

## 말뚝재하시험과 시험결과의 해석

### Pile Load Test and Interpretation of Test Results

최용규, Yongkyu Choi

경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept of Civil and Environmental Engineering, Kyungsung Univ.

**개요** : 말뚝기초의 지지력예측방법 중 신뢰도가 가장 높은 것은 말뚝정재하시험방법이므로 말뚝기초의 경제적이고 신뢰성있는 설계를 위하여 하중전이의 측정이 수반된 말뚝재하시험을 실시하여야 할 것이다. 따라서, 말뚝재하시험 방법들에 대하여 고찰하고, 시험결과의 해석사례를 설명하였다. 또한, 신뢰성 있는 말뚝재하시험 수행을 위하여 고려해야 할 점들도 설명하였다. 또한, 하중전이측정실험에 대한 기본 개념을 고찰하였으며, 이 결과의 활용방안에 대한 설명도 부가하였다.

**주요어** : 말뚝기초, 지지력 예측, 말뚝재하시험, 시험결과 해석, 하중전이 측정실험

## 1. 서론

말뚝기초의 지지력예측방법으로는 말뚝재하시험에 의한 방법, 실내역학실험결과들을 이용한 정역학적 방법, 현장원위치시험(CTP, STP, PMT, DMT 등) 결과에 의하는 방법, 파동방정식에 기초한 방법, 항타 공식 등 동역학적 방법, 말뚝해석용 코드들에 의한 방법 그리고 수치적 기법에 의한 해석적 방법 등을 들 수 있다. 그러나, 시험수행과정이나 시험결과의 해석에 있어 다소 불확실성이 내재하고 있기는 하지만 말뚝재하시험에 의한 예측방법이 가장 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있으며, 다른 예측방법들은 신뢰도가 극히 낮은 실정이다. 다만, 유럽 등에서 적용사례가 많은 정적 관입시험 (CTP)결과에 의한 예측방법이 우수한 것으로 보고되고 있으나, 이 경우에도 상당한 오차가 내포되어 있는 것으로 나타나고 있다 (한국지반공학회, 1997a).

말뚝의 품질검사는 말뚝재하시험과 말뚝의 건전도 검사를 들 수 있다. 말뚝재하시험은 전반적인 시험으로 볼 수 있으며, 지지력과 침하량을 알아내어 말뚝의 전반적인 안정성을 확인할 수 있는데, 말뚝의 거동에 영향을 미치지 않을 정도의 국부적인 하자는 찾아낼 수 없다. 그러나, 국부적인 시험인 건전도 검사에서는 말뚝에 내재되어 있는 매우 국부적인 하자도 찾아낼 수는 있으나 말뚝의 지지력과 침하량 확인을 통한 안정성에 대한 판정은 극히 곤란하다 (choi, 1998). 따라서, 국내건설기술과 관련된 제법규에서 말뚝의 건전도 검사만을 품질검사로 규정할 것이 아니라 말뚝재하시험도 품질검사의 한 항목으로 설정하여 시공에 종속되는 개념으로서의 형식적인 말뚝재하시험이 아닌 시공상태를 확인하고 설계에 반영하는 측면에서의 말뚝재하시험이 될 수 있도록 하여야 할 것이다. 이와 같은 적극적인 개념은 ○○○○ 건설공사에서 채택되었으며, 공사의 시행주체가 직접 발주하여 이미 시공된 말뚝기초들의 안정성을 확인하기 위한 대형의 프로젝트가 수행중에 있다 (부산광역시 건설본부, 1999).

국내에서는 말뚝재하시험을 수행하더라도 지지력 예측이 곤란한 경우도 흔하게 나타나는데, 이는 말뚝재하시험결과의 해석상의 불확실성과 적절한 안전율의 적용 등과 같은 근본적인 요인이외에도 말뚝재하시험방법 선정상의 부적합성, 말뚝재하시험 수행상의 미숙, 활용이 곤란한 지반조사결과 그리고 하중전이 측정의 미시행 등으로 인하여 정확한 지지력 예측을 더욱 곤란하게 하여왔다.

말뚝기초의 설계지지력 확인을 위한 말뚝재하시험의 수행뿐만 아니라, 경제성 있는 설계를 위하여 설계단계에서 하중전이의 측정이 수반된 말뚝재하시험을 수행하여 설계를 완성하는 절차를 일반화시켜야

할 것이며, 설계단계에서 말뚝재하시험의 수행이 극히 곤란한 경우에는 시공초기이라도 반드시 말뚝재하시험을 수행하여 설계를 확인하도록 해야 할 것이다.

여기에서는 말뚝재하시험방법들에 대해 고찰해보고 시험 결과의 해석사례를 설명하고자 한다. 또한, 축하중 전이의 측정이 수반된 말뚝재하시험결과를 활용한 경제적인 말뚝기초의 설계를 수행하고, 그에 따른 건설예산의 절감사례를 소개하고자 한다.

## 2. 말뚝재하시험법의 분류

### 2.1 말뚝재하시험의 종류

말뚝재하시험은 작용하중 형식에 따라 정재하시험 (Static pile load test), 정·동재하시험 (Statnamic test), PDA (Pile driving analyzer), 간편재하시험 (Simple pile load test), 오스터버어그시험 (Osterberg load cell test), SIMBAT시험 등으로 구분할 수 있으며, 이중 정재하시험은 가장 직접적인 방식이라 할 수 있다. 말뚝에 작용되는 하중의 방향에 따라 연직압축재하시험, 연직인발재하시험, 수평재하시험, 경사하중재하시험 그리고 진동하중재하시험 등으로 구분할 수 있으며 연직압축재하시험에는 위에 언급된 모든 시험법이 적용가능하지만 연직인발재하시험과 수평재하시험에는 정재하시험이 적용가능하고 경사하중재하시험에는 정재하시험과 PDA가 적용가능하다. 그러나, 진동하중재하시험으로는 하중발생장치의 대형화와 복잡성으로 인하여 실물재하시험은 곤란할 수 있으며 주로 압력토조를 이용한 모형실험이 수행되고 있다.

시험목적에 따라 통상적인 말뚝재하시험과 설계목적의 말뚝재하시험으로 구분할 수 있으며, 표 1에 상세하게 설명하였다. 통상적인 말뚝재하시험은 공사도중 설계하중의 지지가능 여부만을 확인하기 위하여 수행되어진다. 그러나, 설계목적의 말뚝재하시험은 설계단계에서 시험말뚝을 시공하여 경제성 있는 설계를 수행하기 위한 것이므로, 극한하중 또는 항복하중까지 확인할 수 있어야 한다. 설계목적의 말뚝재하시험에 관하여 다음 절에서 상세하게 소개할 것이다.

### 2.2 설계목적의 말뚝재하시험

설계목적의 말뚝재하시험을 위하여 시공할 시험말뚝은 실물크기이거나 크기 효과 (Scale effect)의 영향을 받지 않을 정도의 축소말뚝이어야 하며, 축하중의 전이양상을 측정할 수 있어야 한다. 극한하중까지 재하하여야 하며 적어도 항복하중까지는 확인할 수 있어야 한다. 연직압축재하 뿐만 아니라 필요하다면 인발재하시험과 수평재하시험도 포함되어야 할 것이다. 상세한 지반특성치가 파악되어야 합리적인 설계를 수행할 수 있다. 이와 같은 시험말뚝에 대한 재하시험을 활용한 설계는 경간장 50m이상의 교량, 단면적 20m<sup>2</sup>이상의 박스 구조물, 폐수처리장, 하수처리장, 지하철공사, 연면적 2만km<sup>2</sup>이상의 건축물 등과 같은 상당한 중요성을 가지는 구조물의 경우에 한하여 적용되어야 할 것이다. 설계단계에서 수행되는 시험말뚝에 대한 정재하시험에는 다소 많은 경비가 소요되지만 약 20억원을 초과하는 건설공사에서는 경제성을 갖는 것으로 보고되고 있으나 (정성기 등, 1998), 여러 가지 변수들을 감안하여 상기와 같은 대형 건설공사에 한하여 시험말뚝에 대한 시험을 수행하여야 할 것이다.

설계목적의 말뚝재하시험과 통상적으로 수행된 말뚝재하시험의 결과를 그림 1에 나타내었다. 설계목적의 말뚝재하시험에서는 극한 지지력을 결정할 수 있고 측정된 하중전이자료를 활용하여 말뚝의 하중 지지거동을 확인할 수 있으므로, 최적화된 말뚝기초의 설계를 수행할 수 있을 것이다. 반면, 통상적인 말뚝재하시험에서는 극한하중은 물론이고 항복하중마저도 구할 수 없는 경우가 대부분이며, 말뚝의 하중 지지양상을 확인할 수 없다. 다만, 설계하중의 지지여부만 확인할 수 있을 뿐이다.

중요한 구조물의 설계에서는 시험말뚝의 시공과 재하시험에 소요되는 비용은 설계용역비에 포함시켜야 할 것이다. 이에 따라 설계용역비는 다소 증가할 수 있을 것이나 말뚝기초의 경제적인 설계가 이루어진다면 말뚝기초의 시공비용을 대폭 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 건설예산은 설계용역비와 시공비

그리고 건설 후 유지·관리비로 구성되므로 시공비의 절감을 통하여 건설예산의 절감을 이룰 수 있을 것이다. 따라서, 시험말뚝을 활용한 경제적인 설계를 통하여 건설예산을 대폭 절감시킬 수 있다는 개념을 대형 건설공사의 발주처들이 확실하게 이해하여 시험말뚝의 시공 및 재하시험에 소요될 비용을 설계용역비에 반영해 줄 수 있도록 해야 할 것이다.

표 1. 목적에 따른 말뚝재하시험의 분류 (최용규, 1999)

	설계목적의 말뚝재하시험 (시험말뚝에 대한 재하시험)	통상적인 말뚝재하시험
목적	- 말뚝기초의 설계에 활용하여 최적화 설계를 수행하기 위함 (시공시방결정도 포함됨)	- 설계하중의 지지 가능 여부 확인
기본원칙	- 극한하중까지 재하 (최소한 항복하중까지는 재하하여야 함) - 하중전이측정실험 포함 - 연직압축재하, 연직인발재하, 수평재하시험	- 설계하중의 2배 이상 - 연직압축재하시험
시험방법	- 실물크기 말뚝 또는 축소말뚝 - 정재하시험 - 필요한 경우에는 정·동재하시험, PDA, 기타방법도 부가적으로 수행할 수 있음 - 시공기준 및 항타기준설정을 위한 시험도 포함해야 함	- 실물크기말뚝 - 정재하시험, 정·동재하시험, PDA, 기타방법
수행시기	- 설계단계	- 시공시
시험결과	- 하중 - 침하량 곡선 (극한하중단계까지) - 축하중의 분포도 (전이양상) - 시공기준 및 항타기준	- 하중 - 침하량 곡선 (항복하중미만)
지반조사	- 상세한 지반조사 → 정확한 지층구분 - 실내 및 원위치 역학시험 → 엄밀한 지반특성치	- 지층구분을 위한 지반조사에서 N치만을 측정함 - 지반조사결과는 거의 활용되고 있지 못함 (설계사례들을 고찰한 결과임)
비고	- AASHTO 규정에서 의무화하고 있음 - 일본 도로교 시방서의 해설에서도 가장 신뢰성 있는 방법으로 추천 - NAFAC DM - 7.2에서 시공초기에 수행하도록 의무화하고 있으며, 가장 신뢰성 있는 것으로 기술하고 있음 - 건교부 제정 “도로교 설계기준“ 개정 (1999년) 내용에 반영하였음 - 국내에서는 채택된 사례가 거의 없음 (최용규 등, 1998a)	- 국내에서 시행된 말뚝재하시험의 일반적인 유형임

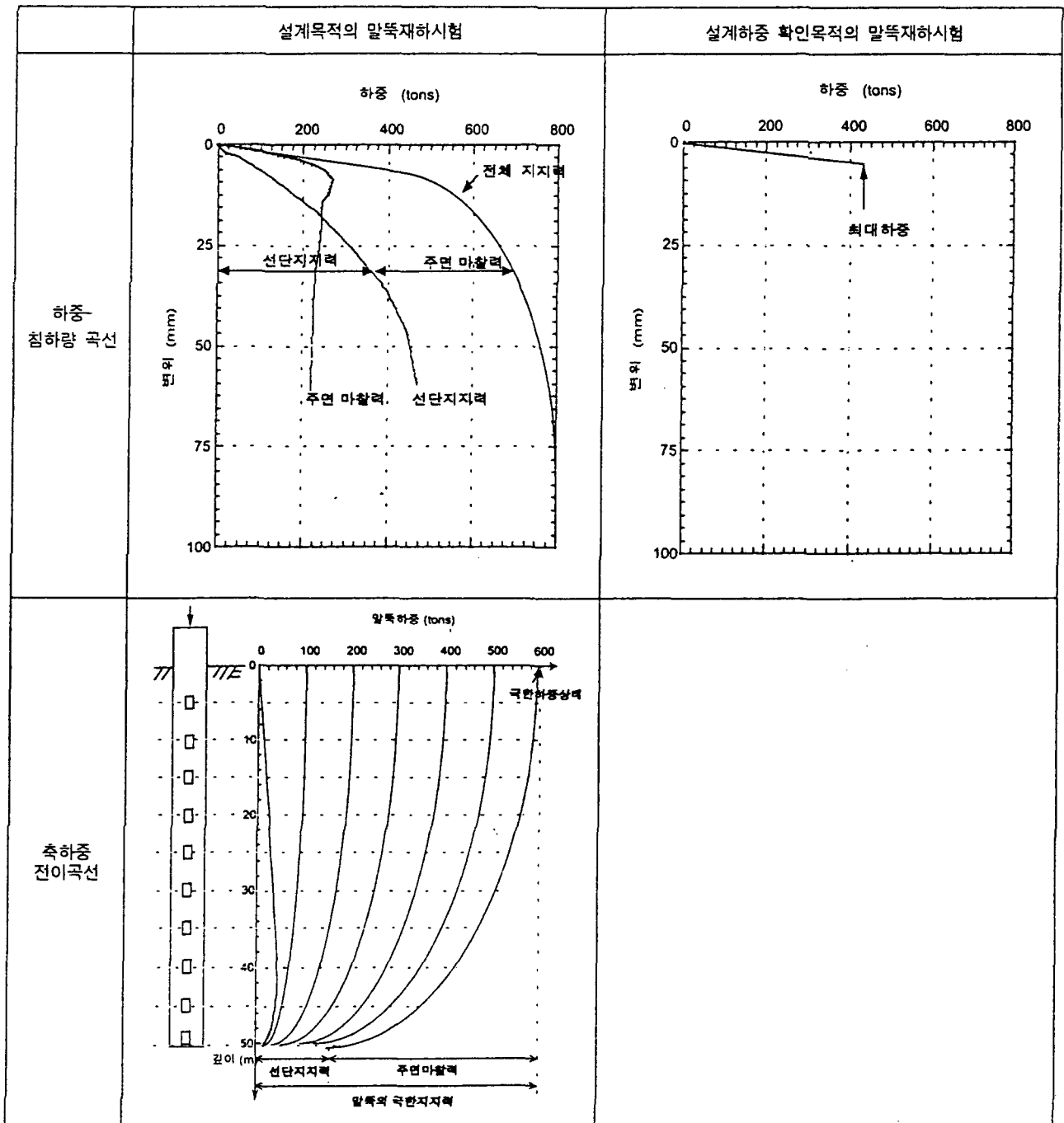


그림 1. 목적에 따른 말뚝재하시험들에서 구한 결과들 (최용규, 1999)

### 3. 연직 압축 정재하 시험

#### 3.1 반력 하중 작용 방식

말뚝 머리에 하중을 재하하는 방법은 사하중을 소요량만큼씩 말뚝머리위에 직접 재하하는 방법도 있지만, 일반적으로 유압잭을 통하여 말뚝머리에 하중을 작용시키는 방법이 사용된다. 반력하중을 작용시키는 방식에 따라 반력사하중 상재방식 (그림 2(a)), 반력말뚝 방식 (그림 2(b)), 반력 지중앵커 방식 (그림 2(c)) 그리고 혼합반력 방식 (그림 2(d)) 등이 있다. 말뚝머리에 대용량의 하중을 재하해야 할 경우 한 가지 반력 방식으로 지지가 곤란할 수 있는데, 이 때 혼합반력방식을 사용할 수 있다. 예를 들면, 반력말뚝으로 대부분의 반력을 지지하고 부족한 일부 반력은 반력 사하중으로 지지시킬 수도 있을 것이다.

말뚝에 실제 하중이 재하되는 상태는 반력사하중 상재방식과 가장 유사하지만, 반력사하중의 제작 및 재하에 소요되는 과도한 시간과 경비 등으로 반력말뚝 방식이나 반력지중앵커 방식 등의 적용성이 증대되고 있다. 그러나, 반력지중앵커 방식을 사용할 경우 지중앵커의 인발력에 의해 지중앵커 내부에 있는 지반 블록이 전체적으로 미소하나마 인발되는 경향이 있을 수 있으므로 시험 말뚝으로부터 충분한 간격 ( $\geq 3D$ )을 유지하여 반력 지중 앵커를 설치해야 한다.

#### 3.2 재하시험 방법

압축재하시험 방법에는 다음의 여러 가지가 있으나 이들 중 ASTM 표준 재하방법인 완속재하시험 방법 (Slow maintained - load test)과 지반의 잔류 침하량을 확인할 수 있는 반복 하중 재하방법 (Cyclic loading test)을 보편적으로 사용하고 있다.

##### 3.2.1 완속재하시험 방법 (Slow maintained-load test)

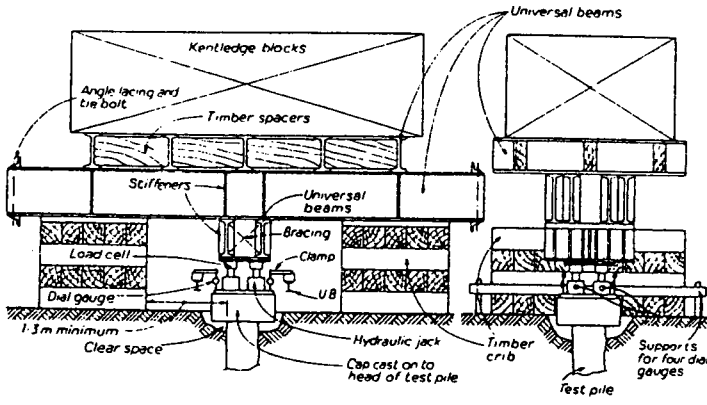
ASTM 표준재하방법 (Standard Loading Procedure)으로 널리 알려진 (ASTM D 1143-81)이 방법에 의한 재하시험 과정은 아래와 같다.

- 가. 총 시험하중을 8단계 즉, 설계하중의 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 125 %, 150 %, 175 % 및 200 % 로 나누어 재하한다.
- 나. 각 하중단계에서 말뚝 머리의 침하율 (Rate of settlement)이 시간당 0.01 inch (= 0.25 mm)이하가 될 때까지, 단 최대 2시간을 넘지 않도록 하여 재하하중을 유지한다.
- 다. 설계하중의 200 %, 즉 총 시험하중 재하단계에서 하중을 유지하되 시간당 침하량이 0.01 inch (= 0.025 mm) 이하일 경우 12시간, 그렇지 않을 경우 24시간 동안 유지시킨다.
- 라. 총 시험하중을 설계하중의 25% 씩 각 단계별로 1시간씩 간격을 두어 재하한다.
- 마. 만약 시험도중 말뚝의 파괴가 발생할 경우, 총 침하량이 말뚝 머리의 직경 또는 대각선 길이의 15 %에 달할 때까지 재하를 계속한다.

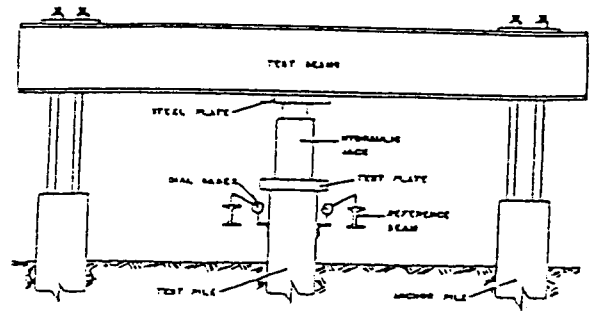
##### 3.2.2 반복하중재하방법 (Cyclic loading test)

ASTM D 1143 - 81(Optional)에 의한 이 시험방법은 아래와 같다.

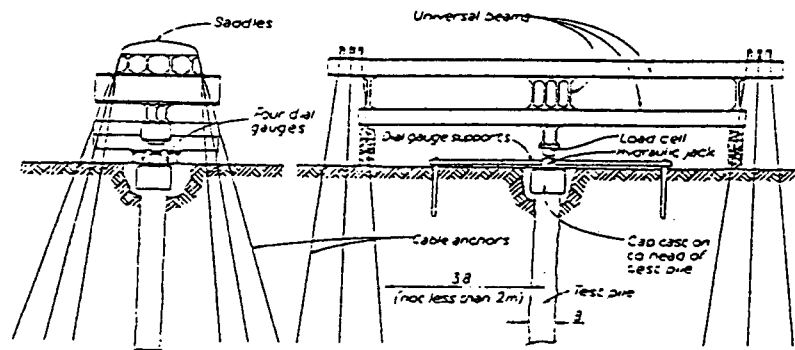
- 가. 재하하중의 하중단계를 표준재하방법에서와 같이 정한다.
- 나. 재하하중 단계가 설계하중의 50 %, 100 % 및 150 %에 도달하였을 때 재하하중을 각각 1시간 동안 유지시킨 후 표준재하방법의 재하시와 같은 단계를 거쳐 단계별로 20분 간격을 두면서 재하한다.



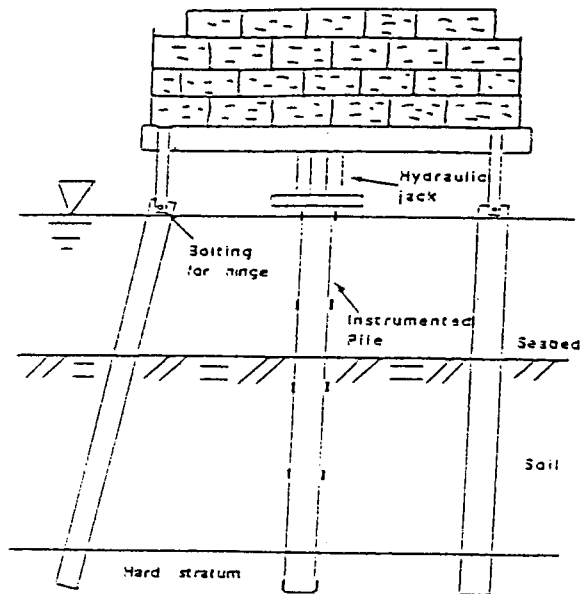
(a) 사하중상재방식



(b) 인발말뚝방식



(c) 지중앵커방식



(d) 혼합방식

그림 2. 연직 압축 재하시험

다. 하중을 완전히 제하한 후 설계하중의 50 %씩 단계적으로 다시 재하하고 표준시험 방법에 따라 다음 단계로 재하한다.

라. 재하하중이 총 시험하중에 도달하게 되면 12시간 또는 24시간 동안 하중을 유지시킨 후 제하하중 그 절차는 표준재하방법과 같다.

### 3.2.3 급속재하시험방법 (Quick maintained-load test)

표준재하방법은 매우 긴 시간 (보통 30 내지 70시간)이 소요된다는 것이 가장 큰 결점이다. 따라서, 안전침하율 기준에 따라 각 하중재하단계에서 경과 시간을 조절하는 것은 별 의미가 없으며 실제로 각 하중단계마다 “동일한” 시간을 유지토록 하는 것이 더 중요하다고 할 수 있다. 이러한 인식하에서 제안된 방법이 “급속재하방법”으로서 New York State Department of Transportation, The Federal Highway Administration 및 ASTM 1143 - 81(Optional)에 의해 권장되고 있으며 그 시험방법은 아래와 같다.

가. 재하하중단계를 설계하중의 10 내지 15 %로 정하고 각 하중단계의 재하 간격을 2.5 내지 15분으로 하여 재하한다.

(주) ASTM에서는 재하 간격을 2.5분으로 규정하고 있으나 그 시간 동안 2 - 4차례에 걸쳐 변위계를 읽고 기록하기에는 충분치 못한 것으로 판단되며 대체로 5분 간격으로 하는 것이 보다 실제적인 것으로 보인다.

나. 각 하중단계마다 2 - 4차례 (예 : 재하 간격 5분일 경우 0, 2.5, 4.0 및 5분 경과시) 침하량을 읽어 기록한다.

다. 시험은 재하하중을 계속 증가시켜 말뚝의 극한하중에 이를 때까지 또는 재하장치의 재하용량이 허용하는 범위까지 재하한 후, 최종 하중단계에서 2.5 내지 15분간 하중을 유지시킨후 제하한다.

(주) 일반적으로 총 시험하중을 표준재하방법에서와 마찬가지로 설계하중의 200 %, 혹은 300 %까지로 제한하는 것이 권장되고 있다 (Fellenius, 1998 ; Prakash et al, 1990). 이 방법을 사용하면 대략 2 - 5시간 이내에 전 시험과정을 마칠 수 있다.

### 3.2.4 일정침하율시험방법 (Constant rate of penetration test)

이 방법은 흔히 CRP test라고 불리우며 말뚝의 극한하중을 신속히 결정하기 위한 목적으로 Whitaker에 의해 개발된 것으로서 Swedish Pile Commission, New York State Dept of Transportation 및 ASTM D 1143 - 81(Optional)에 의해 권장되고 있는바, 그 시험 방법은 다음과 같다.

가. 말뚝의 침하율이 통상 0.01 inch/min. (= 0.5 mm/min.) 내지 0.10 inch/min. (= 2.50 mm/min.)가 되도록 재하하중을 조절하면서 매 2분마다 하중과 침하량을 기록한다.

(주) 침하율을 정하는 데 있어 Whitaker는 마찰말뚝에 대해서는 0.75 mm/min., 선단지말뚝에 대해서는 1.5 mm/min.를 채택할 것을 권유하고 있으며, ASTM에서는 점성토인 경우 0.25 - 1.25 mm/min., 사질토인 경우 0.75 - 2.50 mm/min.를 제시하고 있다.

나. “가”의 방법에 의해 재하하중을 증가시켜 말뚝의 총 침하량이 2 - 3 inch (= 50 - 75 mm)에 달할 때까지 또는 총 시험하중에 도달할 때까지 시험을 계속한 후 재하한다.

(주) ASTM에서는 총침하량이 말뚝 머리의 직경 또는 대각선 길이의 15 %에 달할 때까지 시험을 계속할 것을 규정하고 있다.

이 CRP 시험방법은 급속재하방법 (Quick maintained-load test)에서보다 더 나은 하중 침하량 곡선을 얻을 수 있다는 데 그 장점이 있으며 특히 점성토의 마찰말뚝에 대해 보다 잘 적용된다.

이 방법을 수행하기 위해서는 일정침하율을 유지하기 위해 지속적으로 유압을 가할 수 있는 특수전동

펌프의 구비가 필수적이며, 또한 하중과 침하량 눈금들을 동시에 읽어내야 하므로 시험요원의 적절한 훈련을 필요로 한다.

### 3.2.5 일정침하량시험 방법 (Constant settlement increment test)

이 방법 역시 CRP 시험방법과 마찬가지로 말뚝의 침하량이 일정한 값만큼 증가하도록 단계별 재하하중을 조절하는 방법으로서 그 과정은 아래와 같다.

- 가. 단계별 재하하중을 말뚝의 침하량이 대략 말뚝 머리의 직경 또는 대각선 길이의 1 %에 해당하는 값과 같아지도록 조절한다.
- 나. “가”항의 소정 침하량을 유지하기 위한 재하하중 변화율이 시간당 각 단계에서의 재하하중의 1 % 미만에 이르게 되면 다음 하중단계로 옮겨진다.
- 다. 이러한 과정을 계속하여 말뚝의 총 침하량이 말뚝 머리의 직경 또는 대각선 길이의 10 %에 달할 때까지 (또는 재하장치의 용량한도까지) 시험을 계속한다.
- 라. 재하하중이 총 시험하중에 도달하면 소정 침하량을 유지하기 위한 하중의 변화율이 시간당 총 시험하중의 1 % 미만이 될 때까지 재하하중을 유지시킨 후 총 재하하중을 네 단계로 등분하여 재하하되, 재하단계별로 말뚝의 Rebound율이 시간당 말뚝 머리의 직경이나 대각선 길이의 0.3 % 이내에 들어올 때까지 기다린 후 다음 단계의 재하를 행하도록 한다.

### 3.2.6 하중증가평형시험 방법 (Incremental equilibrium test)

이 방법은 Mohan et al.에 의해 제안된, 표준재하방법을 개선한 방법으로서 표준재하방법에 비해 총 소요시간을 1/3 가량 단축시킬 수 있으며 그 시험결과는 표준재하방법에 의한 것과 잘 부합되는 것으로 알려져 있다.

- 가. 재하하중 단계를 설계하중의 15 % 내지 25 %로 정한다.
- 나. 각 재하하중 단계에서 재하하중을 일정 시간 (5 - 15분) 동안 유지시킨 후, 하중 - 침하량이 평형 상태에 도달할 때까지 재하하중이 감소하도록 방치한다.
- 다. “나”항에서의 평형상태에 도달하면 다음 단계의 하중을 재하하는 식으로 같은 방식을 되풀이하여 재하하중이 총 시험하중에 이를 때까지 시험을 계속한다.

### 3.2.7 스웨덴 반복하중재하 방법 (Swedish cyclic test)

이 방법은 Swedish Pile Commission에 의해 권장되는 방법으로서 다음의 과정을 통해 행하여 진다.

- 가. 초기 재하하중을 말뚝 설계하중의 3분의 1까지로 하여 재하한다.
- 나. 설계하중의 6분의 1까지 재하하여 같은 과정을 20차례 반복한다.
- 다. 다음, 재하하중을 “가”항에서 보다 50 % 증가시켜 재하하고 “나”에서의 같은 과정을 되풀이한다.
- 라. 상기 “가”, “나”, “다”의 과정을 말뚝이 파괴에 이를 때까지 계속한다.

이 방법은 상당히 오랜 시간이 소요되고 하중의 재하 - 제하가 빈번히 반복됨에 따라 말뚝자체도 최초의 말뚝(상태)와는 다른 것이 되고 만다. 따라서 이 시험방법은 특별한 경우에 한하여 사용할 것을 권유하고 있다.

표 2에는 현장에서 수행된 말뚝정재하 압축시험에서 설정한 반복하중 재하방법의 하중재하 단계의



예를 나타내었으며, 그림 3에는 시간에 따른 하중재하상태를 나타내었다. 시험 말뚝은 설계하중 500톤의 현장 타설 콘크리트 말뚝으로 예상 최대재하용량은 2,000톤으로 설정하였다. 여기서, 하중재하단계는 ASTM의 완속재하시험 방법과 반복하중재하방법에 따라 설정되었다.

### 3.3 말뚝재하시험 결과의 정리 및 해석

#### 3.3.1 말뚝재하시험 결과의 정리

말뚝재하시험을 수행한 후 다음과 같은 결과 정리를 하여야 한다.

- ① 말뚝머리 하중 - 침하량 관계 (그림 4(a))
- ② 말뚝머리 하중 - 지반의 잔류 침하량 (또는 말뚝 변형량) 관계 (그림 4(b))
- ③ 하중- 시간 (그림 4(c)), 침하량 - 시간 (그림 4(d)) 관계
- ④ 말뚝의 깊이에 따른 하중 단계별 축하중 전이 양상 (그림 5)
- ⑤ 선단지지력과 주변마찰력의 분리 (그림 6)

여기서, 항목 ① ~ ④의 관계를 이용하여 말뚝의 극한지지력 또는 항복지지력을 구할 수 있다. 그리고 항목 ④와 ⑤를 이용하여 말뚝의 하중지지 거동을 확인할 수 있으며 이 관계를 구하기 위하여 축하중 계측용 센서를 말뚝 깊이별로 설치하여 하중전이 측정을 수행해야 한다.

#### 3.3.2 말뚝재하시험 결과의 해석 사례

그림 4(a) ~ (d)를 이용하여 지반의 지지능력을 고려한 말뚝의 극한 하중 또는 항복하중을 구할 수 있다. 그림 4(a) 와 (b)를 이용하여 하중기준, 전침하량기준 그리고 순침하량기준에서의 극한하중 또는 항복하중을 결정할 수 있으며 하중(P)-시간(t)-침하량(s) 거동특성 (그림 4(c)와 (d))에 의하여 항복하중을 판정하는 방법들이 제안되어 있는데 이들을 표 3 ~ 5에 요약하였다. 표 3 ~ 5에 요약되어 있는 방법들에 대한 구체적인 설명은 생략하였다.

선정된 사례를 그림 7 (Tomlinson, 1997)에 나타내었으며, 두 가지 선정사례를 통하여 말뚝재하시험 결과 해석을 수행하였다. 표 3 ~ 5에 요약된 방법들중 적용가능한 방법들에 의하여 극한 하중이나 항복 하중들을 판정하였다. 두 개의 말뚝재하시험 결과들을 이용하여 판정한 극한 또는 항복하중을 표 3 ~ 5에 함께 나타내었다.

판정법들간의 오차한계에 대한 보고된 사례 (Fellenius, 1980)를 그림 8에 나타내었으며, 여기서, 최대값과 최소값에 대한 비는 1.38정도였다. 세가지 사례에서 Chin의 방법은 대체로 다소 과대평가된 것으로 보이므로, 이것을 제외한다면 최대값과 최소값의 비는 1.25정도이므로 여러 가지 방법들간의 판정오차는 말뚝기초의 지지력 예측에 있어 결정적인 요소는 아닐 수도 있을 것이다.

말뚝재하시험 결과의 해석에는 극한 또는 항복하중의 판정뿐만 아니라 하중전이 측정 결과에 대한 해석도 수반되어야 한다. 이에 관해서는 6절에서 상세하게 설명할 것이다.

### 3.4 말뚝재하시험시 고려해야 할 사항들

신뢰성 있는 말뚝재하시험 수행을 위하여 고려해야 될 사항들은 재하하중의 용량, 하중재하 단계의 조정, 극한 또는 항복하중 판정법의 다양성 및 불확실성, 말뚝재하시험의 빈도, 말뚝재하시험의 시기 그리고 말뚝재하시험법 선정 등을 들 수 있다.

표 2. 하중재하 단계설정 예 (예상)

주 기	하중단계	재하시간	비고
①	0t→125t→250t→0t→Next Cycle	2시간	설계하중의 50 %
②	0t→250t→375t→500t→375t→250t→0t→Next Cycle	3시간	설계하중의 100 %
③	0t→250t→500t→625t→750t→625t→500t→250t→0t→Next Cycle	4시간	설계하중의 150 %
④	0t→250t→500t→750t→875t→1000t→875t→750t→500t→250t→0t→Next Cycle	5시간	설계하중의 200 %
⑤	0t→250t→500t→750t→1000t→1125t→1000t→750t→500t→250t→0t→Next Cycle	10시간	설계하중의 250 %
⑥	0t→125t→250t→500t→750t→1000t→1125t→1250t→1375t→1500t→1200t→1000t→750t→500t→250t→0t→End	34시간	설계하중의 300 %
⑦	0t→250t→500t→750t→1000t→1150t→1250t→1500t→1625t→1750t→1625t→1500t→1250t→1000t→750t→500t→250t→0t→Next Cycle		설계하중의 350 %
⑧	0t→250t→500t→750t→1000t→1150t→1250t→1500t→1750t→1875t→2000t→1875t→1750t→1500t→1250t→1000t→750t→500t→250t→0t→End		설계하중의 400 %

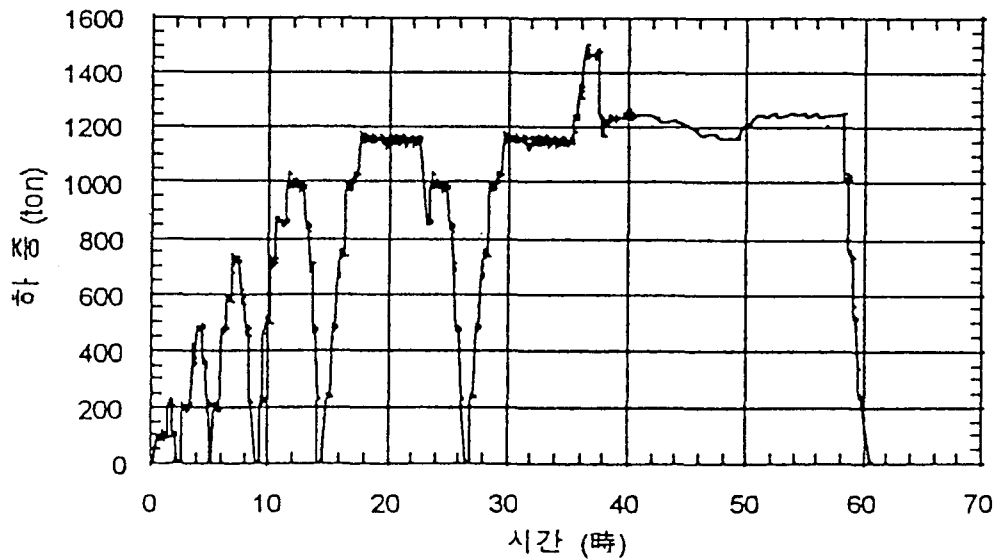
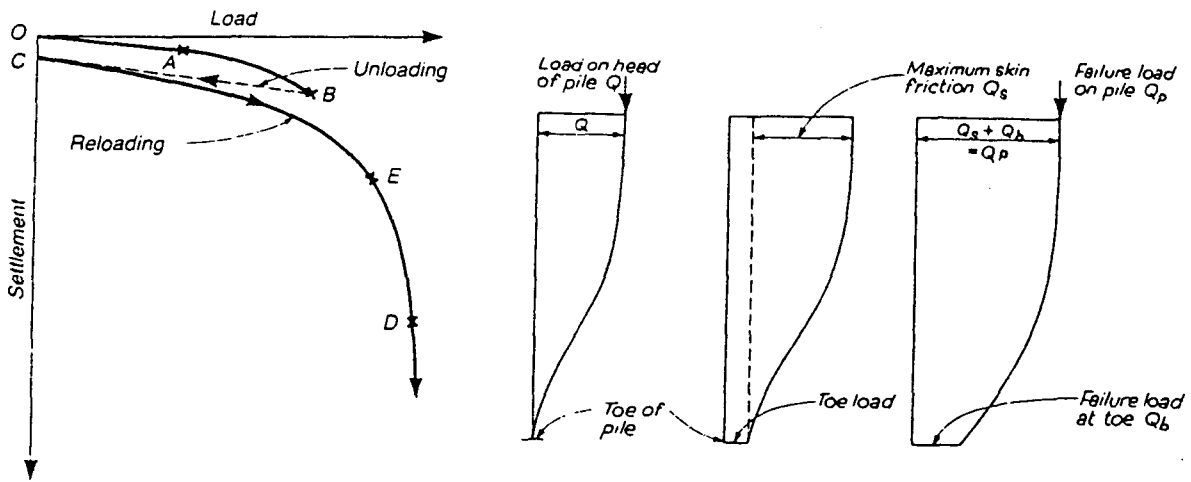
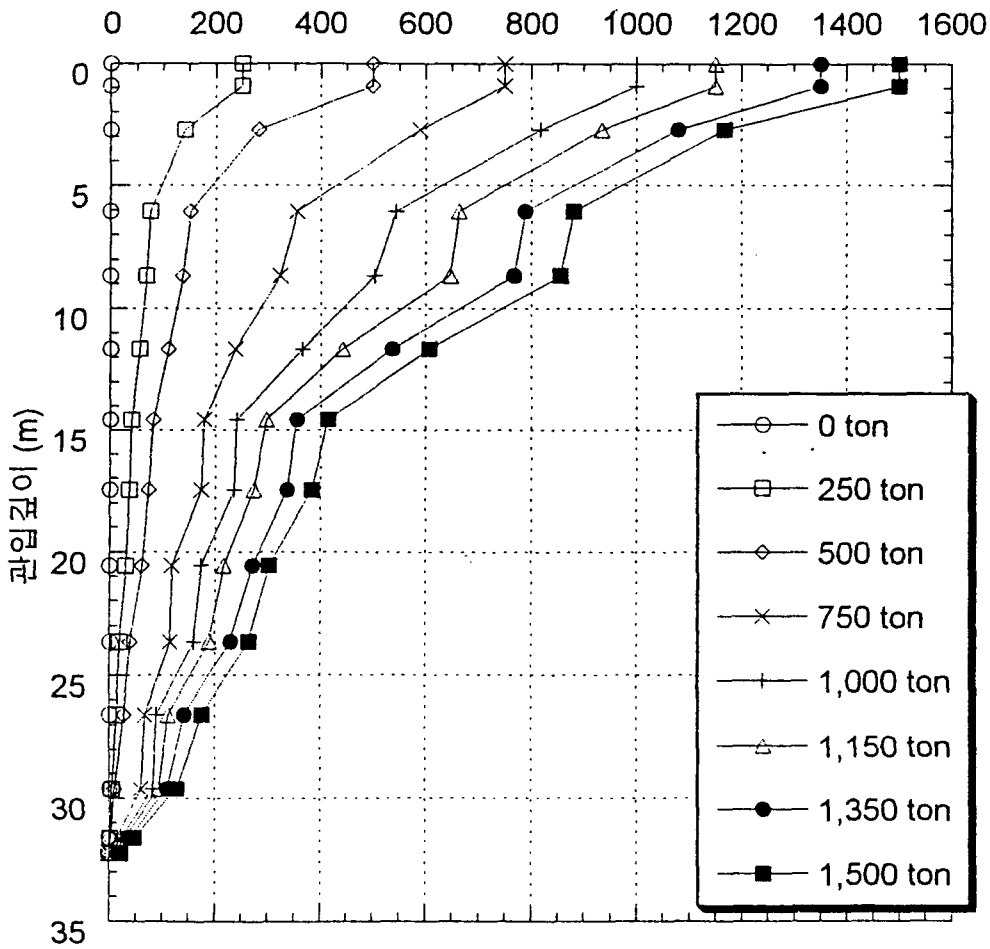


그림 3. 말뚝머리 하중 - 시간 관계



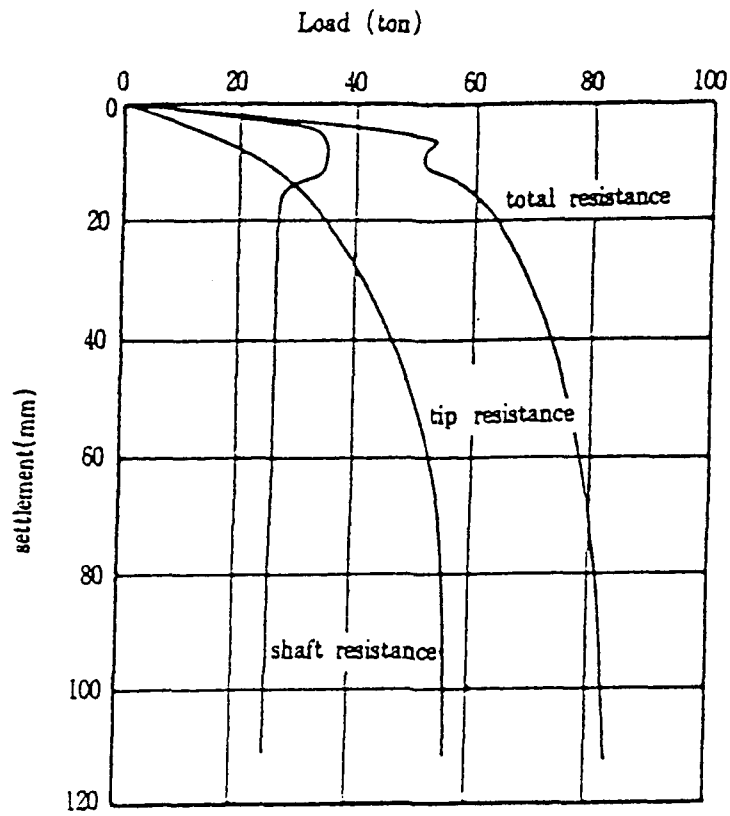


(a) 하중 - 침하량곡선 (b) 점 A의 하중전이 (b) 점 B의 하중전이 (c) 점 D의 하중전이  
하중 (ton)

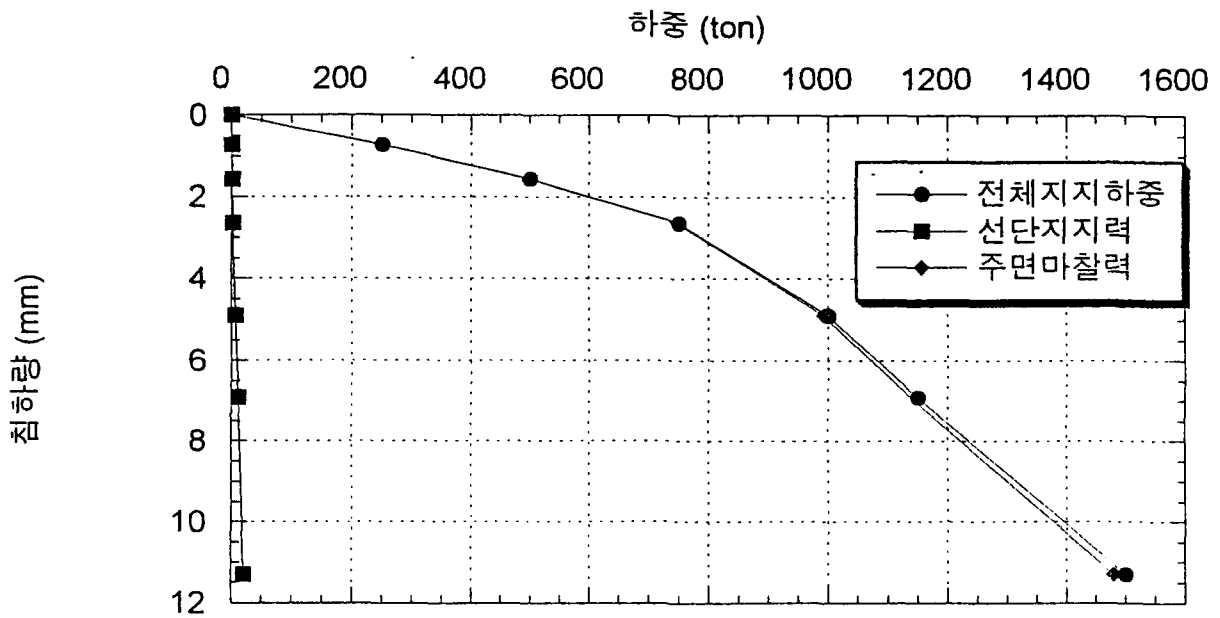


(e) 축하중전이의 측정 예

그림 5. 말뚝축하중전이의 개념 및 측정사례



(a) 선단지지력과 주변마찰력의 분리 개념

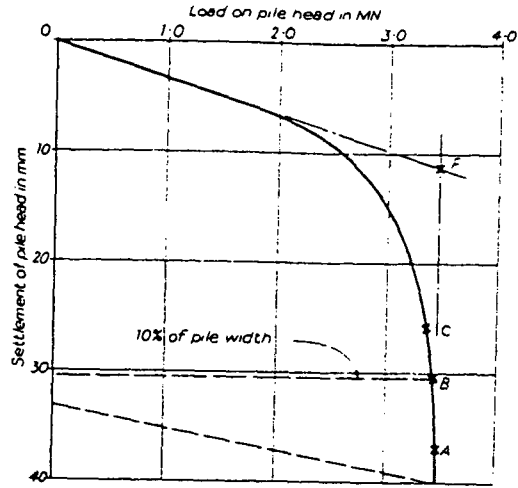


(b) 선단지지력과 주변마찰력의 분리 예

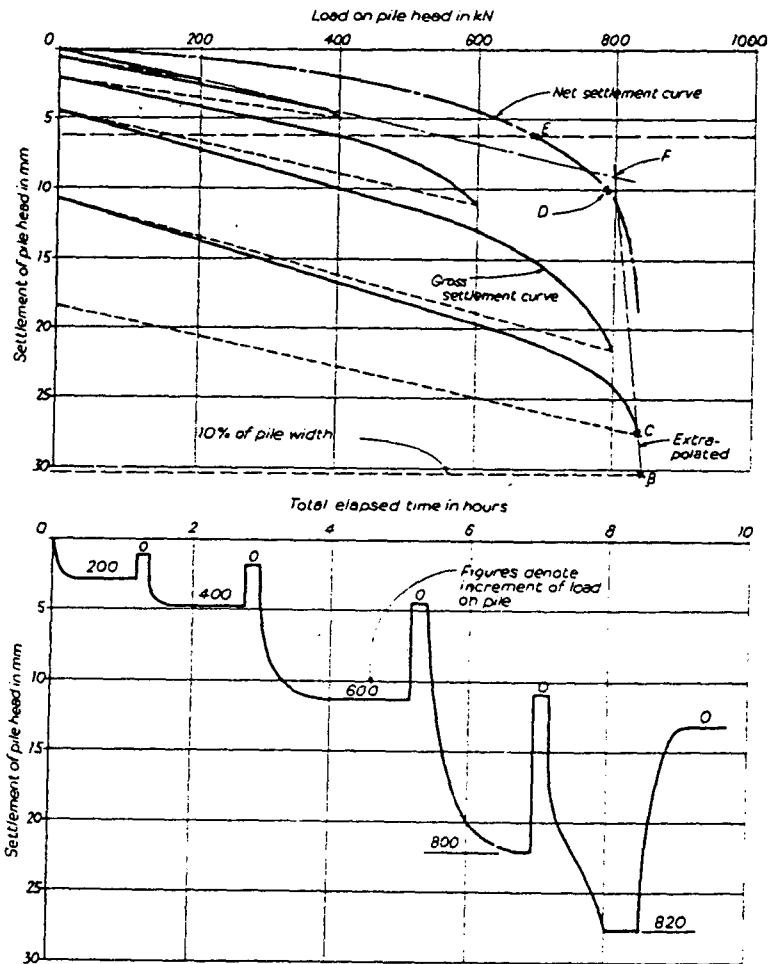
그림 6. 선단지지력과 주변마찰력의 분리

표 4. 전침하량 기준 (부산 광역시 건설본부, 1999)

기준명 또는 제안자	침하량기준 (mm)	허용지지력을 구할 때의 안전율	Pile 1 (MN)	pile 2 (MN)	비 고
독일 (DIN 4014) 기준	20				현장타설말뚝
프랑스	20		3.1	0.75	
벨기에	20		3.1	0.75	
체코슬로바키아	15~20	2.0	3~3.1	0.66	
오스트리아	25		3.2	0.81	
네덜란드	25.4		3.23	0.81	
뉴욕시 기준	25.4		3.23	0.81	
인도 IS:2911 기준	12	1.5	2.68	0.60	
Muns (1959)	20		3.13	0.75	
Terzaghi / Peck (1961)	50.8	2.0	3.4	0.83	
Terzaghi / Peck (1967)	25.4	1.5	3.23	0.80	
Woodward (1972)	12.7~25.4	1.5~2.0	2.73~3.23	0.61~0.81	
Touma / Reese (1974)	25.4	2.0	3.23	0.82	
키에프 건축공정 연구소	>30~40		3.0~3.4	0.83	
우크라이나 건축시공 과학연구소	80		3.4	0.83	부등침하에 민감하지 않은 구조물
	40		3.4	0.83	부등침하에 민감한 구조물
중국 협서성 도로연구소(1973)	60				대구경현장타설말뚝
중국 도로연구원(1974)	40				대구경현장타설말뚝
중국 북경시 말뚝기초 연구소(1976)	15~20	2.0			소구경현장타설말뚝
일본 건축학회 기준	25	2.0			현장타설말뚝
일본 토질공학회 (1993)	0.1D		3.3	0.83	제2한계하중
영국 기초공업기준 Tomlinson	0.1D		3.3	0.83	
Singapore 지하철기준	6~9				설계하중에서
	9~20				설계하중의 1.5배에서
일본 토질공학회	25		3.2	0.81	
러시아	40~80		3.4	0.83	
De Beer	0.1D		3.3	0.83	항타말뚝
	0.3D				현장타설말뚝



(a) 조밀한 자갈층에 시공된 말뚝 (CPR 시험)



(b) 굳은 점토층에 시공된 말뚝 (305mm × 305mm)

그림 7. 시험결과 해석을 위한 선정된 말뚝재하시험결과 사례 (Tomlinson, 1997)

표 5. 순침하량기준 (부산광역시건설본부, 1999)

기준명 또는 제안자	순침하량 (mm)	허용지지력을 구할 때의 안전율	Pile 1 (MN)	Pile 2 (MN)	비
독일 DIN 4026 기준	2.5% D			0.68	타입말뚝
미 국	2% D			0.66	
일본 건축기초구조 설계기준·동해설	2.5% D	3.0		0.68	타입말뚝
덴마크 기초실용기준 DS:415-1965	10% D			0.83	
미국 도로교 설계기준 (1958)	6.3mm			0.66	
미국 AASHTO 기준	6.3mm			0.66	
미국 루이지아나 도로국	6.3mm	2.0		0.66	
미국 보스톤 건축기준	12.7mm	2.0		0.81	
인도 IS:2911 기준	6mm	1.5		0.65	
캐나다 건축기준 (1960)	25mm			0.83	
파리 Veritas사무소 (1964)	20mm	2.0		0.83	
Magnel (1948)	8mm			0.70	
Mansur / Kaufman (1956)	6.3mm			0.66	
Woodward (1972)	12.7mm	1.5		0.81	
New york City, BOCA Uniform Building Code	0.01 in/ton			0.83	

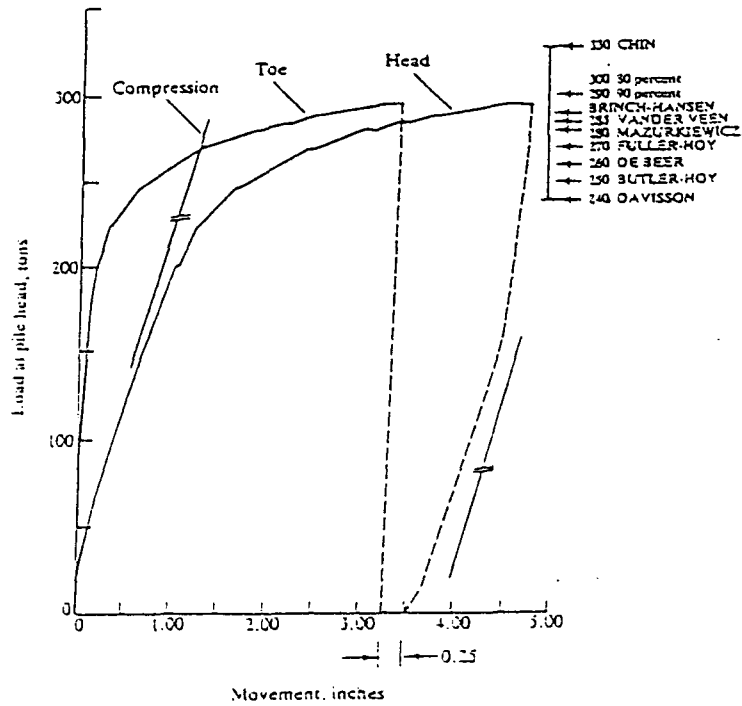


그림 8. 극한하중 판정법들간의 비교 사례 (Fellenius, 1980)



(1) 재하하중의 용량

ASTM에서는 재하하중의 크기를 예상되는 말뚝설계하중 (The anticipated pile design load)의 200 % 정도로 하여 항복하중까지는 확인할 것을 권장하고 있으나 항복하중보다는 극한하중까지 재하하는 것이 더욱 바람직할 것이다. 특히, 말뚝기초의 설계가 극히 안전측으로 이루어지고 있는 우리나라의 현실에서는 설계하중의 200 %까지 재하하더라도 항복하중의 확인마저도 이루어질 수 없는 경우가 많으므로 극한하중의 확인을 위하여 말뚝구조체가 파괴되지 않는 조건에서 설계하중의 400 - 500 %이상까지 재하하여야 할 것이다 (최용규, 1998b).

(2) 하중재하 단계의 조정

예상되는 설계하중의 200 %까지만 재하할 경우에는 재하하중 단계를 설계하중의 25 %로 하여야 하지만, 극한하중을 확인할 수 있도록 설계하중의 400 %만큼 재하한다면 하중 재하단계를 설계하중의 약 40 - 50 %정도로 조정하는 것이 편리할 것이다.

(3) 극한 하중 또는 항복하중 판정법의 다양성 및 불확실성

표 3 ~ 5에 수록된 말뚝의 극한하중 또는 항복하중 판정법들을 적용하여 분석한 사례들에서 볼 수 있듯이 각 방법들 간에는 최대 1.4배 정도의 차이를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서, 말뚝 재하시험 결과의 해석에 있어서도 많은 주의가 필요할 것이다.

(4) 말뚝재하시험의 빈도

구조물 기초 설계 기준 (1997년 개정)에서는 지반 조건에 큰 변화가 없는 경우 말뚝 250개당 1회 또는 각 구조물별로 1회의 시험을 하도록 추천하였으며, 지반 조건에 큰 변화가 있거나 시공법이 다른 말뚝을 사용할 경우에는 말뚝재하시험을 추가하도록 추천하였다. 이는 정재하시험에 대한 추천사항이며, 다른 말뚝재하시험법을 사용할 경우에는 시험회수를 추가하여야 할 것이다.

(5) 말뚝재하시험의 수행시기

말뚝 항타 직후에 점성토 지반에서는 주변지반이 교란되고 과잉 간극 수압이 크게 발생되어 강도가 저하된다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 저하된 강도가 회복되는 데, 최근의 연구에서는 사질토에서도 이와 같은 현상이 나타난다고 보고되고 있다. 즉, 교란된 지반이 원래의 강도를 회복하는 데는 보통 30일 정도 소요된다.

그러나, 조밀하고 포화된 가는 모래층, 실트층 또는 연암층에 타입된 말뚝의 강도는 시간이 경과함에 따라 감소되는 경우도 있는 데, 이것은 시간이 지남에 따라 말뚝관입에 의해 다져졌던 모래나 실트가 이완되거나 니암층과 말뚝의 접촉면에 물이 흘러 들어가 이완되기 때문이므로 충분한 시간이 경과한 후 시험을 수행하도록 하여야 한다.

(6) 목적에 따른 말뚝 재하시험 방법의 선정

말뚝 재하시험은 말뚝 설계에 반영하기 위해 설계단계에서 수행하거나 기시공된 말뚝의 허용 안전하중을 확인하기 위하여 시공도중에 수행할 수 있다. 따라서, 설계 목적의 말뚝재하시험에서는 하중전이의 측정이 수반되어야 하며 극한 하중을 확인할 수 있도록 하여야 한다. 가능하다면, 인발재하시험과 수평재하시험도 수행하도록 하여야 한다. 그러나, 기시공된 말뚝의 안정성 확인 목적의 말뚝재하시험에서는 설계하중의 지지여부만을 확인할 수 있는 시험을 수행하면 된다.

일반적으로 말뚝 재하 시험은 정재하 시험에 의하는 것이 가장 좋으며 비용 등의 문제로 인하여 정재하 시험 만을 수행하기가 곤란할 경우에는 정재하 시험의 횟수를 최소화시키고 PDA를 병용할 수도 있다. 그러나, 이 경우에도 PDA만으로 말뚝의 지지력을 추정하는 것은 아직까지 신뢰도에 있어 문제가 있으므로 반드시 정재하 시험의 결과와 비교하여 검증한 후에 PDA를 적용시켜야 한다 (한국 지반 공학회, 1997b). 즉, PDA만으로 말뚝의 지지력을 결정하는 것은 문제가 있다고 할 수 있다.

### (7) 지반조사자료의 활용

말뚝재하시험과 지반조사의 시행목적 및 활용도에 대한 이해 부족으로 인하여 활용이 불가능한 지반조사가 이루어지는 경우가 많으며, 따라서 지반 조사자료를 활용한 분석이 이루어지지 못하는 경우가 많다.

말뚝재하시험 결과의 분석에 활용할 수 있도록 지층구분을 위한 시추조사 뿐만 아니라 각 지층의 실내 역학시험과 현장시험 (CPT, PMT, SPT 등)이 수행되어야 할 것이다.

## 3.5 기타 압축 재하 시험법들

말뚝정재하시험 외에 새로운 개념의 말뚝재하시험 방법들이 개발되었다. 여기에는, 정·동적 재하시험 (Statnamic test), 동적 재하 시험 (pile driving analyzer), 간편 재하 시험 (Simple pile load test), 유사 정적 재하 시험 (Pseudo-static pile load test) 그리고 SIMBAT 시험 등이 있다.

이들 새로운 개념의 말뚝재하시험 방법들은 시험절차의 간편성, 선단지지력과 주면마찰력의 분리측정 등 각 시험법 고유의 장점들이 있어 말뚝재하시험 실시에 필요한 시간과 경비 측면에서 유리하며, 각 방법들 특유의 지지력 거동해석이 가능하기도 하다. 그러나 이들 새로운 개념의 말뚝재하시험 방법들은 기존의 정적재하시험과 하중재하방법, 재하시간, 재하하중방향, 재하단면적 등 상이한 부분이 있으므로, 반드시 해당현장에서 동일한 말뚝에 대한 정적재하 시험결과와 비교하는 검증과정을 거친 후 적용하도록 해야 한다 (한국 지반 공학회, 1997b).

비용과 시간 등에서 유리하여 국내현장에서 가장 흔하게 사용되고 있는 동적재하시험 (PDA)의 장점은 다음과 같다 (한국 지반 공학회, 1997b). 그러나, 실험 결과의 분석에 있어 숙련된 전문가가 아니면 실제 거동과는 다른 결과를 도출할 수도 있으므로 현장적용시 크게 유의하여야 할 것이다.

- ① 시험소요시간이 매우 짧다.
- ② 비용이 비교적 적게 든다.
- ③ 말뚝관입 도중의 어느 시점에서든 말뚝지지력을 알 수 있다.
- ④ 말뚝과 해머의 성능을 동시에 측정할 수 있으므로 합리적 시공관리를 할 수 있다.
- ⑤ 말뚝타격시에 발생하는 말뚝의 파괴와 위치를 알 수 있다.
- ⑥ 깊이별 저항력 분포를 알 수 있다.
- ⑦ 항타시와 일정시간이 경과한 후 실시하여 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화를 알 수 있다.

동재하시험 결과로부터 말뚝의 정적지지력을 유추하는 것은 아직까지 신뢰도에 있어 논란이 되고 있다. 따라서 말뚝의 지지력을 동적재하시험만으로 판단하는 것은 바람직하지 못하며 반드시 해당현장에서 동일한 말뚝에 대한 정적재하시험 결과와 비교하는 검증 과정을 거친 후에 적용하도록 한다. 이 경우 시간과 비용이 많이 소요되는 정적재하시험 회수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 더욱 많은 지지력 확인이 가능하여 품질관리에 도움이 될 수도 있다 (한국지반공학회, 1997b).

## 4. 인발재하시험

말뚝의 인발재하시험에서는 불확실성을 내포한 선단지지력이 나타나지 않으므로 비교적 명확한 실험 결과를 얻을 수 있으며 해석방법도 간단하다.

인발재하시험은 1개 또는 2개의 유압잭 (그림 9(a)와 (b))을 사용하여 수행하거나 반력말뚝방식 (그림 9(c))으로 수행할 수 있다.

인발재하시험 절차는 ASTM 3689-90을 참고할 수 있으며, 압축정재하시험의 완속재하시험방법과 반복재하시험법과 비슷하다.

## 5. 수평재하시험

말뚝의 수평재하시험은 그림 10에 나타난 것들을 참조하여 수행할 수 있으며 ASTM 3966-90에 따라 수행할 수 있다. 수평재하시험은 자유두부 (free head) 조건으로 시행하는 것이 통상적이지만 말뚝의 실제 수평거동은 말뚝의 강성, 말뚝 폭, 재하높이, 말뚝머리 고정조건, 지반조건 그리고 하중특성 등에 의해 영향을 받으므로 수평재하시험 조건 설정시 잘 고려하여야 한다 (한국지반공학회, 1997b).

수평재하시험 결과는 설정된 시험조건에 따라 크게 달라지므로 시험조건이 구조물의 실제조건과 동일하지 않다면 수평재하시험 결과를 그대로 적용하는 것은 극히 곤란하다. 따라서, 수평재하시험 결과의 해석은 매우 복잡하지만, 재하시험조건이 구조물의 실제 조건과 동일하다고 가정한다면 긴 말뚝에서는 말뚝머리의 허용변위량에 상응하는 하중에 대한 휨응력 검토를 수행하고 짧은 말뚝에서는 휨응력 검토 이외에도 말뚝의 전도에 대한 검토를 추가로 수행해야 한다.

수평재하시험결과에서 허용수평지지력을 직접 구하는 것은 극히 곤란하므로, 수평재하시험에서 작용된 수평하중의 각 단계에서 경사계를 사용하여 말뚝의 지중수평변위를 측정할 수 있다면 수평지반반력에 관계된 계수들을 구하여 해석적인 방법에 의해 실제 구조물의 거동을 추정할 수도 있다.

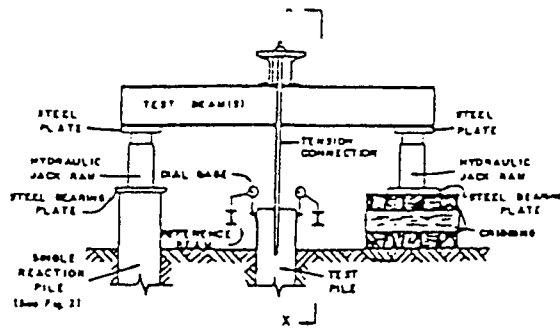
## 6. 축하중전이 측정실험과 말뚝기초 건설예산 절감사례

### 6.1 하중전이해석

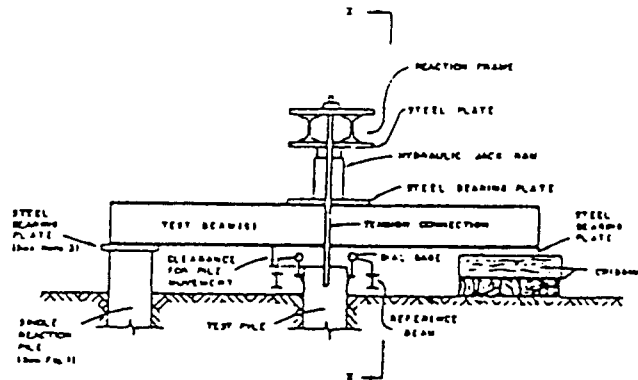
말뚝과 주변 흙 사이에 발생하는 마찰력은 응력 - 변위 - 시간의 특성, 말뚝 - 흙 시스템내에 있는 모든 요소의 파괴 특성 그리고 말뚝의 설치 방법 등에 의해 영향을 받는다 (Vesic, 1977). 하중 전이 해석 방법으로는 다음의 4가지 방법을 들 수 있으며, 여기에서는 실험적인 방법 (최용규, 1989)에 관해서만 설명하였다.

- 1) 실험적인 방법
- 2) 하중 전이 함수를 이용한 방법
- 3) 탄성·고체 방법
- 4) 유한 요소 해석 방법

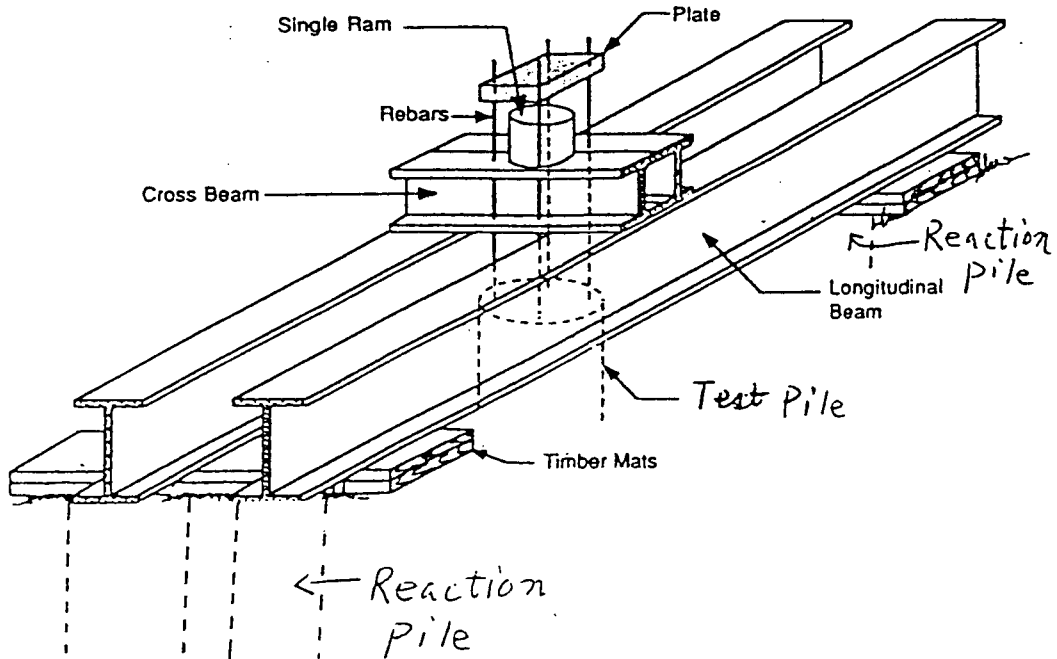
가장 확실한 하중 전이 해석 방법은 실험적인 방법인 데, 그림 11(a)에서와 같이 강관말뚝과 현장 타설 말뚝에 축하중 계측장치를 부착 또는 매설하여 그림 11(b)에 보인 것과 같은 축하중의 분포를 각 재하단계별로 직접 측정하는 것이다. 직경  $D$ 이고, 관입 깊이가  $L$ 이며, 중심부에 수직 하중  $Q$ 가 재하된 말뚝을 그림 12(a)에 나타내었다. 그림 12(b)의 함수  $Q(z)$ 는 말뚝 축을 따라 전달된 하중을 나타내므로, 말뚝 선단 ( $z = L$ )에서,  $Q_b$ 는 말뚝 선단까지 전달된 축하중을 나타내고,  $Q_s (= Q_0 - Q_b)$ 는 말뚝 주변 마찰력의 합을 나타낸다. 여기서,  $Q_0$ 는 말뚝두부에 작용된 하중을 의미한다. 그리고, 말뚝의 주변장  $P$ 로 나눈 축하중 곡선의  $z$ 방향에 대한 기울기는 말뚝 몸체부를 따라 생기는 단위 주변 마찰 응력 ( $f_0$ )이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 2개의 유압 jack사용방법

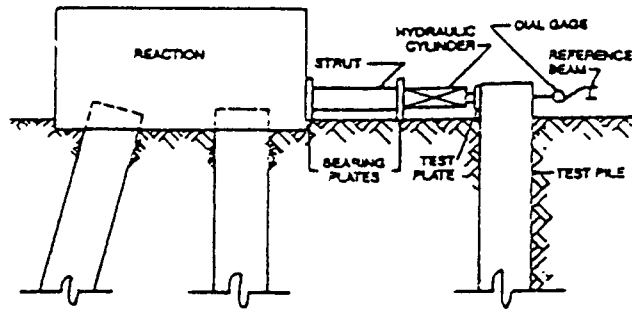


(b) 1개의 유압 jack사용방법

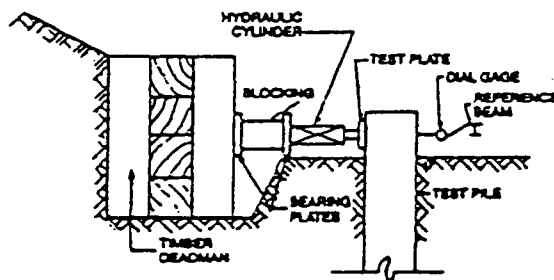


(c) 반력말뚝방식

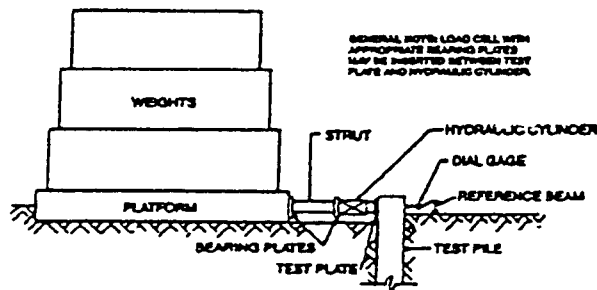
그림 9. 연직 인발 재하시험



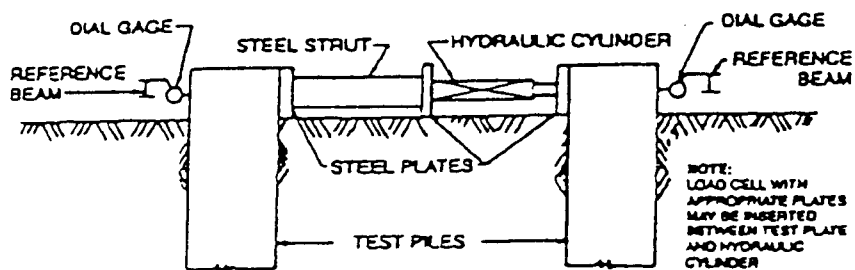
(a) REACTION PILES



(b) DEADMAN



(c) WEIGHTED PLATFORM



(d) Reaction pile method

그림 10. 수평재하시험

$$f_o(z) = -\frac{1}{P} \cdot \frac{dQ(z)}{dz} \quad (1)$$

Q(z)가 깊이 z에 따라 감소하면, 주면 마찰 응력 f<sub>o</sub>는 그림 12(c)에 나타낸 것처럼 양의 값을 갖는다. 만약, 단면적 (A)과 말뚝 변형계수 (E<sub>p</sub>)를 알고, 말뚝 머리의 수직 변위, ω<sub>o</sub>를 알면, 실험에서 측정된 말뚝 축하중 분포 곡선 Q(z)를 이용하여 깊이 z에서의 말뚝 수직 변위 ω(z)를 다음 식으로부터 산출할 수 있다.

$$\omega(z) = \omega_o - \frac{1}{A \cdot E_p} \int_0^z Q(z) dz \quad (2)$$

따라서, 하중전이해석은 말뚝의 연직 지지력 뿐만 아니라 말뚝의 침하량도 산정하는데 활용할 수 있으므로 그 중요성은 매우 크다고 할 수 있을 것이다.

## 6.2 하중전이 측정 사례

말뚝의 깊이에 따른 축하중의 전이양상을 측정하기 위하여 필요한 위치에 축하중 계측 센서를 설치해야 한다. 일반적으로 사용하고 있는 축하중 계측용 센서는 접착형 전기저항식 박편 스트레인게이지 (Bonded foil resistance strain gage)나 진동현 (또는 띠) 식 (Vibrating wire or strip type) 스트레인 게이지로 구성되어 있다. 전기저항식 센서의 경우 4개의 활성 (Active) 스트레인 게이지로 구성된 완전 결선 (Full bridge) 방식을 사용하는 데, 이는 온도에 대한 영향을 배제시켜 준다.

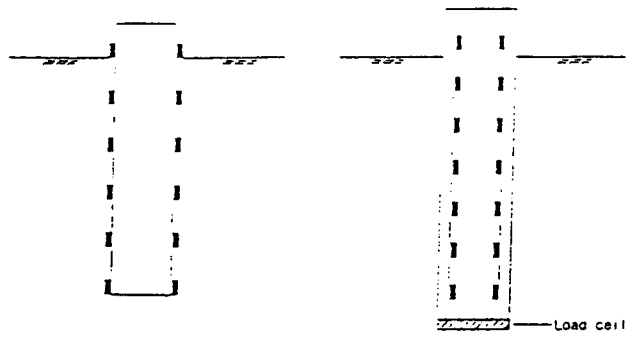
말뚝의 종류에 따라 설치되는 센서의 종류 및 설치 유형이 달라질 수 있다. 강관말뚝의 경우에는 강관응력계만 사용하고, 현장타설 콘크리트 말뚝의 경우에는 콘크리트 응력계와 철근 응력계를 사용하여야 하며, 암반 소켓강관말뚝의 경우에는, 소켓부에 콘크리트 응력계와 철근응력계를, 그리고 강관부와 콘크리트 속채움부에 강관응력계와 콘크리트 응력계를 각각 사용하여야 한다. 또한, 현장타설말뚝과 소켓말뚝의 선단에는 선단 로드셀을 사용할 수도 있으나 매우 고가이어서 특수한 목적으로만 사용할 수 있을 것이다. 센서의 설치간격은 특별하게 규정되어 있는 것은 없으나 하중전이 양상을 잘 반영할 수 있도록 각 지층의 두께와 지층의 구성상태 등을 감안하여 정해야 한다.

그림 13에는 ○○○○건설현장에서 실제로 시공된 현장타설말뚝에 대한 계측센서 설치 상세도이다. 이 말뚝은 풍화암에 시공되어 있는데, 연암층에 관입하도록 되어있는 원 설계개념의 변경에 따른 기시공된 말뚝들의 안정성을 확인하기 위하여 말뚝재하시험을 수행하도록 하였다. 또한, 말뚝기초의 안정성 확인 이외에도 장기계측을 수행하여 안전시공관리와 사용 중 유지·관리에도 활용할 계획이다.

## 6.3 하중전이 측정결과를 활용한 말뚝 기초 건설예산 절감 사례

말뚝기초에 대한 하중전이 측정결과는 다음과 같은 목적으로 활용할 수 있다.

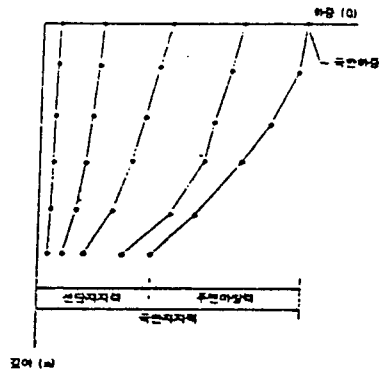
- ① 말뚝기초의 최적화 설계수행을 통한 건설예산 절감
- ② 말뚝기초의 하중지지 거동 분석
- ③ 침하량 해석 또는 계산
- ④ 안전시공관리
- ⑤ 사용중 유지·관리



강관말뚝

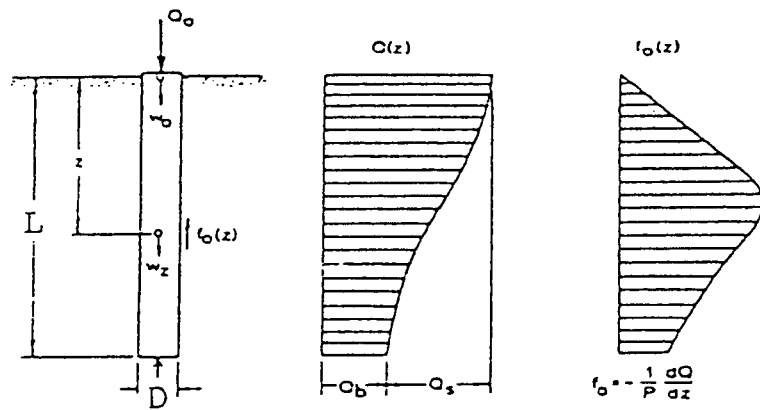
현장타설말뚝

(a) 축하중 계측장치 설치도



(b) 깊이에 따른 축하중 분포도

그림 11. 축하중전이 해석의 개념도



$$W_z = W_0 - \frac{1}{AE_p} \int_0^z Q(z) dz \quad Q(z) = AE_p dw/dz \quad Q_s = P \int_0^L f_0(z) dz$$

(a) 말뚝개요

(b) 축하중의 분포도

(c) 마찰응력의 분포도

그림 12. 단일말뚝의 하중전이

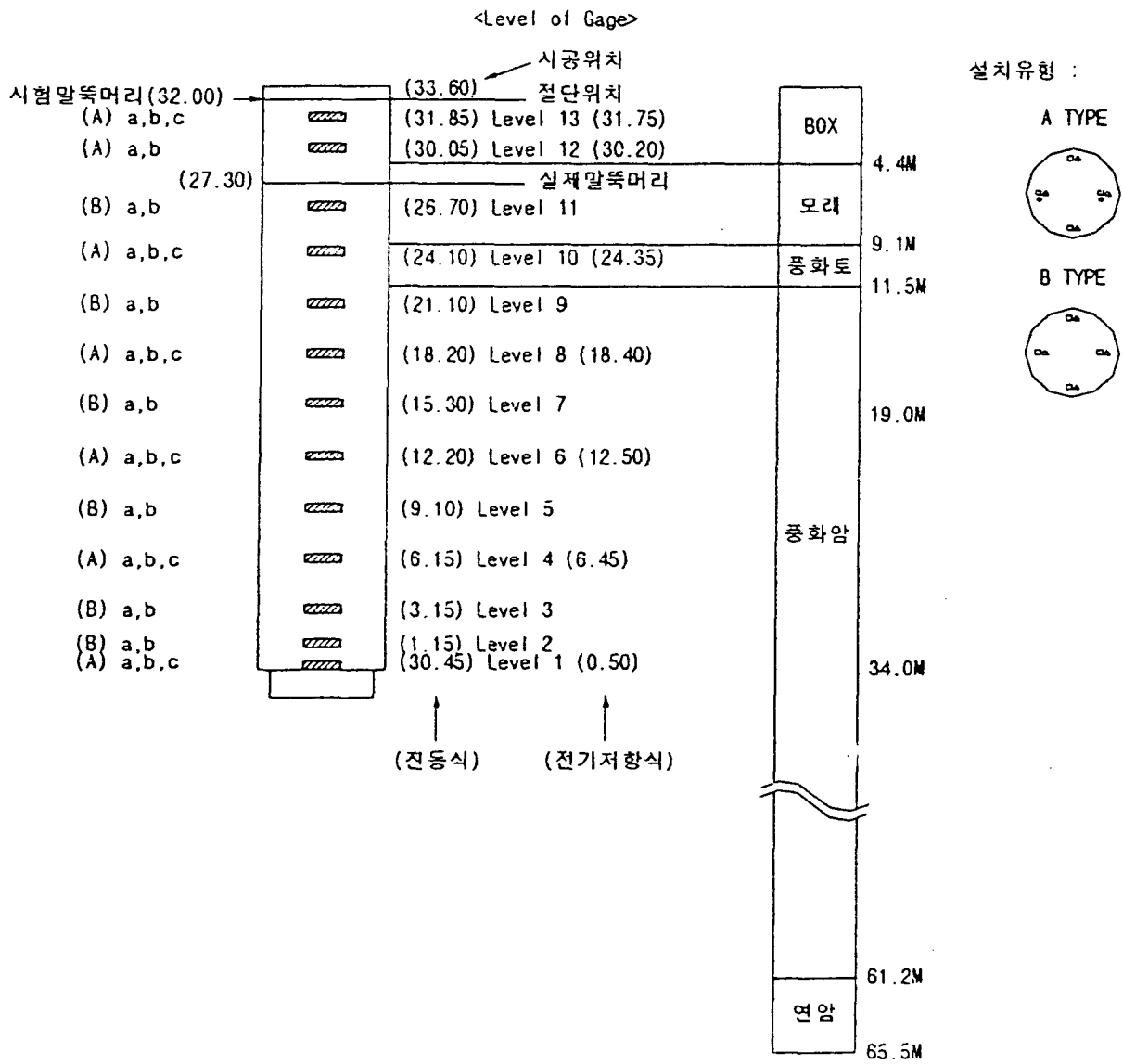


그림 13. 현장타설말뚝에 대한 센서설치 사례



말뚝에 대한 하중전이 측정결과를 말뚝기초의 최적설계에 활용하기 위하여 우선 극한하중 상태에서의 주변 마찰지지력과 선단지지력을 분리하여야 하며 이를 통하여 각 지층에서 발휘되는 단위 주변 마찰지지력과 단위 선단지지력을 확인할 수 있다. 지반의 역학적 특성치를 분석하여 각 지층에서의 설계인자 또는 적용가능한 상관관계를 도출하여 말뚝기초의 최적설계를 수행할 수 있을 것이다.

그림 14에는 ○○대교 실시설계단계에서 수행된 말뚝재하시험에서 측정된 하중전이 분포양상을 나타내었다. 여기서, 직경 508 mm의 강관말뚝 (t = 12 mm)을 시험말뚝으로 시공하였다. 시험말뚝에 대한 말뚝재하시험 결과와 하중전이 측정결과를 활용하여 2개의 교각기초의 건설공사비를 절감시킨 사례였다 (정성기 등, 1998). 예비설계단계에서는 연암까지 관입시키는 직경 1,500 mm의 현장타설말뚝 (L = 66 m)으로 설계되었는데, 지하 66 m까지 천공하여 현장타설말뚝을 시공할 경우 발생할 수도 있는 품질관리 및 시공상의 문제점과 고가의 건설공사비로 인하여 시험말뚝에 대한 재하시험 결과를 토대로 예비설계를 수정하였다. 2개 교각기초를 현장타설말뚝으로 시공할 경우 추정공사비는 약 46.7억원이었으며, 항타강관말뚝으로 시공할 경우 추정공사비는 약 10.5억원이었다. 따라서, 약 36.2억원의 건설예산을 절감할 수 있었으며 최소 360 %의 공사비 절감효과를 얻을 수 있었다 (정성기 등, 1998).

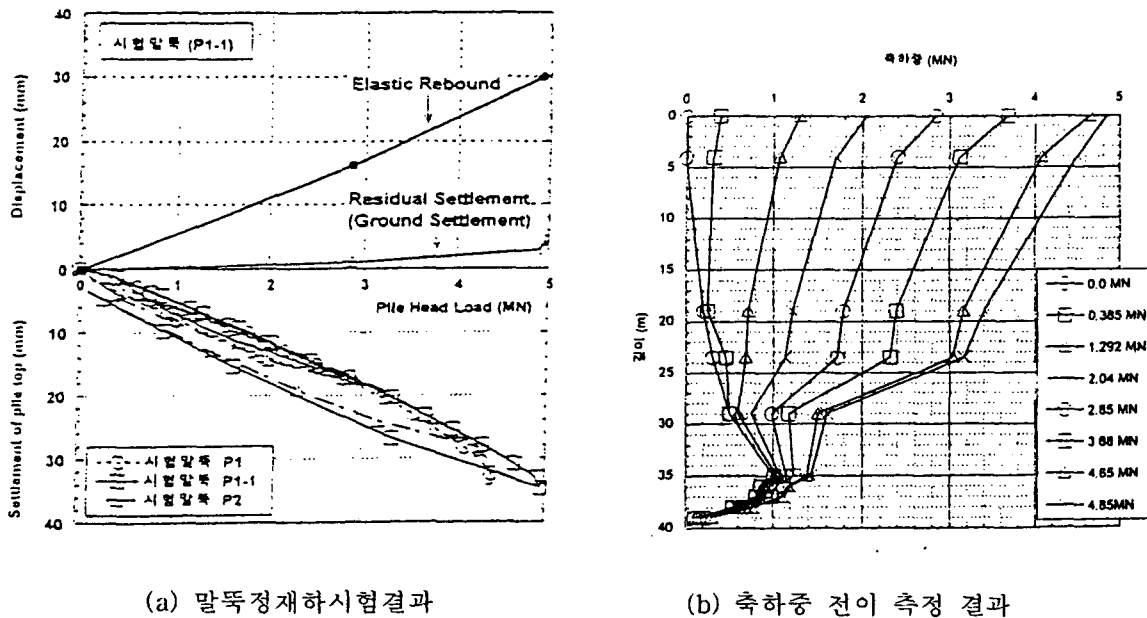


그림 14. 실시설계단계에서 수행된 ○○대교 시험말뚝에 대한 결과

## 7. 요약 및 제언

- 1) 말뚝재하시험을 통한 지지력 예측 방법이 신뢰도가 가장 높으며, 그 외 방법은 신뢰도가 극히 낮은 실정이다.
- 2) 수행목적에 따라 말뚝재하시험은 통상적인 말뚝재하시험과 설계 목적의 말뚝재하시험으로 구분할 수 있다. 설계목적의 말뚝재하시험은 설계단계에서 시험말뚝을 시공하여 경제성있는 설계를 수행하기 위해 실시하며, 반드시 하중전이 양상을 측정할 수 있어야 한다.
- 3) 말뚝재하시험 결과의 해석에서는 말뚝의 극한 하중 또는 항복하중의 판정뿐만 아니라 축하중전이 특성도 포함하여야 한다. 극한하중 또는 항복하중의 판정방법으로는 하중 기준, 전 침하량 기준

그리고 순 침하량 기준을 사용할 수 있으며, 그 방법들사이에는 선단지지력의 불확실성으로 인하여 큰 오차를 내포할 수도 있으나, 제한된 사례를 통한 분석결과 최대값과 최소값의 비는 대체로 1.25였다.

- 4) 말뚝재하시험수행시에는 재하하중의 용량, 재하하중단계의 조정, 극한 또는 항복하중 판정법의 다양성 및 불확실성, 말뚝재하시험의 빈도, 말뚝재하시험의 수행시기, 목적에 따른 재하시험방법의 선정 그리고 지반조사자료의 활용 등에 대하여 고려하여야 한다.
- 5) 새로운 개념의 말뚝재하시험방법들은 시험절차의 간편성 등과 같은 장점이 있어 시간과 경비측면에서 유리하지만, 반드시 해당 현장에서 동일한 말뚝에 대한 정재하시험 결과와 비교하는 검증과정을 거친 후 사용하도록 해야 한다.
- 6) 축하중전이 측정실험결과는 말뚝기초의 최적화 설계를 통한 건설예산 절감, 말뚝기초의 하중지지거동 분석, 침하량 해석 및 계산, 안전시공관리 그리고 사용 중 유지·관리 등에 활용할 수 있다.
- 7) 말뚝의 품질검사에는 건전도 시험뿐만 아니라 말뚝재하시험도 포함시켜 말뚝의 지지력과 침하량 확인을 통한 말뚝기초의 안정성 판정을 할 수 있도록 하여야 할 것이며, 이를 위하여 건설기술관련 제 규정이나 법규들을 개선해야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 김준석 역 (1998), "말뚝기초의 설계법과 해설," 일본토질공학회 저, 도서출판 과학기술
2. 부산광역시 건설본부 (1999), "광안대로 건설공사 말뚝정재하시험 수행 계획서"
3. 정성기, 최용규, 정성교 (1998), "설계목적의 말뚝재하시험을 이용한 말뚝기초 건설비용 절감에 관한 연구," 대한토목학회 논문집, 제 18권 제 III-3호, 1998. 5, pp. 341 - 352.
4. 최용규 (1989), "개단강관말뚝의 폐색효과에 관한 모형실험연구," 서울대학교 대학원 박사학위 논문
5. 최용규, 정성기, 권오균 (1998a), "개단강관말뚝의 하중전이실험에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제 18권 제 III-2호, 1998. 3, pp. 241 - 250.
6. 최용규 (1998b), "알기 쉬운 말뚝기초공학," 부산광역시 공무원 교육교재, 부산광역시 건설안전관리본부
7. 최용규 (1999), "국내 말뚝기초 설계관행의 개선을 위한 제언 - 말뚝기초의 지지력 관점에서-, " 대한토목학회 논문집, 제 19권 제 III-3호, 1999. 5, pp. 467 - 477.
8. 한국지반공학회 (1997a), "깊은기초," 지반공학회시리즈 4, 도서출판 구미서관
9. 한국지반공학회 (1997b), "구조물 기초 설계기준"
10. ASTM D1143-81 : Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load
11. ASTM D3689-90 : Standard Test Method for Individual Piles Under Static Axial Tensile Load
12. ASTM D3966-90 : Standard Test Method for Piles Under Lateral Load
13. Brinch Hansen, J. (1963), "Discussion : hyperbolic stress - strain response for cohesive soils," J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 89 (SM4), pp. 241 - 242
14. Chin, F. K. (1970), "Estimation of the Ultimate Load of Piles not carried to failure," in proc, 2nd S. E. Asia Conf. on Soil Engineering, pp. 81 - 90
15. Choi, Y., Park, C. H., Kim, M. H., Kim, S. J., Kim, B. H., Lee, K. O., Chung, S. G. (1999), "Case study on the Construction of Large Diameter Pile Foundations in Kwangan Grande Bridge Construction Project," Special Publication in the 11th ARC, Seoul, Korea, Aug. 16 - 20, 1999.
16. Davisson, M. T. (1970), "High Capacity Piles," Dept of Civil Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois
17. Fellenius, B. H. (1980), "The Analysis of Results from Routine Pile Loading Tests," Ground Engineering, London, 13, No. 6, pp. 19 - 31
18. Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F. and Elson, W. K. (1994), "Piling Engineering," 2nd ed., Blackie Academic & Professional, Glasgow and London.
19. Prakash, S. and Sharma, H. D. (1990), "Pile Foundations in Engineering Practice," John Wiley & Sons, Inc., 1990, p 734
20. Tomlison, M. J. (1997), "Pile Design and Construction Practice," E & FN SPON, London
21. Vesic, A. S. (1977), "Design of Pile Foundation," NCHRP Synthesis 42, TRB