대구경 말뚝의 정재하시험 및 축하중 전이 측정시험

1. 서론

2. 말뚝기초의 설계 단계

3. 대구경 말뚝의 검증

4. 대구경 말뚝의 재하시험

5. 하중전이 해석

6. 대구경 말뚝의 하중전이 측정실험

7. 대구경 말뚝의 재하시험 및 하중전이 측정사례

8. 결언

최용규
Yongkyu Choi
경성대학교 건설환경공학부 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering,
Kyungsung Univ.

정창규
Changkyu Chung
부산광역시 건설본부 교량1과장

대구경 말뚝의 정재하시험 및 축하중 전이 측정시험

최용규[1], Yongkyu Choi, 정창규[2], Changkyu Chung

[1] 경성대학교 건설환경공학부 토목공학과 교수
[2] 부산광역시 건설본부 교량1과장

1. 서론

국내의 경우 광안대로 건설공사현장에서 대구경말뚝에 대한 하중전이측정을 수반한 정재하시험이 대구경말뚝(Ø=1000mm)에 대하여 처음으로 이루어진 이후 대구경말뚝에 대한 하중전이 측정과 말뚝정재하시험은 점진적으로 증가하고 있다.

본 논문에서는 말뚝기초의 설계절차, 검증시험에 대하여 알아보고 대구경말뚝에 대한 재하시험과 하중전이측정실험에 관하여 설명하였다. 마지막으로 국내에서 이루어진 하중전이측정사례와 결과를 설명하였다.

2. 말뚝기초 설계 단계

2.1 설계 단계 정립

도로교설계기준(2000) 및 해설집(하부구조편)(2001)에서는 말뚝기초의 설계단계를 그림 1에 나타낸 것과 같이 3단계로 설정하였다.

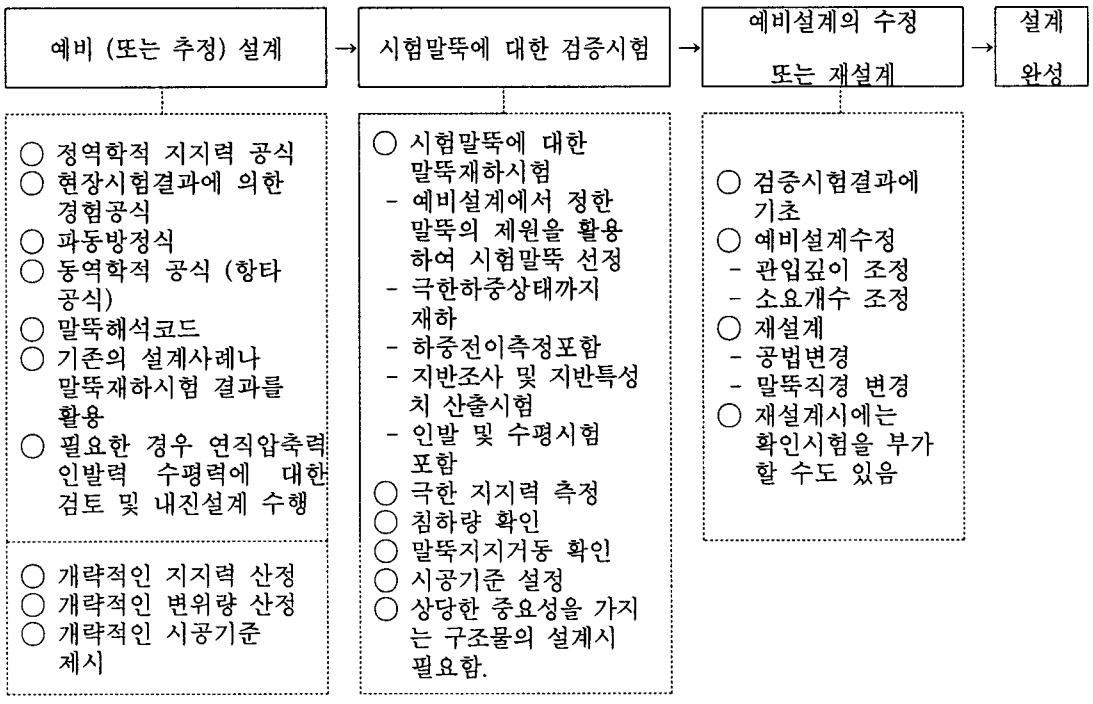


그림 1. 말뚝기초 설계단계의 정립

3단계로 설정된 말뚝기초의 설계단계를 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

1) 1단계 : 예비설계단계

주어진 지반조건을 고려하고 말뚝의 제원을 가정하여 여러 가지 지지력 계산방법들에 의하여 극한압축 또는 인발지지력을 예측한 후 소정의 안전율을 적용하여 허용압축 또는 인발지지력을 추정할 수 있다. 이 허용지지력이 말뚝 머리에 작용된 축방향 설계압축력 또는 설계인발력보다 크다고 판단되면 가정된 제원을 가지는 말뚝을 시험말뚝으로 선정한다. 또한 수평하중을 받는 경우와 내진설계를 수행 해야 하는 경우에도 개략적인 검토를 수행하여 시험말뚝을 선정하는데 고려하여야 한다.

이 때, 내진 설계가 필요한 경우에는 등가정적하중법에 의하여 내진검토가 이루어진 말뚝을 시험말뚝으로 선정하여야 한다.

2) 2단계 : 검증시험 (Proof test) 단계

예비설계 단계에서 선정된 제원의 말뚝을 시험말뚝으로 시공하고 예비설계를 검증하기 위한 말뚝 정재하시험을 수행한다. 이 때, 시험말뚝에는 말뚝축하중 계측용 센서를 설치하여 축하중전이측정시험을 실시하여야 한다. 이와 같은 시험말뚝에 대한 검증시험을 통한 설계절차는 이미 여러나라의 설계기준들에도 반영되어 있다. 검증시험에 대하여 규정하고 있는 설계기준에 대하여 2.3절에 요약하였다.

시공된 시험말뚝에 대한 말뚝정재하시험을 통하여 말뚝기초의 극한지지력을 결정하고 축하중전이의 측정을 통하여 말뚝기초의 하중지지 거동을 확인하여야 한다. 또한, 설계하중단계에서의 말뚝머리의 변위 (침하량, 인발량 그리고 수평변위)를 측정하여야 한다. 이와 같은 검증시험은 압축하중이 작용하는 경우 뿐만 아니라 인발하중이 크게 작용하는 경우와 수평하중이 크게 작용하는 경우 그리고 내진설계를 수행해야 하는 경우에도 실시해야 한다.

시험말뚝의 시공을 통하여 말뚝기초의 지지력 뿐만 아니라 말뚝기초의 공사시방도 결정할 수 있다. 예를 들면, 항타말뚝의 경우에는 항타 관입성 검토 및 항타 장비의 선정, 현장타설말뚝의 경우에는 시공시방과 현장타설 콘크리트의 품질관리 기준, 그리고 내부 속파기 강관말뚝기초의 경우에는 최종항타기준 또는 그라우팅 시공기준 등을 설정할 수 있다.

시험말뚝에 대한 검증시험을 실시설계 단계에서 수행하기 극히 곤란한 경우에는 시공초기에 실제 시공된 말뚝에 대한 말뚝정재하시험을 수행하여야 하며, 이 때에도 설계단계에서 시험말뚝에 대해 수행하는 검증시험과 동일한 방법으로 시행하여야 한다.

3) 3단계 : 예비설계의 수정 또는 재설계단계

검증 시험 결과를 토대로 예비설계 단계에서 선정된 말뚝기초의 적정성을 평가하는 단계이다. 즉, 말뚝기초의 제원 (즉, 관입깊이, 소요갯수, 말뚝의 직경 등)이나 공법 등을 검토하여 예비설계를 수정하거나 필요한 경우에는 재설계를 수행하여야 한다.

예비설계단계에서 선정된 말뚝기초의 관입깊이와 소요개수만 조정하여 만족될 수 있는 경우에는 예비설계의 수정으로 설계를 완성할 수 있다. 그러나, 말뚝기초의 단면 크기를 변화시키거나 공법까지도 변경시켜야 하는 경우에는 재설계를 수행해야 할 수도 있다. 이 경우에는 재설계를 수행하여 설계된 말뚝을 시험말뚝으로 하여 검증시험을 추가로 실시할 수 있다.

2.2 지지력 결정방법

도로교설계기준(2000)에서는 말뚝기초의 지지력결정방법을 다음과 같이 규정하였다.

2.2.1 검증시험결과를 통한 지지력 결정

지반조건을 고려한 말뚝의 극한연직압축지지력은 예비적인 설계에서 선정된 시험 말뚝에 대한 검증시험 결과를 토대로 결정하는 것이 가장 좋다. 즉, 설계단계에서 대표적인 현장조건에 시공된 실물크기나 축소된 시험말뚝에 대한 말뚝정재하시험을 실시하여 구한 극한지지력이어야 한다. 이 때, 시험말뚝에 축하중 계측용 센서를 설치하면 말뚝의 축하중 지지거동을 확인할 수 있으며, 이를 토대로 말뚝의 하중지지특성을 고려하여 외주면 마찰력과 선단지지력을 각각 분리할 수 있다. 극한하중상태에서 확인된 마찰력과 선단력을 이용하여 각 지층에서 발휘될 수 있는 마찰지지응력과 선단지지응력을 구할 수 있으며, 지층이 다소 변화하는 경우에는 측정된 지지 응력값을 이용하여 각 말뚝 시공위치에서 극한상태의 마찰력과 선단지지력을 구하고 이들을 합하여 말뚝의 극한지지력으로 할 수 있다.

2.2.2 지지력 산정공식에 의한 추정

정역학적 지지력 산정공식이 말뚝재하시험에 준하는 정밀도를 가질 경우 (예를 들면, 지반조건이 비슷한 경우에 실시된 설계목적의 말뚝재하시험 자료가 축적된 경우 등)에는 정역학적 지지력 산정공식에 의하여 추정된 극한지지력을 사용할 수 있다. 그러나, 이 경우에도 지지력 산정공식에 사용하는 지반 특성치들은 실내 또는 현장 시험에 의하여 정확하게 산출할 수 있도록 해야 한다.

그러나, 설계단계에서 재하시험의 수행이 극히 곤란하여 지지력 산정공식에 의해 추정된 극한지지력을 사용할 경우에는 시공초기단계에서 말뚝정재하시험을 수행하여 극한지지력을 확인하고 말뚝의 하중지지거동도 파악하여야 한다.

지지력 산정공식에 의하여 극한지지력을 계산할 경우에는 다음의 관계를 사용할 수 있다.

$$R_u = R_s + R_B \qquad (2.1.a)$$

$$= \sum_{i=1}^{n} A_{si} \cdot f_{si} + A_B \cdot q_B \qquad (2.1.b)$$

여기서, R_u : 말뚝의 극한 지지력 (*tonf*)

R_s : 극한 상태의 주면 마찰력 (*tonf*)

R_B : 극한상태의 선단 지지력 (*tonf*)

A_s : 말뚝의 외주면적 (m')

A_B : 말뚝선단의 단면적 (m')

f_s : 극한상태의 외주면 마찰지지응력 ($tonf/m^2$)

q_B : 극한상태의 선단 지지응력 ($tonf/m^2$)

지지력 계산공식에 의해 지지력을 산정할 경우 입력치로 사용되는 지반의 특성치들은 반드시 비교란 시료에 대한 역학적 실내 실험 및 원위치시험(CPT, PMT, DMT, SPT 등)을 실시하여 직접 구하여야 하며, 시험에 의해 지반의 특성치들을 직접 구할 수 없는 경우에는 유사한 조건의 현장사례나 참고 문헌 등에서 추정하여 사용할 수 있다. 그러나 상기의 시험들 중 SPT의 N치는 반드시 타격에너지비에 의한 보정을 해야 하며, 흙의 상태, 연결봉 (Rod)의 길이, 상재압 등에 의한 수정도 이루어져야 한다.

극한 지지력 산정방법으로는 AASHTO 방법과 일본도로교 방법을 사용할 수 있는데, 각 방법을 표 1

에 요약하였다. 여기서, 국내에서 시공되는 대부분의 말뚝들은 연암층이나 풍화암층에 관입 또는 지지되어 있으므로 AASHTO 방법을 우선적으로 사용할 것을 추천한다. 그러나, 극히 곤란한 사정으로 인하여 실내 및 현장 실험이 이루어지지 않은 경우에는 일본도로교시방서의 규정을 사용할 수 있다. 그러나, 이 때에도 보정 및 수정된 N치, 비배수 점착력 c_u, 일축압축강도 q_u 등은 정확하게 산출해야 한다.

2.3 검증시험과 관련된 설계기준 비교

여러 가지 시방서들에서 규정하고 있는 말뚝기초의 설계기준들은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) AASHTO(미국연방도로국)설계기준(1996)

1) 항타관입말뚝

- 시험말뚝은 말뚝의 설치특성을 결정하고 깊이에 따른 지지력을 평가하고 말뚝의 주문길이를 정하기 위하여 각 세부구조물 당 1개씩 선정되어야 한다.
- 지반조건을 파악한 후 시험말뚝들은 정재하, 동적시험, 항타관입성 연구 수행 또는 그들의 조합에 의해 시험 되어질 수 있다.
- 지반조건이 동일하지 않다면 필요한 시험 말뚝의 개수가 증가 되어질 수 있다. 필요하다면 현장타설말뚝의 하중에 대한 거동을 확인하기 위하여 실물크기재하시험이 수행되어야 한다.

2) 현장타설말뚝

- 말뚝재하시험은 현장에 시공될 말뚝에 대해 실시되어야 한다. 특수한 부지조건이나 하중조합이 나타날 때마다 또는 특수하게 설계되었거나 민감도를 가진 구조물이 현장타설말뚝위에 지지될 경우에는 재하시험은 실시되어야 한다.

(2) NAVFAC(미국해군성)의 설계기준(1982)

- 지반의 지지력은 말뚝재하시험으로 결정하거나 흙의 전단강도 또는 관입저항치로부터 추정할 수 있다.
- 선정된 위치에 시험말뚝을 시공초기에 설치하여 말뚝재하시험을 수행하고 그 결과를 분석하여 지지력을 결정한다.
- 말뚝재하시험은 깊은 기초의 재하능력을 평가하는 가장 신뢰할 수 있는 수단이다.

(3) 일본 도로교 시방서의 설계기준(1996)

- 지반으로부터 결정되는 말뚝의 극한지지력은 적절한 지반조사를 실시한 다음 지지력 추정공식으로부터 산정하거나 또는 연직재하시험을 실시하여 구한다.
- 지지력 추정식은 기존의 연직재하시험결과에 기초하여 정하는 것이므로 과거에 다수의 경험이 없는 종류나 공법의 말뚝기초를 사용하는 경우에는 말뚝재하시험으로 극한지지력을 확인하여야 한다.
- 말뚝의 시공시 미리 시험말뚝을 시공하는 것을 원칙으로 한다.

(4) 한국구조물 기초 설계기준(1997)

- 말뚝재하시험은 일종의 실물시험으로서 말뚝에 실제하중을 실제 상부구조물이 건설되었을 때를 재현하므로 여러 가지 지지력 추정방법들 중 가장 신뢰도가 높은 예측이 가능하다.
- 말뚝재하시험은 말뚝의 지지력을 결정함에 있어 말뚝의 거동을 파악하는 가장 확실한 방법이다.

표 1. AASHTO & 일본도로교 시방서 규정에 의한 지지력산정방법 요약

지반 종류	AASHTO규정		일본도로교 시방서 규정		
	항타말뚝	현장타설말뚝	항타말뚝	현장타설 말뚝	내부속파기 말뚝
점토	· Tomlinson(1957); α 방법 · Meyerhof(1976); β 방법 · Schmertmann (1978); CPT방법 · Bagnelin(1978); PMT	· Reese & O'Neill (1988); α 계수결정	· c 또는 N ($tonf/m^2$) (≤ 15)	· c 또는 N ($tonf/m^2$) (≤ 15)	· 0.5c 또는 0.5N ($tonf/m^2$) (≤ 10)
		· $q_b = N_c \cdot S_{UB}$; S_{UB} = 비배수전단강도	· $q_d = f(N)$ $N \leq 40$	· $q_d = 3q_u$ (ton/m^2) q_u:일축압축강도	· 선단처리방식에따라 다름
사질토	· Nordlund(1963); 경험적 유효응력법 · Schmertmann(1978); CPT방법	· $f_i = \beta_i \sigma_i$ $\beta_i = 1.5 - 0.135\sqrt{Z_i}$, $\beta > 0.25$	· 0.2N ($tonf/m^2$) (≤ 10)	· 0.5 N ($tonf/m^2$) (≤ 20)	· 0.1N($tonf/m^2$) (≤ 5)
		· Reese & O'Neill q_B←비보정 N치	· $q_d = f(N)$ $N \leq 40$	· q_d = 300 $tonf/m^2$ ($N \geq 30$)	· 선단처리방식에따라 다름
암반	· 말뚝부재의 능력에 좌우됨 · 약한암 (weak rock)이나 풍화암 (w.r.)의 경우; 말뚝정재하시험 수행	· 소켓부침하량이 10 *mm* 이하인 경우;외주면마찰력 $Q_s \propto q_{SR}$ q_{SR} : 암반과 소켓면의 극한 주면마찰응력 (= $f(\sigma_c)$) σ_c : 암반과 콘크리트중 약한 것의 일축압축강도			
		· 소켓부침하량이 10 *mm* 이상인 경우; $Q_S + Q_B$ $Q_B = N_{ms} \cdot C_O \cdot A_B$ C_O : 선단의 일축압축강도 N_{ms} : 계수			

3. 대구경 말뚝의 검증시험

3.1 개요

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 한다. 상세한 지반특성치가 파악되어야 경제적이고 합리적인 설계를 수행할 수 있다.

검증시험 결과를 말뚝기초의 경제적인 설계에 활용하기 위하여 지반의 역학적 특성치가 정확하게 파악되어야 하므로 각 지층의 특성치를 확인할 수 있는 실내역학실험 (삼축압축실험, 직접전단실험, 일축압축실험, 베인전단실험 등)과 현장시험 (*CPT, PMT, DMT, SPT* 등)을 수행하고 필요한 경우에는 탄성파탐사시험을 실시할 수도 있다. 역학적 특성치 평가는 상기의 시험결과들을 종합하여 판단하는 것이 좋다. 이 때, *N*치만을 이용하여 지반의 특성치를 정하는 것은 피해야 한다.

3.2 적용범위

시험말뚝에 대한 재하시험을 활용한 설계는 경간장 50m이상의 교량, 단면적 20㎡이상의 박스 구조물, 폐수처리장, 하수처리장, 지하철공사, 연면적 2만㎢이상의 건축물 등과 같은 상당한 중요성을 가지는 구조물의 경우에 한하여 적용되어야 할 것이다 (정성기, 1997). 설계단계에서 수행되는 시험말뚝에 대한 정재하시험에는 다소 많은 경비가 소요되지만 말뚝기초 공사비가 약 20억원을 초과하는 건설공사에서는 경제성을 갖는 것으로 보고되고 있으나 (정성기 등, 1998), 여러 가지 변수들을 감안하여 상기와 같은 대형 건설공사에 한하여 시험말뚝에 대한 검증시험을 수행하여야 할 것이다.

3.3 시험말뚝선정 및 축하중 계측용센서 설치원칙

검증시험에 사용할 시험말뚝에 대한 선정에서는 다음을 참고하여야 한다.

① 예비설계에서 정한 제원 (직경, 관입길이 등)과 공법을 가지는 말뚝으로 한다.
② 예비설계에서 정한 말뚝의 직경이 극대구경 (ϕ > 1,000~1,500 *mm*)인 경우에는 크기효과(Size effect)의 영향을 받지 않을 정도로 직경만 축소시킨 축소 시험말뚝으로 한다.
③ 지반조건의 변화가 심하지 않는 경우 대표구조물당 1개소로 한다.
④ 지반조건의 변화가 심한 경우에는 개소를 추가로 선정할 수 있다.
⑤ 시험말뚝에는 축하중 계측용 센서를 설치하여야 한다.

축하중 계측용 센서의 설치시 다음을 참고하여야 한다.

① 축하중 계측용 센서는 각 구조 부재별로 따로 설치한다. 예를 들어, 현장타설 콘크리트 말뚝의 경우 콘크리트와 철근부재에 따로 설치하며, 콘크리트 속채움한 강관말뚝의 경우 강관부와 콘크리트부에 따로 설치하고, 강관말뚝의 경우 강관부재에만 설치 한다.
② 전기저항식 센서의 경우, 각 개소당 4개의 스트레인 게이지를 이용하여 완전결선회로(Full bridge circuit)를 구성하여야 한다.
③ 설치위치는 축하중의 분포도를 확인할 수 있는 적절한 간격으로 한다.
④ 각 깊이에서는 90° 방향으로 4개소씩 설치하는 것을 원칙으로 한다. 그러나, 비용 등의 문제로 곤란한 경우에도 최소한 180° 방향으로 2개소씩은 설치하여야 한다.

3.4 검증시험결과

설계목적의 말뚝재하시험과 통상적인 말뚝재하시험의 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 설계목적의 말뚝재하시험에서는 극한 지지력을 결정할 수 있고 측정된 하중전이자료를 활용하여 말뚝의 하중 지지거동을 확인할 수 있으므로, 경제적인 말뚝기초의 설계를 수행할 수 있을 것이다. 반면, 통상적인 말뚝재하시험에서는 극한하중은 물론이고 항복하중마저도 확인할 수 없는 경우가 대부분이며, 말뚝의 하중지지 양상을 확인할 수 없다. 다만, 극히 안전측으로 사용하고 있는 설계하중의 지지여부만 확인할 수 있을 뿐이다.

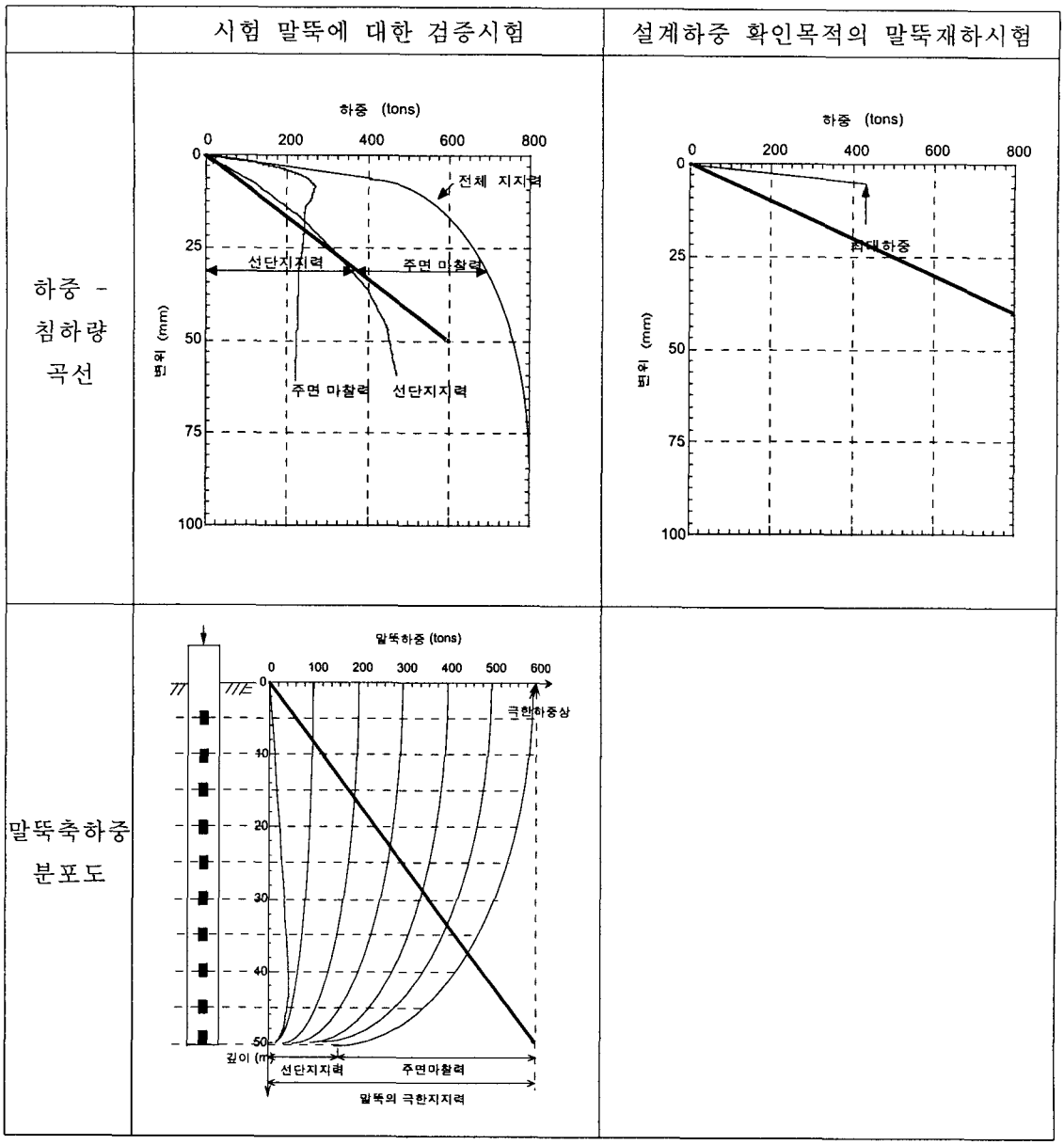


그림 2. 말뚝재하시험에서 얻을 수 있는 대표적인 결과들

3.5 활용

건설 구조물의 발주청에서 설계용역을 발주할 때 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.

4. 대구경 말뚝의 재하시험

대구경 말뚝의 재하시험 방법으로는 정재하시험, 오스터버어그셀시험, 정·동재하시험 그리고 동재하시험 방법이 사용될 수 있다. 이중 정재하시험방법이 일반적으로 사용될 수 있으며 재하하중이 클 경우에는 오스터버어그셀시험

방법이 경제적일 수 있다. 이 절에서는 대구경 말뚝의 정재하시험과 오스터버어그셀시험방법에 대하여 설명하기로 한다.

4.1 말뚝정재하시험방법

대구경말뚝의 정재하시험방법에는 사하중상재방식(그림 3, 그림 4), 지중앵커방식(그림 5), 반력말뚝방식(그림 6) 그리고 복합재하방식(그림 7) 등이 있다.

그림 3. 콘크리트블록상재방법

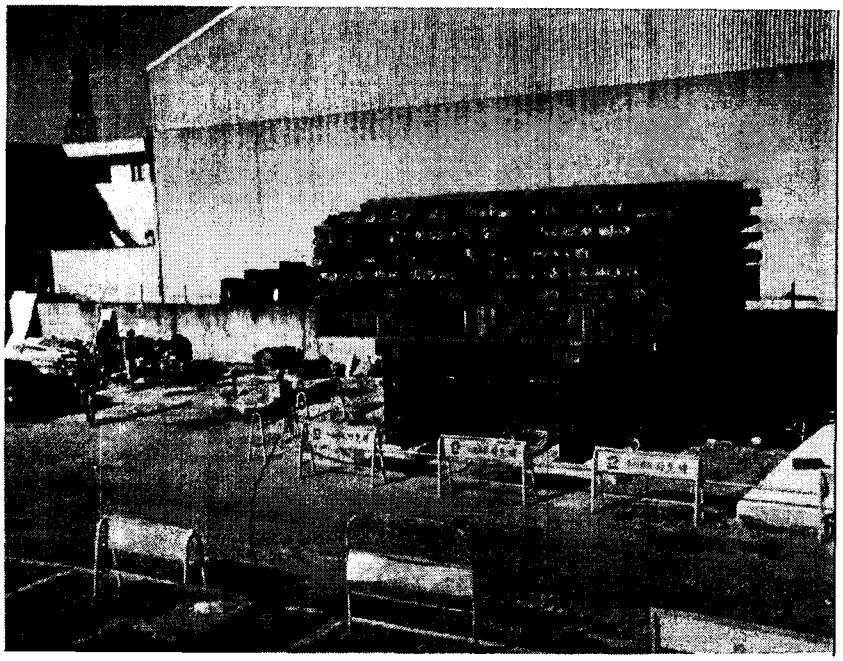


그림 4. 철근상재방법

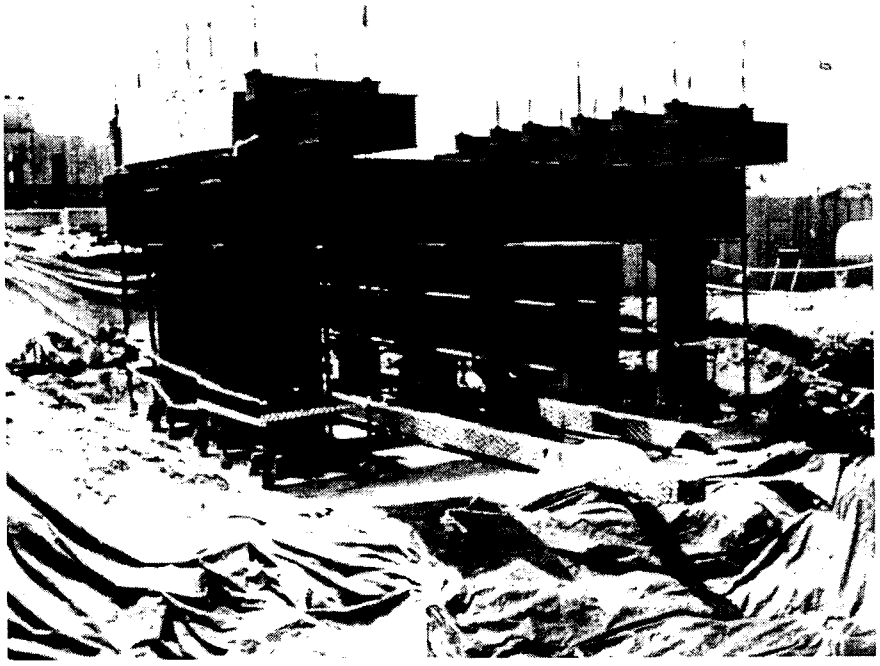


그림 5. 지중앵커방법

그림 6. 반력말뚝방법

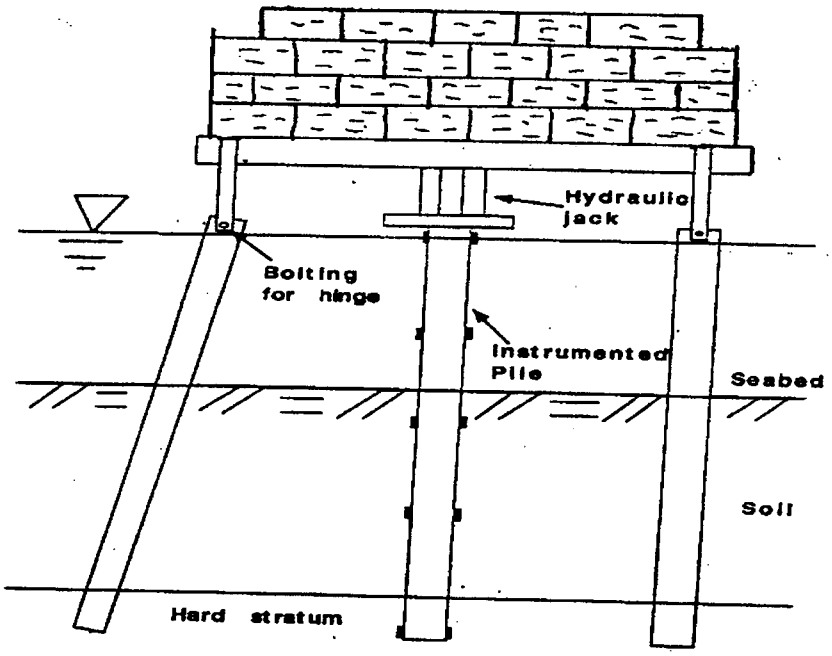


그림 7. 반력말뚝방법

4.2 오스터버그 셀(Osterberg cell) 시험법

이 방법은 미국의 오스터버그가 개발한 재하시험법이다(Osterberg, 1998). 이 방법(그림 8)은 주로 현장타설 콘크리트 말뚝에 적용된다. 말뚝 재하시험을 위해서 말뚝의 선단부에 오스터버그가 고안한 셀(유압 잭)을 설치하고 콘크리트를 타설한다. 이 때 유압 잭에 유압을 공급할 수 있는 튜브와 유압 잭의 변위를 측정할 수 있는 장치를 설치한 상태에서 콘크리트를 타설한다. 콘크리트가 어느 정도 양생되면 유압 잭에 압력을 가하면서 재하시험을 실시한다.

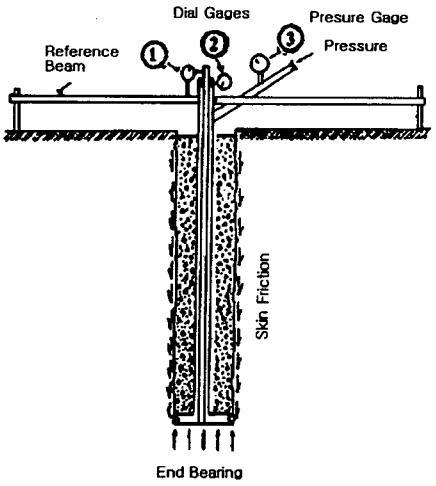


그림 8. 오스터버그 셀 시험법의 개요

이 방법에서는 말뚝의 주면마찰력이 선단부 재하시험의 반력이 되기 때문에 사하중 또는 반력말뚝을 필요로 하지 않는다. 따라서 시험이 그만큼 간단하고 선단지지력과 주면마찰력을 분리하여 측정한다는 장점이 있다.

그러나 이 시험법은 주면마찰력이 작은 경우에는 극히 낮은 하중까지 밖에 시험을 하지 못하고, 또 주면마찰력은 큰 값을 갖더라도 선단지지력이 작으면 그 하중까지 밖에 시험을 할 수 없다는 단점이 있다. 또한 오스터버그 셀의 가격이 고가인 점도 이 시험법의 활성화를 방해하는 요소로 작용하고 있다.

우리나라에서는 동일한 방식은 아니지만 분리된 복수유압잭을 사용하여 수행된 사례(김원철 등, 2002)가 있다.

5. 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; 최용규, 1998)에 관해서만 설명하였다.

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

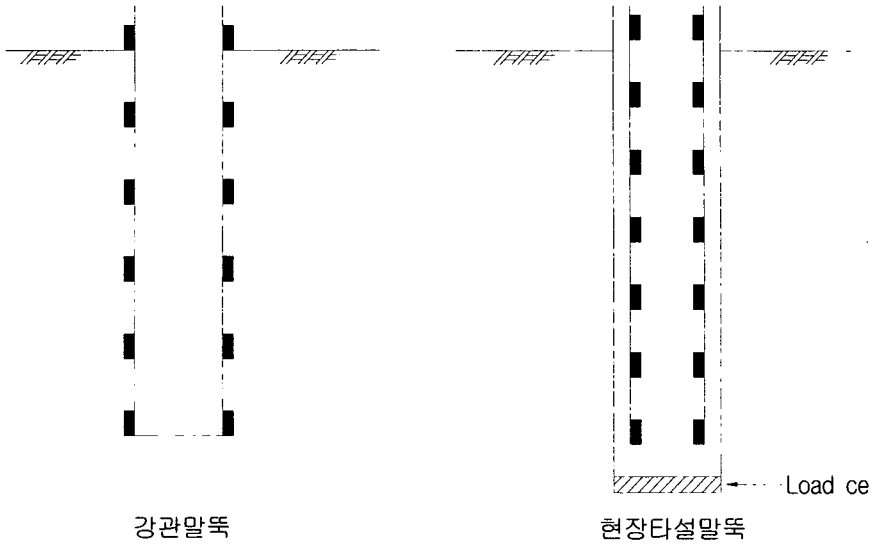
가장 확실한 하중 전이 해석 방법은 실험적인 방법인 데, 그림 9(a)에서와 같이 강관말뚝과 현장 타설 말뚝에 축하중 계측장치를 부착 또는 매설하여 그림 9(*b*)에 보인 것과 같은 축하중의 분포를 각 재하단계별로 직접 측정하는 것이다. 직경 D이고, 관입 깊이가 L이며, 중심부에 수직 하중 Q가 재하된 말뚝을 그림 9(*a*)에 나타내었다. 그림 9(*b*)의 함수 $Q(z)$는 말뚝 축을 따라 전달된 하중을 나타내므로, 말뚝 선단 ($z = L$)에서, Q_b는 말뚝 선단까지 전달된 축하중을 나타내고, Q_s (= Q_o - Q_b)는 말뚝 주면 마찰력의 합을 나타낸다. 여기서, Q_o는 말뚝두부에 작용된 하중을 의미한다. 그리고, 말뚝의 주변장 P로 나눈 축하중 곡선의 z방향에 대한 기울기는 말뚝 몸체부를 따라 생기는 단위 주면 마찰 응력 (f_o)이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_o(z) = -\frac{1}{P} \cdot \frac{dQ(z)}{dz} \qquad (5.1)$$

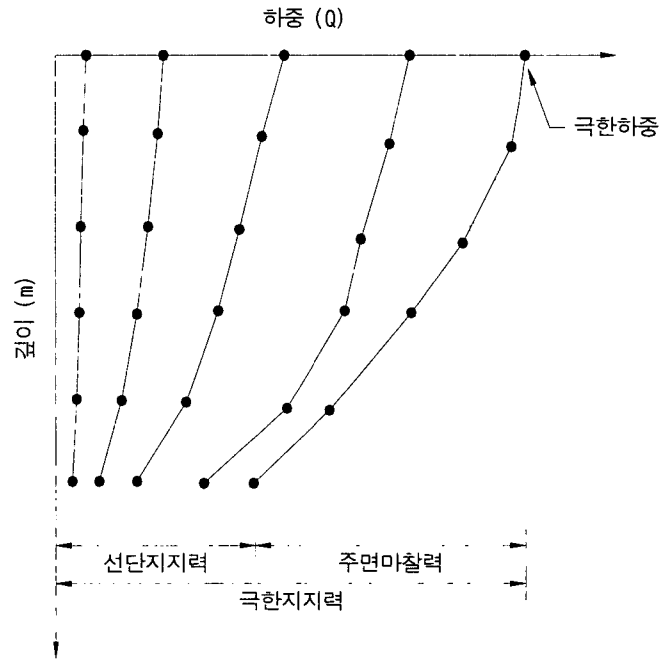
$Q(z)$가 깊이 z에 따라 감소하면, 주면 마찰 응력 f_o는 그림 10(*c*)에 나타낸 것처럼 양의 값을 갖는다. 만약, 단면적 (A)과 말뚝 변형계수 (E_p)를 알고, 말뚝 머리의 수직 변위, ω_o를 알면, 실험에서 측정된 말뚝 축하중 분포 곡선 $Q(z)$를 이용하여 깊이 z에서의 말뚝 수직 변위 $\omega(z)$를 다음 식으로부터 산출할 수 있다.

$$\omega(z) = \omega_o - \frac{1}{A \cdot E_P} \int_0^z Q(z)dz \cdots \qquad (5.2)$$

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

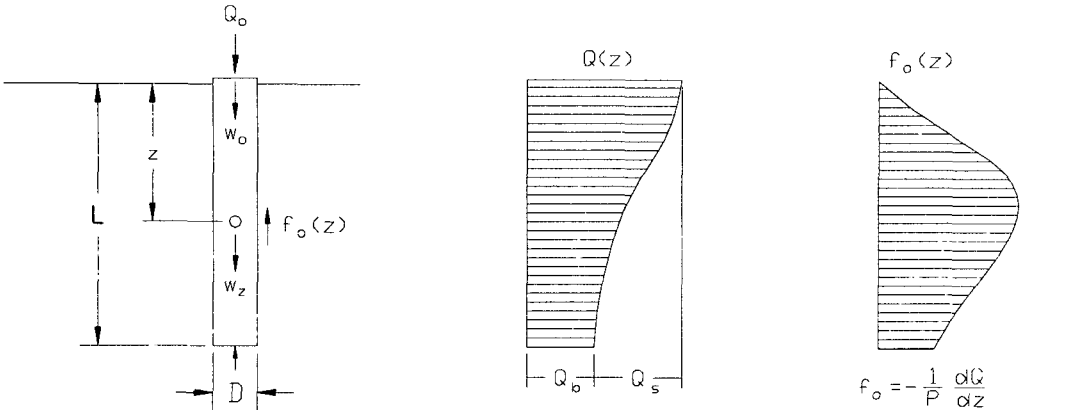


(a) 축하중 계측장치 설치도



(b) 깊이에 따른 축하중 분포도

그림 9. 축하중전이 해석의 개념도



(a) 말뚝개요 (b) 축하중의 분포도 (c) 마찰응력의 분포도

그림 10. 단일말뚝의 하중전이

6. 대구경 말뚝의 하중전이측정실험

대구경 강관말뚝 및 현장타설말뚝에 대한 하중전이측정실험으로 구분하여 설명하여야 한다. 대구경 강관말뚝의 경우에는 소구경말뚝의 경우와 비슷하므로 별도로 설명하지 않으며, 여기서는 대구경 현장타설말뚝에 대한 하중전이측정시험절차에 대하여 설명하는 것으로 한다.

대구경 현장타설말뚝에 대한 하중전이측정시험에서는 말뚝구성부재별로 센서를 설치하여야 한다. 즉, 강관내부속채움말뚝의 경우 강관부와 콘크리트부에, 그리고 현장타설철근콘크리트말뚝의 경우 철근부와 콘크리트부에 축하중계측용센서를 설치하여야 한다.

대구경 현장타설말뚝에 대한 하중전이측정실험절차는 다음과 같다.

(1) 축하중 계측용 센서의 제작 및 설치

축하중계측용센서로는 전기저항식센서(표면접착형, 용접형), 진동식센서, 전기저항식변형봉센서, 광섬유센서 그리고 콘크리트유효응력계 등을 들 수 있으며, 경제성 및 안정성 측면에서 유리한 것으로는 완전결선방식 표면접착형 전기저항식센서와 변형봉센서를 들 수 있다.

상기 두가지 센서의 제작 및 설치방식은 비슷하므로 여기에서는 변형봉센서에 대한 절차만을 소개한다.

① 변형봉 센서 제작 : 표면 청소, 부착위치 선정, 연결전선 납땜, 방수, 방충,
전기테이프로 보호
② 채널선단보호용 슈 용접 : 이 공정은 타격관입 또는 진동관입 강관말뚝의
경우에만 필요함
③ 센서고정용 마운팅블록 용접
④ 변형봉센서 설치
⑤ 연결전선 정리 및 고정
⑥ 보호용 채널 용접
⑦ 외부에 노출된 연결전선 정리

이때 방수, 방충, 그리고 연결전선의 처리에 유념하여야 하며 센서부와 연결전선 보호용 채널 용접시

전선 손상 방지하여야 한다. 또한 전기저항식 센서의 경우 참고문헌(Dunnicliff, 1988)을 참조하여 결선 방식에 유의하여야 한다.

축하중계측용센서는 실험의 중요도, 말뚝구성부재의 종류, 계측기의 종류 등을 고려하여 선정하여야 하며 전기저항식센서의 경우 표면접착형이 가장 경제적이며 4개의 활성(Active) 스트레인 게이지를 사용한 완전결선회로 방식으로 제작되어야 한다.

완전결선식 강관표면접착형 전기저항식센서의 설치중 모습을 그림 11에 나타내었으며, 철근용 및 콘크리트용 전기저항식 변형봉센서의 설치모습을 그림 12에 나타내었다.

(2) 시험말뚝의 시공

통상적인 말뚝시공방법과 동일하며 시공도중 센서손상, 연결전선의 절단, 연결전선의 표식손실 등에 유의하여야 한다. 그리고 현장여건에 따라 추가적인 공기와 장비가 소요될 수 있다.

(3) 축하중분포도의 자동화 측정

센서설치 후, 시험말뚝시공 전과 후, 그리고 말뚝재하시험 실시전까지의 기간중에도 초기치 설정 및 시공중 말뚝에 내재된 하중의 확인을 위한 측정을 실시하여야 한다. 그리고 항타말뚝의 경우 항타로 인한 잔류하중 측정을 하여야 한다. 말뚝재하시험시 하중작용단계에 따라 연속적으로 측정하여야 하며 제하후 말뚝에 하중이 잔류하게 되는지를 반드시 확인하여야 한다. 이 때 설치된 축하중계측용센서 장기계측에 활용할 수 있으며, 이를 통하여 시공중 안정성, 사용중 유지관리에 활용할 수 있다.

하중계수나 말뚝구성재료의 특성치 (예를 들면, 탄성계수, 단면적 등)를 고려하여 말뚝의 축방향 하중을 환산해야 하는데 하중계수나 구성재료의 특성치는 적절한 방법에 의하여 산출해야 한다. 왜냐하면 이 값들에 의하여 말뚝축하중의 분포도의 정확성이 좌우되기 때문이다.

(4) 하중전이 해석

측정결과를 이용하여 말뚝축하중의 분포도를 결정할 수 있으며 마찰지지력과 선단지지력을 분리할 수 있고 마찰응력의 분포와 말뚝 선단에서의 선단지지응력(q)을 계산할 수 있다.

상기의 계산과정을 각 하중단계마다 실시하면 t - z / q - z 관계를 도출할 수 있다.

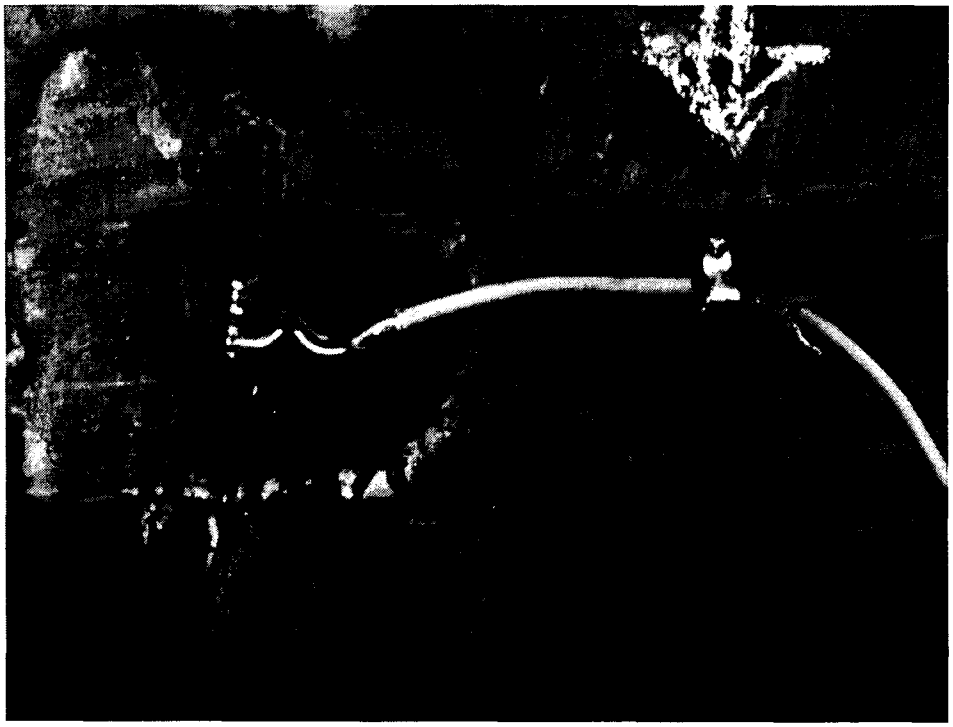


그림 11. 강관접착형 전기저항식 센서 설치 사진

(a) 철근부 (b) 콘크리트부

그림 12. 전기저항식 변형봉센서 설치 사진

7. 대구경 말뚝의 재하시험 및 하중전이 측정사례

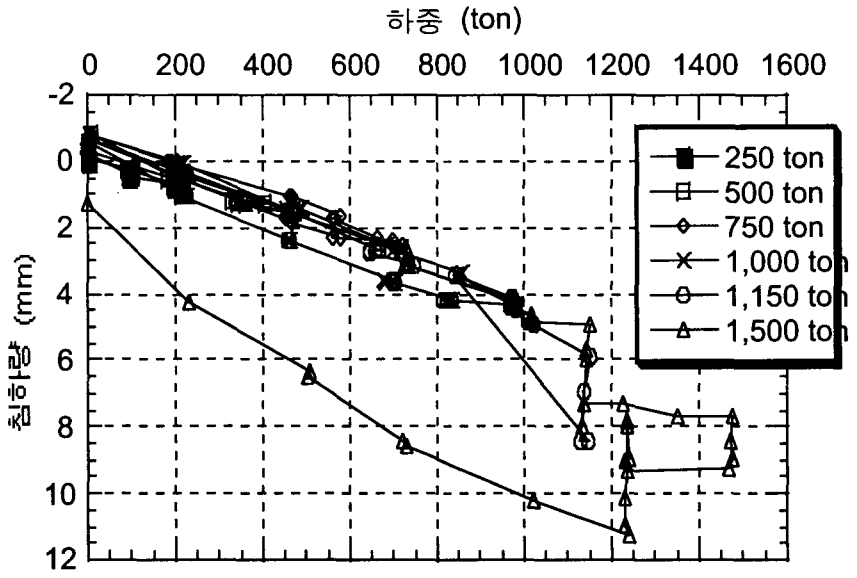
7.1 재하시험 및 하중전이 측정사례 요약

표 2. 재하시험 및 하중전이 측정사례 요약

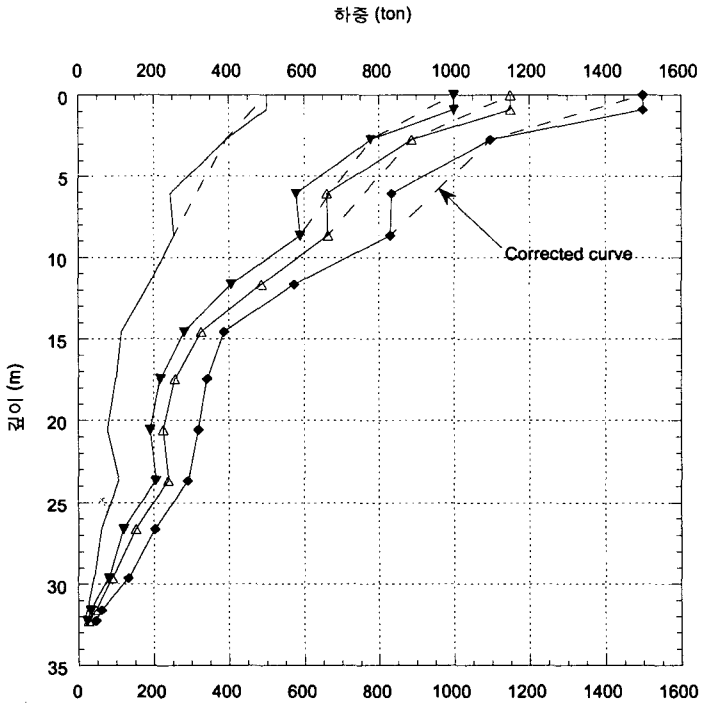
사례	말뚝형식	직경	길이	시험하중	설계하중	항복하중	재하시험방법	축하중계측용 센서 설치 개소부
사례 1 (광안대로TP1)	현장타설 말뚝	1,000	32	1,500	500	750	정재하시험 (반력앵커방식)	철근부 : 88 콘크리트부: 57
사례 2 (광안대로TP2)	강관합성 말뚝	1,000	39.6	2,000	500	1,000	정재하시험 (반력말뚝방식)	철근부 : 40 콘크리트부: 70
사례 3 (광안대로TP3)	강관합성 말뚝	1,000	40.8	2,000	500	1,000	정재하시험 (반력말뚝방식)	철근부 : 44 콘크리트부: 71
사례 4 (수영3호교)	현장타설 말뚝	1,500	33	2,050	320	1,025	정재하시험 (반력앵커방식)	철근부 : 48 콘크리트부: 24
사례 4-1 (수영3호교)	현장타설 말뚝	1,500	33	2,050	320	1,025	오스터버그식방법 (분리유압잭사용)	철근부 : 48 콘크리트부: 24
사례 5 (구미제2대교)	현장타설 말뚝	1,800	22	1860	930	1200	정재하시험 (반력앵커방식)	철근부 : 32 콘크리트부: 16
사례6 (포항연일대교)	현장타설 말뚝	1,500	21	1,750	450	875	정재하시험 (반력앵커방식)	철근부 : 18 콘크리트부: 18
사례 7 (지하철3호선)	현장타설 말뚝	1,500	55		1,038		정재하시험 (반력앵커+ 반력말뚝방식)	철근부 : 60 콘크리트부: 30

7.2 재하시험 및 하중전이 측정사례 결과

(1) 사례 1



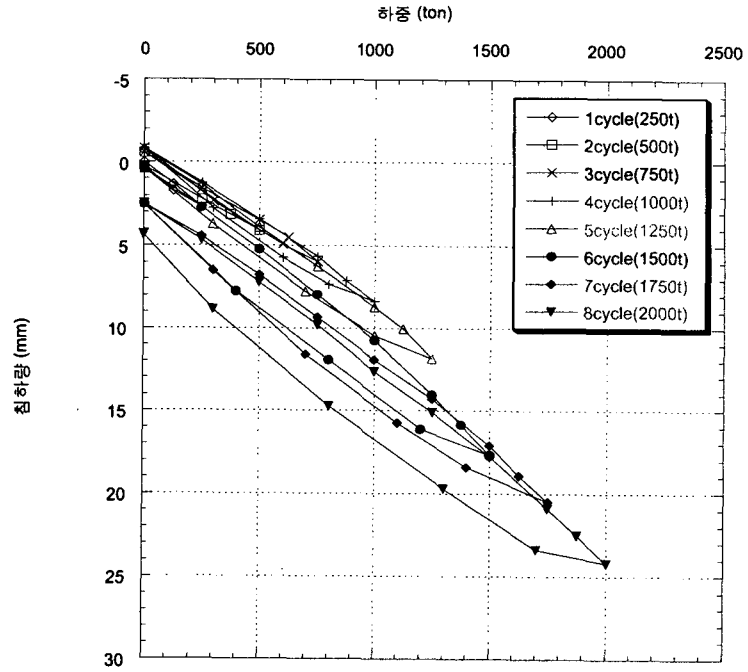
(a) 하중 - 침하량 관계(사례 1: OO대교)



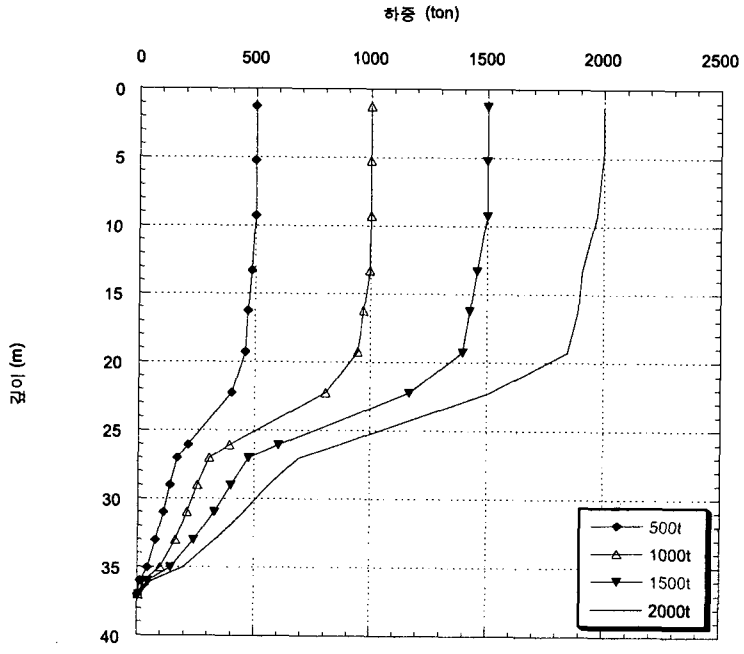
(b) 축하중 분포도

그림 13. 사례 1 : OO대교

(2) 사례 2



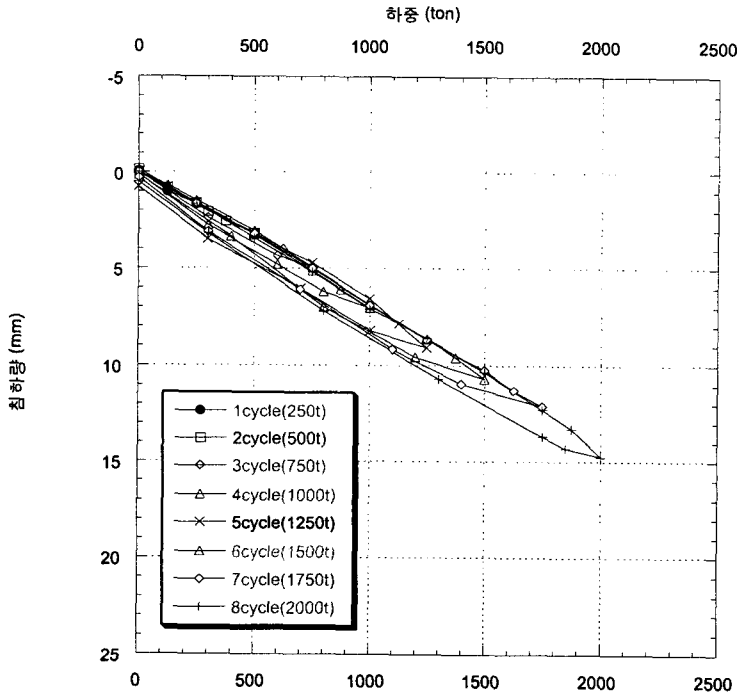
(a) 하중 - 침하량 관계



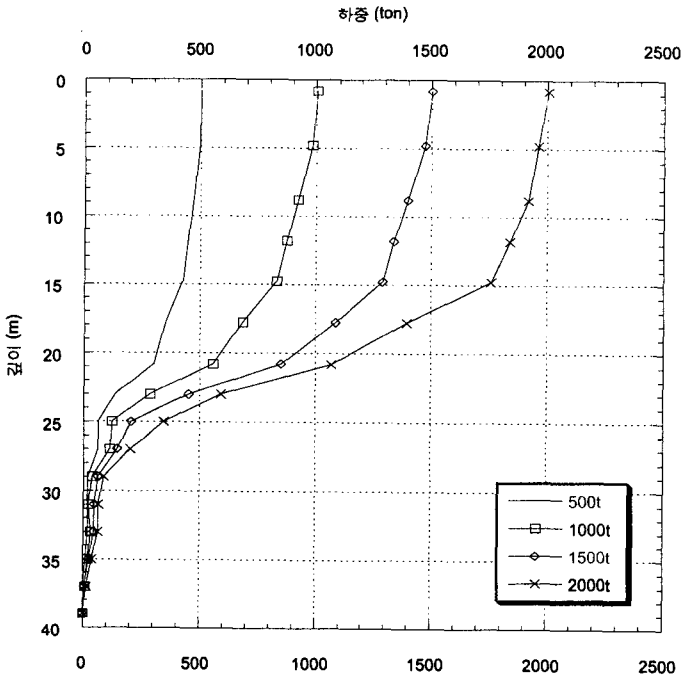
(b) 축하중 분포도

그림 14. 사례 2 : OO대교

(3) 사례 3



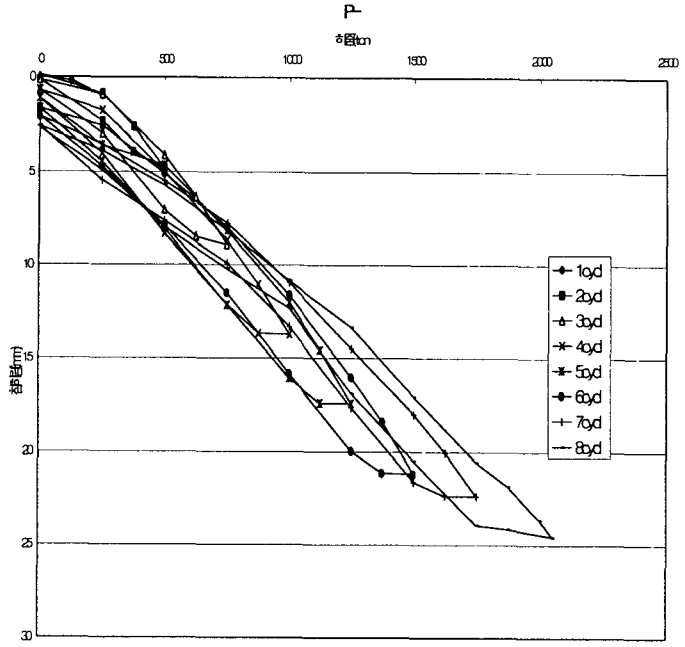
(a) 하중 - 침하량 관계



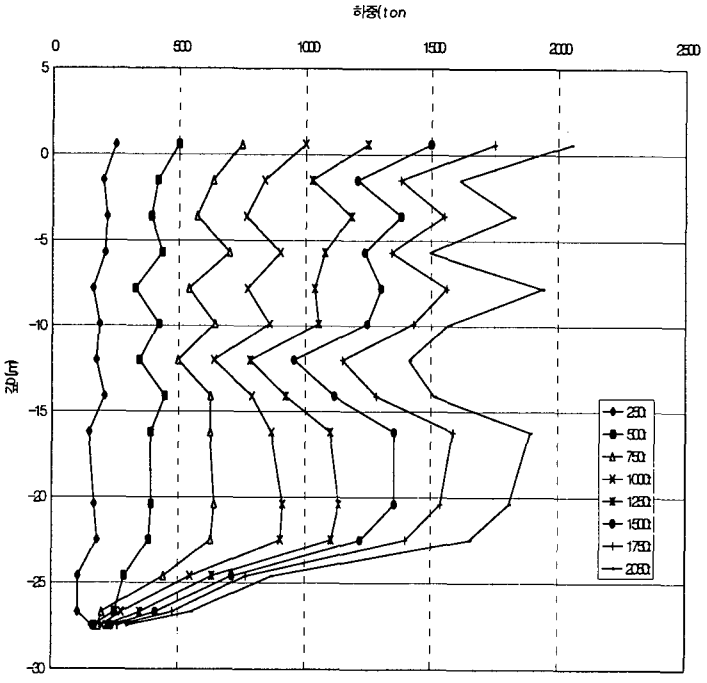
(b) 축하중 분포도

그림 15. 사례 3 : OO대교

(4) 사례 4



(a) 하중 - 침하량 관계



(b) 축하중 분포도

그림 16. 사례 4 : OO교

8. 결언

대구경 말뚝에 대한 검증시험에서는 매우 큰 재하용량이 필요하게 된다. 따라서 정재하시험으로는 항복하중이나 극한하중까지 재하하는 것은 곤란할 수 있다. 국내의 경우 정재하시험시 최대 2050톤까지 재하한 사례는 있으나 이 경우에도 항복하중마저도 확인하지 못하였다. 최근에는 3000톤까지 재하용량을 상향시키려는 시도가 이루어지고 있다.

대구경 말뚝에 대한 재하용량의 증가는 오스터버어그식 재하시험방법으로 가능할 수 있는데, 국내의 경우 분리형 복수유압잭을 사용하여 2400톤까지 재하한 사례는 있다. 최근에는 4800톤까지 재하하려는 시도가 이루어지고 있다.

대구경 말뚝에 대한 검증시험시 수행된 하중전이측정사례는 다수 있으며 특정지역에서 이루어진 것이 대부분을 차지하고 있다. 이와 함께 다수의 사례가 예정되어 있어 하중전이측정은 더욱 늘어날 전망이다.

참 고 문 헌

1. 경성대학교 지반공학연구실(2000), "광안대로 건설공사의 대구경말뚝 정재하시험과 수치해석을 통한 말뚝기초의 안정성 검토 보고서".
2. 경성대학교 지반공학연구실(2000), "포항이암에 소켓된 대구경 현장타설말뚝의 하중전이특성에 관한연구".
3. 경성대학교 지반공학연구실(2002), "부산정보단지 진입도로(수영3호교) 건설공사의 강관말뚝과 현장타설말뚝에 대한 정재하시험 및 하중전이측정 연구용역 보고서".
4. 김원철, 최용규, 임태경, 박봉근(2002), "오스터버어그셀을 이용한 말뚝 재하시험방법 및 적용사례 연구", 2002년 기초기술 학술발표회, 한국지반공학회 기초 기술 위원회.
5. 도로교통협회(2000), "도로교 설계기준".
6. 도로교통협회(2001), "도로교 설계기준 해설집(하부구조편)".
7. 부산광역시(2002), "건설공사 설계지침서".
8. 최용규(1989), "개단강관 말뚝의 폐색 효과에 관한 모형실험연구".
9. 최용규(1998), "알기쉬운 말뚝기초공학", 부산시 공무원 교육교재, 부산광역시 건설안전관리본부.
10. 최용규 등(2002), "Raft의 하중분담을 고려한 말뚝기초의 자동화 설계 프로그램 개발", 2000년 건설기술연구개발사업 최종보고서, 과제번호 R&D/200001010025.
11. 한국지반공학회(1997), "구조물 기초설계기준", 건설교통부.
12. 한국지반공학회(2001), "현장기술자를 위한 말뚝기초 워크샵".
13. 한국지반공학회 기초 기술위원회(2002), "2002년 기초 기술 학술발표회"
14. 日本道路協會(1996), "道路橋示方書・同解說", 丸善(株)出版事業部.
15. AASHTO(1996), "Standard Specifications for Highway Bridges". 16th ed.
16. Dunnicliff, J.(1988), "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", John Wiley & Sons, Newyork, USA, pp. 94~100.
17. NAVFAC(1982), "Soil Mechanics Design Manual", Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, pp. 7.2-59~7.2-85.
18. Osterberg, J. O.(1998), "The Osterberg Load Test Method for Bored and Driven Piles the First Ten Years", Proc. of 7th Inter. Conf. on Deep Foundation, Vienna, Austria, Deep Foundation Institute, 1998.
19. Vesic, A. S.(1977), "Design of Pile Foundations", Report No. 42, Transportation Research Council, Washington, DC, p. 68.