

# 東京港 臨海道路 대구경 강관말뚝의 재하시험\*1

번역자 : 조 천 환 \*2

## 1. 머리말

동경도 品川區 成南島에서 중앙 방파제 외측 매립지를 경유해 江東區 若洲에 이르는 동경항 임해도로는 중앙방파제 외측 매립지까지의 제1기 공사를 완료하고 있으며, 현재, 당해 매립지부터 若洲에 이르는 제2기 공사 착수단계에 있다. 이 구간에서는 제3항로를 동경 임해대교(가칭)로 횡단할 계획으로 되어 있다.

본 교량의 주경간 교각 기초에는 대구경 강관말뚝을 사용한 강관 널말뚝 기초가 선정되었다. 대구경 강관말뚝에 대해서는 동경만 횡단도로에서 재하시험이 실시(橫山好幸 외, 1992)되었지만, 그 실시 사례가 적고, 말뚝 선단의 폐색율을 포함한 지지력 기구가 명백해지지 않은 것이 현 실정이다.

따라서 본 교량의 건설지점에서 대구경 강관말뚝의 지지력을 확인할 목적으로 정재하시험(압축), 수평재하시험, 정동적재하시험(Statnamic test) 및 동적재하시험을 실시했다. 본 고는 현장에서 실시한 실제 대구경 강관말뚝에 관한 일련의 재하시험결과 개요를 소개한 것이다.

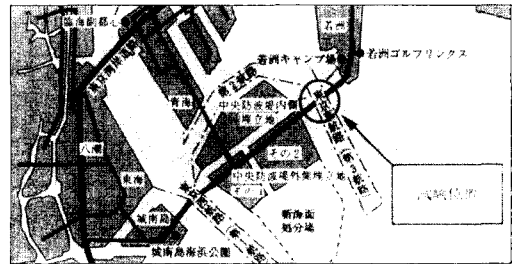


그림 1. 시험실시 위치

## 2. 시험내용

### 2.1 시험위치 및 지반조건

재하시험을 실시한 위치는 그림 1에 나타난 것처럼 동경항 제3 항로 근방 해상부이다.

시험지반은 위쪽에 두께 30m이상의 연약층이 있으며, 아래쪽에는 단단한 자갈층·모래층이 계속되고 있다. 토질 주상도와 시험말뚝의 위치개요도를 그림 2에 함께 나타냈다.

### 2.2 시험종류

재하시험에 사용한 강관말뚝과 시험종류를 표 1에 나타내었다.

\*1 원저자 및 출처 : 菊池喜昭(港灣空港 技術研究所) 외 4인  
基礎工 2004. 10(pp95~98)

\*2 삼성건설, TA팀, 전문위원  
(chunwhan.cho@samsung.com)

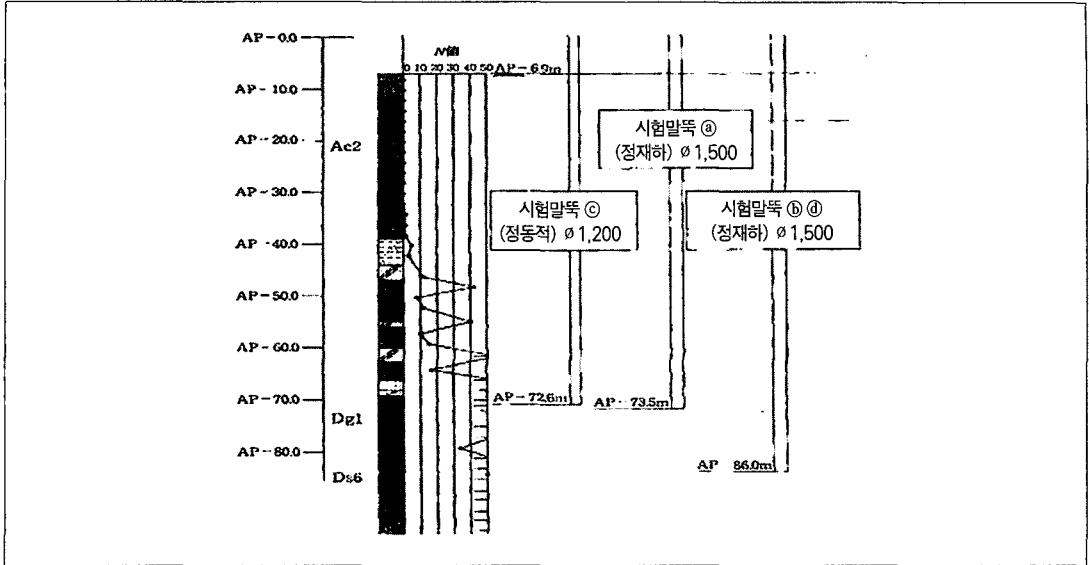


그림 2. 토질 주상도 및 시험말뚝 설치 개요

표 1. 시험말뚝과 시험종류

말뚝No.	시험말뚝			시험종류
	말뚝지름(mm)	말뚝선단심도(APm)	말뚝길이(m)	
③	ø 1,500	-73.5	79.5	SLT, HLT, DLT
⑤	ø 1,500	-86.0	92.0	SLT, DLT
④	ø 1,200	-72.6	80.1	STN, DLT
⑥	ø 1,500(십자리브)	-86.0	93.5	DLT

법례 SLT : 정재하시험    HLT : 수평재하시험    STN : 정동적시험    DLT : 동재하시험

정재하시험은 지지층이 될 수 있는 자갈층 Dg1 (소위 東京礫層)과 모래층 Ds6(소위 江戸川層)에 선단 지지시킨 지름 ø 1,500의 강관말뚝 2본(시험말뚝 ③와 ⑤)으로 실시했다.

정동적시험은, 자갈층 Dg1에 근입시킨 ø 1,200 강관말뚝(시험말뚝 ④)에 실시했다. 또한, 시험말뚝 ③에 대해서는 정재하시험 후에 수평재하시험도 실시했다. 동재하시험은 모든 시험말뚝에 대해 항타시에 실시했다. 시험말뚝 ⑥에서는 선단에 십자 리브를 부착해 그 효과를 조사했다.

시험말뚝③, ④는 자갈층 Dg1 상면AP-69m에서

3D(D:말뚝 지름) 관입한 심도에서 타입종료하고, 시험말뚝 ⑥는 그 아래쪽 모래층 Ds6에 3D 관입한 AP-86m에서 타입종료했다.

### 2.3 시험방법

#### 2.3.1 정재하시험

시험말뚝 ③, ⑤에 대해, 말뚝의 연직재하시험방법·동해설(地盤工學會, 2002)에 준해 정적 정재하시험을 실시했다. 정재하시험 광경을 사진 1에 나타내었다.

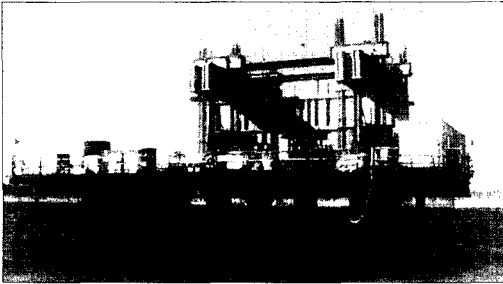


사진 1. 정재하시험 광경

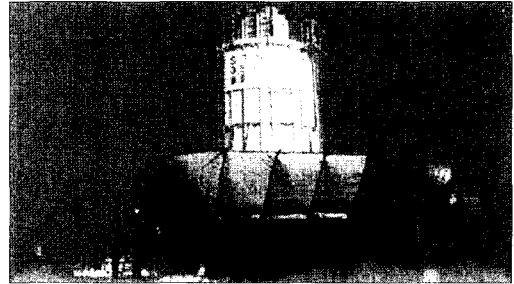


사진 2. 정동적시험 광경

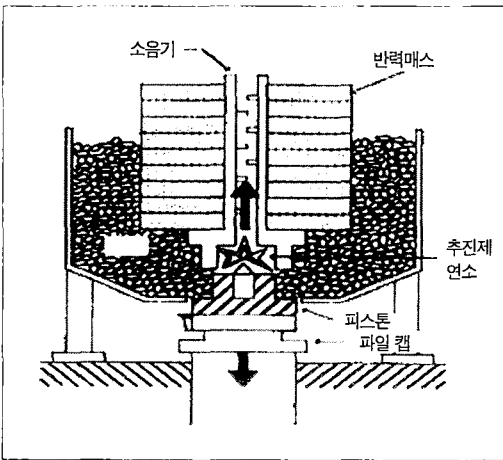


그림 3. 정동적시험 개요

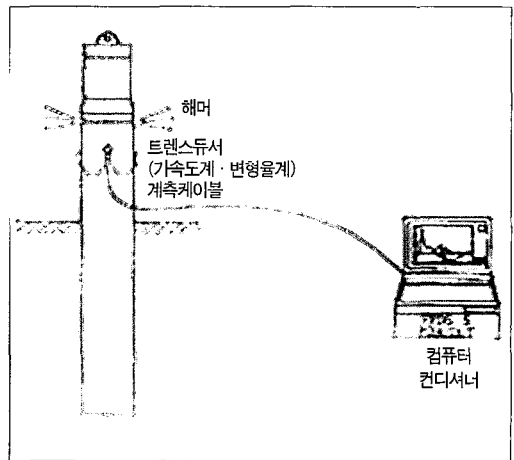


그림 4. 동재하시험 개요

### 2.3.2 정동적시험

시험말뚝 ㉔에서 질량 180톤의 반력 매스를 사용해 정동적시험을 실시했다.

정동적시험의 개요를 그림 3에, 시험 광경을 사진 2에 나타내었다.

### 2.3.3 동재하시험

계측에는 올랜드 응용 과학 연구소 건설공학연구소(TNO)제 시험시스템을 사용했다. 동재하시험 개요를 그림 4에 나타내었다.

### 2.3.4 수평재하시험

수평재하시험은 시험말뚝 ㉔의 해저지반면에서 2.2m 상방의 위치를 유압잭으로 수중에서 수평력을 가했다. 여기서, 반력은 주위 말뚝을 이용했다.

## 3. 시험결과

### 3.1 정재하시험결과

정재하시험에서의 말뚝 머리 하중-변위량 등의 관계 일례를 그림 5에, 하중-변위량 등의 관계 일례를

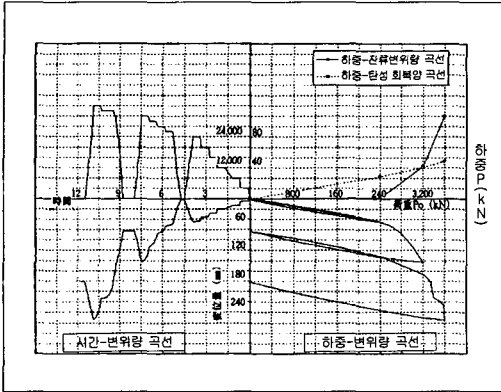


그림 5. 시험결과 종합도(시험말뚝 ⑤)

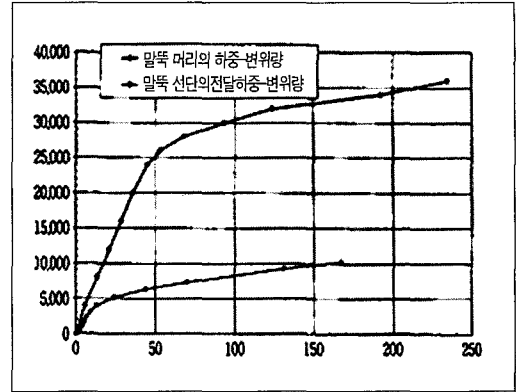


그림 6. 하중 변위량의 관계(시험말뚝 ⑤)

표 2. 한계저항력(정재하시험)(kN)

	시험말뚝 ⑤	시험말뚝 ⑥
제1한계저항력	20,000	26,000
제2한계저항력	32,000	36,000

표 3. 말뚝의 선단지지력(정재하시험)

	시험말뚝 ⑤	시험말뚝 ⑥
말뚝지름(mm)	∅ 1,500	∅ 1,500
지지층의 종류	자갈층	모래층
지지층으로의 근입 길이	3D(4.5m)	3D(4.5m)
선단지지력(kN)	15,700	11,300
외관상의 폐색율(%)	74	53

※ 외관상의 폐색율  $\alpha = \text{선단지지력치} / (300NAp)$   
여기에서 N=40, Ap:말뚝 단면적

표 4. 주변마찰력도(정재하시험)

지층종별	시험치	도시식	제안치
사질토층	3.1N	2N	2N
점성토층	9.2N	10N	10N
자갈층	4.0N	2N	3N

※ 도시식(도로교 시방서의 공식)

그림 6에 나타내었다. 정재하시험결과로 종합적으로 판단한, 제1 및 제2한계 저항력을 표 2에 나타내었다.

제2한계 저항 시의 시험말뚝 축력은 시험말뚝 하

단 근방의 변형률게이지(strain gage) 최하단 위치(하단에서 0.75m 위)에서 상방부터 급격하게 작아졌다. 말뚝은 예상 지지층에 4.5m 관입하고 있으며, 말뚝 선단부근에만 외면 마찰이 급속하게 커졌다고는 생각하기 힘들기 때문에 말뚝 선단부근에서 급변한 축력변화 경향을 말뚝 내주면 마찰영향이라고 생각해, 예상지지층 내 복수측정된 축력을 말뚝 하단 레벨까지 외삽해 선단 지지력으로 했다.

구해진 선단지지력 및 외관상의 폐색율을 표 3에 나타내었다.

지반을 사질토·점성토·자갈 각층으로 나뉘, 각 층마다 주변마찰력도를 구했다. 이 값을 N치와 관련짓고, 시험말뚝 ⑤, ⑥에서 평균한 결과를 표 4에 나타내었다.

주변마찰력도는 자갈층을 제외하고 도로교 시방서(2002)에 제시된 값과 동일했다.

표 3에 나타낸 선단지지력 추정법과 표 4에 제시한 주변마찰력의 제안치를 조합했을 경우의 말뚝 축력분포와 실측 축력분포를 비교하면, 어떤 심도의 경우에도 제안치가 실측치를 상회하지 않고, 말뚝 머리부에서의 축력도 안전측으로 설정할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이로부터 이 방법에 따른 말뚝의



표 5. 말뚝의 선단지지력(정동적시험)

	시험말뚝 ㉔
말뚝지름(mm)	φ1,200
지지층의 종류	자갈층
지지층으로의 근입 길이	3D(3.6m)
선단지지력(kN)	10,800
외관상의 폐색율(%)	80

※ 표 3 참조

표 6. 주면마찰력도(정동적시험)(kN/m<sup>2</sup>)

지층종별	시험치	도시식	제안치
사질토층	3.3N	2N	2N
점성토층	12.0N	10N	10N
자갈층	4.3N	2N	3N

표 7. 동재하시험결과 개요

말뚝 No.	㉑	㉒	㉓
말뚝지름(mm)	φ1,500	φ1,500	φ1,200
말뚝 선단심도 (APm)	-73.5 (자갈)	-86.0 (모래)	-72.6 (자갈)
해머	IHC-S280		
리바운드량(mm)	4.5	4.7	2.2
관입량(mm)	5.6	3.1	6.7
전저항(MN)	12.3	18.7	9.8

극한 저항력을 추정할 수 있다고 판단했다.

### 3.2 정동적시험 결과

자갈층에 3D(3.6m) 근입한 시험말뚝 ㉓를 사용해 정동적시험을 실시했다. 파형 매칭석 결과로부터, 말뚝 머리에서의 정적 극한하중은 26,800kN, 선단 극한지지력은 10,800kN이라고 하는 값을 얻었다. 정재하법의 경우와 동일한 방법으로 외관상 폐색율을 구한 결과를 표 5에 나타내었다.

또한, 지층종류마다 N치와의 관계에서 주면마찰력을 나타내면 표 6과 같이 된다. 이 표에서 알 수

있듯이 시험치는 점성토층에서의 정재하시험결과보다 조금 크지만, 대략 비슷한 것으로 나타났다.

### 3.3 동재하시험결과

동재하시험결과 개요를 표 7에 나타내었다.

표 7에서 알 수 있듯이 IHC-S280해머에 의한 항타종료시의 최종타격당관입량은 3~7mm정도였다. 또한 시간이 경과한 후의 정적저항(정재하시험, 정동적시험 시 말뚝머리에서의 실측 정적 극한하중)을 항타시의 정적저항(동재하시험 결과를 해석해 얻은 말뚝 머리에서의 정적극한하중)으로 나눠서 얻은 지지력증가율(set-up factor)은 약 3~4 정도이었다.

### 3.4 십자 리브의 효과 검토

시험말뚝 ㉑에는 그림 7에 나타낸 것처럼 판두께 22mm의 말뚝 본체 하단부분에 판 두께 22mm의 십자 리브를 길이 2.5D(=3.75m, D:말뚝지름) 구간에 설치했다.

이 효과를 검토하기 위해, 항타종료시(AP-86m), 시공성 조사 및 동재하시험으로 얻어진 저항에 관한 지표(Eh/s=해머 에너지/관입량, CASE 지지력, 선단정적저항 : 파형매칭석(地盤工學會, 2002)로 산출)를 통상의 개단말뚝과 선단 리브가 부착된 말뚝을 비교했다.

십자 리브 부착 말뚝은 개단말뚝에 비해 30~70% 정도지표가 크고, 선단 지지력 증가효과는 30% 이상 기대할 수 있다고 추측된다.

### 3.5 수평재하시험결과

시험말뚝 ㉑에서는 수평재하시험도 실시했다. 재

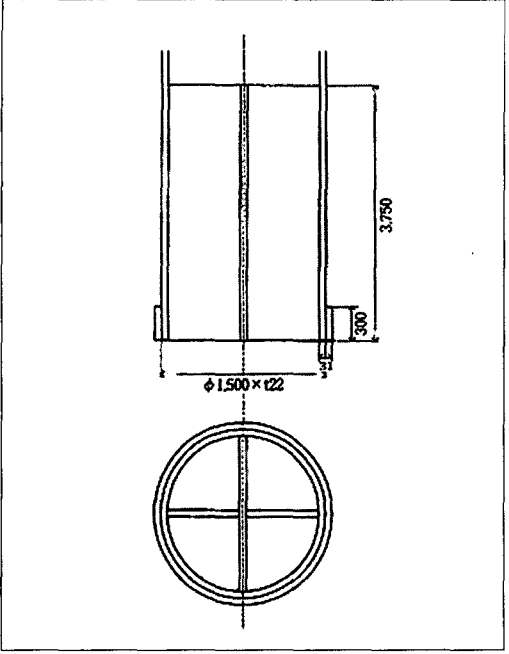


그림 7. 십자리브 설치 개요

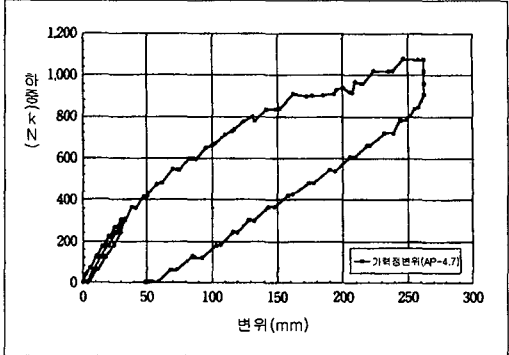


그림 8. 수평하중과 변위의 관계

표 8. 수평지반반력계수(kN/m<sup>2</sup>)

표고AP(m)	수평지반반력계수
-9.0	1,800
-11.8	2,500
-14.1	3,300
-16.9	4,200
-19.8	5,200

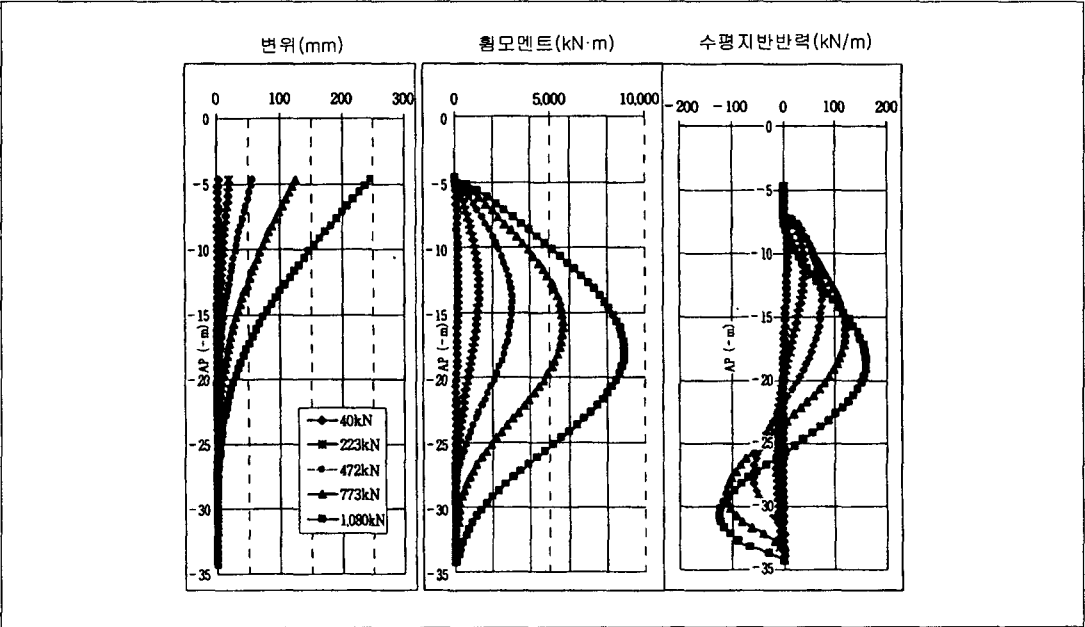


그림 9. 휨모멘트, 변위, 지반반력



하 위치에서의 수평하중과 변위의 관계를 그림 8에 나타내었다.

변형 계측치로 구한 말뚝의 휨모멘트 분포 및 휨 모멘트를 적분·미분해서 구한 변위·지반반력의 분포를 그림 9에 나타내었다.

이러한 변위·지반 반력으로 구한 지반변위 15mm에 대응하는 수평지반 반력 계수를 표 8에 나타내었다.

#### 4. 결론

동경항 臨海大橋(가칭) 건설예정 지점에서, 대구경 강관 말뚝 재하시험을 해상에서 실시, 지지력에 관한 귀중한 데이터를 얻을 수 있었다. 이 결과가 대

구경 강관말뚝의 지지력을 검토할 때 참고가 되면 다행이다. 앞으로, 대구경 강관말뚝의 재하시험 데이터가 더 많이 축적되어, 지지력 기구의 해명이 진행되기를 기대한다.

---

#### 참고문헌

---

1. 横山好幸, 本間政幸, 片山猛, 丸山隆 : 東京港 横斷道路 大口徑 鋼管杭 鉛直載荷試驗(1992), 土と基礎, Vol.40, No.2, pp.47~52, 1992.
2. 地盤工學會(2000), 地盤工學會 基準「杭 鉛直載荷試驗法·同解説」
3. 日本道路協會(2002), 道路橋 示方書·同解説 IV 下部構造編, 2002年 3月.

