

## 대구경 말뚝정재하시험 및 하중전이 측정사례

### Static pile load test and load transfer measurement for large diameter piles.

최용규, Yongkyu Choi

경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Prof., Dept of Civil & Envir. Engineering, Kyung Sung University.

**SYNOPSIS** : Large diameter piles can be defined as piles with diameter of at least 0.76 m (2.5 ft). In bridge foundation, large diameter piles have been used as pier foundations and their use has been increased greatly.

In this study, static pile load tests for large diameter piles performed in Kwangan Grande Bridge construction site were introduced. Also, various sensor installation methods for several types of piles (that is, open-ended steel pipe pile, drilled shafts and socketed pipe piles), pipe axial load measuring method, load transfer analysis method and pile load test results (pile-head load - settlement curve, and pile axial load distribution curve along the pile depth) were introduced.

**Key words** : Static pile load test, Large diameter piles, Bridge foundation, Kwangan Grand bridge, Pile-head load - settlement curve, Pile axial load distribution curve.

## 1. 서론

대구경 말뚝(Large diameter pile)은 직경 0.76 m(2.5 ft)이상인 말뚝으로 정의할 수 있다(O'Neill, 1998). 교량 기초의 경우 대구경 말뚝들이 교각기초로 주로 이용되어 왔으며, 시공실적은 날로 증가하고 있는 실정이다.

대구경 말뚝기초들에 대하여 국내에서 수행된 말뚝재하시험 사례들을 표 1에 요약하였다. 표 1에서 알 수 있듯이, 국내에서 수행된 대부분의 말뚝재하시험에서는 말뚝의 극한지지력(또는 항복지지력)을 확인하지 못하였을 뿐만 아니라 하중전이의 측정도 이루어지지 않았다. 다만, 남항대교 실시 설계(부산광역시 건설안전관리본부, 1997) 당시 수행된 개단강관말뚝에 대한 정재하시험에서 하중전이의 측정이 체계적으로 이루어져 말뚝기초의 실시설계에 반영되었다. 이후 광안대교 건설공사 중 말뚝기초의 안정성 확인을 위하여 실시된 정재하시험에서는 하중전이 측정을 집중적으로 수행하여 말뚝기초의 하중지지거동을 확인할 수 있었다(부산광역시 건설본부, 2000).

본 연구에서 사례로 선정한 광안대교 말뚝기초에 대한 정재하시험의 특징을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 말뚝기초의 안정성과 품질확인을 위하여 발주자가 엔지니어링업체에 직접 발주하여 시행한 국내 최초의 검사시험이었다. 참고로 말뚝재하시험은 관행상 시공사에 일괄 발주되어 관리시험으로만 시행되어 왔는데 이 경우 엔지니어링업체가 하도급으로 참여하게 되어 품질확인이 제대로 이루어질 수 없는 실정이었다.

표 1. 국내 대형 건설공사시 대구경 말뚝 재하시험 수행사례

공사명	말뚝재하 시험종류	시험말뚝종류	시험말뚝제원		최대상재 하중(톤)	재하시험 위치	하중전이 측정여부	센서설치 깊이레벨수
			직경 (mm)	길이 (m)				
서해대교 건설공사 (1995) (1994)	정재하시험	현장타설말뚝 (RCD)	1,500	18	1,460	육상부	미측정	
	정·동재하시험	현장타설말뚝 (RCD)	1,500	32.71	2,265(해석)	측도부	미측정	
		현장타설말뚝 (RCD)	1,500	19.64	1,354(해석)	해상부	미측정	
	PDA	현장타설말뚝 (RCD)	1,500	26.1	2,895(해석)	육상부	미측정	
		현장타설말뚝 (RCD)	1,500	14.5	2,083(해석)	육상부	미측정	
가양대교 건설공사 (1997)	정재하시험	현장타설말뚝 (All casing)	1,500	29.48	1,100	육상부	미측정	
	정재하시험	현장타설말뚝 (All casing)	1,500	27.34	1,200	육상부	미측정	
방화대교 건설공사 (1997)	정재하시험	현장타설말뚝 (All casing)	1,500	24.4	1,560	육상부	미측정	
광안대교 건설공사 (1999)	정재하시험	현장타설말뚝 (풍화대)(RCD)	1,000	32.0	1,500	육상부	측정	13개깊이
	정재하시험	소켓강관말뚝 (풍화대)	1,000	39.6	2,000	해상부	측정	16개깊이
	정재하시험	소켓강관말뚝 (연압)	1,000	40.8	2,000	해상부	측정	17개깊이
남항대교 실시설계 (1997)	정재하시험	개단강관말뚝	608 (t=12 mm)	38~44	500	육상부	측정	13개깊이

둘째, 국내의 육상 및 해상에서 최대 상재하중(2,000톤)을 작용시킨 말뚝정재하시험이었다. 즉, 말뚝 설계하중(약 500톤으로 추정하였슴)의 4배까지 재하하여 말뚝기초의 항복지지력 내지는 극한지지력까지 확인하기 위한 시도를 하였으며 세계적으로도 흔하지 않는 대규모의 말뚝정재하시험이었다.

셋째, 말뚝의 입의 깊이에 축하중계측센서를 충분히 설치하여 하중재하단계에 따른 축하중전이를 측정하였으며, 하중전이해석을 통하여 말뚝의 하중지지거동을 확인하였다. 국내에서는 최초로 1997년 남항대교 설계 당시 개단강관말뚝에 실시한 하중전이 실험(부산광역시 건설안전관리본부, 1997)이 성공적으로 수행된 후 대구경 현장타설말뚝과 대구경 소켓 강관말뚝에서도 하중전ishi험이 성공적으로 수행된 사례로 기록될 수 있을 것이다.

넷째, 해상부 말뚝정재하시험의 경우 대구경 소켓강관말뚝(D = 2,500 mm)기초이므로 본말뚝에 대한 직접재하는 과대한 재하용량으로 인하여 하중재하가 매우 곤란하였다. 따라서, 시험말뚝(축소 소켓강관말뚝 D = 1,000 mm)을 본 말뚝의 시공조건대로 시공하여 시험하였고 대구경 소켓강관말뚝(D = 2,500

mm)을 반력말뚝으로 사용하였는데, 최대상재하중 2,000톤에서 반력말뚝으로 사용된 실제 말뚝의 인발에 대한 안정성을 확인하기 위하여 반력말뚝에도 축하중계측센서와 인발변위측정센서를 설치하였다.

다섯째, 말뚝재하시험결과를 일부 교각기초의 말뚝시공에 반영하여 부분적이거나 예산절감을 기하였고, 수치해석을 통하여 광안대로 전 말뚝기초의 안정성을 확인하였다. 나아가서 시공단계별 교량의 안정성을 확보하고 장래 교량하부기초의 유지관리에 있어 정확한 판단자료를 제시하는 등 우리나라 교량기초 시공의 선진화를 촉진하는데 기여할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 광안대로 건설공사 현장에서 수행된 대구경말뚝에 대한 정재하시험사례를 소개하였다. 또한, 각종 말뚝들(개단강관말뚝, 현장타설말뚝, 소켓강관말뚝)에 대한 축하중계측용 센서설치방법, 말뚝 축하중 측정방법, 하중전이 해석방법, 말뚝재하시험결과(말뚝머리하중 - 침하량 관계 뿐만 아니라 말뚝 축하중의 깊이 에 따른 분포도)분석방법을 소개하였다.

## 2. 하중전이 측정이 수반된 말뚝재하시험의 필요성

하중전이의 측정은 말뚝재하시험 도중에 하중작용단계에서 이루어지게 되지만, 말뚝 시공단계에서 축하중계측용 센서는 말뚝시공단계에서 이루어져야하며 따라서 이와 관련하여 센서 구입비, 설치비용, 설치에 소요되는 기간 등을 사전에 면밀히 검토해야 한다.

하중전이의 측정목적은 말뚝기초의 하중지지양상(즉, 마찰지지, 선단지지 또는 혼합지지)을 확인하여 말뚝 기초의 거동을 규명하기 위한 것이며, 이 결과는 말뚝기초의 최적화설계에 활용할 수 있을 것이다.

말뚝재하시험은 설계단계와 시공도중에 수행될 수 있는데 각 단계에서 말뚝재하시험을 수행해야 할 필요성을 아래에 설명하였다.

### (1) 설계단계에서 실시

말뚝기초의 극한지지력과 하중지지거동을 확인할 수 있다면 말뚝의 지지능력을 최대한 활용하여 최적화 설계를 이룰 수 있을 것이다. 또한, 시험말뚝의 시공을 통하여 검증된 정확한 시공시방(항타말뚝 : 항타관리기준, 현장타설말뚝 : 시공기준 및 콘크리트의 건전도 검사기준)의 설정에 기여할 수 있을 것이다.

대형건설공사의 발주처에서 이와 같은 개념을 도입할 경우 건설예산을 크게 절감할 수 있을 것이다. 예를 들면 해상 장대교량기초 경우 말뚝기초 공사비의 최소한 30 % 정도는 절감시킬 수 있으며 전체공사비에서는 약 10 % 이상 절감가능할 것으로 예상된다. 설계단계에서 수행된 말뚝정재하시험사례는 남항대교 실시설계를 들 수 있는데 육상부 2개 교각 기초말뚝들의 건설비용을 약 49.2 억원에서 약 10.8 억원으로 줄여 약 38.4억원을 절감하였다(정성기 등, 1998)

또한 최근에 일반화 되고 있는 턴키(turn key) 방식의 공사입찰시 이와 같은 개념을 적용시킬 경우에도 위에서 설명한 정도의 말뚝기초부분 시공비용을 절감하여 공사수주에 매우 유리한 위치를 점할 수 있을 것으로 예상된다.

### (2) 시공초기에 실시

설계단계에서 말뚝재하시험을 수행하기 극히 곤란할 경우에는 시공초기이라도 실시한다면 설계단계에서 수행한 것에 준하는 효과를 거둘 수도 있다. 그러나, 이 경우에는 말뚝재하시험결과에 근거하여 기존의 예비설계를 검토하여 재설계를 반드시 수행해야 건설예산의 절감효과를 기할 수 있을 것이다.

### (3) 시공중 실시

시공중 말뚝재하시험을 실시한다면 건설예산의 절감을 이루는 것은 곤란할 수 있다. 이 경우에는 기

시공된 말뚝기초의 지지력과 침하에 대한 안정성을 확인할 수 있으며, 말뚝기초의 하중지지거동을 확인하여 설계개념과 시공된 말뚝의 실제거동과의 적합여부를 확인할 수 있을 것이다.

(4) 말뚝기초의 장기거동 파악에 활용

말뚝구성부재들(콘크리트, 철근, 강관 등)에 설치된 축하중 계측용 센서의 수명이 다하지 않는 한도내에서 말뚝기초 및 말뚝기초에 지지된 구조물의 시공중 안정성을 확보하는데 활용할 수 있으며, 나아가서 사용중 거동확인을 위하여 말뚝기초에 설치된 센서들을 유지관리시스템에 편입하여 활용할 수도 있다. 또한, 구조물의 확장, 보강 및 보수 등에 활용할 수도 있다.

하중전이의 측정이 수반된 말뚝재하시험의 필요성은 도로교설계기준(안) (건설·교통부제정, 2000년 시행예정)(한국도로교통협회, 1999)에도 반영되어 있다. 즉, “5.8절 말뚝기초의 설계”에서 말뚝재하시험과 관련된 부분만을 발췌하여 아래에 수록하였다.

<p>5.8.2 설계의 기본</p>
<p>(3) 일정 규모이상의 교량공사 (경간장 50 m 이상, 장대교량 등의 공사)에서는 말뚝의 시공시방 설정, 깊이에 따른 말뚝 지지력의 평가 그리고 말뚝의 주문 길이 결정 등을 위하여 시험 시공된 말뚝 (Test Pile; 실물크기 또는 축소 말뚝)에 대한 정재하시험을 실시해야 한다. 이때, 시험말뚝에는 축하중 계측 장치를 부착 또는 매설하여 축하중전이를 측정하여야 한다. 시험위치의 상세한 지반특성치가 파악되어야 하며, 지반조건이 크게 변하면 시험 회수도 증가할 수 있다. 단, 설계단계에서 시험말뚝에 대한 정재하시험이 곤란할 경우에는 시공초기에 설계확인을 위한 말뚝정재하시험을 실시할 수 있다. 이 경우에도 설계단계에서의 말뚝정재하시험과 동일한 방법으로 시행되어야 한다.</p>
<p>5.8.5.1 외말뚝의 허용연직 압축 지지력</p>
<p>(3) 지반조건에 따라 결정되는 말뚝의 연직압축방향의 극한지지력은 실물크기 말뚝이나 축소 말뚝에 대한 연직재하시험을 수행하여 결정하는 것이 가장 좋다. 그러나, 정역학적 지지력산정공식이 말뚝재하시험에 준한 정밀도를 가질 경우나 시험말뚝에 대한 재하시험이 곤란한 경우에는 정역학적 지지력산정공식을 사용하여 극한연직압축지지력을 추정할 수 있다. 반드시 하중전이 특성을 확인하여 말뚝기초의 하중지지 거동을 파악하여야 한다.</p> <p>(2) 외말뚝의 침하는 재하시험결과를 보정하여 산정하여야 하며, 침하량 산정공식을 사용하여 추정할 수도 있으나 이 경우에도 하중전이 특성을 고려하여야 한다.</p>
<p>5.8.5.2 외말뚝의 허용연직 인발지지력</p>
<p>(3) 지반조건에 따라 정해지는 외말뚝의 극한연직인발지지력은 인발재하시험으로부터 결정하는 것이 가장 신뢰성있는 방법이며, 지반조사 결과를 토대로 정역학적 지지력공식으로 계산한 지반의 최대 주변 마찰력의 합으로 추정할 수도 있다.</p>
<p>5.8.6.1 외말뚝의 허용수평지지력</p>
<p>수평력을 받는 외말뚝의 지지력과 변위는 수평재하시험을 통하여 결정하는 것이 가장 신뢰성 있는 방법이며, 탄성보 방법과 극한평형법 등과 같은 해석적 방법, 프레스미터 결과를 이용한 방법 등에 의하여 추정할 수도 있다. 실제 구조물과 같은 조건에서 실시된 재하시험이 아닌 경우에는, 이들 방법을 조합하여 사용하는 것이 좋다.</p>

### 3. 하중전이 해석

#### (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

#### (2) 실험적인 하중전이해석

가장 확실한 하중 전이 해석 방법은 실험적인 방법인데, 그림 1 (a)에서와 같이 강관말뚝과 현장 타설 말뚝에 축하중 계측장치를 부착 또는 매설하여 그림 1 (b)에 보인 것과 같은 축하중의 분포를 각 재하단계별로 직접 측정하는 것이다. 직경 D이고, 관입 깊이가 L이며, 중심부에 수직 하중 Q가 재하된 말뚝을 그림 2 (a)에 나타내었다. 그림 2 (b)의 함수 Q(z)는 말뚝 축을 따라 전달된 하중을 나타내므로, 말뚝 선단 (z = L)에서, Q<sub>b</sub>는 말뚝 선단까지 전달된 축하중을 나타내고, Q<sub>s</sub> (= Q - Q<sub>b</sub>)는 말뚝 주변 마찰력의 합을 나타낸다. 그리고, 말뚝의 주변장 P로 나눈 축하중 곡선의 z방향에 대한 기울기는 말뚝 몸체부를 따라 생기는 단위 표면 마찰 응력 (f<sub>0</sub>)이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_0(z) = - \frac{1}{P} \cdot \frac{dQ(z)}{dz} \quad \text{-----}(1)$$

Q(z)가 깊이 z에 따라 감소하면, 표면 마찰 응력 f<sub>0</sub>는 그림 2 (c)에 나타난 것처럼 양의 값을 갖는다. 만약, 단면적 (A)과 말뚝축의 변형계수 (E<sub>p</sub>)를 알고, 말뚝 머리의 수직 변위, w<sub>0</sub>를 알면, 실험에서 측정된 말뚝 축하중 분포 곡선 Q(z)를 이용하여 깊이 z에서의 말뚝 수직 변위 w(z)를 다음 식으로부터 산출할 수 있다.

$$w(z) = w_0 - \frac{1}{A \cdot E_p} \int_0^z Q(z) dz \quad \text{-----}(2)$$

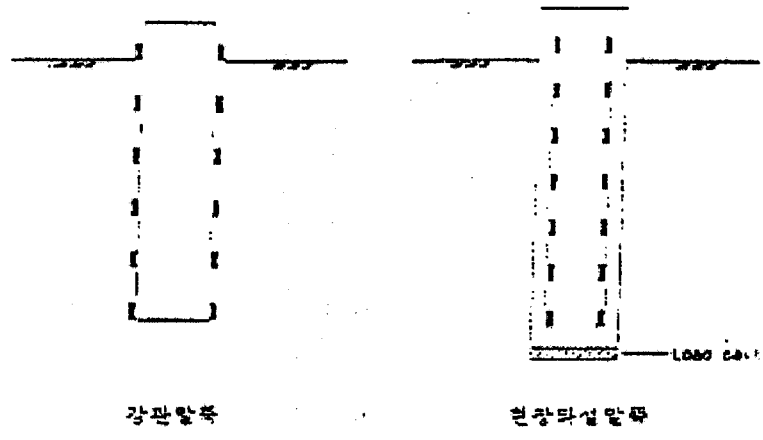
따라서, 하중전이해석은 말뚝의 연직 지지력 뿐만 아니라 말뚝의 침하량도 산정하는 데 활용될 수 있으므로 그 중요성은 매우 크다고 할 수 있을 것이다.

#### (3) 하중 전이 실험의 활용 방안

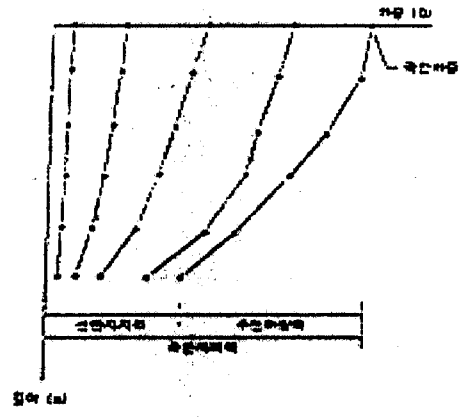
하중전이 측정을 통하여 규명된 하중전이 특성은 말뚝의 하중지지 거동을 확인하는데 이용할 수 있을 뿐만 아니라 다음과 같은 목적으로 활용할 수 있다 (최용규 1998).

- 1) 말뚝기초의 최적화 설계에 활용

- 마찰력과 선단지지력 분리
  - 각 지층에서의 마찰응력과 선단지지 응력 계산
  - 설계 인자 도출 (← 지반의 역학적 특성치 필요함)
  - 최적화 설계 수행
- 2) 말뚝 기초의 하중 전이 거동 규명
  - 3) 하중 전이 해석 수행을 통한 침하량 해석 가능
  - 4) 안전 시공 관리에 활용
  - 5) 사후 유지 관리에 활용



(a) 축하량 지속상차 설치도



(b) 길이여 따른 축하량 분포도

그림 1. 하중전이 해석의 개념도

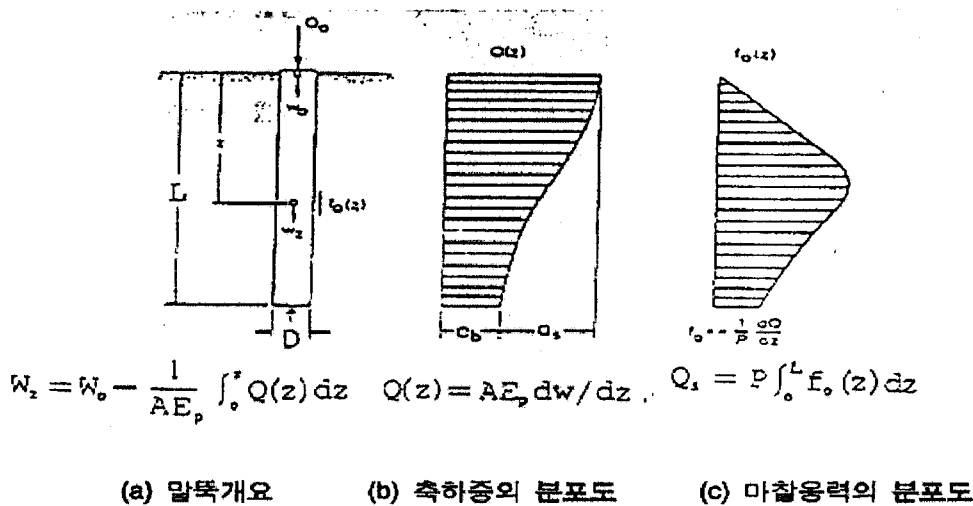


그림 2. 단일말뚝의 하중전이

#### 4. 하중전이 측정실험 절차

##### (1) 축하중 계측용센서의 제작 및 설치

일반적으로 사용되고 있는 축하중 계측용 센서로는 전기저항식(electrical resistance type)과 진동식(vibrating type)을 들 수 있다. 전기저항식 센서의 경우 취급이나 설치면에서 다소 어려울 수 있으나 내구성과 정확성은 우수하며 사용자의 능력에 따라 다양한 적용성을 가질 수 있다. 반면 진동식 센서의 경우 제작회사에서 기성 완제품으로 제작되어 시판되므로 취급이나 설치면에서 용이하지만 내구성이나 적용성면에는 다소 제약이 있을 수 있다. 최근에는 광섬유센서(optical fiber sensor)가 말뚝기초의 재하시험에 활용되기도 한다.

진동식 센서의 경우에는 진동띠식(vibrating strip type)과 진동현식(vibrating wire type)센서가 있으며 기성제품으로 생산되고 있다. 전기저항식 센서의 경우에는 말뚝구성부재(강관 또는 철근)에 직접 접착시키는 방법을 사용할 수 있으나 콘크리트에는 직접 접착시킬 수가 없으므로 본 연구에서는 변형봉 센서를 제작하여 사용하였다. 변형봉 센서의 주요한 제작공정은 변형봉 가공, 변형봉 표면정리, 접착제 준비, 센서접착, 접착제 경화, 연결전선 납땜, 완전결선회로 구성, 방수처리 그리고 방충처리 등이며, 각 공정에 관한 구체적인 설명은 경성대학교 지반공학연구실의 고유한 기술이고 지면이 제한되어 있는 관계로 생략하였다.

말뚝의 종류, 센서의 종류, 설치방법 등에 따라 축하중 계측용 센서의 설치공정이 다소 다를 수 있다. 여기에서는 전기저항식 스트레인 게이지로 완전결선회로(full-bridge circuit)를 이루도록 제작된 변형봉 센서와 진동식 센서를 설치하는 것으로 하였으며, 주요한 공정은 채널선단보호용 슈 용접(타격관입 또는 진동관입 강관말뚝의 경우에만 필요한 공정임), 센서고정용 마운팅블록 용접, 센서설치, 연결전선 정리 및 고정, 보호용 채널 용접, 그리고 외부에 노출된 연결전선 정리 등이다.

말뚝에 설치된 센서는 지중에 관입 또는 매설되어야 하므로 방수, 방충, 그리고 연결전선의 처리에도 매우 유념하여야 한다. 또한 센서부와 연결전선 보호용 채널 용접시 전선이 손상되지 않도록 해야 한다.

전기저항식 센서의 경우 결선방식에 매우 유의하여야 하며, 실험의 중요도, 말뚝구성부재의 종류, 계측기의 종류 등을 고려하여 선정해야 한다. 사용할 수 있는 결선방법들을 표 2에 나타내었으며, 4개의 활성(Active) 스트레인 게이지를 사용한 완전결선회로가 가장 좋은 방법으로 알려져 있다(Dunnicliff,

1988).

자동계측시스템은 센서의 종류, 실험의 중요도, 측정방식 등에 따라 선정되어야 하므로, 사용할 센서의 종류 선정에 신중을 기하여야 할 것이다.

표 2. Wheatstone Bridge Networks

Type	Advantages	Limitations	Bridge Factor <sup>a</sup>	Usage
Quarter, two-wire system; Figure 8.15a	Least expensive Easiest to use	Sensitive to temperature change at gage and leads Nonlinear at high strain levels	1.0	Use only in laboratory environment at constant temperature Never use in geotechnical field applications
Quarter, three-wire system; Figure 8.15b	Eliminates error caused by temperature changes at leads	Sensitive to temperature change at gage Nonlinear at high strain levels	1.0	Most popular network for stress/strain analysis on structures
Half, with dummy gage; Figure 8.16a	No temperature effects	Dummy must be unstressed and bonded to same material and at same temperature as active gage	1.0	Long-term tests on structures where temperature variations are great and increased accuracy is required
Half, with both gages active, at 90° to each other (Poisson effect); Figure 8.16b	No temperature effects	Not suitable for biaxial stress fields	1.3	May be used on long columns or tendons subject to uniaxial loads
Half, with both gages fully active, equal tensile and compressive strains; Figure 8.16c	No temperature effects	Bridge network not always possible to achieve	2.0	Measurement of bending of beams Cantilever type transducers Torsional transducers
Full, with dummy gages; Figure 8.17a	No temperature effects	Most expensive	2.0	Rare
Full, with all gages active, two at 90° to other two (Poisson effect); Figure 8.17b	No temperature effects	Most expensive Not suitable for biaxial stress fields	2.6	Tension links or compression columns, for example, load cells
Full, with all gages fully active, two tensile, two compressive, equal strains; Figure 8.17c	No temperature effects Maximum output	Most expensive	4.0	Bending beams

<sup>a</sup>Output relative to quarter bridge network. See Figures 8.15-8.17. Assumes  $\Delta r = 0$ ,  $\mu = 0.3$ ,  $\Delta R$  is small compared with  $R$ , uniaxial stress field, and all gages at same temperature.

## (2) 시험말뚝의 시공

통상적인 말뚝시공방법과 동일하므로 구체적인 설명은 생략하였다. 그러나, 센서손상, 연결전선의 절단, 연결전선의 표식손실 등에 유의하여야 하며, 현장여건에 따라 추가적인 공기와 장비 등이 필요할 수도 있다.



### (3) 자동화 측정

말뚝재하시험이전 단계에서 예비 측정이 필요할 수도 있다. 즉, 센서설치 후, 시험말뚝시공 전과 후, 그리고 말뚝재하시험 실시 전까지의 기간중에도 초기치 설정 및 말뚝에 내재된 하중의 확인을 위한 측정을 실시하여야 한다. 특히, 항타말뚝의 경우에는 항타로 인하여 말뚝에 잔류되는 하중을 측정해야 하는데, 이 경우에는 동적인 신호를 집적해야 하므로 진동식 센서는 사용할 수가 없다.

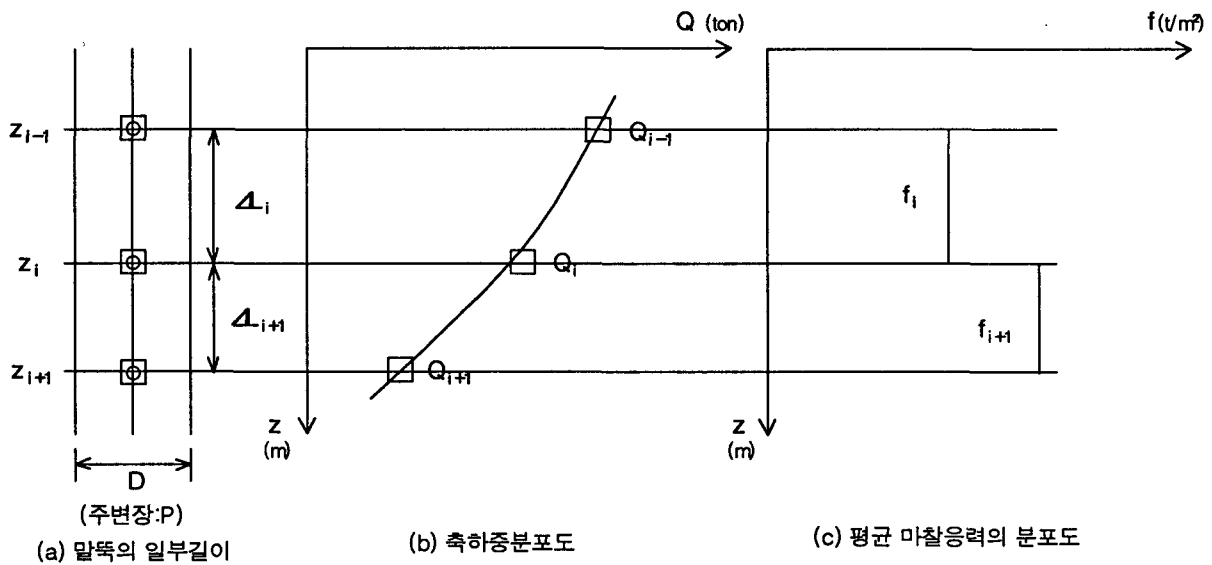
말뚝재하시험시 하중작용단계에 따라 연속적으로 말뚝축하중을 측정해야 하며, 반복 재하를 할 경우에 임의 주기의 하중 제하후 말뚝에 하중이 잔류하게 되는지를 반드시 확인하여야 한다.

말뚝재하시험이 완료되고 난 후 장기계측이 필요한 경우에는 시공단계별로 측정을 수행하고 사용중 거동확인을 위한 측정을 수행하여야 한다.

### (4) 하중전이 해석

초기치, 시공중 잔류하중 측정치, 말뚝재하시험시 측정치 등을 이용하여 깊이에 따른 말뚝축하중의 분포도를 결정하여야 한다.

예를 들어 임의 깊이들( $z_{i-1}$ ,  $z_i$ ,  $z_{i+1}$ )에서 측정된 말뚝 축하중이  $Q_{i-1}$ ,  $Q_i$ ,  $Q_{i+1}$ 이라면 이를 이용하여 마찰응력의 분포도를 식 (2)에 의해 구할 수 있으며, 임의 구간에 대한 평균마찰응력을 그림 3에서와 같이 구할 수도 있다.



$Q_{i-1}$ ,  $Q_i$ ,  $Q_{i+1}$  : 측정된 값

$$\text{평균 주변마찰 저항력 } f_i = \frac{\Delta Q}{\Delta A_s} = \frac{Q_{i-1} - Q_i}{P \cdot \Delta L_i}$$

$$\text{평균 주변마찰 저항력 } f_{i+1} = \frac{\Delta Q}{\Delta A_s} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{P \cdot \Delta L_{i+1}}$$

$$\text{단위선단저항력 } q_b = \frac{Q_B}{A_B}$$

그림 3 실험적인 하중전이 해석방법

## 5. 대구경 말뚝 정재하시험과 하중전이측정 사례

### 5.1 개요

#### (1) 말뚝정재하시험 위치

광안대로 건설공사 현장에서 대구경 말뚝에 대한 정재하시험이 수행된 1공구와 5공구의 시험위치를 그림 4에 나타내었다.

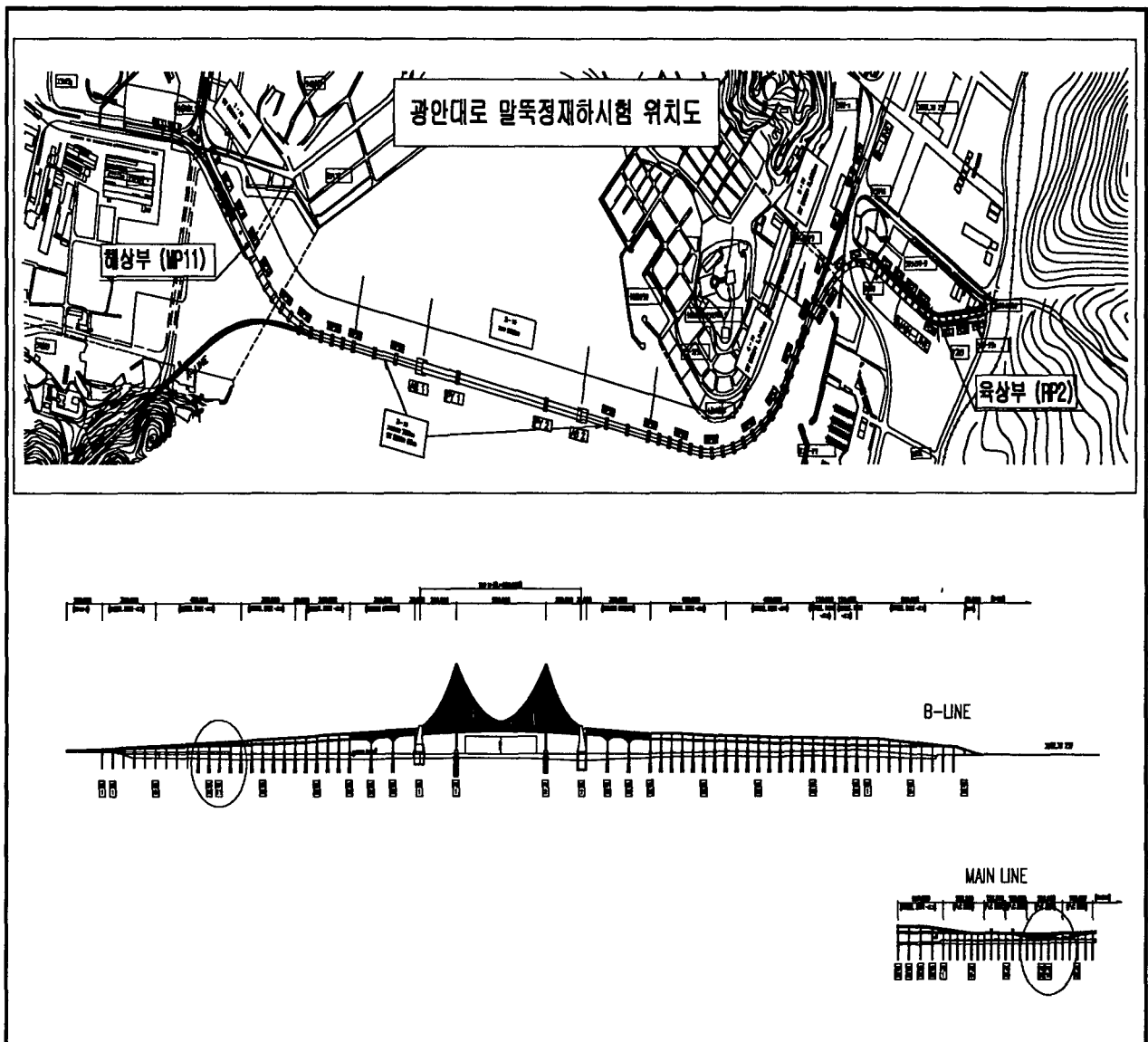


그림 4. 대구경말뚝 정재하시험 위치도

(2) 광안대로 말뚝정재하시험의 목적 및 의의

설계단계와 시공초기에는 수행되지 못하였으나 시공도중 실시되었으므로 건설예산절감 효과는 거둘 수 없었으나, 기시공된 말뚝기초들의 연직지지력과 침하에 대한 안정성 확인은 할 수 있었다. 또한, 설계단계에는 발견되지 않았던 깊은 연약대가 1공구와 5공구의 일부구간에 존재하는 것으로 확인되어, 깊은 연약대에 시공될 말뚝기초의 시공법을 결정하고 필요한 경우에는 보강대책을 강구해야 할 수도 있었다(최용규, 2000). 또한, 미미하나마 시공중 문제의 소지가 있었던 말뚝들(MP20 - MP11, MP12 - P8, PY2 - P3)에 대한 안정성 검토를 수행하였다.

광안대교 건설현장의 말뚝재하시험은 설계단계와 시공초기에 수행되지 못하여 최적화 설계에는 활용되지 못하였으므로 건설예산의 절감을 이루지 못하였으나 말뚝기초의 안정성확인에만 활용되어 아쉬움이 남는다. 그러나, 이와 같은 대구경 정재하시험결과는 향후 부산광역시외의 말뚝기초 설계기준의 작성에 활용되어질 수 있을 것으로 예상된다.

(3) 말뚝정재하시험 요약

광안대로 건설현장에서 수행된 대구경 시험말뚝들에 대한 정재하시험을 표 3에 요약하였다. 아울러, 1997년에 남항대교 실시설계시 수행된 강관말뚝에 대한 시험 개요도 수록하였다.

표 3. 대구경 시험말뚝에 대한 압축정재하시험 요약

구분		광안대교 건설공사			남항대교 실시설계
시험말뚝 기호		TP1	TP2	TP3	TP4
시험위치		5공구(육상)	1공구(해상)	1공구(해상)	2공구(해상)
교각위치-말뚝번호		RP2-P1	MP11-P6~13	MP11-P2~9	
말뚝형식		풍화대에 소켓된 현장타설말뚝	풍화대에 소켓된 강관말뚝	연암부에 소켓된 강관말뚝	풍화암 상부에 있는 자갈층에 지지
말뚝 제원	특징	실제말뚝	시험말뚝	시험말뚝	시험말뚝
	직경 (mm)	1,000	1,000	1,000	508 (t = 12 mm)
	길이 (m)	32	39.6	40.8	38~40
시험하중 (톤)		1,500	2,000		500
설계하중 (톤)		500	500		165
하중재하수단		반력앵커의 인발저항력 (Ø12.7×24공)	본말뚝(Ø = 2,500mm) 2개의 인발저항력		사하중 상재 (철근 500톤)
비고		계측센서 설치	계측센서 설치	계측센서 설치	계측센서 설치

## 5.2 사례 1 (TP1, 풍화암에 소켓된 대구경 현장타설말뚝)

### (1) 센서 설치

시험말뚝 TP1에 대한 현장의 시공일정이 촉박한 상황이었어서 축하중 측정용 계측센서를 제작하지 못하고 진동식(vibrating type) 센서를 구입하여 현장에서 설치하였다.

현장타설콘크리트 말뚝은 콘크리트와 철근으로 구성되어 있으므로 각 부재에 작용되는 하중의 크기를 알아내야 한다. 따라서, 콘크리트 응력계와 철근응력계를 각각 설치하였으며 임의 깊이당 콘크리트응력계와 철근응력계를 각각4개씩 설치하였다. 또한, 철근에는 전기저항식 스트레인 게이지를 완전결선회로(full bridge circuit)를 구성하도록 설치하여 보완적인 역할을 할 수 있도록 하였다. TP1에 설치한 축하중 측정용 센서의 위치 및 사용 수량은 그림 5에 도시하였다.

### (2) 시험말뚝의 시공

RCD장비를 이용하여 굴착을 완료하고 철근망을 삽입하는데, 이 때 각 철근망에는 센서와 연결전선들이 매달려 있으므로 철근망 삽입시에 주의를 기울여야 했다. 하부 철근망에 있는 연결전선을 상부철근망에 고정시키면서 철근망을 서서히 삽입하였다. 여기서, 수평재하시험시 지중의 수평변위를 측정하기 위한 경사계관도 설치하였다. 철근망의 삽입이 완료되면 콘크리트를 타설하였다. 이때 콘크리트 타설과 함께 외부케이싱을 인발해야 하는데 외부케이싱의 인발에 의한 연결전선의 손상을 방지하기 위하여 연결전선 여분의 길이는 절단하여 두었다. 차후의 전선연결 시 식별할 수 있도록 표시를 해두는 것을 잊지 말아야 하였다. 또한, 트레미관의 인양시 설치된 센서들이 손상받지 않도록 주의하여야 하였다. 콘크리트 타설이 완료되면 절단해둔 전선을 연결해 주었다. 센서 설치완료후, 철근망 삽입전, 철근망 삽입후, 콘크리트타설 직후에 각각 센서의 값을 측정하였으며, 말뚝재하시험전까지 주기적으로 또는 간헐적으로 측정을 계속하였다.

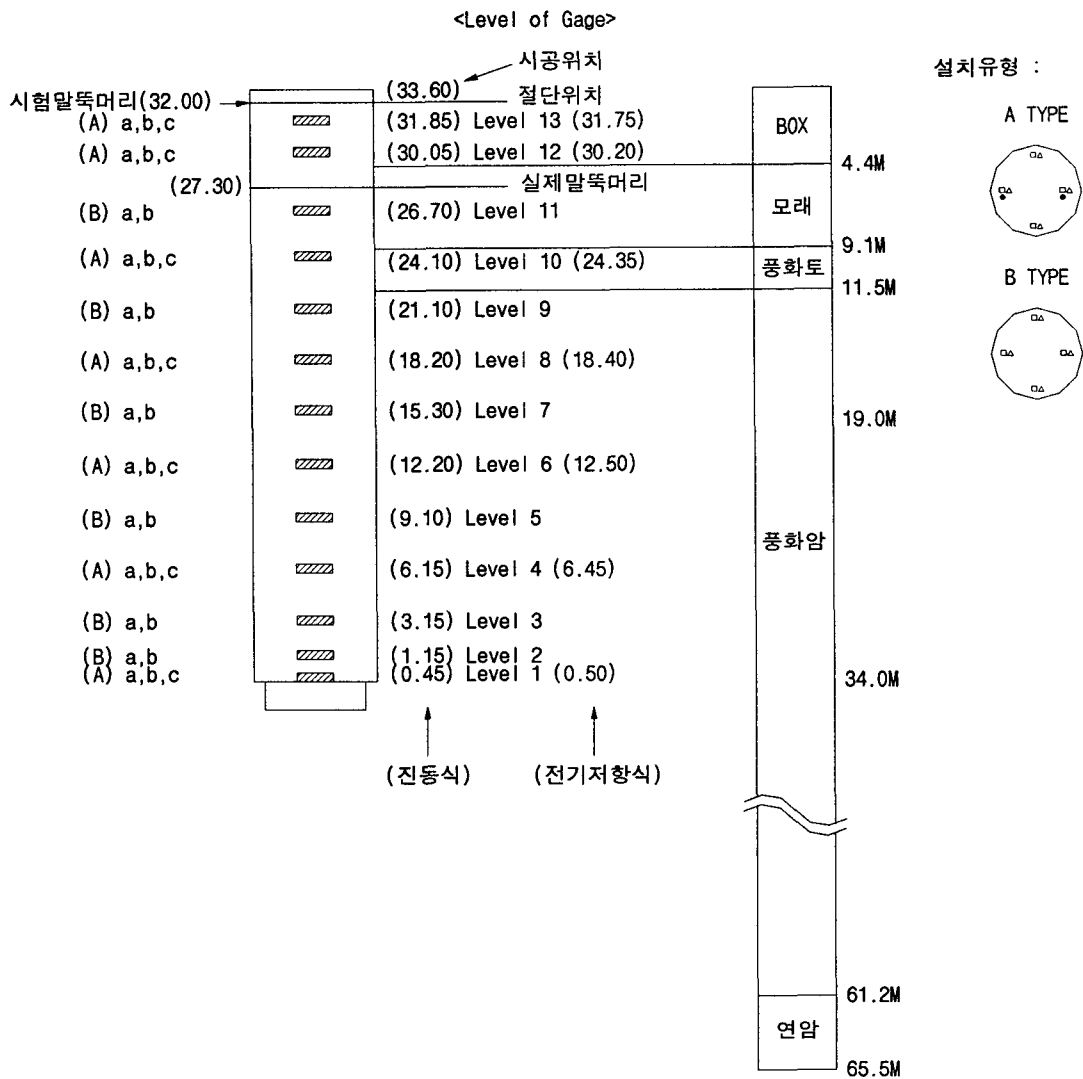
### (3) 말뚝재하시험 수행 및 축하중전이 측정

TP1은 육상부에 시공된 현장타설말뚝이었으며, 인접하여 시공된 말뚝들을 반력말뚝으로 사용하는 것이 불가능하였으므로 지중앵커를 시공하여 저항력을 반력으로 사용하였다. 직경 12.7 mm의 앵커를 시험말뚝의 양쪽에 대칭되게 12개씩(한쪽에 6개씩 2열) 배열하였다.

TP1에 대한 말뚝정재하시험 전경은 사진 1에 나타내었다. 여기서, 500톤 유압잭 4개와 유압센서 4개, LVDT 4개를 사용하여 말뚝머리에 작용된 하중과 침하량을 자동측정시스템을 통하여 계측하였다. 하중재하단계는 125톤(설계하중의 25%)씩 증가시켜 12단계로 설정하였으며, 250톤(설계하중의 50% 단계) 증가 단계마다 재하하여 6주기로 재하하였다. 각 주기별 하중단계는 표 4에 나타내었다. 최대재하단계인 1,500톤에서 12시간 대기하는 것을 계획하였으나 콘크리트 부재의 항복이 유발되어 1,200톤으로 하중을 줄여 장기거동을 확인하였다.

말뚝축하중측정은 진동현식센서와 전기저항식센서를 함께 측정할 수 있는 자동측정시스템인 CR10X를 사용하였으며, 약 3분 간격으로 실시간 측정을 실시하였다.

# RP 2



재 료 표					
품 명	기 호	산출근거	할증	계	비 고
철근응력계-(진동식)	□ a	13개소x4개=52개	10%	57	제 작
콘크리트응력계-(진동식)	△ b	13개소x4개=52개	10%	57	제 작
철근응력계-(전기저항식)	● c	7개소x2개x2개=48개	10%	53	제 작

그림 5. TP1 (현장타설말뚝)에 대한 센서 설치도

표 4. 각 주기별 하중재하 단계

주기	재하단계	Q/Q <sub>D</sub> <sup>1)</sup> (%)
①	0t → 125t → 250t → 125t → 0t → Next Cycle	50
②	0t → 250t → 375t → 500t → 300t → 375t → 250t → 0t → Next Cycle	100
③	0t → 250t → 500t → 625t → 750t → 625t → 500t → 250t → 0t → Next Cycle	150
④	0t → 250t → 500t → 750t → 875t → 1000t → 875t → 750t → 500t → 250t → 0t → Next Cycle	200
⑤	0t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1150t → 1000t → 750t → 500t → 250t → 0t → Next Cycle	250
⑥	0t → 125t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1150t → 1250t → 1375t → 1500t <sup>2)</sup> → 1200t <sup>3)</sup> → 1000t → 750t → 500t → 250t → 0t → End	300

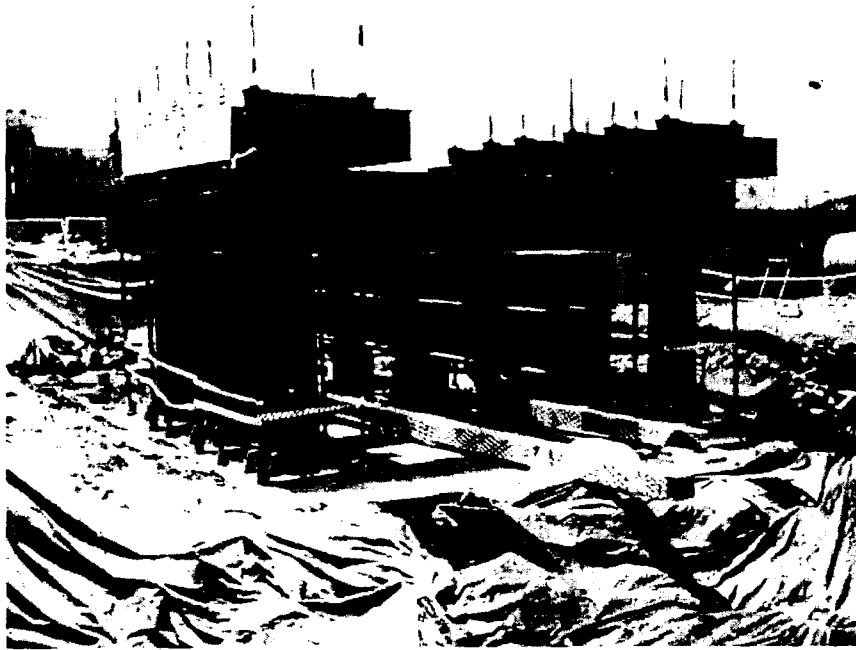


사진 1. TP1에 대한 정재하시험 전경

(4) 말뚝재하시험 결과

1) 말뚝머리하중 - 침하량 관계

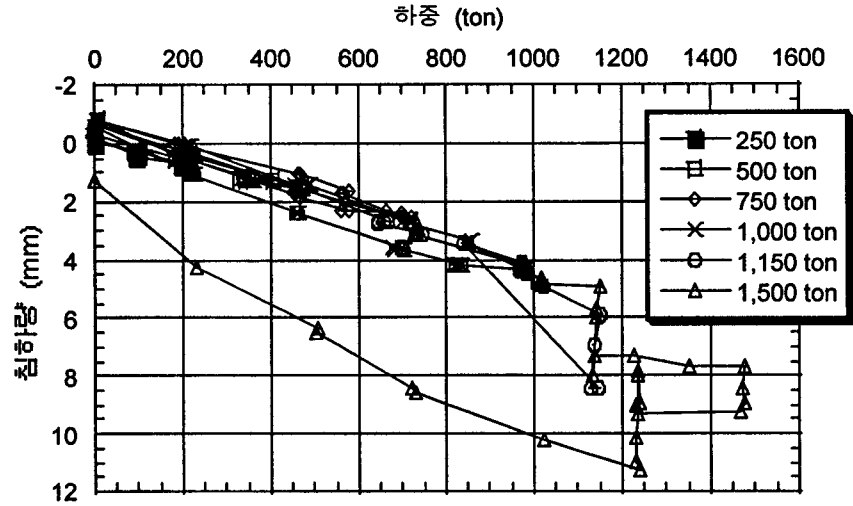


그림 6. 말뚝머리하중-침하량 관계

2) 말뚝축하중 분포도

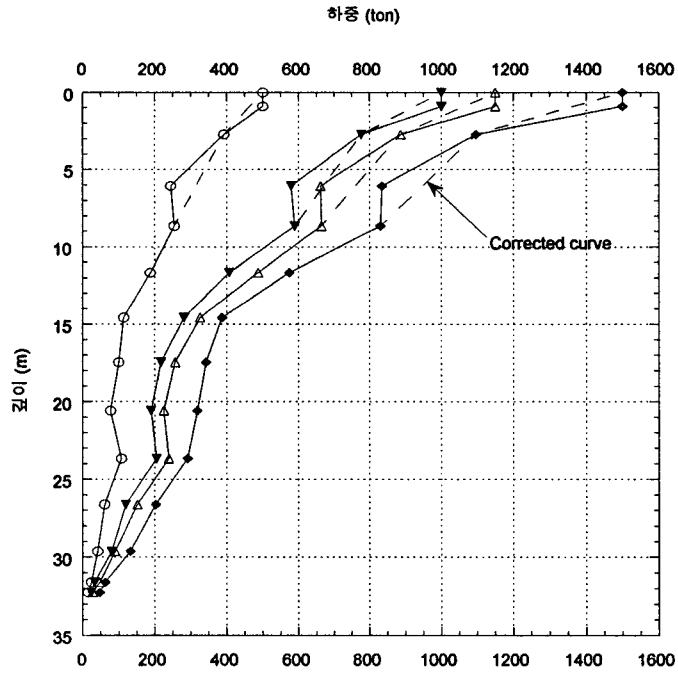
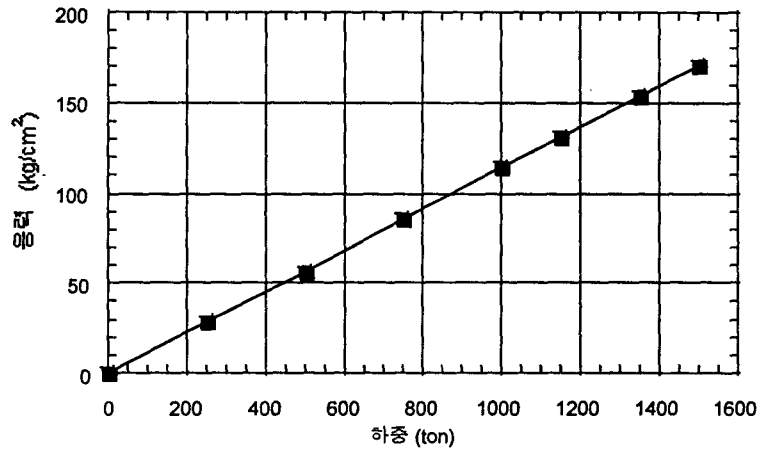
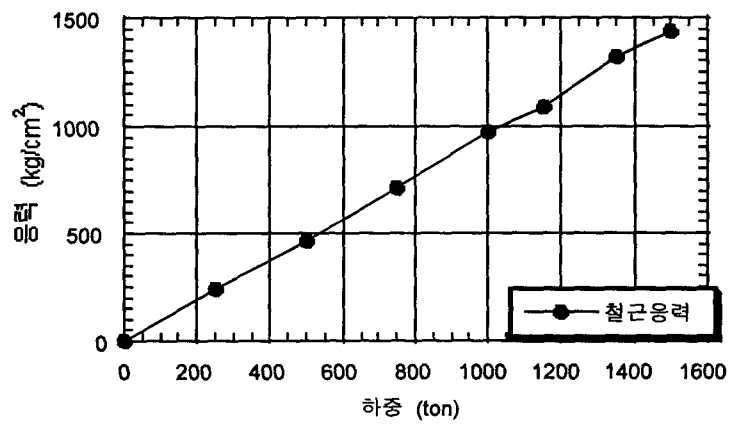


그림 7. 말뚝축하중 분포도

3) 말뚝구성재료에 발생하는 응력



(a) 콘크리트 응력



(b) 철근 응력

그림 8. 말뚝구성재료에 발생하는 응력



4) 각 지층에 발생된 마찰 저항력 분포도

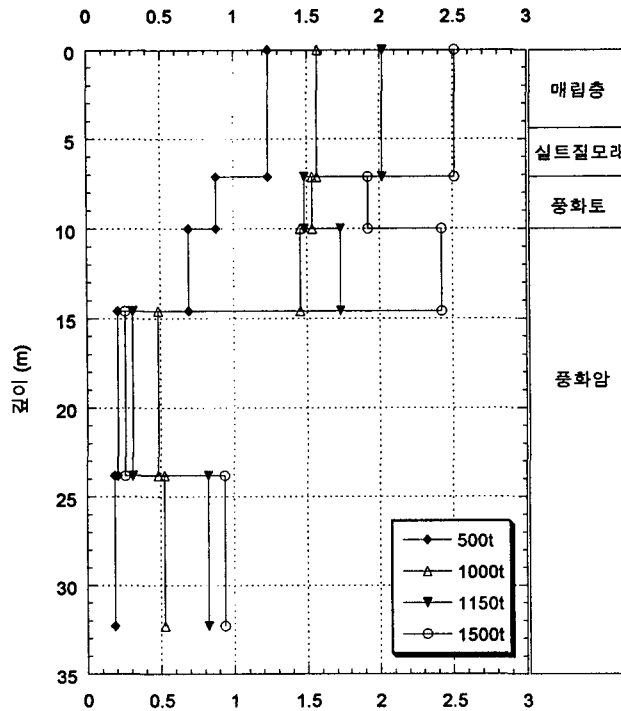


그림 9. 각 지층에 발생된 평균 마찰저항력

(5) 요약

그림 6에는 말뚝머리하중 - 침하량 - 시간의 관계를 도시하였는데, 여기서, 말뚝머리에 1,500톤의 하중이 작용할 때까지 하중과 침하량의 관계가 선형적임을 알 수 있었다. 다만, 1,150톤 하중단계에서 침하량이 다소 크게 발생되었다가 회복되는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 시험말뚝 두부에 무수축콘크리트로 두부정리를 하였는데 이부분에서 균열이 유발되어 침하가 발생한 것으로 확인되었다.

그림 8에는 하중재하단계에 따른 말뚝두부근처에서 발생된 콘크리트응력의 크기를 도시하였는데 1,500톤 재하하중에서 콘크리트의 항복응력을 초과하고 있는 것을 확인하였으며 더 이상의 하중을 재하할 경우 시험말뚝이 손상될 가능성이 있을 것으로 판정하여 하중재하를 종료하였다. 특히, TP1은 실제 말뚝을 시험말뚝으로 사용한 경우였다. 즉, 지반의 지지력이 큰 경우에는 말뚝부재의 항복응력을 초과하여 말뚝이 급작스럽게 파괴될 수 있으므로 하중 - 침하량 곡선만으로 항복이나 파괴를 판단할 것이 아니라 말뚝부재에 발생하는 응력의 크기도 함께 고려하여야 할 것으로 판단되었으며, TP1의 말뚝재하시험에서는 시험말뚝의 구성부재에 발생하는 응력의 크기를 제어하여 실제말뚝으로 사용될 시험말뚝에 손상을 주지않고 말뚝재하시험을 성공적으로 수행하였다.

그림 7에는 측정된 깊이에 따른 말뚝축하중의 분포양상을 도시하였다. 여기서, 말뚝에 작용된 전체하중이 마찰지저력과 선단지저력에 의해 저항하는 양상을 확인할 수 있었는데, 최대재하하중 1,500톤의 재하단계에서도 TP1은 마찰지저력으로 거동하였으며 마찰력의 대부분은 말뚝의 상부깊이에서 발휘되었다. 이와 같은 하중지저특성을 확인하기 위하여 축하중계측센서의 설치가 필요하였다.

### 5.3 사례 2와 사례 3 (TP2 와 TP3, 풍화암과 연암에 소켓된 대구경 강관말뚝)

#### (1) 센서 설치

##### 1) TP2 와 TP3에 대한 센서 설치

TP2와 TP3에 대한 현장작업일정은 다소 여유가 있었으므로 변형봉 센서(경성대학교 지반공학 연구실 자체 제작)를 실내에서 제작하여 현장에서 설치하는 것으로 계획하였다. 변형봉 센서의 제작공정은 본 연구팀이 고안한 독특한 방식이므로 여기에서는 자세하게 설명하지 않기로 하였으며 현재 특허출원을 준비하고 있는 중이다. 복잡한 제작공정을 거쳐 실내에서 제작한 변형봉 센서를 현장에서 말뚝 각 구성부재에 설치하였다. 즉, 말뚝하부 철근콘크리트부에는 콘크리트와 철근에 센서를 설치하였으며, 강관부에는 강관과 속채움콘크리트에 센서를 설치하였다. 센서설치에 관한 자세한 과정은 참고문헌(부산광역시 건설본부, 2000; 최용규, 2000)에 설명되었다. 그림 10에는 TP2에 대한 센서설치도를 도시하였으며 그림 11에는 TP3에 대한 센서설치도를 도시하였는데, 각각의 경우 철근콘크리트부에 대한 센서설치 간격은 다소 상이하였다.

TP2에서는 철근콘크리트부의 길이가 짧아 약 1 m의 간격으로 센서설치를 하였으며, TP3에서는 철근콘크리트부의 길이가 길어 약 2 m간격으로 센서설치를 하였다. 임의 깊이에서는 콘크리트응력계와 철근응력계(또는 강관응력계)를 각각4개씩 설치하였다.

##### 2) 반력말뚝에 대한 센서 설치

해상부에서는 실제말뚝을 반력말뚝으로 사용하기로 계획하였으므로 인발력에 대하여 실제 말뚝이 손상되지 않아야 하였으므로 콘크리트응력계와 철근응력계(또는 강관 응력계)를 설치하였다. 반력말뚝에 대한 시공일정이 촉박하였으므로 변형봉센서를 자체 제작할 시간이 없어 진동식 센서를 구입하여 설치하였다.

TP3에 대한 반력말뚝들에는 센서를 설치할 수 있었으나(그림 12), TP2에 대한 반력말뚝에서는 시공일정이 맞지않아 센서를 설치할 수 없었다.

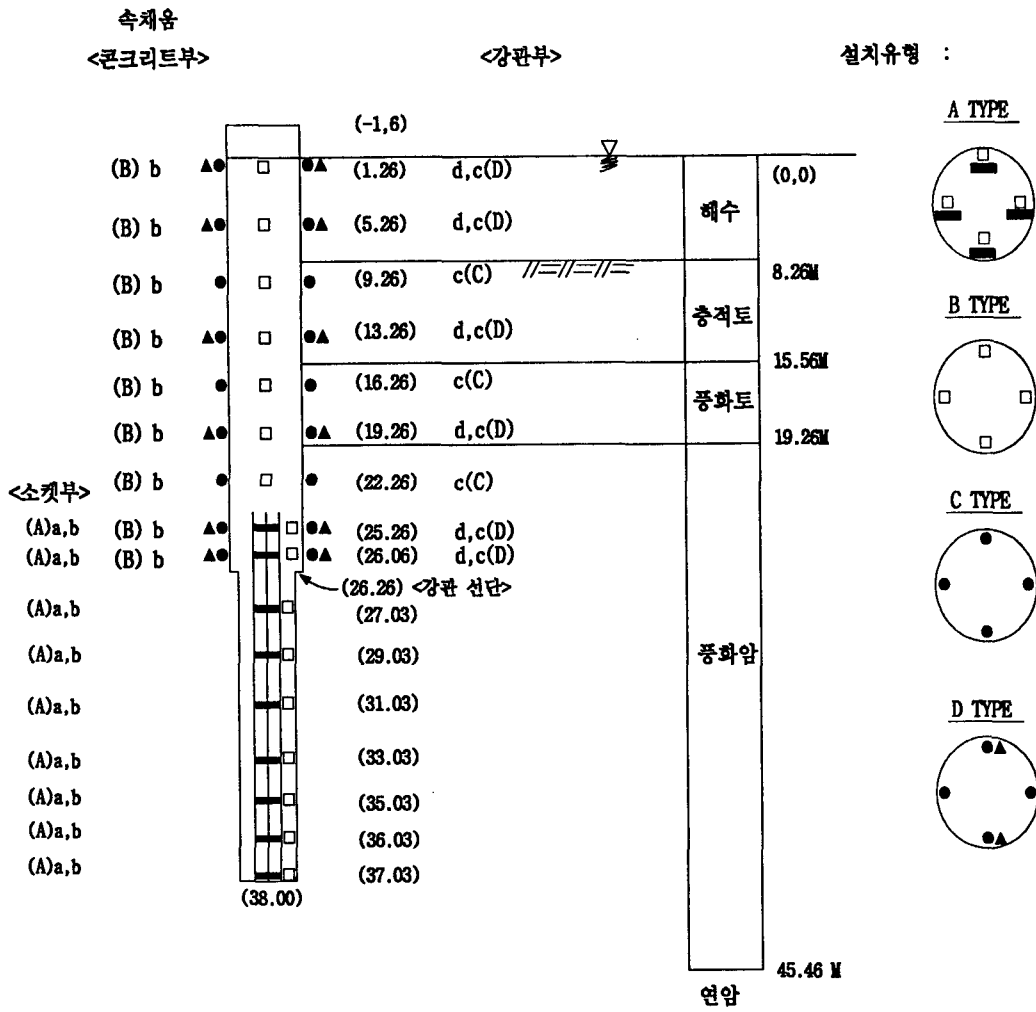
#### (2) 시험말뚝시공

시험말뚝 시공시 주의하여야 할 사항들은 TP1의 경우에서 이미 설명하였으므로 여기에서는 시험강관말뚝과 실제 강관말뚝의 시공상 차이점만 설명하였다.

실제강관 말뚝은 직경이 극대구경( $\phi = 2,500 \text{ mm}$ )이었으므로 철근콘크리트부와 강관속채움부를 구분하여 콘크리트를 타설할 수 있었으나 시험강관말뚝에서는 직경이 1,000 mm이었으므로 작업성의 문제로 인하여 연속적으로 한번에 콘크리트를 타설하였다.

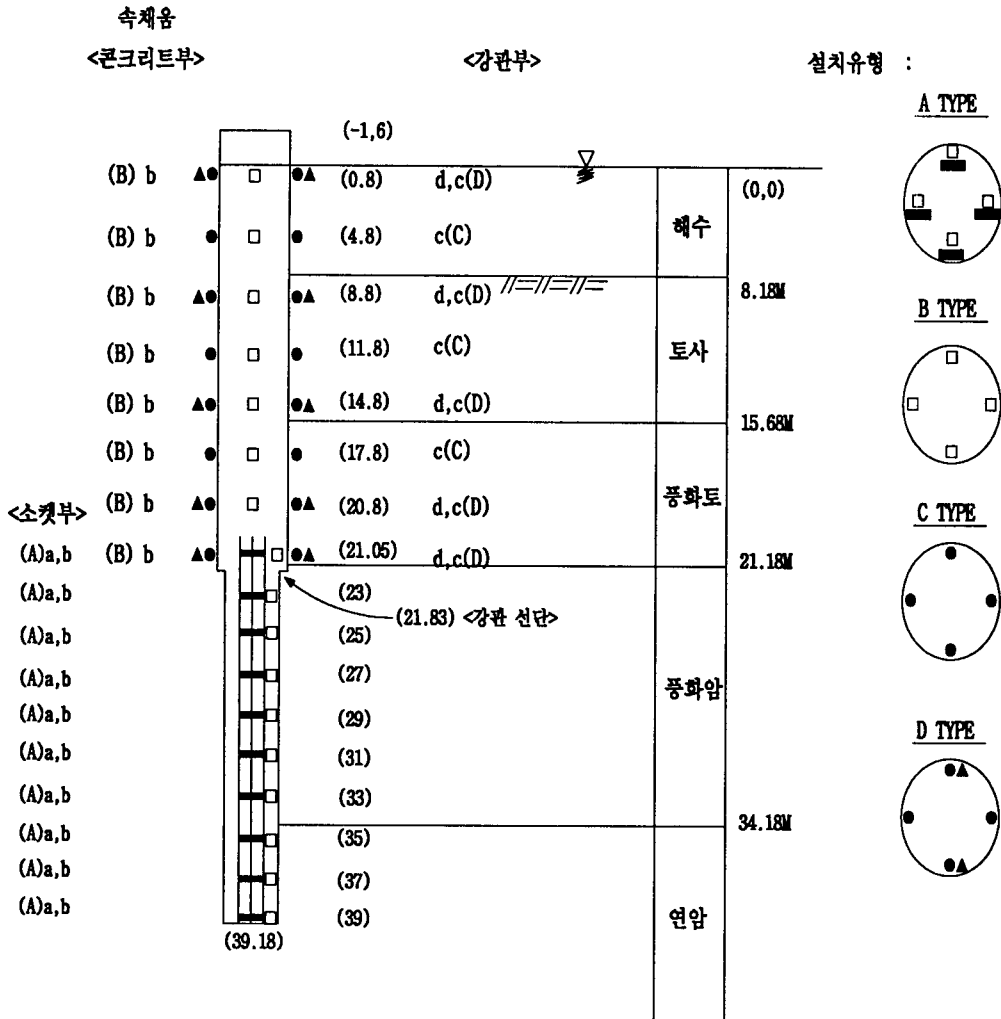
#### (3) 말뚝정재하시험 수행 및 축하중전이 측정

해상부에 시공된 소켓강관말뚝이었으며, 시공된 실제말뚝들(즉, 반력말뚝들)의 중간에 시공되었으므로 실제 말뚝들을 반력말뚝으로 사용할 수 있었다. 반력말뚝이 극대구경이었으므로 반력말뚝에 창을 만들어 재하대를 끼워넣어 고정시켜 재하장치의 안정성을 확보할 수 있었다. 해상부 시험말뚝 TP2와 TP3에 대한 시험전경을 사진 2와 3에 수록하였으며, TP3에 대한 반력말뚝, 지지대 고정용 말뚝들의 배치상태를 그림 13에 도시하였다. 해상시험의 경우 지지대를 고정시킬 수 있는 고정된 부분이 없으므로 지지대를 확보하는 것이 매우 어려울 수 있으나 본 현장에서는 주변에 시공된 실제말뚝들이 기하학적으로 잘 배치되어 있어 지지대 고정이 가능하였다. 반력말뚝들에는 최대 1,000톤의 인발력이 작용될 수 있었으므로 인발에 대한 반력말뚝들의 안정성을 확보하는 것이 중요하였다. 따라서, TP3의 경우에는 반력말뚝에도 센서를 설치하였고 반력말뚝들이 연암부에 소켓되어 있어 인발에 대한 우려가 없는 것으로 판단되었다. 그러나, TP3의 경우에는 반력말뚝들에 센서를 설치하



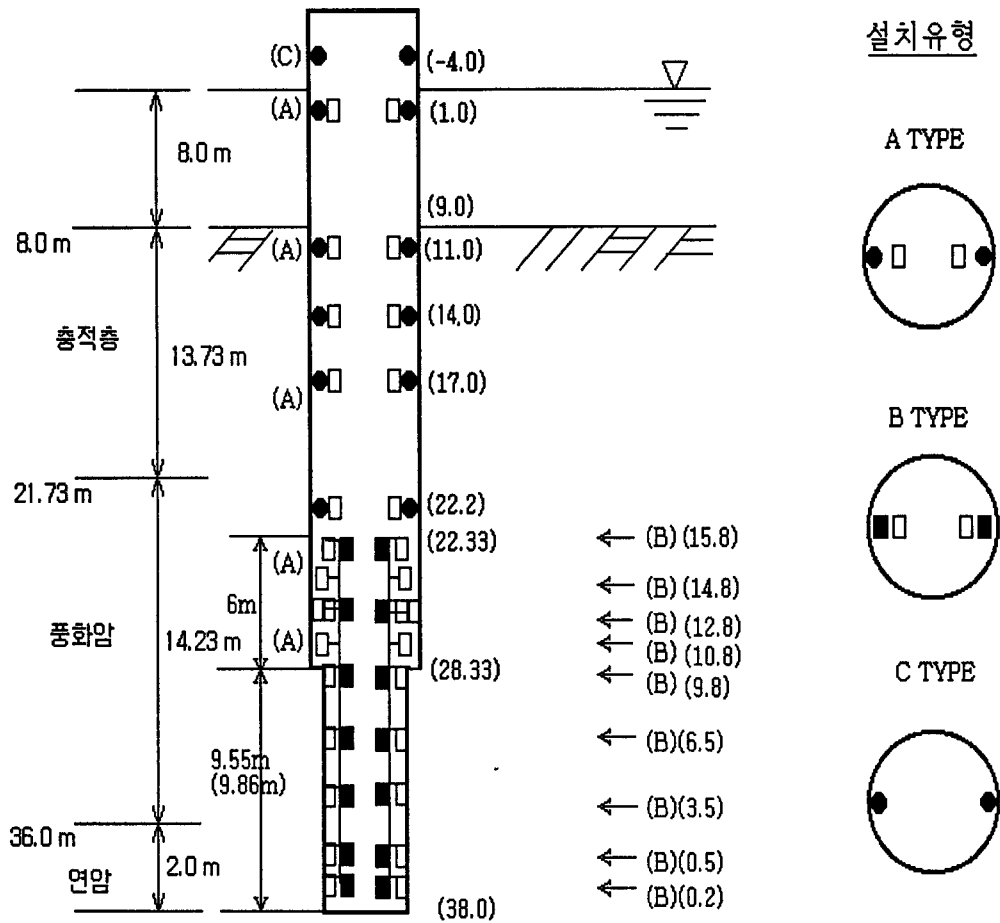
재료표						
설치부위	품명	기호	산출근거	할증	계	비고
소켓부 및 속채움 콘크리트	철근응력계 (전기저항식)	■ a	9개소 × 4개 = 36개	10%	40	제작
	콘크리트응력계 (전기저항식)	□ b	16개소 × 4개 = 64개	10%	70	제작
강관	강관 응력계 (전기저항식)	● c	9개소 × 4개 = 36개	10%	40	제작
	진동현식 스트레인게이지	▲ d	6개소 × 2개 = 12개	10%	13	구입

그림 10. TP2에 대한 센서 설치도



재료표						
설치부위	품명	기호	산출근거	할증	계	비고
소켓부 및 속채움 콘크리트	철근용력계 (전기저항식)	■ a	10개소 × 4개 = 40개	10%	44	제작
	콘크리트용력계 (전기저항식)	□ b	16개소 × 4개 = 64개	10%	71	제작
강관	강관 용력계 (전기저항식)	● c	8개소 × 4개 = 32개	10%	35	제작
	진동현식 스트레인게이지	▲ d	5개소 × 2개 = 10개	10%	11	구입

그림 11. TP3에 대한 센서 설치도



재 료 표					
설치부위	품 명	기호	산출근거	소요수량 (개)	비고
소켓부	철근응력계	■	7개소×2개 = 14개	15	제작
	콘크리트응력계	□	10개소×2개 = 20개	22	제작
강관부	강관응력계	●	6개소×2개 = 12개	13	제작
속채움 콘크리트부	콘크리트응력계	□	5개소×2개=10개	11	제작

그림 12. 반력말뚝에 대한 센서 설치도

지 못하였고 반력말뚝들이 풍화대에 소켓되어 있어 인발 가능성이 높을 것으로 판단되었으나 재하시험중 반력말뚝에 인발변위계를 설치하여 세심하게 관찰한 결과 실제말뚝의 인발은 우려할 상황은 아니었다.

TP2와 TP3에는 최대 2,000톤까지 재하하였으며, 하중은 125톤씩 16단계로 증가시켰으며 250톤 증가 단계마다 제하하여 8주기로 반복적으로 재하하였다. 8개 주기에 대한 하중단계를 표 5에 나타내었다. 최대 재하하중단계에서 12시간이상 재하하여 장기거동을 확인하였다.

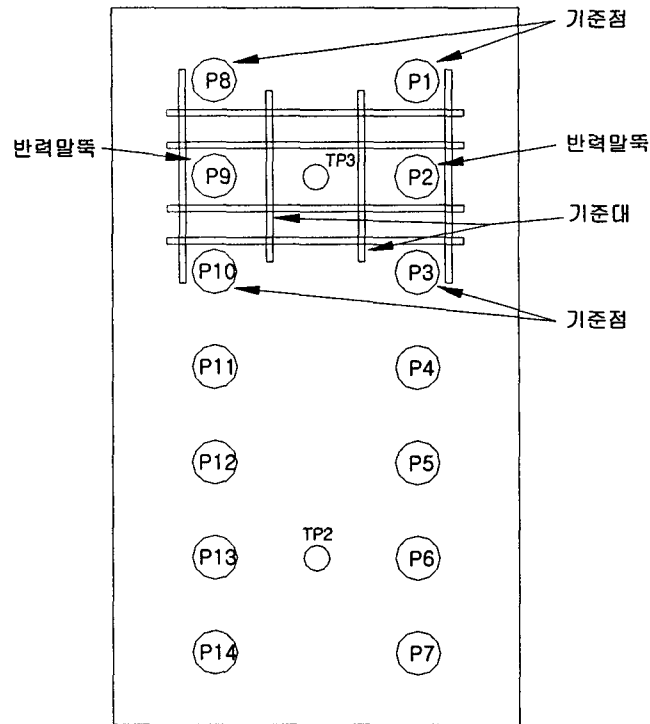


사진 2. TP2에 대한 정재하시험 전경



사진 3. TP3에 대한 정재하시험 전경

MP 11



시험말뚝	반력말뚝	기준점
TP2	P6 / P13	P5 & P7 / P12 & P14
TP3	P2 / P9	P1 & P3 / P8 & P10

그림 13. TP3에 대한 재하시험 장치 배치도

표 5. 각 하중 재하주기에서의 하중단계

주기	재하단계	Q/Q <sub>D</sub> (%)
①	0t → 125t → 250t → 125t → 0t → Next Cycle	50
②	0t → 125t → 250t → 375t → 500t → 300t → 0t → Next Cycle	100
③	0t → 125t → 250t → 500t → 625t → 750t → 600t → 300t → 0t → Next Cycle	150
④	0t → 125t → 250t → 500t → 750t → 875t → 1000t → 800t → 600t → 300 → 0t → Next Cycle	200
⑤	0t → 125t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1125t → 1250t → 1000t → 700t → 300 → 0t → Next Cycle	250
⑥	0t → 125t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1250t → 1375t → 1500t → 1200 → 800t → 400t → 0t → Next Cycle	300
⑦	0t → 125t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1250t → 1500t → 1625t → 1750t → 1400t → 1100t → 700t → 300t → 0t → Next Cycle	350
⑧	0t → 125t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1250t → 1500t → 1750t → 1875t → 2000t → 1700t → 1300t → 800t → 300t → End	400

(4) 말뚝재하시험결과

1) TP2에 대한 결과

① 말뚝머리하중 - 침하량 관계

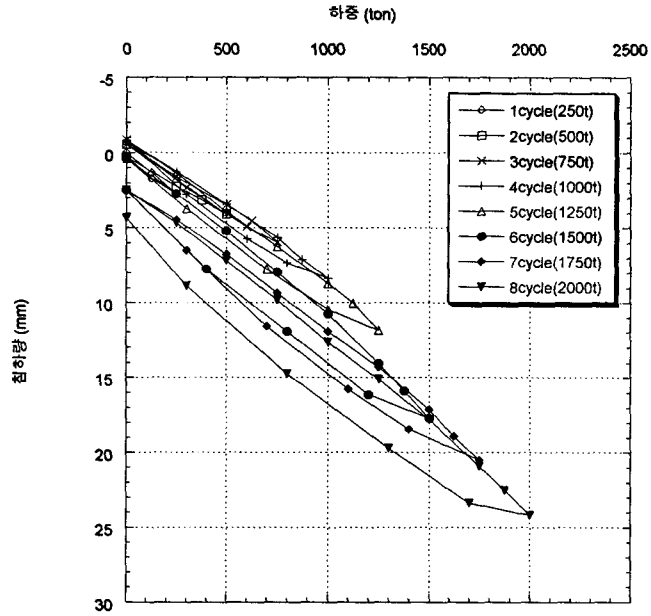


그림 14. 말뚝머리하중 - 침하량 관계 (TP2)

② 말뚝축하중 분포도

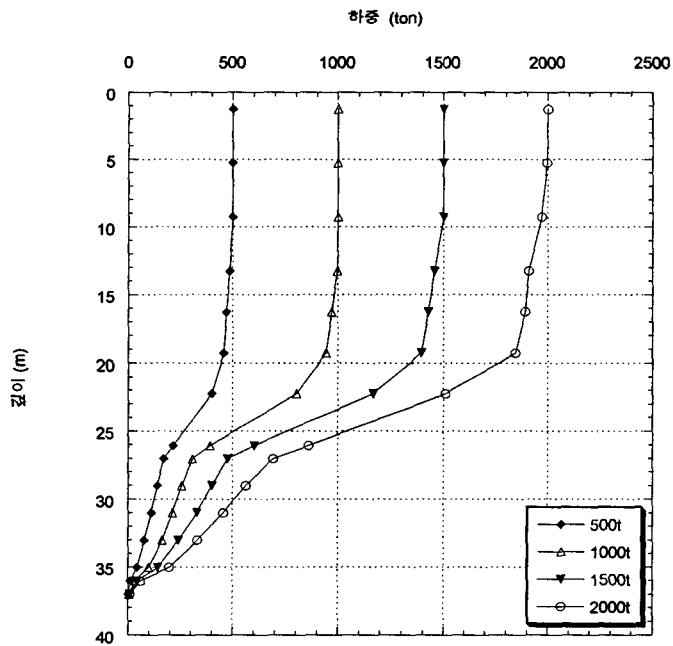
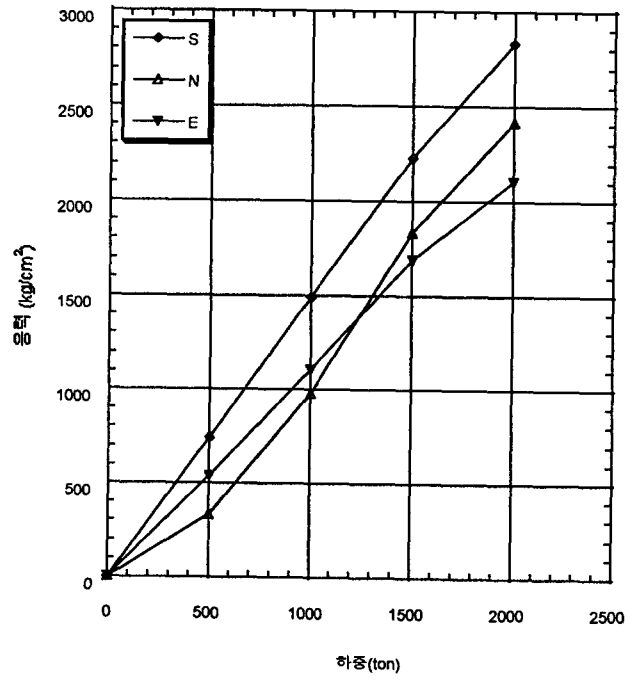


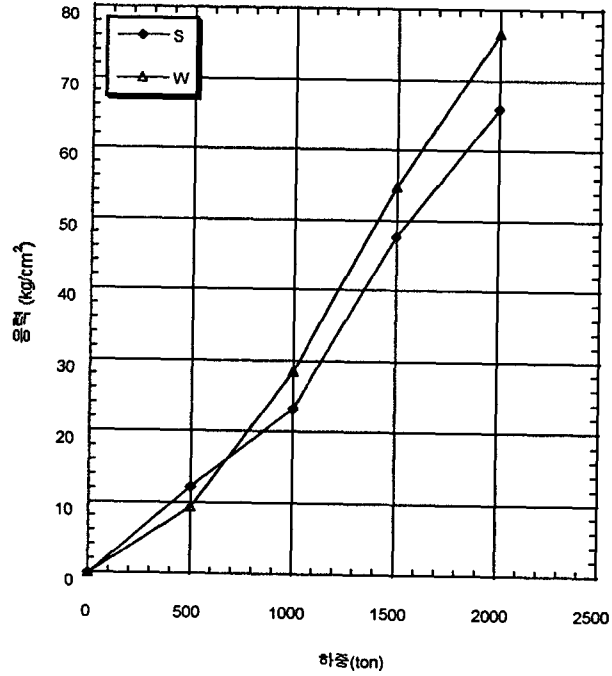
그림 15 말뚝축하중의 분포도 (TP2)



③ 말뚝구성재료에 발생된 응력



(a) 강관부의 응력 측정치



(b) 속채움콘크리트부의 응력 측정치

그림 16. 말뚝구성재료에 발생된 응력

④ 마찰저항력의 분포도

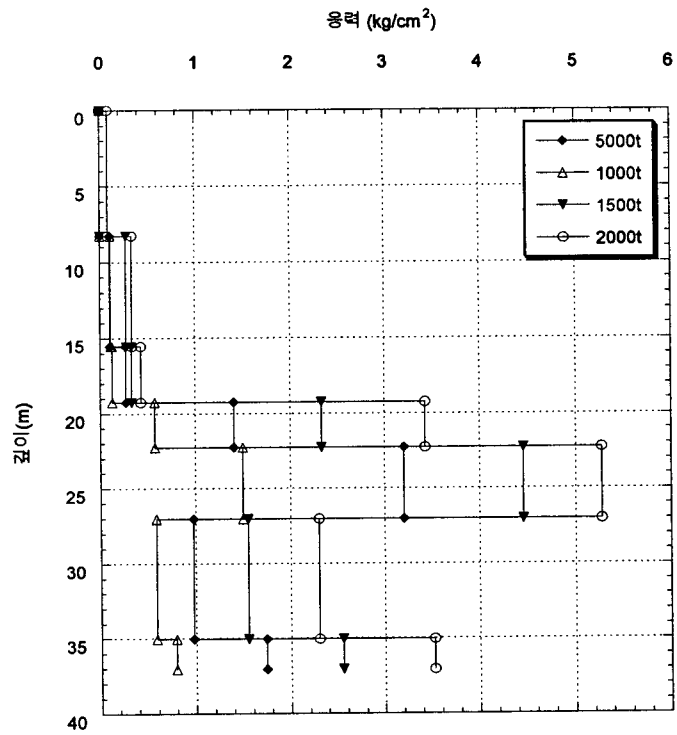


그림 17. 각 지층에서 발생된 평균마찰저항력의 분포도

2) TP3에 대한 결과

① 말뚝머리하중 - 침하량관계

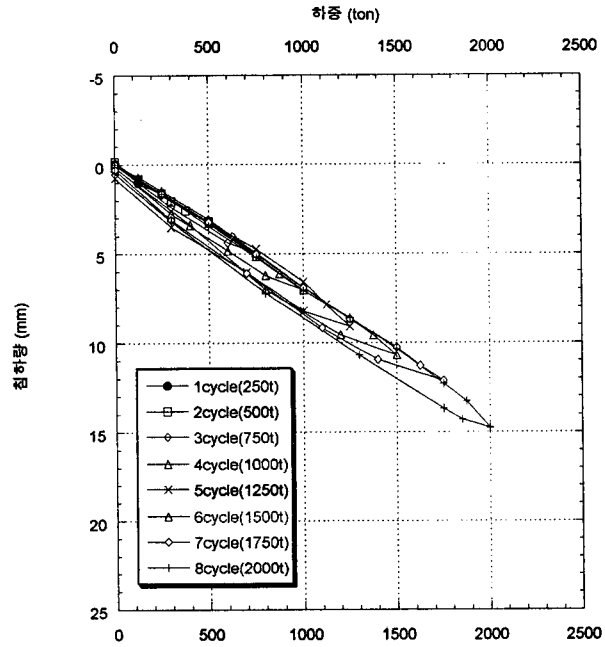


그림 18. 말뚝머리하중 - 침하량관계 (TP3)

② 말뚝머리축하중 분포도

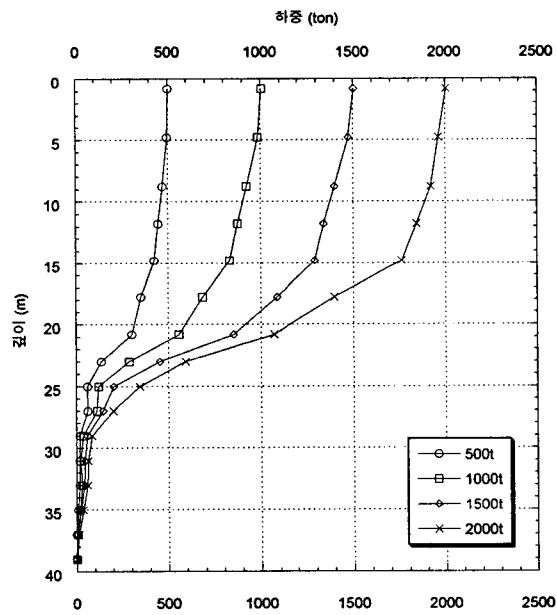
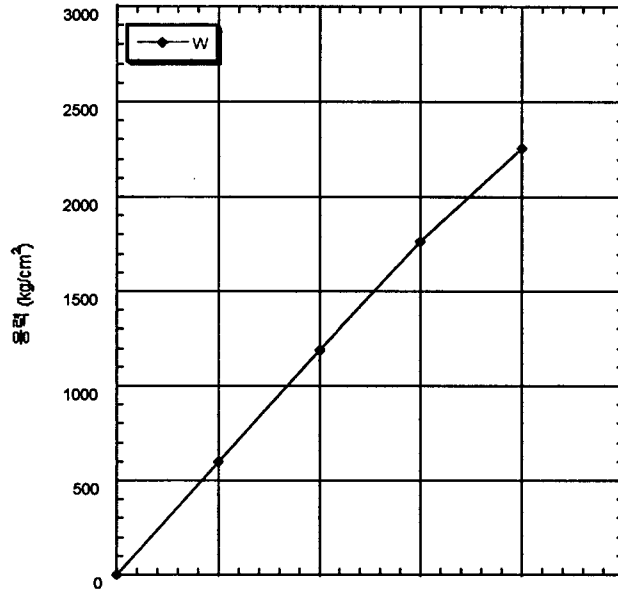
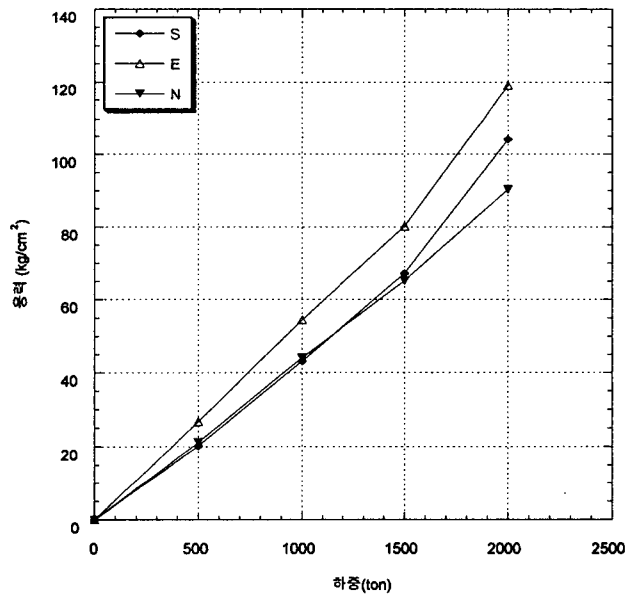


그림 19. 말뚝축하중 분포도 (TP3)

③ 말뚝구성재료에 발생된 응력



(a) 강관부의 응력 측정치



(b) 속채움콘크리트부의 응력 측정치

그림 20. 말뚝구성재료에 발생된 응력

④ 말뚝머리축하중 분포도

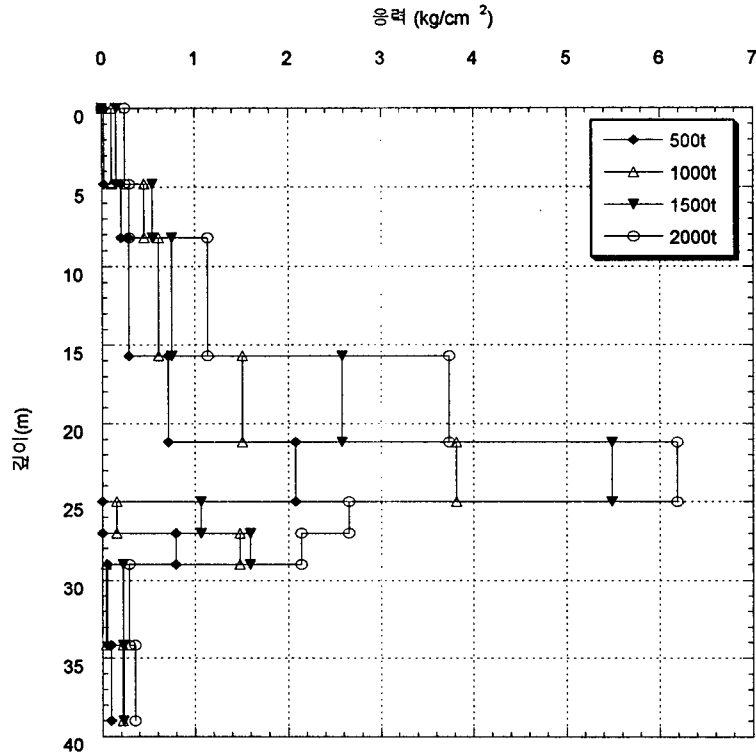


그림 21. 각 지층에서 발생된 평균마찰저항력의 분포

(5) 요약

그림 14과 18은 풍화대와 연암에 소켓된 강관말뚝에 대한 말뚝머리하중 - 침하량 관계이다. 최대재하용량 2,000톤에서도 풍화대에 시공된 소켓말뚝의 하중 - 침하량 관계가 선형적으로 나타났으며 침하량측면에서도 안전측으로 나타나고 있는 것을 알 수 있었다. 따라서, 연암에 소켓된 강관말뚝은 물론이고 풍화대에 소켓된 말뚝에서도 충분한 지지력이 확보되는 것을 확인할 수 있었다. 설계하중 500톤의 4배인 최대재하하중 2,000톤에서는 극한하중을 확인할 수 있을 것으로 예상하였으나 항복하중마저도 확인할 수 없는 상태이었다. 이와 같은 결과에서 우리나라의 말뚝설계관행상의 문제점을 추론해 볼 수 있는데, 말뚝의 지지력을 과소평가하여 극히 안전측으로 사용하고 있으며, 풍화대에 소켓되는 말뚝의 설계를 꺼리고 있다는 점이다.

그림 15과 19에는 TP2와 TP3에 대한 관입깊이에 따른 말뚝축하중의 분포를 도시하였다. 최대재하하중 2,000톤에서도 말뚝은 마찰지지 거동을 하고 있었으며 대부분의 하중을 풍화대에 관입된 소켓부에서 지지하고 있었다. TP2의 경우에는 풍화대에 관입된 소켓부의 마찰저항력에 의해 지지되고 있었다. TP3의 경우에는 연암에 5 m정도 소켓되어 있음에도 불구하고 풍화토층과 상부풍화대층에 관입된 소켓부의 마찰저항력에 의해 지지되고 있었으며, 하부풍화대층과 연암층에 관입된 소켓부에서는 저항력이 거의 발생하지 않았다. 따라서, 풍화대가 깊을 경우 풍화대를 관통하여 연암에 말뚝의 선단을 소켓시키는 설계관행은 너무 비경제적인 것으로 판단되었으며, 풍화대도 충분한 지지층이 될 수 있음을 확인하였다.

## 5.4 사례4 (TP4, 개단강관말뚝)

■ 말뚝제원 (직경 : 508 mm, 두께 : 12 mm, 관입길이 : 38 - 42 m)

(1) 센서설치

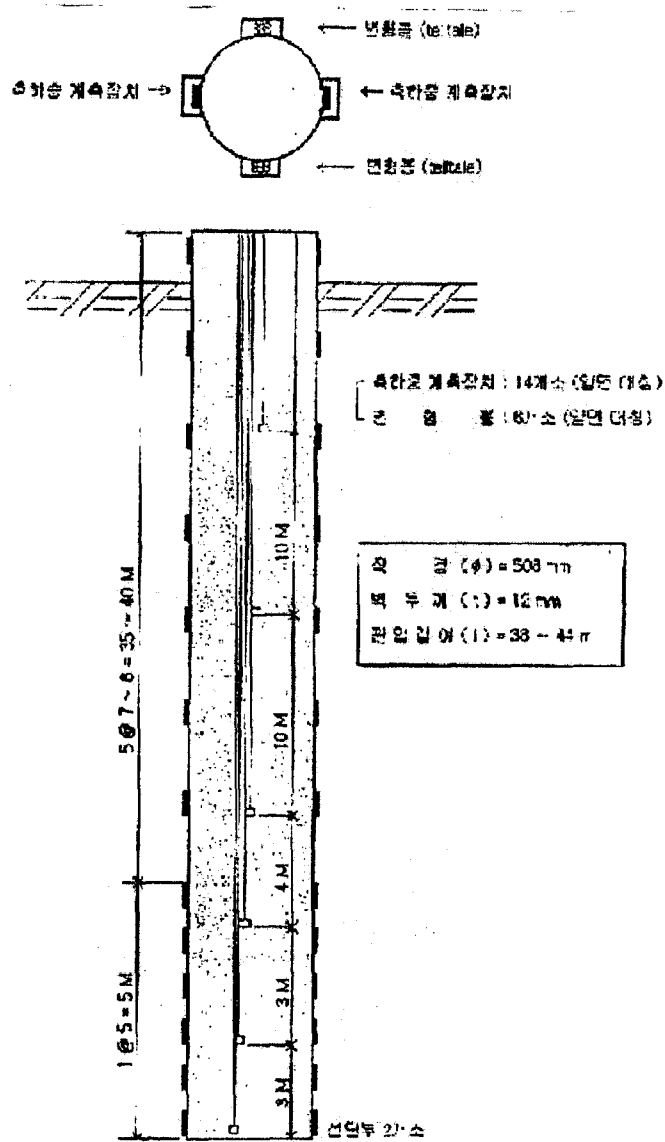


그림 22. 개단 강관말뚝에 대한 센서 설치도

(2) 말뚝재하시험 결과

1) 말뚝머리하중 - 침하량 관계

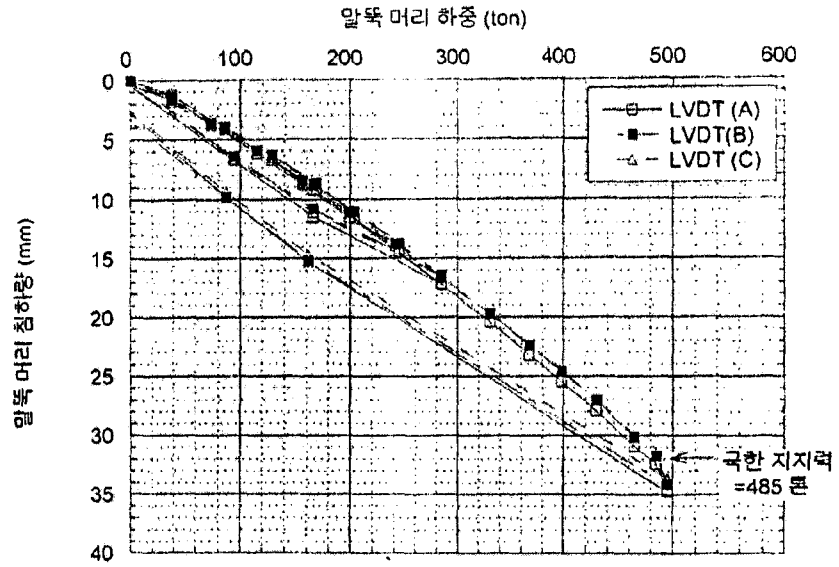


그림 23. 말뚝머리하중 - 침하량 관계 (개단강관말뚝)

2) 축하중 분포도

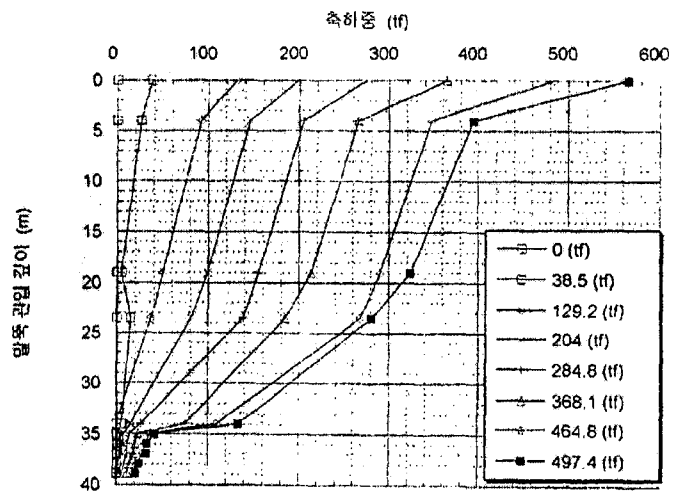


그림 24. 말뚝축하중 분포도

## 6. 결론 및 제언

(1) 말뚝기초의 안정성 확인을 위하여 발주자가 직접 시행한 최초의 말뚝재하시험이었다. 말뚝재하시험은 관행상 시공사에 일괄 도급되어져 시행되어 왔는데 이 경우에는 안정성확인을 위한 시험으로서의 기능이 크게 감소될 수 있다.

(2) 국내에서 최대의 상재하중(2,000톤)을 작용시킨 말뚝정재하시험이었다. 즉, 말뚝설계하중(약 500톤)의 4배까지 재하하여 말뚝기초의 항복지지력 내지는 극한 지지력까지 확인하기 위한 시도를 하였으나 극한지지력은 물론이고 항복지지력도 확인할 수 없었다.

(3) 말뚝의 임의의 깊이에 축하중계측센서를 충분히 설치하여 하중재하단계에 따른 축하중전이를 측정하였으며, 하중전이해석을 통하여 말뚝의 하중지지거동을 확인하였다. 국내에서는 1997년 남항대교 설계 당시 개단강관말뚝에 실시한 하중전이 실험(부산광역시 건설안전관리본부, 1997)이 성공적으로 수행된 후 대구경 현장타설말뚝과 대구경 소켓 강관말뚝에서도 하중전이시험이 성공적으로 수행된 사례로 기록될 수 있을 것이다.

(4) 해상부 말뚝정재하시험의 경우 시공된 실제 소켓강관말뚝( $\varnothing = 2,500$  mm)을 반력말뚝으로 사용하였는데, 최대상재하중 2,000톤에서의 반력말뚝의 인발에 대한 안정성을 확인하기 위하여 반력말뚝에도 축하중계측센서와 인발변위측정센서를 설치하였다.

(5) 시험말뚝들은 소켓부의 마찰 저항력에 의해 마찰소켓말뚝으로 거동하였으며, 풍화암에 말뚝의 선단을 위치시킨 마찰지지 소켓말뚝으로 설계하더라도 현재 사용하고 있는 설계하중의 2배 정도는 충분히 지지할 수 있을 것으로 예상되었다. 따라서, 현행 설계에서 무시하고 있는 마찰지지력을 활용한 설계를 일반화시켜 건설예산을 절감하고 시공안전성도 확보할 수 있도록 해야 할 것이다.

(6) 풍화대에 시공된 시험말뚝(현장타설말뚝, 강관말뚝)의 지지력도 충분하게 확보할 수 있으며, 특히 현장타설말뚝의 경우 지반보다 콘크리트의 응력이 허용치를 초과하여 말뚝부재의 파괴가 선행되었다. 따라서, 풍화암도 말뚝기초에 대한 매우 양호한 지지 지반이 될 수 있음을 확인하였다.

(7) 실시 설계단계에서 말뚝재하시험을 수행하여야 할 것이며, 이를 토대로 말뚝기초의 극한 지지력을 결정하여 설계를 완성하면 건설예산을 10 %이상 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 이와 같은 설계절차는 2000년도에 시행될 도로교설계기준에도 규정되어 있으므로 이런 대형 건설공사의 발주처들에서도 이러한 개념을 건설적으로 수용하여 건설기술의 진보를 이룰 수 있도록 하여야 할 것이다.

## 감사의 글

광안대로 건설공사의 대구경 말뚝정재하결과를 사용할 수 있게 허락해준 부산광역시 건설본부 관계자 분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 부산광역시 건설본부 (2000). “광안대로 건설공사 말뚝정재하시험 종합보고서.”
2. 부산광역시 건설안전관리본부 (1997). “제2부산대교 (현 남항대교) 건설공사 실시 설계 - 설계목적의 말뚝재하시험 보고서-.” 1997. 6.
3. (사)한국도로교통협회 (1999). “도로교설계기준(안) - 중앙건설기술 심의본.” 건설교통부 제정, (사)한국도로교통협회, 지진공학연구센터, 1999. 5.
4. 정성기, 최용규, 정성교 (1998). “설계목적의 말뚝재하시험을 이용한 말뚝기초의 건설비용절감에 관한 연구.” 대한 토목학회 논문집, 제 18권 제 III-3호, 5월, pp. 341 - 352
5. 최용규 (1989). “개단강관말뚝의 폐색효과에 관한 모형실험연구.” 서울대학교 대학원 공학박사학위 논문



문.

6. 최용규 (2000). "광안대로 건설공사의 대구경 말뚝정재하시험과 수치모델링을 통한 말뚝 기초의 안정성 검토 보고서." 2000. 2.
7. 한국지반공학회 (1997a). "구조물기초 설계기준."
8. 한국지반공학회 (1997b). "깊은 기초." 지반공학시리즈4
9. ASTM D 1143-81 (Reapproved 1994) (1994). "Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load."
10. Dunicliff, J., Green, G. E. (1988). "Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance." John Wiley and Sons, New York.
11. O'Neill, M. W. (1998). "Applications of Large Diameter Bored Piles in the United states." Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe & Haegeman (eds.), Balkema, Rotterdam.
12. Reese, L. C., O'Neill, M. W. (1998). "Field Load Tests of Drilled Shafts." Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, 7 - 10, June.
13. Vesic, A. S. (1997). "Design of Pile Foundations." NCHRP Synthesis 42, TRB.