

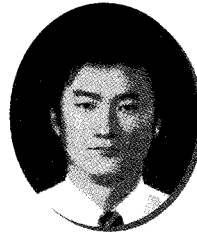
# 사례분석을 통한 말뚝재하시험 계획 및 설계 적용



서 지원  
(주)동성엔지니어링 상무



김 정 환  
(주)동성엔지니어링 차장  
(geo92@dsen.co.kr)



이 충 숙  
(주)동성엔지니어링 대리

## 1. 서론

국내에서는 최근 각 기관별로 말뚝기초에 대한 설계기준 선진화 및 품질관리 기준개선 등에 대한 노력이 이루어지고 있다. 기업체, 연구기관, 학교 등에서는 새로운 말뚝재료 및 시공방법 등에 대한 개발에 앞장서고 있다. 말뚝기초의 사용이 증가함에 따라 안정성과 더불어 경제성, 시공성에 대한 관심이 깊어지는 것에 기인하는 현상으로 생각된다. 이러한 말뚝기초의 발전과정 중에 말뚝재하시험역시 수차례 시험기준이 정비되고, 별도의 시험기준서가 발간되는 등 발전의 길을 함께하고 있다.

설계기준이 선진화되고, 새로운 재료 및 시공법이 개발되고, 말뚝재하시험기준이 정비되고 있는 등 말뚝기초 기술은 급변하고 있다. 그러나, 아직까지 실제 설계에서 설계자들은 이들의 적용에 지극히 보수적인 입장을 보이고 있다. 과거 실적을 중시하거나, 설계당시 수행할 수 있는 시험의 한계 이외에도, 새로운 기술에 대한 설계자들의 이해, 관심 및 인식 부족 등이 문제의 원인이 된다고 생각된다.

다. 본 고에서는 여러 가지 문제들 중 설계자의 입장에서 말뚝재하시험 계획과 설계 적용에 대한 이들 기술의 활용 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 말뚝재하시험

### 2.1 말뚝재하시험의 분류

말뚝재하시험에는 시험방법에 따라 동재하시험, 정재하시험 및 양방향재하시험 등이 있으며, 시험 목적에 따라 지지력확인시험 및 설계목적의 말뚝재하시험 등으로 분류할 수 있다(이하에서는 지지력확인시험은 품질관리시험, 설계목적의 말뚝재하시험은 검증시험이라 함). 본 고에서는 이런 통상적인 말뚝재하시험의 분류를 참고하여, 시험 시기에 따라 표 1과 같이 3가지 경우의 말뚝재하시험으로 분류하여 사례 분석 및 활용방안을 제시하였다

## 2.2 말뚝재하시험 사례 선정

말뚝재하시험 사례는 전술한바와 같이 총 3가지의 경우를 선정하였다. 각 사례의 목적별로 설계, 시험계획, 설계 및 시험계획 절차 등 중점적인 특징에 대하여 분석하므로써, 말뚝재하시험 계획 및 설계 적용에 대한 방향을 제시하고자 하였다.

첫번째, ○○배수펌프장 사례는 설계단계에서 말뚝재하시험을 선행하고 그 결과를 이용하여 대안설계를 수행한 경우이다. 여기서, 말뚝재하시험 방법은 정재하시험 방식을 채택하였고, 시험말뚝 시공, 반력앵커 시공, 정재하시험 등 시험 비용이외에도 인·허가 및 시험기간 등 검증시험 수행을 위해 해결해야 할 부분들이 많았던 사례이다. 여러 가지 어려운 점들을 해결하면서, 같은 조건에서 시험의 효과를 극대화하기 위해 설계에 적용할 인자들을 설계자가 먼저 검토하고, 시험을 계획하는 사람은 그 인자들을 얻기 위해 여러 가지 시험을 복합적으로 계획한 사례이다. 따라서, 이 사례에 대해서는 시험과 설계 적용 방향이 함께 계획된 사례로 이에 대한 내용을 중점적으로 기술하였다.

두 번째, ○○고로기초 사례는 통상적으로 수행하는 말뚝의 품질관리시험으로 설계에서 제시한 지지력만을 확인한 경우이다. 품질관리 목적으로의 재하시험은 이미 많이 알려져 있고 그 수행실적도 매우 풍부하다. 따라서, 품질관리시험 자체에 대한 설명은 생략하고 말뚝재하시험 계획시 반력에 대한 계획에 대해서만 기술하였다. 이 사례는 기존 공장을 편측으로 확장하면서 공장을 신축하는 공사였으므로, 기존 말뚝을 어떻게 반력말뚝으로 활용할 수 있는가가 문제의 핵심이 되었던 경우였다. 기존말뚝의 부족한 반력을 앵커로 보강하여 계획하였다가 후에 반력부족으로 사하중재하 방식으로 변경한 사례이다.

세 번째, ○○진입교량 사례는 실시설계단계에서 인근

재하시험 결과로부터 필요한 설계인자를 채택하여 설계하였다. 그리고, 시공초기단계에서 이 결과들에 대한 확인 시험을 계획하고 필요시 설계변경을 하도록 계획을 수립한 후 설계에 반영한 경우이다. 첫 번째 사례인 시험말뚝에 대한 검증시험이 현실적으로 어려운 경우 인근재하시험 사례를 활용하는 비교적 현재의 발주방식에서 접근하기 용이한 방법으로 생각되며, 이런 과정에 대해 중점적으로 기술하였다.

## 3. 말뚝재하시험 계획 및 설계 적용

### 3.1 사례 1(설계단계;○○배수펌프장)

#### 3.1.1 시험 계획

말뚝기초를 설계하고 시공하기 위해서는 해석적인 방법 이외에도 여러 가지 직·간접적 시험이 활용되어진다. 본 사례에서는 설계를 위한 시험과 시공을 위한 시험으로 구분하여 시험계획을 수립하고 그 결과들을 활용하는 방안 에 대하여 정리하였다. 본 연구에 적용된 시험 계획을 요약 하면 그림 1과 같으며, 시험시 필요한 시험 항목 및 장비를 표 2에 정리하였다.

#### (1) 지층 및 말뚝기초 계획

본 연구가 수행된 현장은 낙동강 하구언에 위치하고 있으며, 상부로부터 인접도로 확포장시 시공된 매립층 8m, 모래층 8m, 상부점토 17m, 하부점토 34m, 모래·자갈층 7m, 연암으로 구성되어 있다. 조사결과 기반암층의 심도가 70m이상이고 기반암의 상부 모래·자갈층이 매우 조밀한 상태로 7m 존재하였다. 따라서, 항타관입성 분석 결과를 반영하여 모래·자갈층을 지지층으로 하는 70여 m

표 1. 시험시기에 따른 말뚝재하시험의 분류

말뚝재하시험 시기	시험 목적
설계 단계	시험말뚝에 대한 검증시험 결과를 설계에 반영
설계후 시공전	설계에 적용된 인근재하시험 결과의 설계인자 확인 및 설계 변경
시공중	설계지지력에 시공말뚝의 지지력 확인

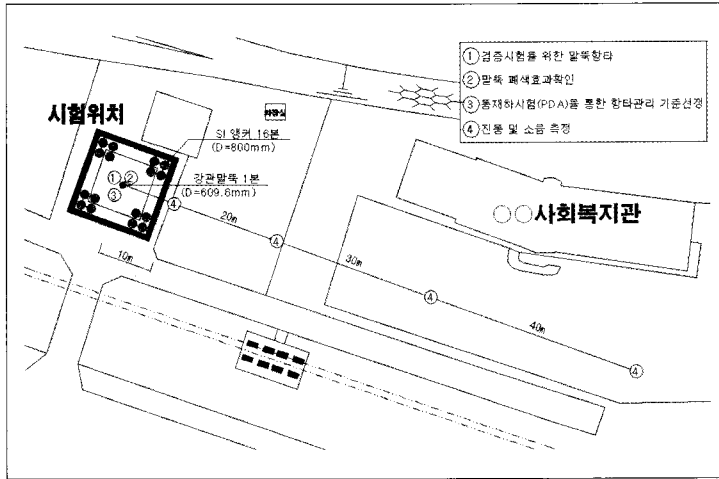


그림 1. 시험계획 평면도(부산광역시 건설본부, 2004)

의 장대말뚝기초를 계획하였다. 말뚝기초 계획은 그림 2 (a)와 같으며 말뚝설치 위치의 지층횡단면은 그림 2 (b)와 같다.

(2) 설계를 위한 시험계획

본 사례에서는 검증시험으로 여러 가지 시험 방법 중 말뚝동재하시험을 채택하였으며, 통상적인 방법으로 시행되어온 정재하시험이 갖는 현장 대표성 결여의 문제에 대한 대책으로 하중전이 시험을 포함하여 시험 계획을 수립하였다. 시험 계획을 요약하면 그림 3과 같다.


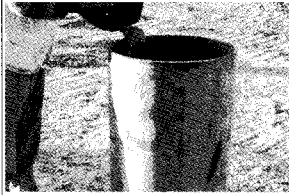
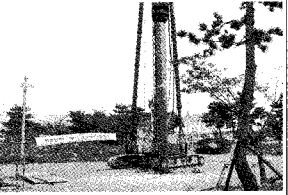
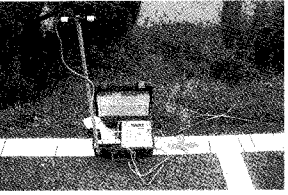
설계에 적용된 말뚝은 강관말뚝( $\phi=609\text{mm}$ ,  $t=14\text{mm}$ , STK490)으로 항타시공성을 감안하여 개단말뚝이 사용되

었는데, 관내토의 측정으로 말뚝의 폐쇄 조건을 확인하였다. 일반적으로 개단말뚝은 상대관내토 높이( $H_i/D_i$ ,  $H_i$ : 관내토 높이,  $D_i$ : 말뚝 내경)가 6~8이상일 경우 폐쇄단면적을 적용하여 선단지지력을 결정하게 된다(Paikowsky & Whiteman, 1990). 따라서, 시험말뚝 시공후 말뚝내부로 줄자에 추를 달아 자유낙하 시키는 방법으로 관내토 심도를 측정하고, 그 결과를 설계에 반영하도록 하였다.

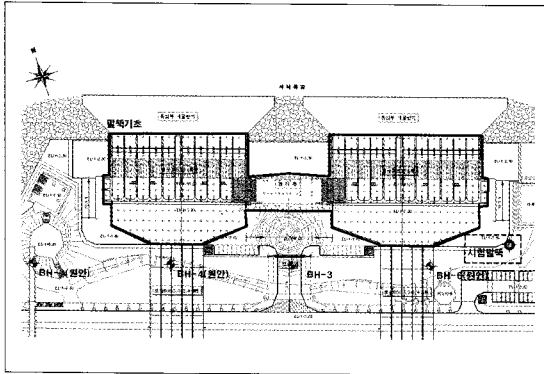
(3) 시공을 위한 시험 계획

말뚝 시공중 품질관리기준으로 활용되고 있는 항타관리 기준 선정을 위하여 시험말뚝 항타시 말뚝 동재하시험을 계획하였다. 물론 동재하시험을 통해 획득할 수 있는 정보

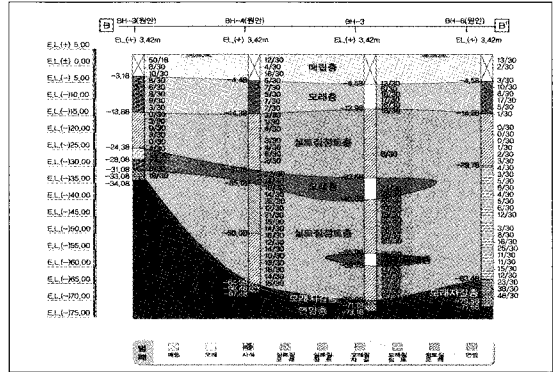
표 2. 목적에 따른 시험 항목 및 장비

설계를 위한 시험		시공을 위한 시험	
① 정재하시험 및 하중전이측정	② 관내토 상승높이 측정	③ 동재하시험	④ 진동·소음 측정
 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 재하대 및 반력시스템</li> <li>• 유압재, 유압센서, 펌프</li> <li>• 전기저항식 센서</li> <li>• 자동회계측시스템</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 관내토 깊이를 측정할 수 있는 줄자</li> <li>• 추</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 항타분석기(PDA)</li> <li>• 가속도계, 변형률계</li> <li>• 항타기</li> <li>• 게이지 부착 기구</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 진동 측정기</li> <li>• 소음 측정기</li> <li>• 이격거리측정용 줄자</li> <li>• 기타</li> </ul>

## 사례분석을 통한 말뚝재하시험 계획 및 설계 적용



(a) 말뚝배치도

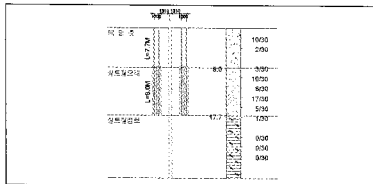


(b) 지층 단면도

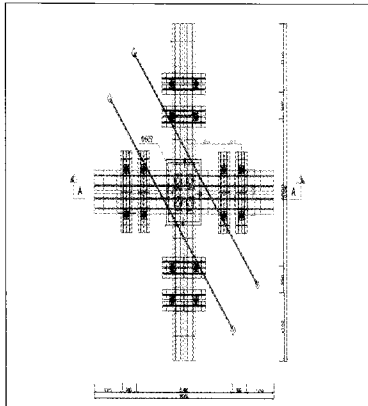
그림 2. 말뚝배치도 및 지층 단면도(부산광역시 건설본부, 2004)

Parts list of Pile load test		
Name of parts	QTY	Reference
1. Main beam	4set	I-beam 912x329x116x22x10300/25w Raist.
2. Reference beam	2set	100x100x10300
3. Casting beam	8ea	H=300x250x25ea
4. Tension bar	12ea	Miscalloy termion bar M50 Lp=2100x1ea
5. Tied Pile	1set	
6. A/C or Dial gauge	4set	10 O=150.00mm
7. Upper plate	1ea	150x150x100
8. Hydraulic cylinder	5ea	Cyl=6000x1ea
9. Lower plate	1ea	200x200x100
10. Anchor	12point	Lp=800x1ea
11. Hydraulic pump	2set	Ultra-high pressure/high pressure
12. Valve set & hose	1set	

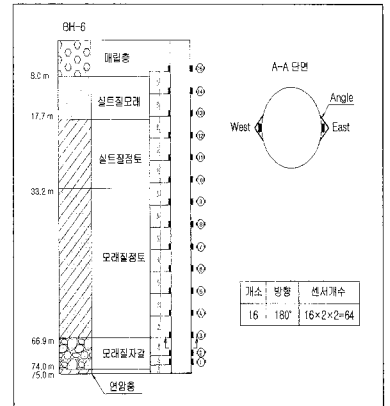
(a) 재하장치 상세내역



(b) A-A단면



(c) 재하장치 평면도



(d) 하중전이센서 설치위치

그림 3. 말뚝 정재하시험 및 하중전이 측정 계획도(부산광역시 건설본부, 2004)

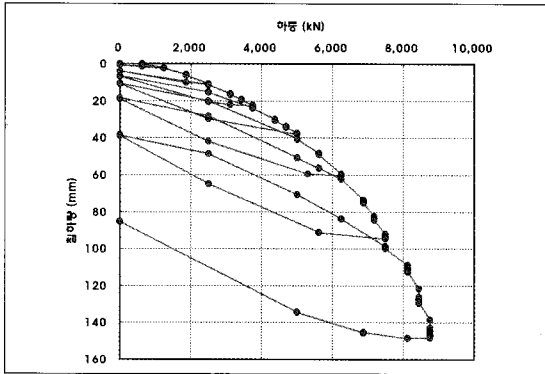
의 범위는 훨씬 넓다. 하지만 지저력 특성을 획득하기 위한 시험으로는 말뚝정재하시험을 채택하였고, 시공과 관련된 정보를 획득하기 위해 동재하시험을 선택하였으므로, 본 고에서는 동재하시험으로부터 시공과 관련된 정보만을 분석하였다. 그리고, 말뚝의 시간경과에 따른 효과와 관련된 자료를 획득하기 위해 지반안정 후 재항타 시 동재하시험을 계획하였으나, 재항타로 인한 지반교란이 우려되어 이 지반의 셋업 값(Setup value)은 확인하지 못하였다. 그러나, 동재하시험과 정재하시험의 결과를 비교하여 항타관리기준 선정 시 지표로 활용하였으며 자세한 내용은 다음 절에 수록하였다.

시공현장에 인접하여 약 60~70m 이격한 거리에 사회 복지회관이 있어 말뚝항타 시 진동·소음의 영향을 확인

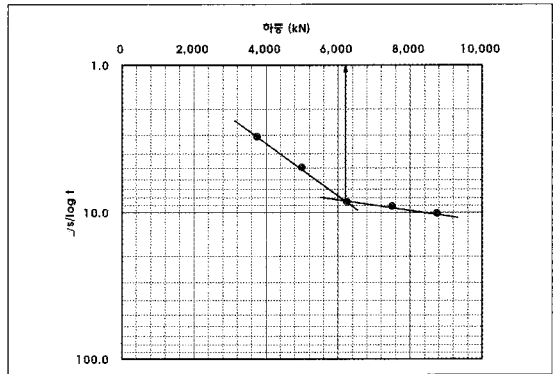
할 필요가 있었다. 현재까지 설계단계에서는 제안식에 의한 검토만으로 진동·소음 영향거리를 계산하고 공법 선정 및 대책 방안을 제시하였다. 그러나, 이것은 실제 적용되는 장비와 타격 에너지를 무시하고, 또한 주변 지형 및 지층조건마저 무시함으로써 실제 결과와는 너무 많은 차이를 보여 왔다. 따라서, 본 사례에서는 시험말뚝 항타 시 진동·소음을 이격거리별로 직접 측정하여 설계에 반영하도록 하였다.

### 3.1.2 설계 적용

검증시험 단계에서 설계를 위한 시험과 시공을 위한 시험으로 구분하여 총 4가지 시험을 계획하였다. 여기에서는 시험된 결과를 항목별로 설계와 시공에 적용하는 활용



(a) P-S 곡선



(b) S/log t-P 곡선

그림 4. 정재하시험 결과

방안에 대하여 제시하였다.

#### (1) 정재하시험 결과의 활용

본 사례에 대한 실시설계를 수행하는 동안 연직지지력을 예측하기 위하여 정역학적 지지력공식, 수치코드에 의한 방법과 더불어 검증시험 결과를 분석하였다. 그러나, 본 고의 목적은 각 방법의 신뢰성을 평가하는 것이 아니므로 이중 검증시험 결과(그림 4 참조)에 의한 지지력 산정만을 제시하였다.

정재하시험 결과를 분석하여 하중-침하량 곡선으로부터 허용지지력을 결정하였다. 이 값에서 중립점 상부에는 공용시 부주면 마찰력이 작용하게 됨으로 이 부분을 감안해야 할 필요가 있었다. 그러나 정재하시험 결과로부터 이를 고려할 방법이 없었으므로 하중전이 측정 결과(그림 5)를 활용하였다. 즉, 정재하시험으로부터 허용지지력을 결정하고, 하중전이 측정 결과에서 나타난 주면마찰력을 활용하여 최종 설계지지력을 결정하였다. 이 때 중립점 상부

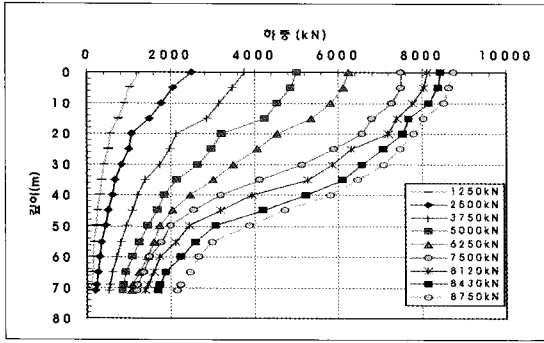
의 주면마찰력을 부주면마찰력으로 가정하여 설계에 반영하였다.

정재하시험은 비용이 비교적 고가이기 때문에 많은 수량을 적용하기 힘들다. 그러므로 제한적인 의미로 현장 대 표성이 결여된다고 말할 수도 있으나 시험위치 선정에서 현장을 대표할 수 있는 지반조건을 설정하여 시험을 수행 함으로써 대표성을 확인할 수 있었다. 본 사례의 경우 구조물 설치 지반의 지층 구성이 같고 각 지층의 역학적 특성도 유사하게 조사되었다. 따라서, 정재하시험 및 하중전이 측정결과를 활용하여 각 구조물별 설계지지력을 별도로 예측하였다. 하중전이 측정시 산출된  $q-z$  곡선과  $t-z$  곡선을 활용하여 각 지층별 단위 주면마찰응력과 선단지지력을 분리하고, 식 (1)을 적용하여 표 3과 같이 설계지지력을 예측하였다. 그림 5 (c)에서 알 수 있듯이 실트질점토와 실트 질모래의 경우 API규준(1993)에서 제시된 점성토(Coyle & Reese, 1966)와 사질토(Coyle & Suliaman, 1967)의 하중 전이곡선중 점성토와 비슷한 경향을 나타내었으며, 모래

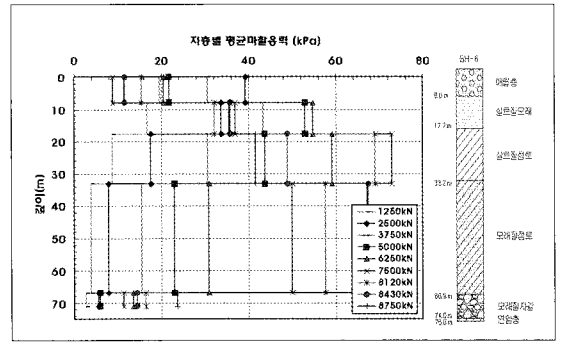
표 3. 각 구조물별 검증시험 결과 예측된 설계 지지력

위 치	중립점(m)	부주면 마찰력 (kN/본)			주면마찰력 (kN/본)	선단지지력 (kN/본)	허용지지력 (kN/본)	설계반력 (kN/본)
		작용값	감소계수	저감후				
검증시험 위치	29.9	1822	70%	547	4,869	2,170	1,800	1580
펌프장 A동	29.7	1889	70%	567	4,674	2,170	1,715	1580
펌프장 B동	33.3	1854	70%	556	4,691	2,170	1,731	1580
관리동	28.4	2208	70%	662	4,506	2,170	1,563	1390

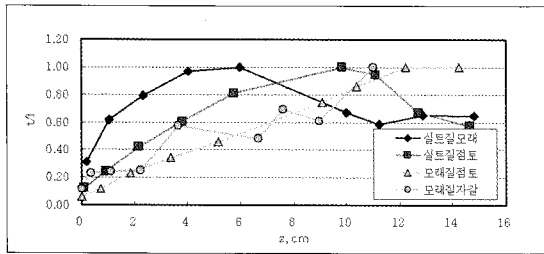
사례분석을 통한 말뚝재하시험 계획 및 설계 적용



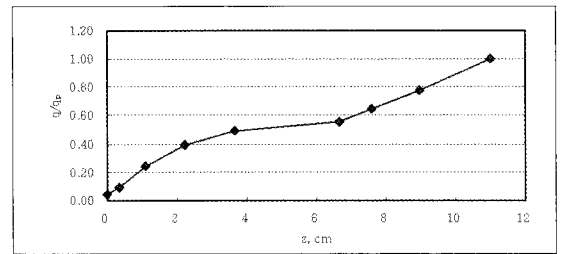
(a) 축하중 분포도



(b) 지층별 평균 주면마찰력



(c) t-z 곡선



(d) q-z 곡선

그림 5. 하중전이 측정 결과

질자갈과 모래질점토의 경우 시험중 극한값에 도달하지 않은 것으로 판단되었다. 그림 5(d)에서 선단지저력 역시 재하도중 극한값에 도달하지는 않은 것으로 판단되었다.

$$Q_a = \frac{Q_p}{2} + \left( \frac{\sum_{z=중립점}^{선단} f_s(\text{지층별}) \times A_s}{2} - \sum_{z=0}^{\text{중립점}} f_s(\text{지층별}) \times A_s \right) \quad (1)$$

(2) 관내토 심도 측정결과와 활용

시험말뚝 시공후 관내토 심도를 측정하여 말뚝의 폐쇄 효과에 대한 검토를 수행하였다. 표 4에 따라 상대관입 깊이에 따른 관내토 거동을 평가하였다.

본 사례의 경우 관내토가 말뚝직경 0.609m의 8배인 약

5m이상 형성되었으므로 완전폐쇄조건으로 볼 수 있었다. 즉 관내토가 50m 정도로 측정되었으므로 설계지저력 예측시 100% 폐쇄조건으로 검토되었다.

말뚝길이 74m이고 관내토가 50m까지 상승되었다는 것은 선단폐쇄조건 검토 이외에도 다른 큰 의미를 가진다. 일반적으로 말뚝내부는 토사 또는 콘크리트 속채움으로 설계하게 되는데, 이 경우 관내토를 예측할 수 없기 때문에 속채움 수량은 말뚝길이의 100%로 산출하게 된다. 그러나, 본 사례의 경우 측정된 수량을 적용함으로써 약 5억원 정도의 공사비를 절감할 수 있었다. 물론 이 수량 역시 예측 수량이므로 현장에서는 시공 시 관내토를 필히 측정하여

표 4. 상대관내토 높이에 따른 폐쇄효과 발현 양상(Paikowsky & Whiteman, 1990)

구분	상대 관입 깊이	관내토 다짐 상태	관내토 거동
1단계	$L_i/D_i < 1.5 \sim 2.5$	• 다짐 안됨	• 말뚝의 내주면마찰력만 작용
2단계	$1.5 \sim 2.5 < L_i/D_i < 6 \sim 8$	• 관내토 흠뻐기(Plug)가 점진적으로 형성	• 말뚝 내주면마찰력 작용 • 관내토 아칭 작용으로 인해 흠뻐기(Plug)가 급격히 형성
3단계	$L_i/D_i > 6 \sim 8$	• 관내토 흠뻐기(Plug) 형성	• 관내토의 아칭 작용으로 인해 말뚝 선단부가 완전 폐쇄됨 • 말뚝 선단부에 다짐 흠뻐기가 형성됨

표 5. 항타시공성 분석 결과

구 분	근입깊이(m)	말뚝재원	항타기	최대 BPM (회/m)	SetValue (mm/회)	최대압축응력 (kPa)	항타고(m)	가능여부
GRLWEAP	65.3	609.6	DKH-10	715.4	1.40	193,790	1.2	관입불가
			DKH-13	330.5	3.03	197,030	1.2	항타가능
시험 시공	73.8	609.6	DKH-13	588	17	169,730	0.7	항타가능

표 6. 이격거리별 소음 예측 및 측정 결과(유압해머 130kN 사용시)

이격거리(m)		10	15	30	60	100	150	250	400
소음도(dB)	예측	92.9	89.3 <sup>1)</sup>	83.3	77.3	72.8	69.3	64.9	60.8
	시험	73.1	-	63.0	60.1	59.7	-	-	-

주: 1) 기준소음도

표 7. 이격거리별 진동 예측 및 측정 결과(유압해머 130kN 사용시)

이격거리(m)		10	30	60	100	150	250
진동 (cm/sec)	예측(Attewell과 Farmer, 1973)	2.8	0.48	0.16	0.07	0.04	0.02
	시험	0.224	0.156	0.097	0.083	-	-

야할 것으로 판단되었다.

### (3) 동재하 시험 결과의 활용

본 사례에서는 항타관리기준을 선정하기 위해 시험말뚝 항타시 동재하 시험을 수행하였다. 이에 앞서 GRLWEAP 프로그램을 이용하여 시험말뚝 항타장비와 낙하고, 관입 지반 등을 예측하였다. 또한, 대상지반의 연약층 심도가 깊고 지층이 매우 연약한 점을 감안하여 항타 초반부터 동재하 시험을 수행하여 압축응력뿐 아니라 인장응력에도 주의를 기울였다. GRLWEAP 프로그램을 이용하여 예측한 결과 130kN 해머에 대해 1.2m 낙하고를 유지할 경우 말뚝이 지지층에 관입될 것으로 분석되었다. 그러나, 시공 중 동재하 시험 결과에 의해 과다항타응력이 우려되어 낙하고를 0.7m로 조정하였으며, 예상 지지층보다 다소 깊어 74m 위치에 단위길이당 최대항타수(BPM)가 588회/m이하에서 항타를 종료하였다.

이 심도에서 동재하 시험 결과로부터 분석된 허용지지력은 1,200kN으로 나타났으며 이후 실시된 정재하 시험 결과에 비해 매우 적게 나타났다. 그러나, 여기서 동재하 시험 결과를 지지력 산정에 활용하는 것은 곤란하였지만 항타 기준설정 측면에서는 이 값을 활용할 수 있었다. 즉, 물론

서로 시험방법이 다르기 때문에 셋업 값(Setup value)으로 활용하기에는 다소 무리가 있으나 항타관리기준에는 적용할 수 있었다. 현장에서 시공 전 항타관리기준을 선정할 때 항타중 동재하 시험에 의한 지지력이 설계지지력 1,600~1,800kN을 만족할 때까지 계속 항타를 수행한다면, 말뚝은 과잉항타응력에 의해 손상될 우려가 있을 뿐 아니라 비경제적인 기준이 될 우려가 있다. 따라서, 본 사례에서는 항타관리기준에 일반적인 항타관리기준(램중량, 낙하고, 최종관입량)뿐 아니라 재항타 시험이 수행되지 못할 경우 동재하 시험에 의한 최소 지지력 1,200kN을 참고값으로 하여 적절한 항타관리기준 선정이 될 수 있도록 하였다.

### (4) 진동 · 소음 측정 결과의 활용

본 사례에서는 말뚝항타위치와 약 60~70m 이격된 위치에 사회복지회관이 인접하여 있었으므로 정확한 진동 · 소음 예측이 필요하였다. 또한, 주변 지형을 살펴보면 대상 부지 전 · 후로 낙동강이 흐르며 4면이 모두 개방되어 있고, 지지층은 깊으며 조밀한 자갈층에 말뚝이 근입되었다. 따라서, 음원이 개방되어 있고 반발에너지가 비교적 적기 때문에 제안식에 의해 예측된 진동 · 소음보다는 다소 적은 값을 나타낸 것으로 분석되었다. 진동 및 소음 측정 결과

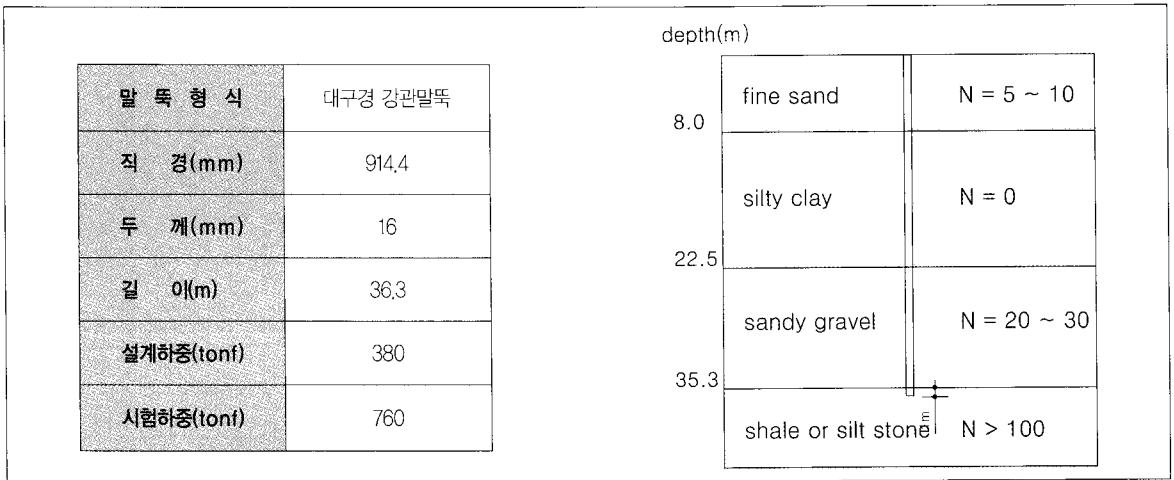


그림 6. 시험말뚝의 현황 및 과업구간의 지층현황도

를 요약하면 표 6~7과 같다.

### 3.2 사례2(시공중:○○고르기초)

○○고르기초 사례는 통상적으로 수행하는 말뚝의 품질 관리시험으로 설계에서 제시한 지지력만을 확인한 경우이다. 기존 제철공장을 편측으로 확장하면서 공장을 신축하는 공사였으므로, 기존 말뚝을 어떻게 반력말뚝으로 활용할 수 있는가가 문제의 핵심이 되었던 경우로 기존말뚝의 배치로 인해 반력말뚝의 배치가 곤란한 상황에 따라 부족한 반력을 신규 반력파일을 시공토록 계획하였다가 후에 반력 부족으로 시하중재하방식을 추가하여 변경한 사례이다.

#### 3.2.1 시험 계획

하부에 말뚝기초로 시공되어진 구조물의 경우는 상부 구조물 증대 및 확장에 따른 사항이 발생시 기초의 지지력을 재확인하고 미흡할 시 구조물의 안전을 위하여 보수, 보강 등의 공법이 요구 되어진다. 본 시험은 제철공장에서도

로의 용량을 증대하고자 하부기초의 지지력 확보에 대한가 능성 여부를 판단하기 위한 목적으로 시험을 계획하였으며, 시험 위치는 기존의 타워크레인 기초로 사용되어진 구간이며 구조물기초에 해당되지 않아 시험위치로 선정하였다.

본 시험의 현황은 하부말뚝기초(914.4mm)에 대하여 안정성 분석을 수행하여 기초의 지지능력을 검증하도록 하며, 이에 대한 시험말뚝의 두께 및 기타 제반사항은 위의 그림 6에 요약하였다.

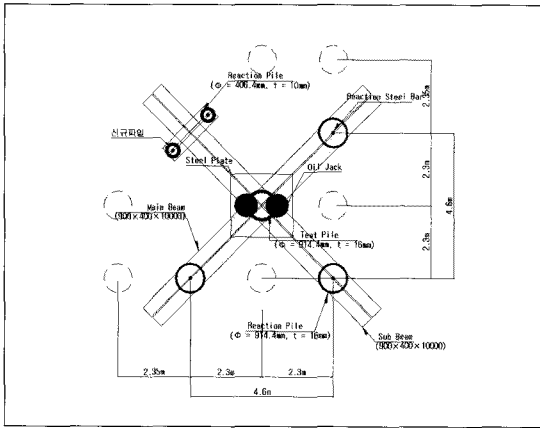
#### 3.2.2 반력 계획

시험부지는 크레인이 설치되었던 위치로 말뚝배치가 정 방향으로 위치하고 있지 않아 반력말뚝의 배치가 곤란하여 인근현장에서 시공중인 직경 406mm 강관말뚝을 반력 말뚝으로 사용하기 위하여 2분을 시공토록 하였다. 반력 말뚝의 인발력을 측정하기 위하여 정역학적 방법 및 현장 인발시험을 통하여 인장력을 산정하고 있으나, 시험부지의 지반이 연약지반으로 이루어져 있고 토질설계정수 산정을 위한 지반조사결과가 존재하지 않아 인근 광양의 설계정

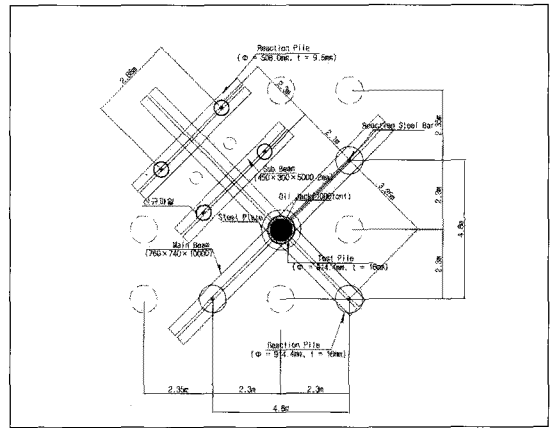
표 8. 반력말뚝의 인발력 검토결과

말뚝현황	인근설계정수를 적용한 인발력(tonf)	N-value를 적용한 인발력(tonf)
직경 406mm	89.0	49.1
직경 508mm	112.5	62.3
직경 914mm	205.0	115.8





(a) 기존 계획



(b) 변경계획

그림 7. 시험말뚝 및 반력말뚝 배치도

수결과를 이용하여 반력말뚝의 인발력을 산정하였다.

분석결과 인근지역에서 반영된 설계정수 및 물성치를 이용하여 분석할 경우 현재 제철소내의 인발력보다 과하게 나타나며, 허용 지지력 검토시 제안된 N값 기준에 주변마찰력을 인발력으로 역산하여 적용한 결과가 가장 작게 분석되어 반력의 확보 및 보다 안전한 시험을 수행하고자 추가 반력말뚝 508mm 4본을 시공하여 시험토록 계획하였다.

각각의 반력 프레임의 배치에 따라 시험하중에 따른 반력말뚝의 인발력을 검토하였으며, 그 결과는 표 8과 같다.

인발력 검토결과 인근 설계에 적용된 결과를 사용하였을 경우 반력말뚝에 대한 인발력이 과대하게 판정되어 N값을 이용한 지지력 설계기준의 주변마찰력을 인발력으로 사용하여 결정토록 하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 재하프레임은 그림 7과 같이 계획하여 설치하도록 계획하였다.

상기와 같이 시공될 경우 인발력이 계산된 결과로 작용된다는 보장이 전무하며 기존의 하부기초로 사용되었던 914mm 강관말뚝과 새로 시공된 508mm 말뚝 간에 인발력 상이로 인하여 편심이 발생할 것으로 판단되어졌다. 그 결과 최하로 계산된 인발력 외에 상부에 steel-plate를 적재하여 반력말뚝 + 사하중의 방법으로 시험을 수행토록 계획을 변경하였다. 반력말뚝 + 사하중의 프레임 설치단면은 그림 8에 나타내었다.

### 3.2.3 시험 결과

본 과업의 계획재하단계는 8사이클 최대 760tonf 이었으며 극한하중 확인을 위하여 최대 800tonf 이상의 하중을 계획하였으나, 재하 도중 상재사하중의 편심이 발생하기 시작함에 따라 위험성을 감안하여 최대 785tonf을 재하하고 시험을 종료하였으며 그 결과를 아래에 요약하였다.

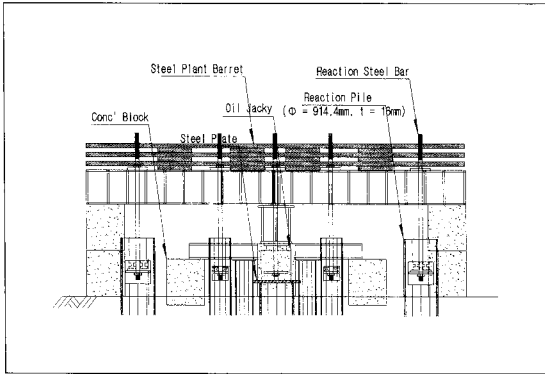
상기와 같이 지반의 잔류침하량은 재하하중 785tonf에서 약 8.0mm가 발생하였다. 그림 9(d)에서 살펴보면 최대 재하하중시까지 탄성침하량이 잔류침하량보다 크게 나타나 지반의 파괴가 일어나지 않은 것으로 나타났다.

실물 말뚝 정재하시험을 실시하여 지지력 검증을 수행하였으며, 표 9와 같이 말뚝재료의 허용하중, 하중-침하량 분석법 및 침하량 기준에 따른 검토를 수행하여 최적화된 말뚝의 허용 지지력을 결정하였다. 그 결과 설계 지지력 380tonf에 상응하는 약 430tonf 가량의 허용 지지력을 산정할 수 있었다.

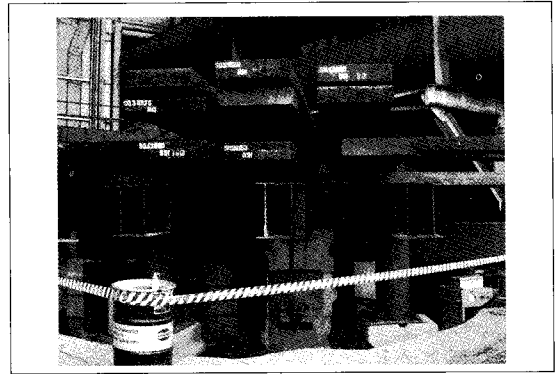
정리하면 기존말뚝의 부족한 반력을 앵커로 보강하여 계획하였다가 후에 반력부족으로 사하중재하방식으로 변경하였다. 통상적인 품질관리 목적의 재하시험의 경우에서도 전문가에 의한 재하시험 계획의 중요성을 확인할 수 있었다.

### 3.3 사례3(설계후 시공잔;○○진입교량)

사례분석을 통한 말뚝재하시험 계획 및 설계 적용

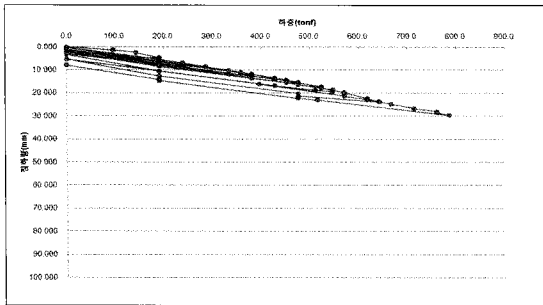


(a) 재해대 설치단면

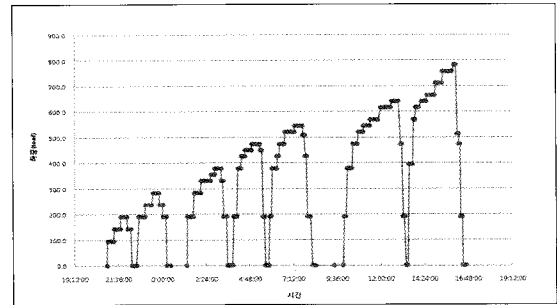


(b) 재해대 설치현황

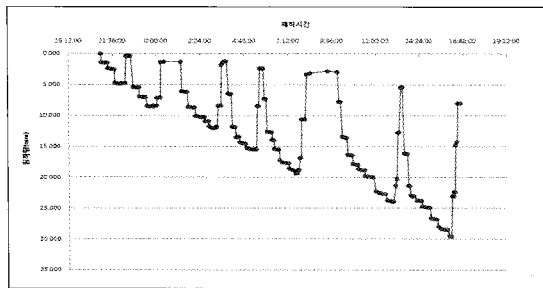
그림 8. 재해대 설치도



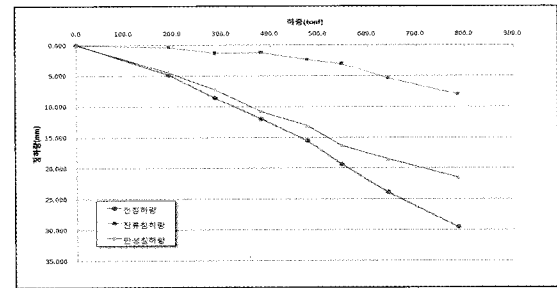
(a) 말뚝머리 하중 - 침하량 곡선



(b) 시간 - 하중 곡선



(c) 시간 - 말뚝머리 침하량 곡선



(d) 말뚝머리 하중 - 잔류침하량 곡선

그림 9. 말뚝머리 하중 관계곡선

3.2.1 설계 개요

○○진입교량 사례는 인근 단지조성 및 개발과 더불어 발주된 교량으로, 인근 단지개발 중 고층빌딩 및 교량기초를 위한 말뚝재하시험 사례가 많은 지역이다. 이미 공개된 재하시험결과 및 발주처로부터 제공받은 재하시험결과 중 지반조건이 유사하고, 설계에 필요한 하중전이 시험이 수반된 재하시험을 선정하여 그 결과를 이용해 설계를 수행

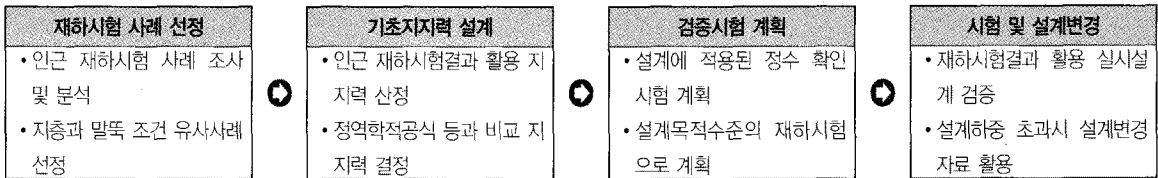
하고, 시공초기 재하시험을 통해 필요시 설계변경을 하도록 계획하였다.

3.2.2 인근재하시험을 활용한 설계

재하시험 적용 현장과 설계 현장의 지층조건을 분석한 결과 지층구성, 층후, 물리적 특성 및 역학적 특성들이 유사하게 나타났다. 따라서, 지층별 단위주면마찰응력, 선단

표 9. 말뚝의 허용지지력 요약

판별법	기준 항복 하중 (tonf)	허용하중 (tonf) (F.S = 2)	극한 하중 (tonf)	최소 항복지지력 (tonf)	허용지지력(tonf) ( $Q_u = Q_y/2,$ $Q_u = Q_y/3$ )	말뚝재료의 허용하중 (tonf)	허용 지지력 (tonf)
P-S 방법	930	465	-	430	430	552	430
logP-logS 방법	920	460	-				
logP-S 방법	860	430	-				
Davisson의 방법	1100	550	-	-	550		
Chin의 방법	-	-	1,667	-	556		
전침하량(25.4mm)기준	-	660	-	-	660		



지지력, 하중전이 양상 등 설계에서 필요한 항목들을 분석하고 그 결과를 이용하여 말뚝의 설계지지력을 산정하고, 정역학적 지지력 공식, 수치해석코드 등의 결과와 비교하여 말뚝의 설계지지력을 제안하였다.

### 3.2.3 재하시험계획 및 설계 반영

아무리 인근 재하시험 현장의 조건이 유사하더라도 시험 지반 조건, 말뚝의 직경 등 여러 가지 측면에서 일치할 수는 없으며, 통상적인 설계에서 기초 지지력 산정을 위해 적용한 경험식이나 이론식은 시공시 기초지반에 대한 현장시험을 통하여 확인하는 것이 일반적이다. 그러나, 당 사례의 경우 인근 재하시험 결과로부터 기초에 필요한 정수들을 얻어 설계지지력을 추정하였으므로, 시공 초기 하중전이를 수반한 재하시험을 통해 설계에 적용한 매개변수와 예측값을 검증하도록하였다. 시험결과 말뚝의 지지력이 설계하중의 범위를 벗어나는 경우 발주처와 협의해서 설계변경이 가능하도록하여 재하시험의 결과를 설계에 반영할 수 있도록 계획하였다. 시험말뚝에 대한 검증시험이 현실적으로 어려운 점을 감안하면, 인근재하시험 사례가 있는 경우 이를 활용하는 방법이 비교적 현재의 발주방식에서 접근하기 용이한 방법으로 생각된다.

## 4. 결론

본 고에서는 말뚝재하시험 계획과 설계 적용에 대한 이들 기술의 활용 방안을 제시하고자 하였다. 통상적인 말뚝 재하시험의 분류를 참고하여, 시험 시기에 따라 다음과 같이 3가지 경우의 말뚝재하시험으로 분류하였다. 각 사례의 목적별로 설계, 시험계획, 설계 및 시험계획 절차 등 중점적인 특징에 대하여 분석하므로써, 말뚝재하시험 계획 및 설계 적용에 대한 방향을 제시하고자 하였다.

- 1) ○○배수펌프장 사례는 설계단계에서 말뚝재하시험을 선행하고 그 결과를 이용하여 대안설계를 수행한 경우이다. 시험은 반영 목적에 따라 설계시 지지력에 축을 목적으로 하중전이 측정을 수반한 말뚝 정재하시험과 관내토의 축정, 시공관리를 목적으로 동재하시험과 진동·소음 측정을 수행하여 각각의 결과를 설계에 활용하였다. 설계시 여러 가지 불확실성을 최소화할 수 있는 가장 좋은 방법이기 는 하나 시험 비용 이외에도 인·허가 및 시험기간 등 적용에 어려움이 많은 방법으로 분석되었다.
- 2) ○○고고기초 사례는 통상적으로 수행하는 말뚝의 품

질관리시험으로 설계에서 제시한 지지력만을 확인한 경우이다. 기존 공장을 편측으로 확장하면서 공장을 신축하는 공사였으므로, 기존 말뚝을 어떻게 반력말뚝으로 활용할 수 있는가가 문제의 핵심이 되었던 경우였다. 기존말뚝의 부족한 반력을 앵커로 보강하여 계획하였다가 후에 반력부족으로 사하중재하 방식으로 변경하였다. 통상적인 품질관리 목적의 재하시험의 경우에서도 전문가에 의한 재하시험 계획의 중요성을 확인할 수 있었다.

3) ○○진입교량 사례는 실시설계단계에서 인근 재하시험 결과로부터 필요한 설계인자를 채택하여 설계하였다. 그리고, 시공초기단계에서 이 결과들에 대한 확인 시험을 계획하고 필요시 설계변경을 하도록 계획을 수립한 후 설계에 반영한 경우이다. 시험말뚝에 대한 검증시험이 현실적으로 어려운 점을 감안하면, 인근 재하시험 사례가 있는 경우 이를 활용하는 방법이 비교적 현재의 발주방식에서 접근하기 용이한 방법으로 분석되었다.

보고서”, 인천경제자유구역청

4. 정성기, 최용규, 정성교 (1988), "설계목적의 말뚝재하시험을 이용한 말뚝 기초 건설비용 절감에 관한 연구", 대한토목학회 논문집 제 19권 제 III-2호
5. 한국도로교통협회 (2000), "도로교설계기준", 한국도로교통협회, 2000, pp.441
6. 한국도로교통협회 (2005), "도로교설계기준", 한국도로교통협회, 2005, pp.461
7. API (1993), "Recommended Practice for Planning, Designing, and Construction Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design", API recommended practice 2A-WSD(RP2A-WSD)
8. Attewell, P.B. and Farmer, I.W. (1973), "Attenuation of ground vibrations from driven piling", Ground. Engineering, 1973, 6, 4 (2), pp. 26-29.
9. Coyle, Harry M., and Reese, Lymon C. (1966), "Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay", J. of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol. 92, No SM2, Proc. Paper 4702, 1966, pp.1-26
10. Coyle, Harry M., and Sulaiman (1967), "Skin Friction for steel piles in Sand", Proceeding's Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vole. 93, No. SM6, November, 1967, pp. 261-277
11. Paikowsky, S. G. and Whiteman, R. V. (1990), "The effects of Plugging on Pile Performance and Design.", Can. Geotech. J., 27(3), pp 429-440.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부·환경부 (2006), "환경친화적인 도로건설 지침", 건설교통부, pp.101-102
2. 부산광역시청 건설본부 (2004), "○○배수펌프장 건설공사 대안설계 보고서", 부산광역시청
3. 인천경제자유구역청 (2007), "○○진외교량외 1개소 실시설계