

설계 목적의 말뚝 재하시험을 이용한 건설비용 절감 사례 연구

Case Study on Construction Cost Saving of Pile Foundation Using Pile Load Test For Design

정성기¹⁾, Sung-Gi Jung, 최용규²⁾, Yongkyu Choi, 정성교³⁾, Sung-Gyo Jung, 홍인선⁴⁾, In-Sun Hong, 강해관⁵⁾, Hae-Gwan Kang

- ¹⁾ 부산광역시 건설안전관리본부, Senior Engineer, Construction Safety Management Headquarters, Pusan Metropolitan City.
- ²⁾ 경성대학교 공과대학 건설·환경공학부 부교수, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyung-sung Univ.
- ³⁾ 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.
- ⁴⁾ 도화 종합기술공사 구조부 전무이사, Executive Manager, Structural Dept., Dohwa Associated Engineering Services, Ltd.
- ⁵⁾ (주) 지오텍 대표이사, Representative Director, Geotech Ltd.

SYNOPSIS : As a part of study to improve the habitual practice of pile foundation design and generalize the design method of pile foundation using static pile load for design purpose, design for foundations of two piers (p16 and p17) of the second Pusan grand bridge was achieved after performing the static pile load test for design purpose. The determination of method of pile foundation, the determination of construction specification and driving specification of pile foundation, and the confirmation of the effect on construction cost saving were done due to the results of the static pile load test for design purpose, which has not been made in the domestic construction work. It was expected that the drilled shaft foundations (1st choice) and the steel pipe pile foundation (2nd choice) designed by the static pile capacity equation were needed much more construction costs by at least 346% and 55%, respectively, than the steel pipe pile designed by the static pile load test for design purpose (3rd choice).

KEYWORDS : The static pile load test for design purpose, the open-ended steel pipe pile, construction cost saving, ultimate pile capacity, drilled shafts, static pile capacity equation.

1. 서 론

건설부에서 제정한 「구조물 기초 설계 기준」에는 “외말뚝의 축방향 극한 지지력은 말뚝 재하시험에 의해 구하는 것이 가장 좋다. 정재하 시험을 시행하기 곤란할 때에는 정역학적 지지력 공식에 의해서

추정하여도 무방하다.” (건설부, 1986)라고 설명되어 있으나 그 동안 설계 목적의 말뚝 재하시험의 중요성이 인식되지 않아 정역학적 지지력 공식에 의한 추정 설계가 이루어지고 있는 실정이며, 설계 이전 단계에서 재하시험을 수행하여 확인된 말뚝 지지력을 이용한 설계는 이루어지지 않고 있다.

최근 들어 대형 구조물의 붕괴사고들을 계기로 구조물의 안정성이 강조되면서 시공 초기 단계에서 설계 지지력 확인 목적의 재하시험이 차츰 증가되고 있으나, 이의 수행은 많은 노력, 시간, 그리고 비용이 소요된다는 이유로 아직도 재하시험을 기피하는 공사 현장이 많은 실정이다. 실제 말뚝 재하시험이 수행된 국내 현장에서 재하시험이 수행된 말뚝들중 극한 지지력은 물론이고 항복 지지력마저도 확인하지 못한 것이 58%에 달하였다 (지반공학회, 1994). 따라서, 말뚝 기초의 과잉 설계로 인한 경제적 손실은 연간 1000억원 이상으로 추정되어 실로 막대함을 알 수 있었다 (지반공학회, 1994).

따라서 본 연구에서는 비경제적인 말뚝 기초의 설계 관행을 해소하기 위하여 1997년 9월경 착공될 제2부산대교 영도측 일부 교각 기초를 비교 대상 모델로 선정하여 국내 공사에서 시행 사례가 없는 설계 목적의 말뚝 재하시험을 설계 이전 단계에서 수행하여 말뚝 기초 공법을 선정함과 동시에 건설비용 절감 효과를 확인하였다. 설계 목적의 말뚝 재하시험을 수행하여 설계된 강관 말뚝 기초 (제3안)는 당초 설계되었던 현장 타설 말뚝 기초 (제1안)과 정역학적 지지력 공식을 사용한 강관 말뚝 기초 (제2안) 등에 비해 최소 34%와 55%의 건설비용 절감 효과가 예상되었다.

2. 설계 목적의 말뚝 재하시험

말뚝 재하시험은 수행 목적에 따라 설계 목적의 말뚝 재하시험과 설계 지지력 확인 목적의 말뚝 재하시험으로 구분할 수 있으며 (최용규, 1997a) 그 상세한 내용은 표 1에 요약하였다.

Table 1. Classification of pile load test due to purpose.

항 목	분 류	설계 목적의 말뚝 재하시험	설계 지지력 확인 목적의 말뚝 재하시험
목적		<ul style="list-style-type: none"> 극한 지지력을 결정 설계 인자를 결정 → 설계에 반영 말뚝 항타 기준 설정 	설계 지지력의 확인
재하시험 수행 시기		설계 이전 단계에 수행	시공 초기에서 수행
재하하중의 크기		항복 또는 극한 지지력을 결정할 수 있을 만큼의 하중 (본 시험의 경우 최대 5.5MN 상계하였음)	허용 설계 지지력의 2배 이상
재하하중의 용량		현저하게 커짐	전자에 비해 작은 용량으로 수행 가능
장점		<ul style="list-style-type: none"> 말뚝의 극한 지지력을 충분히 활용한 설계가능 (주변 마찰력 활용) 최적 설계 가능 → 비용 절감 및 안전성 확보 공기 절감 가능 속하중 계속 장치 부착 → 하중 전이 해석 수행 가능 침하량에 대한 확인 및 분석 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 설계 지지력만 확인 → 극히 안전측의 설계 가능 시공 중에 재하시험 수행 → 추가 장비 반입 없음
단점		<ul style="list-style-type: none"> 재하하중의 크기와 재하하중의 용량이 커짐 → 재하 시험비용 약간 증가 장비 반입, 기타 부대장비 등의 조달에 어려움 속하중 계속 장치 부착에 따른 계속 장치 및 측정기 필요 정밀한 지반조사, 현장시험, 실내 역학시험 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 말뚝의 극한 지지력을 충분히 활용하지 못함 → 비경제적인 설계 최적설계가 되지 못함

국내에서 수행사례가 없는 설계목적의 말뚝 재하시험은 극한 지지력을 확인하여 말뚝 기초의 최적화 설계에 활용될 수 있으며, 설계 이전단계에 수행되어야 한다. 말뚝의 극한 지지력을 확인할 수 있을 만큼 대용량의 재하틀이 필요하고 말뚝 재하시험만을 위한 현장을 설치하여야 하므로 통상적으로 수행되어 온 말뚝 재하시험에 비해 재하시험비는 다소 증가할 것이다. 그러나, 말뚝의 축하중의 전이 해석을 수행하여 말뚝 기초의 최적 설계를 할 수 있고 침하량에 대한 확인 및 해석을 할 수 있으며, 최적 항타 기준도 제시할 수 있을 것이다.

반면, 국내에서 통상적으로 수행되고 있는 설계 지지력 확인 목적의 말뚝 재하시험은 시공중에 시행되어지며, 설계 지지력의 2배이상만 재하하면 되므로 항복 지지력마저도 확인하지 못하는 경우가 대부분이다. 따라서, 설계 지지력 확인 목적의 말뚝 재하시험은 기초 말뚝의 지지력을 충분히 활용할 수 없는 비경제적이고 비효율적인 과업일 수 밖에 없다.

3. 말뚝 재하시험 및 시험 결과의 분석

3.1 시험 계획

본 연구에서는 여러 가지 시험들이 실시되었다. 말뚝의 극한 수직 지지력 결정을 위하여 말뚝 정재하시험을 수행하였으며, 말뚝의 시공 방법 결정과 항타 관리 기준 설정을 위하여 시험항타를 수행하였다. 또한, 말뚝의 항타 관리 기준 설정을 위하여 항타 완료 직후 PDA를 수행하였으며, 항타시 인접지반에 발생하는 지반 진동을 측정하여 시공방법 결정에 활용하였다. 지층구조 확인, 실내 역학 시험용 비교란 시료 채취 및 PMT 수행, 그리고 지반 진동 측정을 위하여 시추공들을 형성하였다. 시추 도중 비교란 시료의 채취가 곤란하였으므로 지반의 특성치 산출을 위해 PMT를 수행하였다.

말뚝의 설치 위치, 시추조사 위치, 지반진동 측정 위치, PMT 실시 위치, 그리고 PDA가 실시된 말뚝 위치 등을 그림 1에 나타내었다.

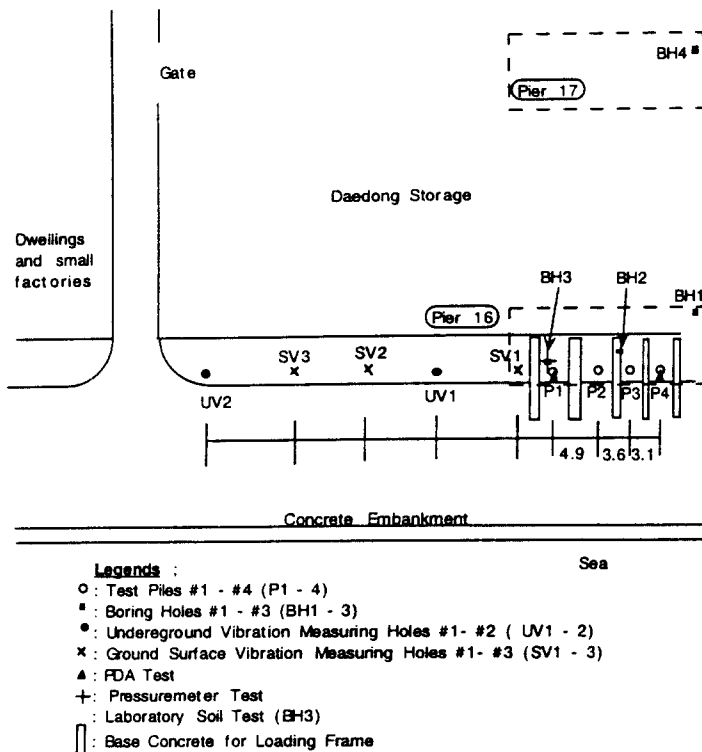


Fig. 1. Test site and various tests performed in the field

Table 2. Installation method and its purpose of test piles.

시험 말뚝	시공 일자	항타기 용량(KN)	설치 방법	목적
P4	2월 22일 ~ 24일	70	· 매립층 천공후 삽입 · 항타 시공	· 말뚝 재하 시험 · 기초공법 선정 · 경제성 검토
P3	2월 26일 ~ 27일	70	· 매립층 천공후 삽입 · 항타 시공	· 말뚝 재하 시험 · 기초공법 선정 · 경제성 검토
P1	3월 8일 ~ 9일	100	· 매립층 상부 2.5m까지만 굴착하여 큰 암석덩어리 제거 후 다시 매립 · 매립층에서 부터 직접 항타	· 말뚝 재하 시험 · 기초공법 선정 · 경제성 검토
P2	3월 18일 ~ 19일	100	· 매립층 상부 2.5m까지만 굴착하여 큰 암석덩어리 제거 후 다시 매립 · 매립층부터 직접 항타	· 말뚝 재하 시험 · 기초공법 선정 · 경제성 검토

시험 말뚝은 직경 508mm, 두께 12mm인 개단 강관 말뚝이었으며, 길이 15m의 강관 파이프를 용접하여 소요의 길이까지 제작하였다. 시험 말뚝 P1~P4에 대한 설치 과정 및 시험 목적 등을 표 2에 요약하였다. 시험 말뚝에 부착된 축하중 계측 장치를 부착하였는데 본 실험에 사용된 축하중 계측 장치(Mansur et al. 1970)는 전기 저항식 스트레인 게이지였으며 각 깊이에서는 180° 방향으로 1쌍의 게이지를 부착하였다.

3.2 시험 방법 및 절차

본 연구에서는 축하중 계측 장치가 부착된 시험 말뚝의 준비, 시험 말뚝의 시공, 말뚝 재하시험 수행의 순으로 시험을 수행하였으며, 하중 전이 시험을 위하여 축하중 계측 장치를 부착하였으므로 축하중 계측 장치의 부착 과정, 보호 방법 등은 참고 문헌(최용규 1997)에 자세히 설명되었다.

시험 말뚝은 유압 항타기에 의해 타격관입되었으며 항타과정, 시공순서, 그리고 말뚝 지지층의 선정과정 등에 관한 자세한 것은 참고문헌(최용규, 1997)을 참고할 수 있을 것이다.

말뚝 정재하 시험은 사하중(철근) 상재 방법에 의해 수행되었으며 말뚝 정재하 시험에서 측정할 항목들(즉, 말뚝 머리 하중, 말뚝 머리 침하량, 말뚝 각 위치에서의 축하중)을 본 연구자가 구축한 자동화 계측 시스템을 이용하여 측정하였다. 각 측정치들은 정재하 시험을 수행하기 직전에 영점 조정을 하였으며, 말뚝의 항타 영향을 고려하기 위하여 말뚝 타격 관입 단계에서 측정된 항타 잔류하중의 분포를 말뚝 재하 시험시 측정된 축하중의 분포에 가산해 주었다(Fang, 1991; Briaud, 1984).

3.3 시험 결과 및 분석

시험 부지내에서 시행된 3개의 시추공들(BH1~3)에 대한 지반 주상도는 매우 상이하게 설명되어 있으므로 PMT시험용 시추공인 BH3에서 채취한 NX크기 시료와 BH1의 SPT실시 후 채취한 시료 등을 토대로 지층 구조를 표 3과 같이 결정하였다. 여기서, 통일 분류법에 의한 표기는 NX크기 시료에 대해 실시된 실내 시험 결과에 의한 것이다.

Table 3. Representative subgrade strata.

시추구조	지표면으로부터 깊이(m)	통일 분류법	N 치	비 고
매립층	10~11	SW-SM		
모래	16~17			
연약점토	23~28	ML	8~10	· 연약 점토 · PMT실시
견고한 점토	35	CL	20~30	· 단단한 점토 · PMT실시(24~24.5m) · 30m전후에서모래및자갈질 함유된 층 존재(N) 50 · PMT실시(28.2~28.7)
매우 견고한 점토	38~39	CL	N> 50	· 매우 단단한 점토 · 모래와 자갈 함유
자갈	42~45		N) 50	
풍화토	47~48			
풍화암	65~66			

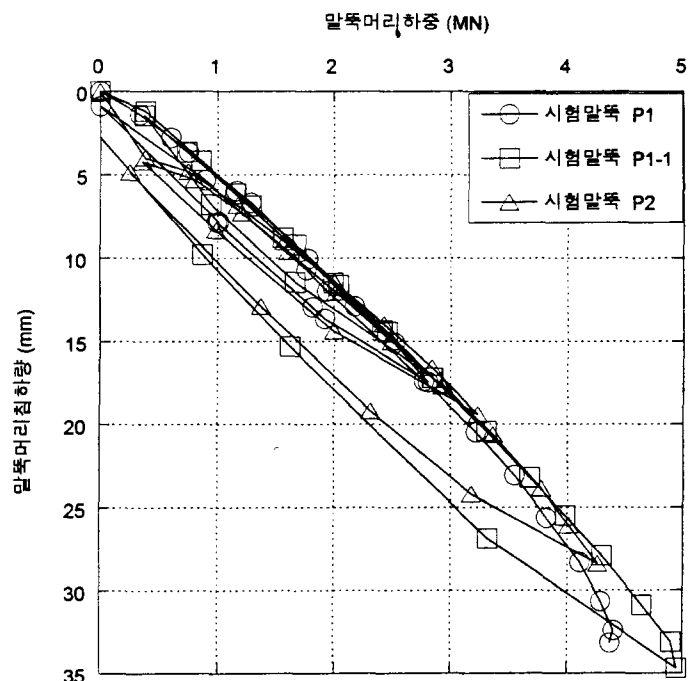


Fig. 2 Pile head load vs settlement curves for test piles

말뚝 정재하 시험은 P1과 P2에 대해 실시되었다. 시험 말뚝 P1에서는 2회의 정재하 시험이 수행되었으며, 첫 번째 재하시기는 말뚝 설치 후 14일 경과시이었고 반력 상재하중의 부족으로 극한 지지력을 구할 수 없었다. 두 번째 재하시기는 말뚝 설치 후 30일 경과시이었고 충분한 반력 상재 하중을 확보하여 극한 지지력을 구할 수 있었다. 시험 말뚝 P2에서는 말뚝 설치 후 30일 경과시 재하 시험이 수행되었으며 극한 하중 상태까지 상재하지 못하였다. 그림 2에서는 각 재하 시험시의 말뚝머리 하중과 말뚝머리 침하량의 관계를 나타내었다. 시험 말뚝 P1에서 말뚝 설치 14일과 30일 경과시 수행된 재하시험 결과로부터 하중-침하량 곡선이 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 이것은 시간이 경과함에 따라 말뚝 주변 지반이 안정되면서 말뚝 주변 마찰력이 증가되었기 때문이다. 그림 3에는 P1말뚝에 대한 축하중의 깊이에 따른 분포도를 나타내었는데, 여기서 항타에 의하여 말뚝과 지반에 내재된 지지 하중의 영향을 고려하기 위하여 항타 잔류하중을 말뚝 정재하 시험시 측정된 축하중의 분포에 가산해 주었다. 말뚝에 작용된 하중의 대부분은 주변 마찰력에 의해 지지되었으며, 선단 강재부에서 발휘되는 지지력은 하중의 크기에 따라 크게 영향을 받지 않았다.

말뚝 정재하 시험에서 극한 (또는 최대 하중 재하시) 지지력, 항복 지지력, 그리고 허용지지력을 구하였으며, 각 하중 단계에서의 말뚝 침하량을 구하여 표 4에 나타내었다. 그림 3과 그림 4에서 말뚝의 극한 지지력은 4.85 MN이었으며, 말뚝 주변 마찰력 (관내토 폐색력 포함)은 4.55 MN이었고 선단 강재부 지지력은 0.3 MN이었다. 또한, 극한 상태에서 말뚝의 침하량은 32mm이었다.

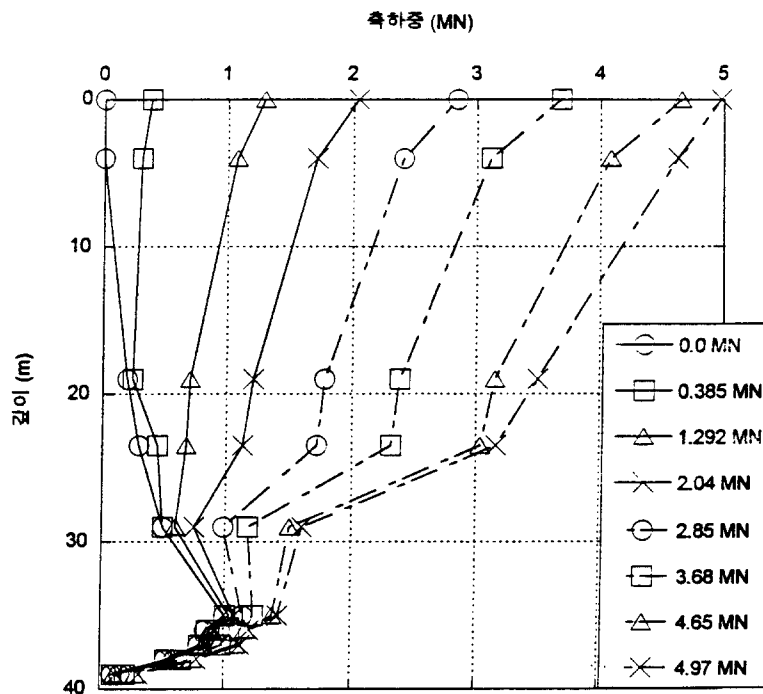


Fig. 3 Distributions of pile axial load along the pile depth
(test pile P1, 1 month after pile installation)

Table 4. Pile capacity and settlement at each loading stage.

(a) Pile capacity

(단위 : MN)

	극한 또는 최대 지지력	항복 지지력	허용 지지력	시험 수행 시기
P1	4.4	3.2	1.60	말뚝 설치 후 14일 경과
P1	4.85	3.5	1.60	말뚝 설치 후 30일 경과
P2	4.4	3.3	1.65	말뚝 설치 후 30일 경과

(b) Settlement

(단위 : mm)

	극한 또는 최대 지지력	항복 지지력	허용 지지력	시험 수행 시기
P1	31.0	20.0	8.5	말뚝 설치 후 14일 경과
P1	32.0	22.0	9.0	말뚝 설치 후 30일 경과
P2	27.0	17.0	7.5	말뚝 설치 후 30일 경과

4. 말뚝 기초 공법 선정 및 건설 비용 절감 효과

4.1 말뚝 기초 공법 선정

제2부산대교 영도측 육상부의 교각 기초는 민가들이 인접해 있는 관계로 직경 1,500 mm인 현장 타설 콘크리트 말뚝으로 설계되어 있었으나, 지질 조사 및 지층 탄성파 탐사 결과 시험 대상 지역은 단층 파쇄대에 위치하여 기반암인 연암이 약 66m이하에서 나타났으므로 현장 타설 콘크리트 말뚝의 적용성과 공사비 부문에서 문제점이 야기되었다. 다행히 영도측 육상부 교각중 P16과 P17은 단층 파쇄지역에 위치해 있었으나 주변의 민가들이 교각위치로부터 약 40~50m 떨어져 있었으므로 항타 강관 말뚝 공법의 적용을 고려할 수 있었다.

강관 말뚝 기초와 현장 타설 콘크리트 말뚝의 장·단점을 비교하였으며 강관 말뚝 기초는 시공시 진동을 유발시킬 수 있으나 본 시험 항타에서 측정된 지반 진동 측정치는 규제 기준치에 훨씬 못 미치고 있었다. 강관 말뚝 기초는 설계 목적의 말뚝 재하시험을 수행하는 것을 전제하였으므로, 지지력과 발생 가능한 침하량을 확인할 수 있어 기초의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다. 따라서, 지하 66m이상 천공하여 현장타설 말뚝을 시공할 경우 발생할 수 있는 품질 관리 및 시공상의 문제점과 고가의 건설 공사비로 인하여 P16과 P17 교각 기초는 항타 개단 강관 말뚝 공법을 채택하였다.

4.2 건설 비용 절감 효과

본 연구에서는 당초 설계 되었던 1,500mm 직경의 현장 타설 콘크리트 말뚝 기초 (제1안), 정역학적 지지력 공식에 의해 설계된 개단 강관 말뚝 기초 (제2안) 그리고 설계 목적의 말뚝 정재하 시험을 이용한 개단 강관 말뚝 기초 (제3안)에 대한 건설 공사 비용을 비교하였으며 표 5에 나타내었다. 표 5에는

말뚝에 작용될 하중과 허용 지지력, 소요 말뚝 개수 그리고 건설 비용 등을 나타내었다. 여기서, 제1안의 경우 지반 천공에 의한 주변 지반의 연약화로 인하여 주변 마찰력을 기대하기 어렵고 말뚝 선단부의 부등 침하시 말뚝 구조체의 안정성이 우려되므로 연암층에의 근입을 기준으로 하였다. 제2안의 경우 말뚝 선단부의 신뢰성 있는 지지력 확보를 위해 일반적인 지지층으로 설계하고 있는 연암층 상단을 기준으로 할 수도 있었으나 풍화암층 상단을 지지층으로 하였다. 제3안은 말뚝에 과용력이 작용되지 않은 상태에서 말뚝을 가능한 최대 깊이까지 타격 관입시켜 설치하였다.

동일한 제원 (직경 : 508mm, 두께 : 12mm)을 사용한 개단 강관 말뚝 기초일지라도 설계목적의 말뚝 재하 시험을 수행할 경우 (제3안)에는 정역학적 지지력 공식을 사용한 경우 (제2안)에 비해 최소 55%의 공사비를 절감할 수 있을 것으로 예상되었으며, 현장 타설 콘크리트 말뚝 (직경 : 1,500mm)을 사용한 경우 (제1안)에 비해 최소 346%의 공사비 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상되었다 (정성기, 1997).

Table 5. Comparison of construction cost among the selected types.

구 분		제 1 안	제 2 안	제 3 안
		암반의 일축 압축 강도 적용	정역학 지지력 공식 적용	설계 목적의 말뚝 정재하시험 적용
		R.C.D 말뚝 ($\phi=1,500$ mm)	강관 말뚝 ($\phi=508$ mm, $t=12$ mm)	강관 말뚝 ($\phi=508$ mm, $t=12$ mm)
반력(톤)/개	평상시	495.8	73	108.3
	지진시	562.3	87.3	129.7
허용지지력 (톤)	평상시	848	81	161.7
	지진시	1272	121.6	242.5
길 이	m	66	49	43
말뚝개수	개	54	300	200
각점공사비	천원	3,008,644	324,471	193,618
강관말뚝	천원	-	873,180	510,840
소 계	천원	3,008,644	1,197,651	704,458
계 경 비	천원	1,259,356	419,349	241,542
도급공사비	천원	4,268,000	1,617,000	940,000
관급자재비	천원	401,450	-	-
말뚝 재하시험비	천원	-	-	100,000
총공사비	천원	4,669,450	1,617,000	1,046,000
제 3안 기준 공사비 대비	%	446	155	100

5. 결론

하중 전이 실험이 포함된 설계 목적의 말뚝 재하시험을 수행하여 말뚝 기초 공법을 선정하였으며, 건설 비용 절감 효과를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 설계 목적의 말뚝 재하 시험을 수행한 결과 P16과 P17 교각 기초에 가장 적합한 기초 형식은 항타 개단강관말뚝기초였다. 본 연구에서는 직경 508mm, 두께 12mm, 그리고 관입 길이 38~44m의 강관 말뚝을 사용하였으며, 극한 지지력은 4.85 MN이고 허용지지력은 1.60 MN이었으며 허용 하중 시 침하량은 7.5~9.0 mm이었다.
2. 설계 목적의 말뚝 재하시험 수행에 따라 강관 말뚝의 적용성을 확인하였다. 즉, 말뚝 항타기는 인접 민가에 소음을 최소화하기 위하여 7~10톤 유압항타기를 사용하였으며, 선정된 각 위치로부터 지표면 전파 진동과 지중 전파 진동의 크기를 측정된 결과 최소 규제기준치에도 훨씬 못미치고 있어 인접 민가에 대한 항타진동의 영향은 없는 것으로 판단하였다.

3. 설계 목적의 말뚝 재하시험을 이용한 강관 말뚝 기초 공법이 가장 경제적인 방안이었다. 제3안은 제2안과 제1안에 비해 각각 최소 55%와 34%의 공사비의 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상되었다. 이와 같이 설계 목적의 말뚝 재하시험을 시행할 경우 건설비용의 절감효과는 매우 컸다.
4. 설계 목적의 말뚝 재하 시험을 수행할 경우, 말뚝 기초 공사비의 절감은 물론이고 정확한 공사 시방과 확실한 시공을 통하여 말뚝 기초 구조물의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 예상되었다.

참고문헌

1. 건설부 (1986), "구조물 기초 설계 기준 제 4장 말뚝 기초편," pp. 193-206.
2. 정성기 (1997), "설계 목적의 말뚝 재하 시험을 이용한 말뚝 기초 건설 비용 절감에 관한 연구," 동아대학교 산업대학원 건설공학과 석사학위 논문, 1996년 6월, pp 34-39.
3. 최용규 (1997a), "제 2 부산대교 건설 실시 설계-설계 목적의 말뚝 재하시험 결과 보고서," 부산광역시 건설 안전관리 본부, 1997. 6, p. 16.
4. 한국 지반 공학회 (1994), "창립 10주년 기념 한국 지반공학 발자취," pp. 394-397.
5. Briaud, J.L. & Tucker, L. (1984), "Piles in sand : A Method Including Residual Stresses," Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, No.11, Nov. 1984, pp. 1666-1680.
6. Fang, H.Y (1991), "Foundation Engineering Handbook," Van Nostrand Reinhold, New York, 1991, pp. 517-520.
7. Mansur, C.I, & Hunter, A.H. (1970), "Pile Test - Arkansas River Project," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 96, No. SM5, Sept. 1970, pp. 1545 ~1582.

감사의 글

본 연구에서는 제2부산대교 실시 설계를 위해 수행된 설계 목적의 말뚝 정재하 시험 과업의 일부를 활용하였으며, 본 연구를 위해 지원을 아끼지 않은 부산시 건설 안전 본부 관계자들과 말뚝 항타에 의한 지반 진동 측정을 위해 수고해 준 한국과학기술원 토목공학과 김동수 교수께 감사드립니다.