻는다.

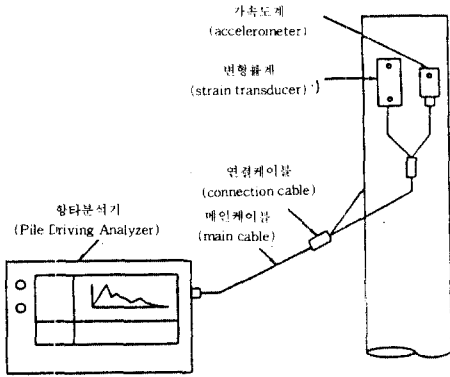


그림 2 말뚝에 부착된 변형률계와 가속도계

향타분석기에 의해 측정된 F와 V, 즉 힘과 속도의 파형기록은 말뚝에 대한 흙의 저항력의 위치와 크기를 결정하는데 사용할 수 있다.

전술한 바와 같이 말뚝의 단면이 일정하고 어떠한 저항력도 작용하지 않는다면 힘과 속도의 파형은 타격시 식 (6)에 의한 비례관계를 이룬다.

이러한 관계는 흙의 저항력, 또는 말뚝의 단면 변화 등에 의한 반사파가 측정계의 위치에 도달할 때까지 지속된다. 흙의 저항력에 의한 반사파는 타격 후  $2\kappa/C$ 의 시간이 경과했을 때 발생하며 이때  $\kappa$ 는 저항이 발생한 곳의 깊이이고 C는 파의 속도이다.

반사파가 측정계의 위치까지 도달하는데 걸린 시간과 파의 속도를 알 수 있으므로 저항이 발생한 곳의 위치를 결정할 수 있다. 흙의 저항력은 힘의 파형에 대해서는 증가를 가져오며 속도파형에 대해서는 같은 비례로 감소를 가져온다. 이러한 개념은 다음 그림 3에 보인 것과 같은 흙의 저항에 관한 model과 이에 대한 힘과 속도의 파형을 살펴봄으로써 좀더 자세히 설명할 수 있다.

그림 3에서 보는 바와 같이 model말뚝은 전체 길이의 1/3되는 지점 "A"에 작은 저항요소를 갖고 있으며 2/3되는 지점 "B"에는 이보다 큰 저항요소를 갖고 있다. 또한 깊이 L되는 곳의 말뚝선

단부에는 아무런 저항도 작용하지 않고 있다.

이러한 이론적인 저항에 의한 힘과 속도의 파형은 시간  $2A/C$ 가 경과할 때까지는 비례관계 혹은 같은 형태를 이루고 있다.

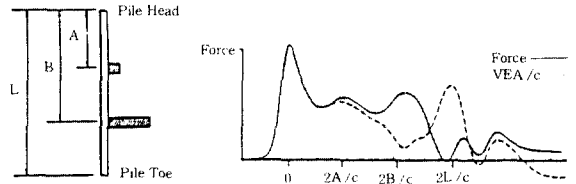


그림 3 힘과 속도파형에 대한 지반저항력의 영향

시간  $2A/C$ 에서 A점의 흙의 저항력에 의한 반사파가 발생하여 힘의 파형에 대해서는 증가를 가져오고 속도의 파형에 대해서는 같은 크기의 감소를 일으킨다.

시간  $2A/C$ 와  $2B/C$ 사이에서는 더이상의 흙의 저항력은 나타나지 않고 있다. 따라서 힘과 속도의 파형에 대한 더이상의 분리는 발생치 않으며 이 두 파형은 평행상태를 유지한다.

시간  $2B/C$ 에서는 A점에서 보다 큰 흙의 저항력에 의한 반사파가 말뚝두부에 도달하게 되며 이로부터 상당한 크기의 증가와 감소가 힘의 파형과 속도의 파형에 대해 각각 발생한다. 시간  $2B/C$ 와  $2L/C$  사이에서는 흙의 저항력이 존재하지 않으며 따라서 힘과 속도의 파형은 다시 평행상태를 이루게 된다.

시간  $2L/C$ 가 경과하면 말뚝선단부에서의 흙의 저항력이 반사되어 말뚝두부에 도달하게 되나, 말뚝선단부의 저항력이 없는 상태이므로 힘과 속도의 두 응력파들은 자유단 상태를 만나게 되어 인장과 (tensile wave)가 반사되게 된다. 이 인장파는 속도파에는 증가를 일으키고 힘의 파에 대해서는 감소를 가져오게 된다.

이상에 대한 실측례로서 흙의 저항이 힘과 속도의 비례관계(proportionality)에 미치는 영향을 그림 4의 a), b), c)의 각 경우에 나타내었다. 그림 4의 a)는 흙의 주면마찰저항과 선단저항이 크지 않은 경우의 힘과 속도의 파형을 나타낸다. 마찰저항이 크지 않으므로 시간  $t_1$ 부터 시간  $t_2$  (=  $t_1$

$+2L/C$ 까지 힘과 속도에 대한 파형의 분리가 크게 발생하지 않으며, 파가 선단부 (시간= $t_2+2L/C$ )에 이르러서는 힘의 파는 급격히 감소하고, 속도의 파는 거의 2배로 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 4의 b)는 주변마찰저항은 크지않고 선단저항이 큰 경우로 힘과 속도에 대한 파는 주변부 ( $0 \leq t < 2L/C$ )에서는 크게 분리되지 않고 있으나 선단부 ( $t \approx 2L/C$ )에 이르자 힘의 파는 크게 증가하고, 속도의 파는 거의 0이 됨을 알 수 있다. 그림 4의 c)는 큰 주변마찰력이 작용되는 마찰말뚝의 경우로 힘과 속도에 대한 파의 분리가 처음부터 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

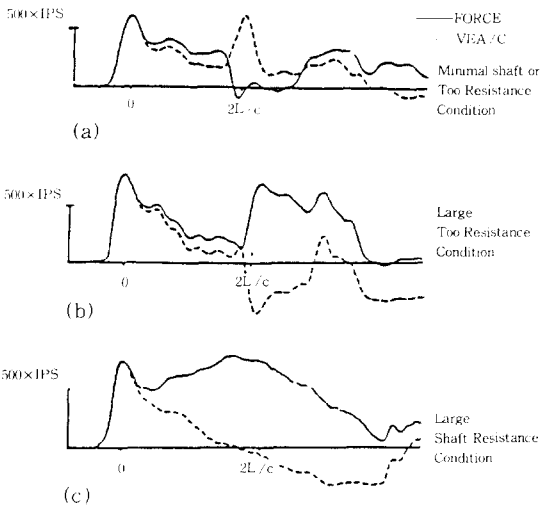


그림 4 흙의 저항력이 비례관계(propportionality)에 미치는 영향-실측예

### 2.2.3 시험장치 및 준비

① 해머 : 진동해머를 제외하고는 항타시공에 사용되는 어떠한 종류의 해머도 사용가능하며 보통 최대시험하중의 1%~1.5%의 Ram중량을 가져야 한다. 본 건 시험에서는 Ram중량 14Ton의 드롭해머를 사용, 낙하고를 최대 4m 까지로 하여 시험을 실시하였다.

② 변형률계(strain transducers) : 변형률계는 타격으로 인하여 말뚝에 발생하는 변형률을 측정하며 이 변형률계의 임피던스(impedance)는 말뚝임피던스의 0.5~2배가 되어야 한다.

③ 가속도계(accelerometer) : 가속도계로부터 측정되어진 가속도는 항타분석기에 의해 적분되어 속도로 변환, 변형률계로 부터 측정된 힘의 파(force wave)와의 관계로 부터 지반저항력을 산출할 수 있다.

④ 본건 시험의 경우 변형률계와 가속도계 말뚝 두부로 부터 대략 1.0 D(D : 말뚝직경) 하단부에 90° 간격으로 각각 한쌍씩 총 4쌍을 부착하였으며, 부착방법은 Grinder등을 사용하여 콘크리트 표면을 매끈하게 고른 다음 전기 Drill로 구멍을 뚫어 콘크리트용 Anchor를 설치한 후 고장력 볼트를 사용하여 말뚝에 고정하였다.

⑤ 항타분석기(PDA) : 항타시 변형률계 및 가속도계로 부터 측정된 Analogue 신호에 대해 signal conditioning을 실시하며 A/D 변환기를 통해 시간에 대한 힘과 속도를 digital data로 변환하여 저장하고, 힘과 속도의 파형을 case 방법으로 추정된 각종 계산치와 함께 화면에 나타낸다. 본건 시험에는 최신 model인 PDA-PAK을 사용하였다.

이상 시험장치의 기본도를 그림 5에 표시하였으며 기타 말뚝 cushion, steel striker plate 등을 포함한 시험말뚝의 두부정리 상세도는 그림 6과 같다.

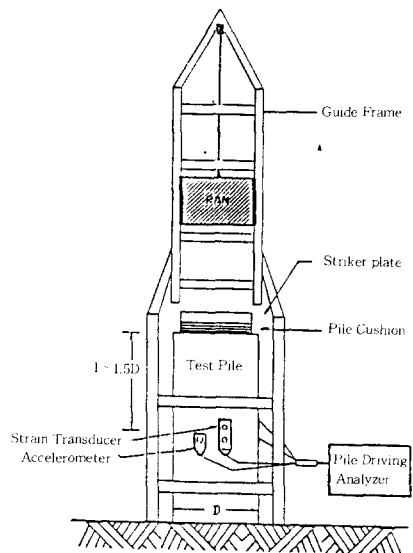
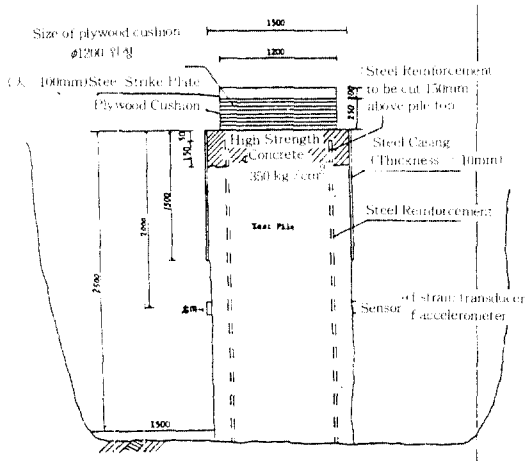


그림 5 동재하 시험 장치도



註) a. 두부 정리를 위한 콘크리트는 28일 강도가 나오도록 조강제를 사용하거나 충분한 양생을 지켜야 함.  
b. 합판 cushion은 못등을 사용하여 일체가 되도록 하여야 함.

그림 6 시험말뚝 두부정리 상세도

### 2.3 재하시험 결과의 해석

전술한 기본이론을 바탕으로 하여 말뚝향타분석기(PDA)를 이용, 말뚝의 지지력을 산정하는 바 그 분석방법으로는 경험에 의한 Damping 계수( $J_c$ )를 가정하여 항타와 동시에 말뚝의 예상지지력, 말뚝의 손상정도 등을 계산할 수 있는 Case방법과 PDA를 통해 얻은 힘과 속도를 항타완료 후 컴퓨터를 이용하여 말뚝지지력에 영향을 주는 각종 토질정수를 가정한 후 이를 시행차오법으로 반복 계산하여 최종적으로 말뚝의 지지력, 하중-침하량 관계 등을 결정할 수 있는 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program)방법이 있으며 이를 개략적으로 기술하면 다음과 같다.

#### 2.3.1 Case 방법

이 방법은 한마디로 표현하여 동적재하시험에 의한 지지력 예측법 중 간편 계산법이라고 할 수 있다. 근본적으로 말뚝두부에 변형률계와 가속도계를 설치하여 측정된 값을 가지고 말뚝의 지지력을 예측하는 것은 다음 절의 CAPWAP 방법과 같으나 본 case방법은 측정치를 가지고 지지력을 예

측할 수 있는 공식에 대입하여 구하는 방법이다.

Case 방법의 기본이 되는 전체저항력은 Rausche등 (1985)에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$RTL = \frac{1}{2} [FT_1 + FT_2] + \frac{1}{2} \frac{EA}{c} [VT_1 - VT_2] \quad (7)$$

- 여기서, RTL : 전체저항력  
 $FT_1, FT_2$  : 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 에 말뚝두부에서 측정된 힘  
 $VT_1, VT_2$  : 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 에 말뚝두부에서 측정된 속도  
 $EA/C$  : 말뚝의 임피던스

일반적으로 시간  $t_1$ 은 측정된 속도가 최대인 시간으로 하며 시간  $t_2$ 는  $t_1$ 으로 부터  $2L/C$ 가 경과한 시간을 말한다.

항타시 말뚝의 전체저항력 RTL은 정적저항력과 Damping으로 인한 동적저항력으로 구성된다. Case 방법에서는 동적저항력을 Case Damping 계수( $J_c$ ), 말뚝의 임피던스 ( $EA/C$ ), 말뚝선단에서의 입자속도( $v_t$ )의 곱으로 정의하고 전체저항력으로 부터 동적저항력을 제거함으로써 말뚝의 정적 지지력을 추정한다.(식 8)

$$\begin{aligned} RSP &= RTL - J_c \frac{EA}{C} V_t \\ &= RTL - J_c [VT_1 \left(\frac{EA}{C}\right) + FT_1 - RTL] \\ &= \frac{1}{2} (1 - J_c) [FT_1 + VT_1 \left(\frac{EA}{C}\right)] \\ &\quad + \frac{1}{2} (1 + J_c) [FT_2 + VT_2 \left(\frac{EA}{C}\right)] \end{aligned} \quad (8)$$

말뚝향타분석기(PDA)는 각 항타시마다 계산된 출력값을 선택할 수 있다. PDA계산 출력값에는 Gauge 부착위치에서의 최대압축력, 최대인장력, 에너지 전달 등 총 36가지가 있으며 이들 중 중요한 것은 표 1과 같다.

표 1 PDA 계산출력치

출력치	내 용
CSX(FMX)	Gauge 위치에서의 최대압축응력 (최대압축력)
CSB(CFB)	말뚝상단부에서의 최대압축응력 (최대압축력)
TSX(CTX)	말뚝에 작용하는 최대인장응력 (최대인장력)
DMX	Gauge 위치에서의 최대변위
EMX	Gauge 위치에서의 최대 항타에너지
ETR	에너지 전달률
BTA	말뚝의 손상정도를 나타내는 건전도 지수
RTL	말뚝의 Total resistance (정적+동적)
RSP(RP#)	Case 방법에 의한 정적극한지지력 (RSP w/jc=0.#)
RMX(RX#)	Case 방법에 의한 최대 정적극한지지력(RMX w/jc=0.#)
RMN	Case 방법에 의한 최소 정적극한지지력
RSU(RU#)	Early unloading을 보정한 정적극한지지력(RSU w/jc=0.#)
RAU	Case 방법에 의한 선단지지 말뚝의 극한지지력

case 방법은 항타와 동시에 말뚝의 예상지지력을 계산하므로 항타관리에 매우 편리하지만 말뚝의 실제 지지력 측정시 case damping 계수인  $J_c$ 를 경험적으로 가정하여야 하고, 시간  $FT$ 와  $VT$ 의 계산을 위해 시간  $t$ 를 선택하여야 하는 등의 오차 유발요인을 포함하고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 개발된 것이 CAPWAP (CAsE Pile Wave Analysis Program) 방법이다.

### 2.3.2 CAPWAP 방법

이 방법은 Case 방법과 마찬가지로 말뚝두부에서 측정된 힘과 시간, 또는 가속도와 시간과의 관계를 이용하여 지지력을 예측하는 방법이나, 근본적으로 약산 공식을 이용하지 않고 CAPWAP (CAsE Pile Wave Analysis Program) 프로그램을 이용하여 구하는 방법이다.

CAPWAP 프로그램은 Case Western Reserve University에서 Rasuche(1970)에 의해 최초로 개발되었으며 항타분석기(PDA)로 부터 얻어진 힘과 속도를 이용, 말뚝에 작용하는 힘과 말뚝의 변위를 정량화하여 시행착오법에 의한 Signal Matching 과정을 통해 말뚝의 경계조건(boundary conditions) 즉, 말뚝의 지지력, 지반저항력의 분포, quake 및 damping 특성을 결정하는 방법이다.

이 방법에서는 파동방정식 해석의 경우와 같이 말뚝을 응력파의 이동시간이 동일한 연속적인 요소로 모델링한 후 가정된 경계조건을 사용하여 프로그램에 의해 계산된 파형이 항타분석기에 의해

실측된 파형과 최대한 일치될 때까지 경계조건을 바꾸어가며 반복 계산한다. 계산된 파와 실측된 파를 일치시키기 위한 반복작업시 조정되는 경계조건인 parameter 중 대표적인 것은 quake, unloading quake, 흙 및 말뚝의 damping, unloading level, reloading level, radiation damping을 위한 parameter, plug mass, 말뚝의 극한 지지력, 지반저항력의 분포 등이다. 그림 7은 이러한 CAPWAP 방법에 대한 개념을 나타낸 것이다.

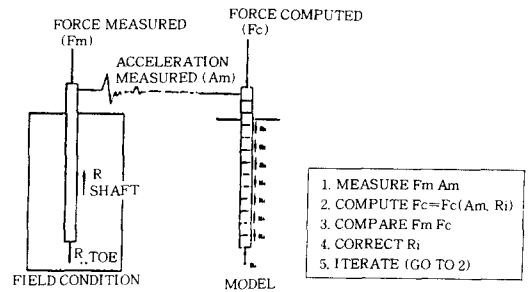


그림 7 CAPWAP 방법의 개념도

CAPWAP은 이러한 반복작업결과 산출된 경계조건을 이용, 정재하시험을 모사하여 하중재하에 따른 말뚝의 침하량과 지반의 정적저항력 관계를 나타내주며 이와함께 주변마찰력의 분포를 제시해준다.

그림 8은 CAPWAP 방법에 의한 최종계산결과 의 한 예(例)이다.

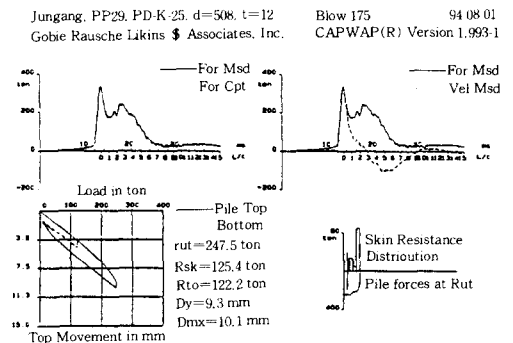


그림 8 CAPWAP 해석결과 예(例)

## 2.4 재하시험결과 - 허용지지력의 판정

본 동재하시험에서는 Ram중량 14Ton의 드롭해머를 사용, 낙하고를 0.5m~4.0m로 조정하며 각 시험말뚝에 대해 5회씩 타격을 가하여 지지력을 측정하였으며, 전술한 바와 같이 Cass방법 및 CAPWAP 방법을 사용하여 그 결과를 분석하였다.

### 2.4.1 Case 방법에 의한 분석

① 본건 동재하시험 실시 당시 매타격에 대해 case 분석방법으로 계산된 지지력은 PDA 화면에 의해 출력되었다.

아래 표 2는 case방법으로 산출된 각 시험말뚝의 지지력 계산결과를 나타낸 것으로서 각종 지지력 출력값 중 RMX값을 기준으로 하였다.

표 2 Case 방법에 의한 지지력 계산결과

시험번호	최대타격력 (FMX) (ton)	극한지지력 (RMX) (ton)	비 고
PILE NO. 3	2110	1360	Case Damping 계수 : Jc=0.5
		1800	Case Damping 계수 : Jc=0.0
PILE NO. 8	2060	1750	Case Damping 계수 : Jc=0.5
		1980	Case Damping 계수 : Jc=0.0

② 위 표에서 보는 바와 같이 case방법을 사용하여 분석한 본건 시험말뚝의 지지력은 case damping 계수 (Jc)의 값에 따라 큰 차이를 보이고 있으며 따라서 본건 시험말뚝과 같은 대구경 현장타설 말뚝에 대해서는 case방법은 적합치 못한 것으로 판단된다.

### 2.4.2 CAPWAP 방법에 의한 분석

본 말뚝시험결과에 대한 보다 정밀한 분석을 위해 CAPWAP 분석방법을 사용하였으며 그 결과를 요약하면 다음 표 3과 같다.

표 3 CAPWAP 방법에 의한 지지력 분석결과

지지력구분 시험번호	주면마찰력 (ton)	선단지지력 (ton)	전체(극한) 지지력 (ton)	허용지지력 (ton)	비 고
PILE NO. 3	2507	388	2895	1447	안전율 2.0
PILE NO. 8	1716	367	2083	1042	

위 표에 나타난 CAPWAP 방법에 의한 분석결과를 살펴보면, PILE NO. 3의 경우 극한지지력은 2895 ton으로 설계하중 620 ton에 대해 4.6이상의 안전율을 나타내고 있으며 PILE NO.8의 경우도 극한지지력은 2083 ton으로서 설계하중에 대해 3.3이상의 안전율을 갖는 것으로 판정되고 있다.

그러나 본건 시험에 있어 낙하고를 4m까지 높였음에도 불구하고 2개소의 시험말뚝 모두 침하량이 거의 0에 가까웠다는 사실을 감안한다면, (즉 시험말뚝의 극한지지력을 도출해내기에 충분한 타격력이 동원되지 못했음) 위의 판정값은 안전측에 속하는 것으로 보아야 타당할 것으로 판단된다.

또한 각 시험말뚝에 대한 지지력 성분을 검토해보면 시험말뚝 NO. 3의 경우 주면마찰력이 전체 지지력 성분의 약 87%를 차지하고 있으며 시험말뚝 NO. 8의 경우도 주면마찰력 성분의 비율이 약 82.4%로서 이와같은 판단을 잘 뒷받침 해주고 있다.

## 2.5 결 론

1) 본건 시험말뚝의 극한지지력 (CAPWAP 분석)은 다음과 같다.

PILE NO. 3 : 2895 ton

PILE NO. 8 : 2083 ton

이에 2.0의 안전율을 적용하면 허용지지력은 각각 1447 ton 및 1042 ton이 되어 설계하중 620 ton을 충분히 만족하고 있다.

2) 각 말뚝의 지지력 성분 중 주면마찰력의 비율은 PILE NO. 3 및 PILE NO. 8에 대해 각각 87% 및 82.4%로 나타나고 있어 본건 시험에 있어 극한 선단지지력을 측정하기에는 타격에너지가 충분치 못했던 것으로 판단된다.

3) 이상을 종합하면, 본건 동재하시험을 실시한 2개소의 말뚝 PILE NO. 3과 PILE NO. 8은 각각 1447 ton 및 1042 ton 이상의 허용지지력을 확보하고 있으며 따라서 설계하중 620 ton을 충분히 만족하고 있는 것으로 결론지을 수 있다.



### 3. 수평검측공시험 (CSL : Crosshole Sonic Logging Test)

#### 3.1 개 요

수평검측공시험은 현상타설말뚝의 결함을 파악하는데 가장 신뢰하는 방법이다. 이 시험은 그림 9와 같이 발신기 (source probe)와 수신기 (receiver probe) 사이를 진행하는 초음파 영역의 압

축파 (compression wave pulse)의 에너지와 도달시간을 측정, 분석하여 현상타설말뚝체의 결함을 파악하는 방법이다.

당 현장에서 사용한 시험장비는 프랑스 CEB-TR사의 CS87기종을 사용하였으며 (그림 10 참조), 그림 11은 말뚝체의 결함부분과 진전한 부분을 측정할 전형적인 예이다.

CSL시험에 의한 진전도의 판정 근거는 발신기와 수신기 사이의 평균속도의 감소로 인한 도착시간의 절대적인 증가 정도를 기준한다. 말뚝체의 결함부분을 판단하는 이러한 절대적인 도착시간의 증가는 다음과 같은 3가지 조건에서 나타난다.

- (1) 발신기와 수신기의 거리의 증가
- (2) 발신기와 수신기를 잇는 탄성과 전파경로상에 약한 concrete, honeycomb 혹은 contaminated concrete등과 같이 낮은 강성도 (느린 탄성과 전파속도) 를 갖는 결함부위가 존재할 경우
- (3) Tube와 concrete 사이의 부착상태 불량

발신기와 수신기 tube의 상·하부의 거리가 일정할 때 말뚝원크리트상태를 판정하는 기준은 다음과 같다.

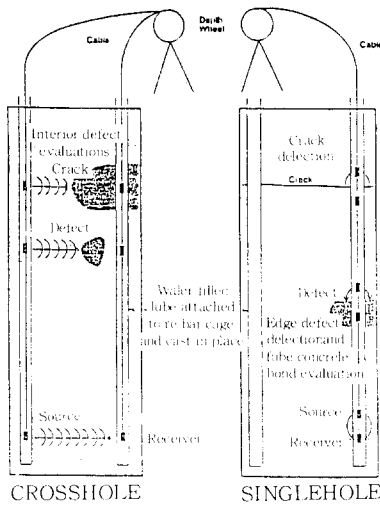


그림 9 Sonic logging for drilled shafts and slurry walls

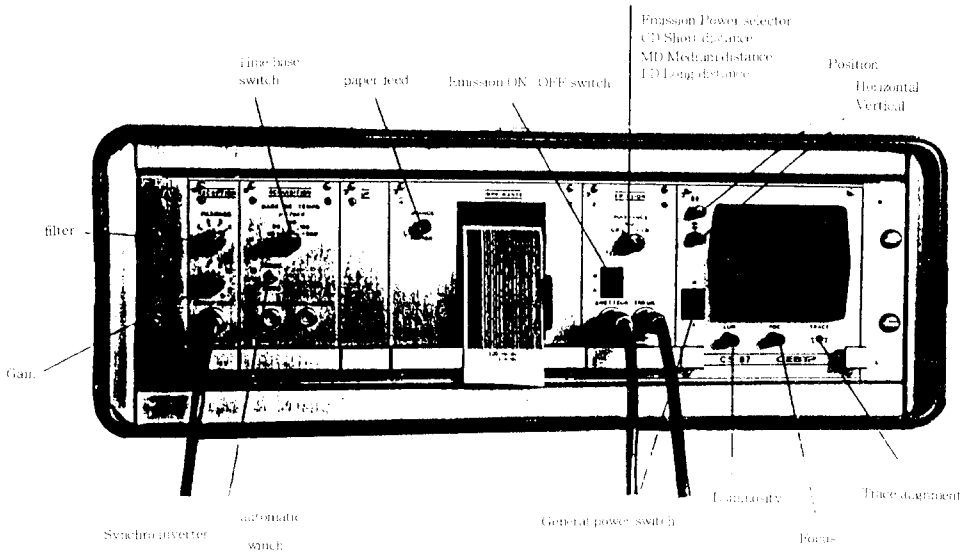


그림 10 Sonic coring equipment CS 87

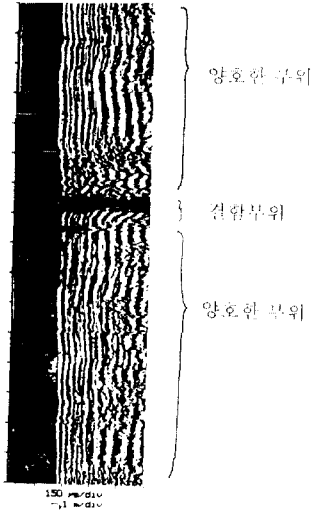


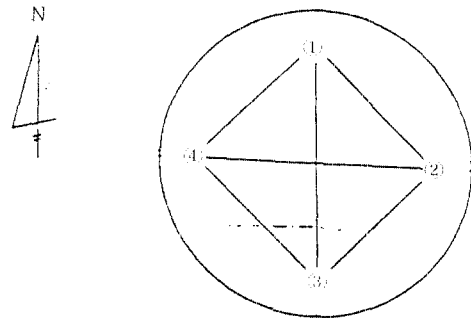
그림 10 시험 결과 예

### 3.2 시험방법

현장타설말뚝의 심도는 약 30M, 직경은 1.5M이다. 감속관 튜브는 철근망 내부에 직사각형 형태로 4개를 설치하고서 레미콘을 타설하였다. 튜브의 내경은 50M이며 튜브내를 물로 충만시켰다. 좋은 시험 결과를 얻기 위해서는 튜브내를 레미콘 타설 후 튜브와 레미콘의 밀착을 위해 맑은 물로 청소하여 물로 채우고 뚜껑을 덮어 보호하고, 시험시 물의 상태를 점검한 후 튜브내에 물이 차도록 새운후에 시험에 임해야 한다.

또 한가지 중요한 사항은 튜브간 간격을 유지하면서 수직으로 튜브가 설치 되어야 한다.

그림 12에서와 같이 북쪽에 있는 튜브가 1번 Hole이며 시계방향으로 2,3,4번으로 Hole Number를 정하였다.



시험은 ①-②, ②-③, ③-④, ④-① 그리고 대각선 방향으로 ①-③, ②-④의 6개의 Tube Pair를 시행하였다.

### 3.3 결론

최적의 시험자료를 얻기 위해서는 시험튜브의 설치가 무엇보다 중요하다. 추후 시험 튜브 설치시에는 상·하부가 균등하게 수직으로 설치될 수 있도록 현장관리자는 신경을 기하여야 한다. ■

Rating	NDT Results indicative of Drilled Shaft Concrete Condition
Good (G)	No signal distortion and decrease in signal velocity of 10% or less are indicative of good quality concrete
Questionable(Q)	Minor signal distortion and a lower signal amplitude with a decrease in signal velocity between 10% and 20%. Results indicative of minor contamination of intrusion and/or questionable quality concrete. Investigation of anomalies with 10-15% reductions in velocity have identified sound concrete at some sites and flawed concrete at others.
Poor /Defect (P/D)	Severe signal distortion and much lower signal amplitude with a decrease in signal velocity of 20% or more. Results indicative of water slurry contamination or soil intrusion and/or quality concrete.
No Signal (NS)	No signal was received. Highly probable that a soil intrusion or other severe defect has absorbed the signal (assumes good bonding of the tube concrete interface). If PVC tubes are used or if the measurement is from near the shaft top the tube concrete bonding is more suspect.
Water (W)	A measured signal velocity of nominally $V = 4800$ to 5000 fps. This is indicative of a water intrusion or of a water filled gravel intrusion with few or no fines present.