

말뚝기초의 경제적인 설계절차에 의한 건설비용 절감 사례 연구

Case Study for Construction Cost Saving by means of Economic Pile Design Procedure

최용규* · 임종석** · 권오균***

Choi, Yong-kyu · Lim, Jong-seok · Kwon, Oh-kyun

Abstract

In this study, the economic pile design procedure using the proof test results was proposed. In order to improve the inappropriate pile design routine, the proof test for 6 pile cases were performed and the construction saving effect were analyzed. The saving rate of construction cost with the small diameter piles and the large diameter drilled shafts were 34 - 47 and 0 - 55 %, respectively.

Keywords : Pile foundation, Construction cost saving, Proof test, Economic design technique

요 지

본 연구에서는 검증시험결과를 활용한 말뚝기초의 경제적인 설계절차를 제안하였다. 그리고 비경제적인 말뚝기초의 설계관행을 해소하기 위하여 6개 사례를 선정하여 설계를 목적으로 한 말뚝 정재하시험 (즉, 검증시험)을 수행하고, 검증시험 결과를 활용하여 건설비용 절감효과를 분석하였다. 말뚝기초 건설비용 절감효과는, 말뚝의 하중지지능력을 확인할 수 있는 소구경 말뚝에서는 34 - 47 %로 나타났으며, 말뚝의 최대하중지지능력 확인이 곤란한 대구경 말뚝에서는 0 - 55 %로 나타났다.

주요어 : 말뚝기초, 건설비용절감, 검증시험, 경제적인 설계

* 정회원 · 경성대학교 건설 · 환경공학부 교수

** 정회원 · 목포대학교 토목공학과 부교수

*** 정회원 · 계명대학교 토목공학과 부교수

1. 서론

건설부에서 제정한 구조물 기초 설계기준((사)한국지반공학회, 2002) 및 해설((사)한국지반공학회, 2003)에는 지반의 축방향 극한지지력은 일정규모이상의 공사에서는 설계단계에서 시험말뚝을 설치하고 압축재하시험을 실시하여 확인하도록 하였으며, 제반 여건상 설계 단계에서 재하시험 수행이 곤란한 경우에는 지지력 계산공식에 의하여 추정 설계하도록 되어 있으나 이 경우에도 시공초기에 실제말뚝에 대한 압축재하시험을 실시하여 극한지지력을 확인하도록 규정하였다. 그리고, 도로교 설계기준((사)한국도로교통협회 & 한국지진공학회, 2000) 및 해설집((사)대한토목학회, 2001)에서도 예비설계단계에서 선정된 말뚝을 시험말뚝으로 시공하고 검증시험을 수행한 후 예비설계를 수정하거나 또는 재설계하여 설계를 완성하도록 규정하고 있다.

그러나 그동안 재하시험의 중요성이 인식되지 않아 대부분 정역학적 지지력 공식에 의해 말뚝기초의 설계가 이루어 졌다. 말뚝 정재하시험이 실시된 경우도 설계를 목적으로 한 시험이 아니라 시공된 말뚝에 대한 설계하중 지지 여부를 확인하는 목적이었다. 아직까지도 설계분야 및 시공 현장에서는 상당한 노력과 시간 그리고 비용이 많이 소요된다는 이유로 말뚝 정재하시험을 기피하고 있는 실정이다. 실제 말뚝 재하시험이 수행된 국내 현장(202개)에서도 시험말뚝 중 58%가 극한지지력은 고사하고 항복지지력마저도 확인되지 않은 채 설계지지력만 확인하는 시험으로 종결되고 있어 말뚝기초의 과잉설계로 인한 시간적 그리고 경제적 손실이 막대함을 알 수 있다(이명환, 1994).

따라서, 본 연구에서는 비경제적인 말뚝기초의 설계관행을 해소하기 위하여 6개의 실제 사례 (소구경 강관말뚝 3개 및 대구경 현장타설말뚝 3개)를 선정하여 설계를 목적으로 한 말뚝 정재하시험(즉, 검증시험)을 수행하고, 그 결과를 활용하여 건설비용 절감효과를 분석하였다. 또한, 검증시험결과를 활용하는 말뚝기초의 경제적인 설계기술에 관하여 제안하였다.

2. 국내 설계기준에 나타난 말뚝기초의 설계 방법

2.1 도로교 설계기준 및 해설집

2.1.1 말뚝기초 설계기준

도로교 설계기준((사)한국도로교통협회 & 한국지진공

학회, 2000) 및 해설집((사)대한토목학회, 2001)에서는 말뚝기초의 설계와 관련하여 그림 1과 같은 설계절차를 통하여 설계를 완성하도록 규정하였다. 즉, 예비설계단계, 검증시험단계, 그리고 예비설계의 수정 또는 재설계 단계를 거쳐 설계를 완성하도록 하였다.

예비설계 단계에서는 지반조건을 고려하고 말뚝의 제원을 가정하여 여러 가지 지지력 산정 공식들에 의하여 극한 지지력을 예측한 후 소정의 안전율을 적용하여 허용지지력을 추정할 수 있다.

검증시험(Proof test)단계에서는 예비설계단계에서 정한 말뚝을 시험말뚝(AASHTO, 1996)으로 선정하여 시험말뚝을 시공하고 말뚝 정재하시험(ASTM D1143-81 (Reapproved by 1994))을 수행하는 단계이다. 이 단계에서는 시험말뚝 시공을 통하여 말뚝기초의 공사시방을 결정할 수 있게 되는데, 예를 들어, 항타 말뚝의 경우 항타 관입성 검토 및 항타 장비의 선정, 현장타설 말뚝의 경우 시공시방과 현장타설 콘크리트의 품질관리기준 등을 설정할 수 있다. 시공된 시험말뚝에 대한 축하중전이 거동 측정을 수반한 말뚝 정재하 시험을 통하여 말뚝기초의 극한 지지력을 결정하고 축하중전이 측정을 통하여 말뚝기초의 축방향하중지지 거동을 측정하도록 한다.

2.1.2 시험말뚝에 대한 검증시험

(1) 검증시험의 범위

목적에 따른 말뚝재하 시험 종류를 표 1에 설명하였다. 여기서, 시험말뚝에 대한 검증시험은 설계단계에서 실시하며 추정된 예비설계를 확인하여 경제적인 설계를 이루기 위한 것이다.

설계목적의 말뚝재하시험에서는 시험말뚝(Test pile)을 시공하여야 하는데, 시험말뚝은 실물크기이거나 크기 효과(Scale effect)의 영향을 받지 않을 정도의 축소말뚝이어야 한다. 시험말뚝에는 적절한 위치에 축하중 계측용 센서를 설치하여야 한다. 검증시험에서는 극한하중을 구할 수 있을 정도까지 하중을 재하하여야 하며, 적어도 항복하중까지는 확인할 수 있어야 한다. 이 때, 각 재하하중단계에서는 말뚝 축하중의 분포도를 측정하여 축하중전이양상을 확인할 수 있어야 한다. 연직압축재하시험 뿐만 아니라 필요하다면 인발재하시험과 수평재하시험도 수행할 수 있다. 상세한 지반특성치가 파악되어야 합리적인 설계를 수행할 수 있다.

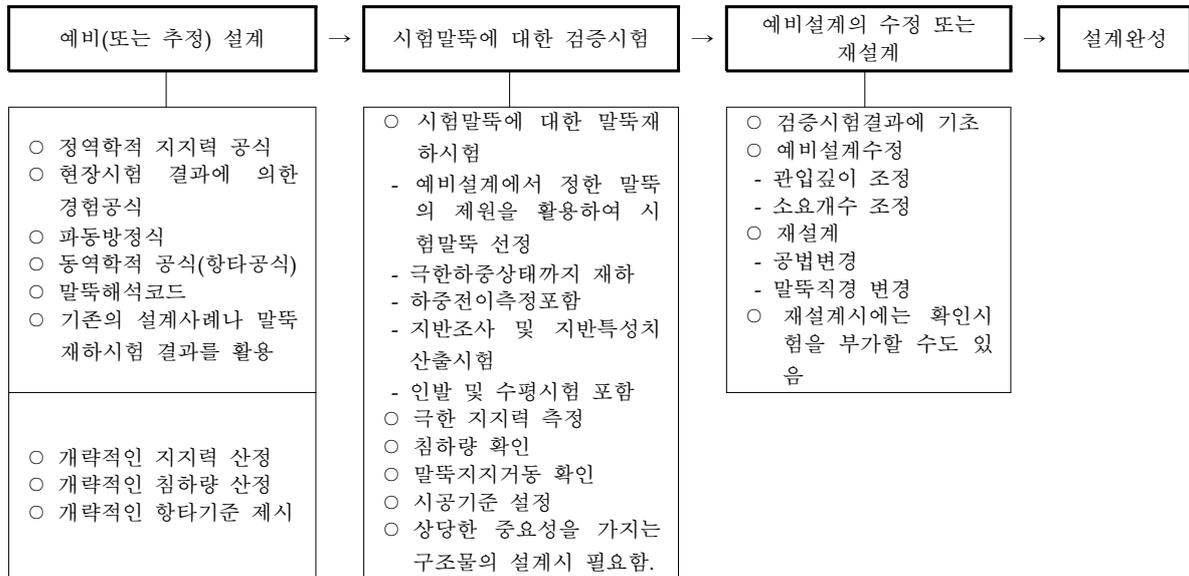


그림 1. 말뚝기초 설계단계의 정립

표 1. 목적에 따른 말뚝재하시험의 분류

구분	시험말뚝에 대한 검증시험 (설계목적의 말뚝재하시험)	통상적인 말뚝재하시험
목적	- 말뚝기초의 설계에 활용하여 최적화 설계를 수행하기 위한 (시공시방결정도 포함됨)	- 설계하중의 지지 가능 여부 확인
기본 원칙	- 극한하중까지 재하 (최소한 항복하중까지는 재하하여야 함) - 하중전이실험 포함 - 연직압축재하, 연직인발재하, 수평재하실험	- 설계하중의 2배 이상 - 연직압축재하
시험 방법	- 실물크기 말뚝 또는 축소말뚝 - 정재하시험 - 필요한 경우에는 정·동재하시험, PDA, 기타 방법도 부가적으로 수행할 수 있음	- 실물크기말뚝 - 정재하시험, 정·동재하시험, PDA, 기타 방법
수행 시기	- 설계단계	- 시공시
시험 결과	- 하중 - 침하량 곡선 (극한하중단계까지) - 축하중의 분포도 (전이양상) - 시공기준 및 항타기준	- 하중 - 침하량 곡선 (항복하중이하)
지반 조사	- 상세한 지반조사 → 지층구분 - 실내 및 원위치 역학시험 → 지반특성치	- 지층구분을 위한 지반조사에서 N치만을 측정함 - 지반조사결과는 거의 활용되고 있지 못함 (설계사례들을 고찰한 결과임)
비고	- AASHTO 규정에서 의무화하고 있음 - 일본 도로교 시방서의 해설에서도 가장 신뢰성 있는 방법으로 추천 - NAFAC DM - 7.2에서 시공초기에 수행하도록 의무화하고 있으며, 또한 가장 신뢰성있는 것으로 설명하고 있음 - 각종 문헌들과 기준에서도 가장 신뢰성있는 것으로 기술하고 있음 - 건교부 제정 “도로교 설계기준” 개정(2000년) 내용에 반영하였음 - 국내에서는 채택된 사례가 거의 없음(최용규 등, 1998)	- 국내에서 시행된 말뚝재하 시험의 일반적인 유형임

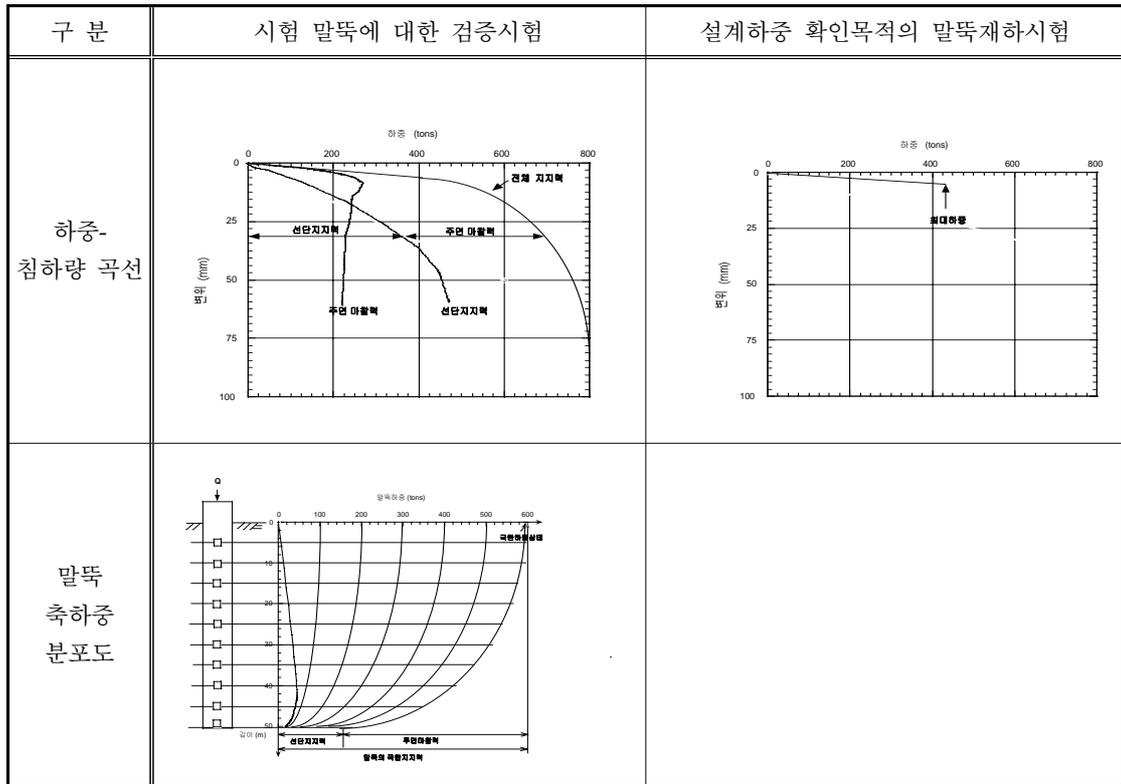


그림 2. 목적에 따른 말뚝재하시험들에서 구한 결과 예

검증시험에는 연직압축재하시험뿐만 아니라 필요하다면 인발재하시험, 수평재하시험, 부마찰력측정시험 그리고 부마찰력 저감효과확인시험 등도 포함될 수 있다.

검증시험을 수행하여 구한 대표적인 결과를 그림 2에 수록하였으며, 통상적으로 수행되어온 말뚝재하시험의 결과도 함께 도시하였다.

(2) 적용 범위

이와 같은 검증 시험을 통한 경제적인 설계방식은 도로 교 교량의 기초말뚝 뿐만 아니라 철도교량, 단면적 20m² 이상의 박스 구조물, 취수장 및 정수장, 폐수 처리장, 하수 처리장, 지하철 공사, 연면적 2만m² 이상의 대형 건물 등의 말뚝기초 설계에도 적용할 수 있다. 설계단계에서 수행되는 시험말뚝에 대한 정재하시험에는 다소 많은 경비가 소요되어 설계비에서 다소 증가할 수 있으나, 경제적인 설계를 이룰 수 있다면 공사비에서 큰 절감을 이룰 수 있으므로 건설예산의 절감을 이룰 수 있다. 사례 연구를 통하여 말뚝기초 공사비가 육상과 해상공사인 경우 약 10억원과 17억원을 초과하는 건설공사에서는 경제성을 가지는 것으로 보고되어 있다(정성기 등, 1998).

(3) 시험 예산 확보 방안 및 건설 예산절감 효과

설계용역의 발주청에서는 설계단계에서 시험말뚝의 시공 및 검증시험을 수행하는데 소요되는 비용을 설계용역비에 반영하여야 한다. 검증시험은 개정된 도로교 설계기준에서 필수적으로 부가된 설계절차이므로 발주청에서는 기존의 설계용역비와는 별도의 개념으로 시험말뚝 시공비와 시험비를 확보하여야 한다. 이 비용은 통상적인 말뚝재하시험에 소요되는 비용보다 다소 고가이므로 설계용역비에서 다소 증가될 수 있다. 그러나 검증시험결과에 기초하여 경제적인 설계를 이룰 수 있다면 말뚝기초분야의 시공비를 약 30% 이상 절감할 수 있을 것으로 예상되므로 전체적인 건설 예산을 10%이상 절감할 수 있을 것이다. 또한, 시험말뚝에 설치된 계측센서를 기초분야의 유지·관리에 활용할 수도 있으므로 유지·관리비용도 절감할 수 있을 것이다.

시험말뚝의 시공비와 검증시험비는 현재 대가기준이 없으므로 향후 적정한 대가기준을 정할 때까지 기수행된 사례들에 적용된 적산자료 및 건적 등에 의하여 계상하고 있다.

2.2 구조물 기초 설계기준 및 해설집

구조물 기초 설계기준((사)한국지반공학회, 2002) 및 해설((사)한국지반공학회, 2003)에서는 말뚝의 축방향 허용지지력은 말뚝의 허용하중과 지반의 허용지지력을 각각 계산한 다음 이 두가지 값중에서 작은 값을 택하여 적용해야 하며, 말뚝의 축방향 변위는 상부 구조물의 허용범위 이내로 규정하고 있다. 구조물 기초 설계기준 해설(2003)에서는 국내에서는 시공상의 한계 때문에 지반의 허용지지력은 말뚝재료의 허용하중에 비하여 낮은 경향이 있으므로 말뚝의 축방향 허용지지력은 지반의 허용지지력에 의하여 결정되는 경우가 많다.

구조물 기초 설계기준(한국지반공학회, 2002) 및 해설(한국지반공학회, 2003)에는 말뚝의 허용하중은 말뚝재료의 압축응력, 이음에 의한 감소, 장경비에 의한 감소, 부주면 마찰력, 무리말뚝 영향 그리고 말뚝침하량 등을 고려하여 판정하도록 하였다. 또한, 지반의 축방향 극한지지력은 일정 규모이상의 공사에서는 설계단계에서 시험말뚝을 설치하고 압축재하시험을 실시하여 확인하도록 하였으며, 제반 여건상 설계 단계에서 재하시험 수행이 곤란한 경우에는 지지력 계산공식에 의하여 추정 설계하도록 되어 있으나 이 경우에는 신뢰도가 극히 낮기 때문에 시공초기에 실제말뚝에 대한 압축재하시험을 실시하여 극한지지력을 확인하도록 규정하였다.

외말뚝의 축방향 지지력을 결정하는 방법으로는 정역학적 지지력 공식, 현장시험 결과에 의한 경험공식, 파동방정식, 동역학적 항타공식, 정적·동적 재하시험 및 기존자료에 의한 추정법 등이 있으며, 축방향 지지력 결정의 목적, 현장여건 등에 따라 선택적으로 적용된다고 설명되어 있다. 즉, 말뚝기초의 설계와 관련하여 말뚝기초 설계시 경제성에 대한 검토를 수행하여야 한다는 것을 의미한다.

3. 검증시험결과를 활용한 말뚝기초의 경제적인 설계 절차

3.1 기본사항

먼저, 시험말뚝에 대한 검증시험을 수행해야 한다. 소구경 말뚝의 경우에는 극한(또는 항복)하중을 확인할 수 있도록 하여야 한다. 예를 들면 직경 609mm의 경우 1,000

톤 정도의 재하용량을, 직경 800mm의 경우 1,500톤 정도의 재하용량을 갖춘 재하시스템을 준비하여야 한다. 대구경 말뚝의 경우에는 극한(또는 항복)하중까지 재하하는 것이 극히 곤란하지만 공사비 절감효과를 높이기 위해서는 가능한한 재하용량을 늘여야 한다. 직경 1,500mm이상의 말뚝에서는 재하용량을 3,000 - 3,500톤 이상으로 하여야 한다. 검증시험에서는 축하중 계측용 센서를 설치하여 말뚝축하중전이를 측정하여 축하중지지양상을 확인할 수 있어야 한다.

검증시험 결과 분석을 위하여 각 지층의 역학적 특성치를 알 수 있어야 한다. 이를 위하여 실내역학시험(삼축압축시험, 직접전단시험 등) 또는 원위치시험(CPT, PMT, DMT, SPT)을 선택적으로 실시하여야 한다.

3.1.2 경제적인 설계절차

검증시험결과를 활용한 경제적인 설계절차는 다음과 같다. 검증시험결과로는 말뚝머리 하중 - 침하량 관계, 축하중분포도가 사용되어진다.

- i) 축하중 계측용 센서가 설치된 시험말뚝을 시공한다.
- ii) 시험말뚝에 대한 정재하시험을 수행한다. 시공초기에는 본 말뚝도 시험말뚝으로 사용될 수 있다. 이 때, 말뚝머리 하중 - 침하량 관계와 축하중분포도를 측정하여야 한다.
- iii) 말뚝머리하중 - 침하량 관계로부터 허용지지력(Q_{a1})을 결정한다. 소구경 말뚝의 경우에는 극한(또는 항복)하중을 결정한 후 소정의 안전율을 적용시켜 허용지지력을 구한다. 그러나 대구경 말뚝의 경우 극한(또는 항복)하중을 구하는 것이 극히 곤란할 수 있으므로 재하가능한 최대하중에 안전율 2.0을 적용시켜 최소허용지지력(Q_{a1})을 구할 수 있다.
- iv) 축하중 분포도로부터 주면마찰력과 선단지지력을 분리할 수 있는 데, 소구경 말뚝의 경우 극한(또는 항복)하중 시 값들에 분리안전율을 적용시켜 허용지지력(Q_{a2})을 구할 수 있다. 분리안전율로는 주면마찰력의 경우 1.0, 1.5, 2.0을 사용할 수 있으며 (Tomlinson, 1994), 선단지지력의 경우 3.0을 사용할 수 있다. 대구경 말뚝의 경우 적용된 최대하중에 분리안전율을 적용시켜 최소허용지지력(Q_{a2})을 구할 수 있다.

v) 축하중 분포도를 분석하여 각 지층의 주면마찰 응력과 선단지지 응력을 구할 수 있다. 이 값들을 이용하여 작용부위별 저항력을 구할 수 있는데 소구경 말뚝의 경우 극한(또는 항복)하중시 값에 소정의 안전율을 적용하여 허용지지력(Q_{a3})을 구할 수 있다. 그러나 대구경 말뚝의 경우 최소허용지지력(Q_{a3})을 구할 수 있다.

vi) 위에서 구한 3종류의 허용지지력값중에서 가장 작은 값을 허용지지력으로 한다.

vii) 최대하중조합시 말뚝캡에 작용되는 총 연직하중을 상기 과정에서 구한 허용지지력으로 나누어 말뚝의 소요 개수를 결정한다.

4. 사례연구를 통한 건설비용 절감효과 분석

본 연구에서는 비경제적인 말뚝기초의 설계관행을 해소하기 위하여 총 6개의 사례를 선정하여 설계목적의 말뚝정재하시험을 수행하였고, 검증시험결과를 토대로 말뚝기초의 재설계를 실시하여 건설비용 절감효과를 분석하였다.

4.1 대상 사례 개요

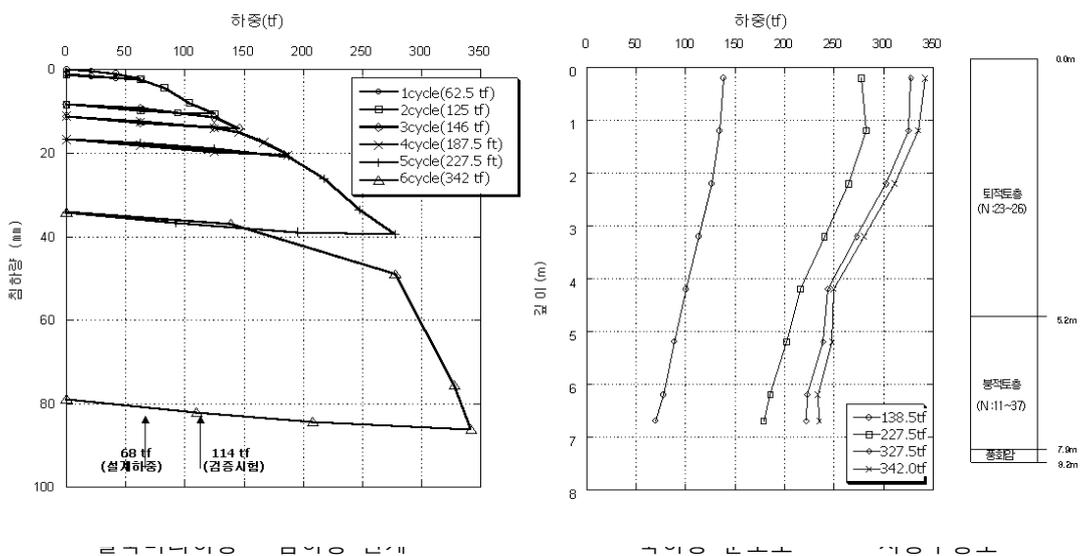
소구경 강관말뚝 사례로는 3가지를 선정하였다. 사례 1은 배수박스 기초로 사용된 말뚝의 경우인데 풍화토층에 말뚝의 선단이 풍화토층에 관입되어 있고 말뚝의 길이가 8.0m로 짧아 선단지지력이 50%정도 발휘되었다. 사례 2는 연약토층위에 건설된 지하차도 기초로 사용된 말뚝의 경우인데, 연약한 실트질층을 통과하여 말뚝선단부가 자갈

층에 지지되었고 이 경우에도 선단지지력이 60%정도 발휘되었다. 사례 3은 지상철 교각기초로 사용된 말뚝의 경우인데, 상부 연약층을 통과하여 말뚝 하부 10m정도가 자갈혼재된 모래층에 관입되어 있고 말뚝의 길이가 길어 마찰말뚝으로 거동하고 있었다.

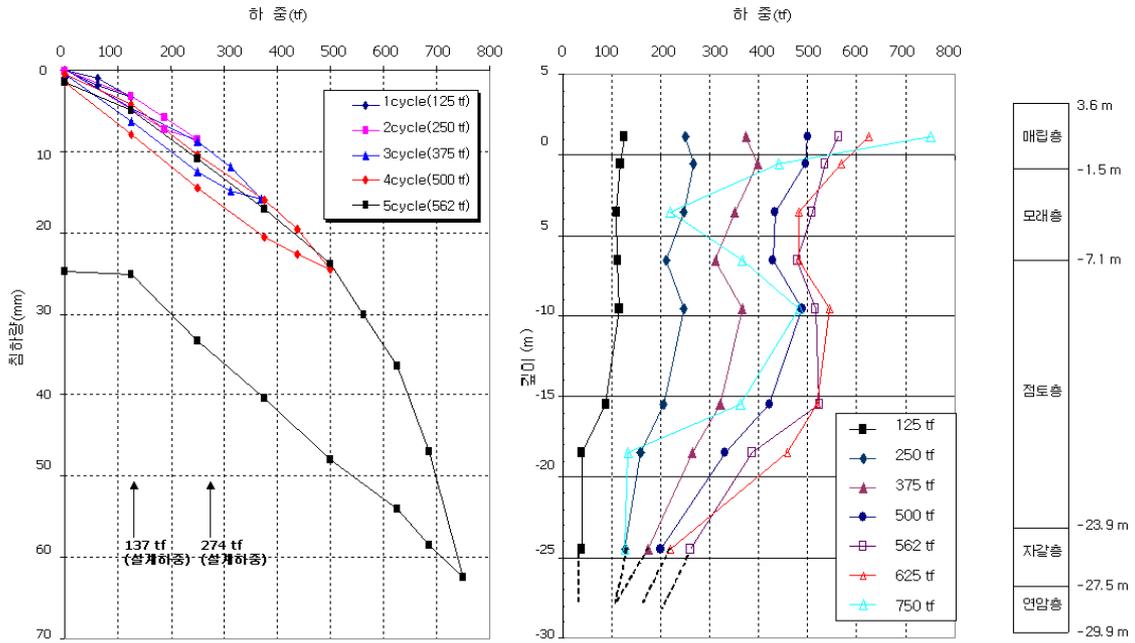
대구경 말뚝 사례로도 교량의 교각기초로 사용된 3가지를 선정하였다. 사례 4는 연약토층과 풍화토층을 통과하여 말뚝의 선단이 풍화암층에 관입된 경우이며 재하시험의 재하용량을 설계하중의 2배까지만 계획하였다. 사례 5는 연약한 실트질층위에 장래 부지정지를 위하여 성토 계획이 수립되어 있는 지역이었으므로 부마찰력을 고려하여 설계지지력이 과소평가되어 있고 말뚝의 선단은 풍화암에 4m정도 관입되었다. 사례 6은 일반토사 매립층, 준설패립층 풍화토층을 관통하여 풍화암층에 5m 정도 관입되었다. 상기의 대구경 말뚝의 3가지 사례는 모두 마찰지지말뚝으로 거동하였다.

4.2 건설비용 절감 효과 분석 방법

6개의 사례에 대한 검증시험 결과를 그림 3에 나타내었는데, 말뚝머리하중 - 침하량 관계, 축하중 분포도 그리고 지층 구성도를 사례별로 정리하였다. 그리고 말뚝머리하중 - 침하량 관계 그림에는 검증시험결과에 기초하여 결정된 말뚝의 허용지지력을 표시해 두었으며, 예비설계단계에서 계산공식에 의해 산정된 설계하중도 함께 나타내었다. 여기서 대구경 말뚝의 경우에는 검증시험에서 항복지지력마저도 구할 수 없었으므로 최소허용지지력 값을 나타내었다.



(a) 사례 1 (경성대학교 지반공학연구실, 2000b)

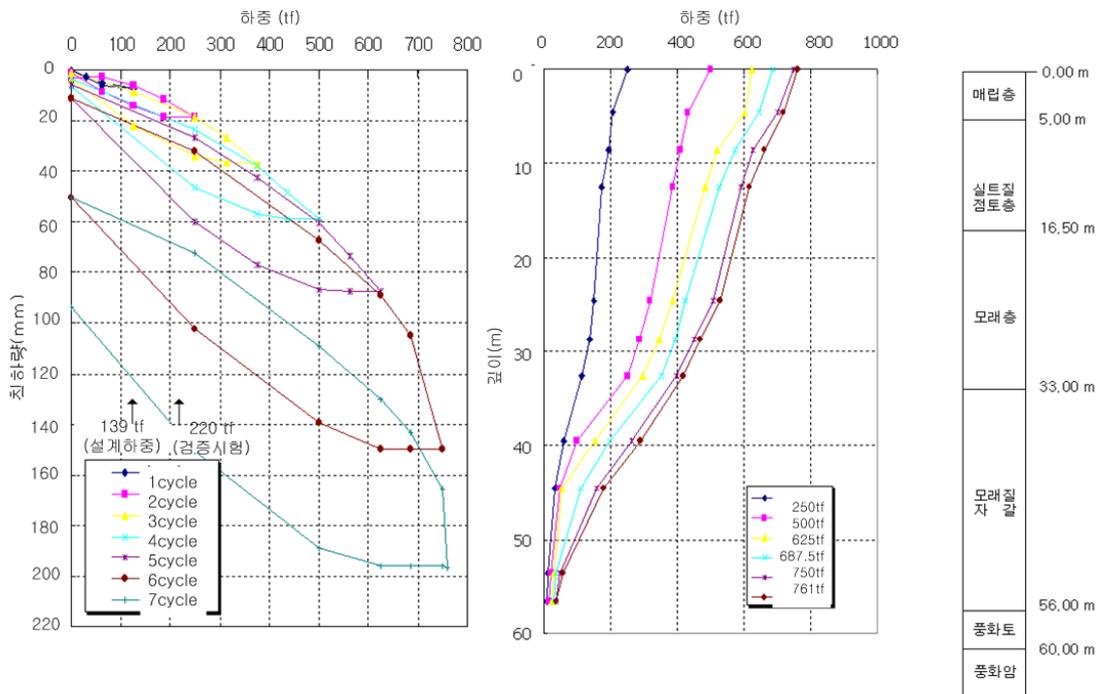


말뚝머리하중 - 침하량 관계

축하중 분포도

지층주상도

(b) 사례 2 (경성대학교 지반공학연구실, 2002b)

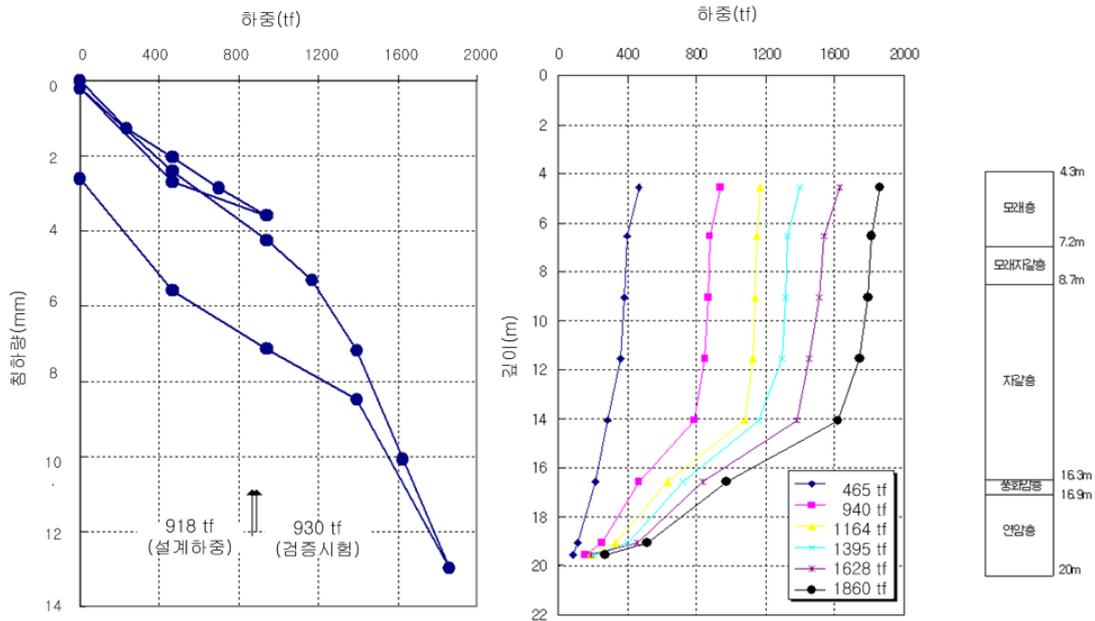


말뚝머리하중 - 침하량 관계

축하중 분포도

지층주상도

(c) 사례 3 (경성대학교 지반공학연구실, 2002a)

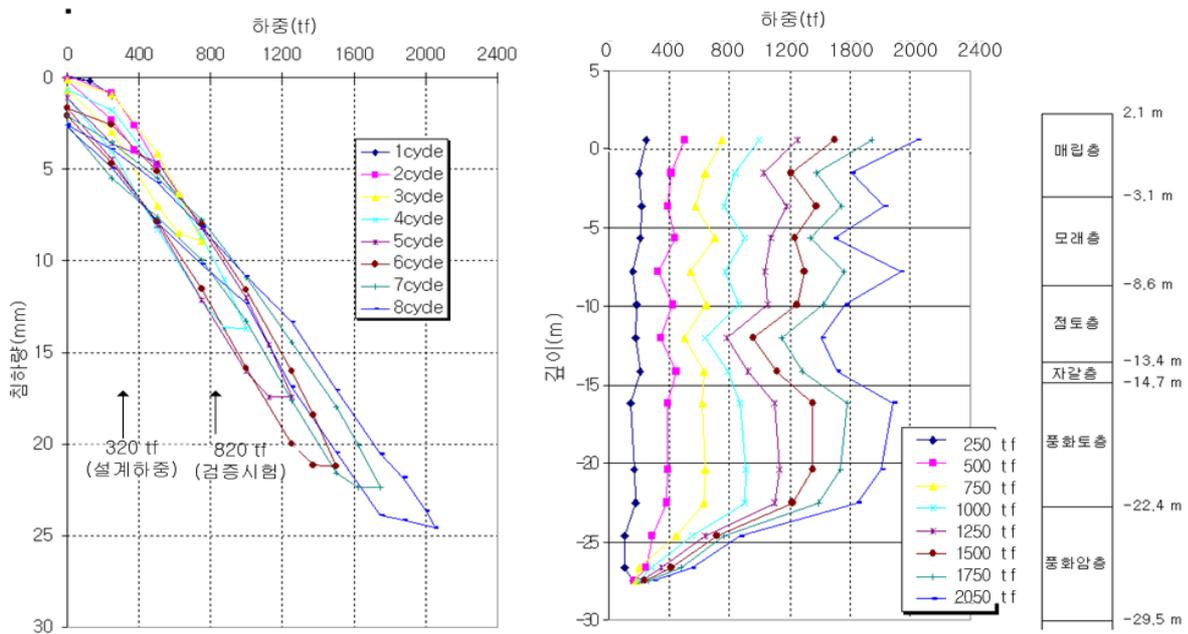


말뚝머리하중 - 침하량 관계

축하중 분포도

지층주상도

(d) 사례 4 ((주)현대건설, 2001)

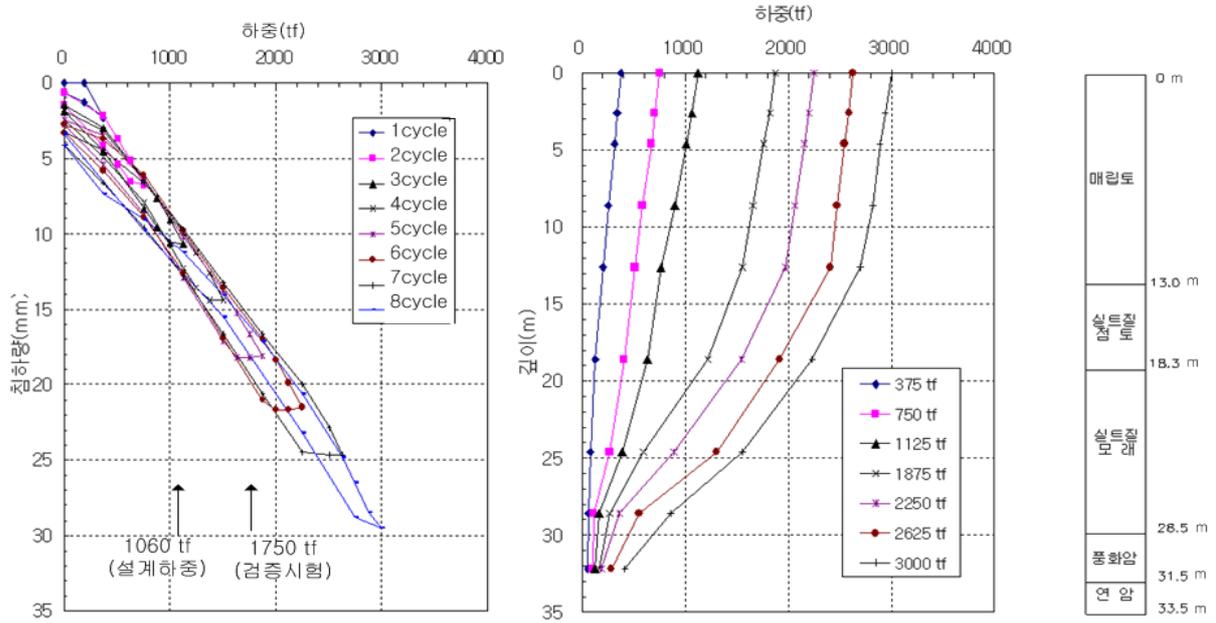


말뚝머리하중 - 침하량 관계

축하중 분포도

지층주상도

(e) 사례 5 (경성대학교 지반공학연구소, 2002b)



말뚝머리하중 - 침하량 관계

축하중 분포도

지층주상도

(6) 사례 6 (경성대학교 지반공학연구실, 2003)

그림 3. 사례들에 대한 검증시험 결과 요약

4.2.1 극한(또는 항복)하중이 확인된 경우

소구경 말뚝의 경우에는 검증시험을 통하여 극한하중과 항복하중을 모두 결정할 수 있었으나 본 연구에서는 항복

하중에 안전율 2.0을 적용시켜 허용지지력으로 하였다. 이렇게 결정된 허용지지력과 설계하중을 비교하여 기설계된 말뚝의 수량을 조정하는 것으로 하여 건설공사비 절감효과를 분석하였으며 그 결과를 표 2에 요약하였다.

표 2. 소구경 말뚝 사례 분석

구 분		사례 1	사례 2	사례 3
시험 목적		시공초기 시행된 검증 시험	시공초기 시행된 검증 시험	시공초기 시행된 검증 시험
시험 말뚝	종류	강관 말뚝	강관 말뚝	강관 말뚝
	직경/두께(mm)	609/12	609/14	609/14
	길이(m)	8.0	27.4	48.5
최대 재하 용량(tonf)		342	750	780
설계 하중(설계서, tonf)		68	137	139
지지력 결정 방법		말뚝머리하중-침하량 관계 (극한 또는 항복 하중에 의해 분석)	말뚝머리하중-침하량 관계 (극한 또는 항복 하중에 의해 분석)	말뚝머리하중-침하량 관계 (극한 또는 항복 하중에 의해 분석)
허용 지지력 (검증시험, tonf)		114	274	220
기존설계시의 말뚝 소요 물량(본)		144	15	32
검증시험을 통한 재설계시의 말뚝소요 물량(본)		86	8	21
절감 효과(%)		40	47	34

사례 1의 경우 풍화토층에 관입되어 있어 말뚝의 실제 지지능력의 50%이하 수준을 사용하고 있는 상태이었으며 말뚝을 더 깊게 항타하여 풍화암층에 지지시켰다면 지지능력을 충분히 발휘시킬 수 있었을 것으로 판단되었다. 이렇게 하였다면 사용말뚝의 수량을 더 줄일 수 있어 경제성을 훨씬 높일 수 있었을 것으로 보인다.

사례 2의 경우 말뚝이 풍화암층 위에 있는 자갈층에 지지되어 있어 지지능력은 충분히 발휘하고 있는 것으로 보인다. 계산공식에 의한 설계하중은 지반의 지지능력의 50% 정도만을 사용하고 있는 상태이었다.

사례 3의 경우 자갈 혼재된 모래층이 두껍게 분포하고 있으며 풍화암층은 GL (-)65m이하에서 나타나고 있어 이 지층에 까지 말뚝을 관입시키는 것은 극히 비경제적인 것으로 판단하여 자갈 혼재된 모래층에 말뚝을 지지시키는 것으로 하였다. 따라서, 지반의 지지력은 충분히 활용한 것

으로 보이며, 계산공식에 의한 설계하중은 매우 작게 산정된 것임을 알 수 있었다.

항복하중이 확인된 소구경 말뚝의 경우 검증시험에 의해 지반의 지지능력을 제대로 확인할 수 있었으며, 이를 이용하여 공사비 절감효과를 분석해 본 결과 34 - 47 %정도의 비교적 일정 범위에 드는 것을 알 수 있었다.

4.2.2 극한(또는 항복)하중이 확인할 수 없는 경우

대구경 말뚝의 경우에는 검증시험을 통하여 극한지지력은 고사하고 항복하중마저도 결정할 수 없었으므로 재하가 가능한 최대하중을 최소항복하중으로 가정하였다. 최소항복하중에 안전율 2.0을 적용시켜 최소허용지지력으로 하였다. 이렇게 결정된 최소허용지지력과 설계하중을 비교하여 기설계된 말뚝의 수량을 조정하는 것으로 하여 건설공사비 절감효과를 분석하였으며 그 결과를 표 3에 요약하였다.

표 3. 대구경 현장타설말뚝 사례 분석

구 분		사례 4	사례 5	사례 6
시험 목적		시공초기 시행된 검증 시험	시공초기 시행된 검증 시험	시공초기 시행된 검증 시험
시험 말뚝	종류	현장타설 말뚝	현장타설 말뚝	현장타설 말뚝
	직경(mm)	1800	1800	1800
	길이(m)	20.1	25.6	34.0
최대 재하 용량(tonf)		1860	2050	3500
설계 하중(설계서, tonf)		918	320	1060
지지력 결정 방법		말뚝머리하중-침하량 관계 (재하가능한 최대용량에 의해 분석)	말뚝머리하중-침하량 관계 (재하가능한 최대용량에 의해 분석)	말뚝머리하중-침하량 관계 (재하가능한 최대용량에 의해 분석)
허용 지지력(검증시험, tonf)		930	820	1750
기존설계시의 말뚝 소요 물량 (본)		5	20	9
검증시험을 통한 재설계시의 말뚝소요 물량 (본)		-	9	6
절감 효과(%)		-	55	33

사례 4의 경우 계산공식으로 구한 설계하중의 2배만큼만 재하시키는 통상적인 설계하중 지지여부만을 확인하는 목적으로 수행된 말뚝재하시험이었으므로 공사비 절감효과를 전혀 얻을 수 없었다.

사례 5의 경우 최소허용지지력을 1025톤으로 구할 수 있었으나 부마찰력이 나타나는 관계로 이를 고려하여 최소허용지지력은 820톤으로 산정되었다. 계산공식에 의한 말뚝의 설계하중은 320톤으로 산정되었는데 이 값은 너무 작게 산정된 것으로 판단되었다. 따라서, 검증시험에 의한 기초공사비 절감효과는 매우 크게 나타났다.

사례 6의 경우 3,500톤까지 재하하였으나 항복의 징후조차 발견할 수 없었다. 따라서, 직경 1,800mm 현장타설 말뚝의 항복하중은 이 값을 크게 상회할 것으로 예상되었다. 최소허용지지력은 1,750톤으로 구하였으며, 계산공식에 의한 설계하중은 통상적으로 사용하는 값보다 비교적인 값으로 사용하였으나 이 경우에도 공사비 절감효과는 33%이었다.

대구경 말뚝의 경우 검증시험에 의해 지반의 지지능력을 제대로 확인할 수 없었으므로 최소허용지지력을 이용하여 공사비 절감효과를 분석해 본 결과 0 - 55%정도로 매우 크게 분산되었다. 여기서, 공사비 절감효과가 0%로 나타난 사례는 말뚝재하시험 용량을 설계하중의 2배로 계획하였기 때문에 말뚝의 지지능력을 더 이상 활용하지 못한 경우에 해당하는 사례이었다. 이와 같이 절감효과가 큰 범위로 분산되어 나타나는 원인으로는 과소평가된 지지력, 검증시험시 극한(또는 항복)지지력의 확인 곤란, 고재하용량 재하시스템의 미비 등을 들 수 있다.

5. 결론 및 제언

말뚝 정재하시험에 의한 검증시험을 6개 현장에서 수행하였으며 시험결과를 분석하여 말뚝기초의 건설공사비절감효과를 확인하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 경제적인 말뚝기초 설계절차를 소구경 말뚝과 대구경 말뚝으로 구분하여 제안하였으며, 소구경 말뚝의 경우 극한(또는 항복)하중을 이용하였으며 대구경 말뚝의 경우 재하기능한 최대하중을 이용할 수 있도록 하였다.

2. 소구경 말뚝 사례에서는 검증시험을 통하여 극한(또는 항복)하중을 확인할 수 있어 말뚝의 최대지지능력을 효과적으로 이용할 수 있었다. 이와 같은 경우 말뚝기초 건설공사비 절감효과는 34 - 47%로 나타났으며 비교적 일정 범위에 들고 있음을 알 수 있었다.

3. 대구경 말뚝 사례에서는 말뚝재하시스템의 최대재하하중만큼만 재하할 수 있어 말뚝의 최대지지능력을 확인할 수 없었다. 따라서 이와 같은 경우 건설공사비 절감효과는 재하시스템의 재하용량에 따라 달라지게 되는데 본 사례연구에서는 0 - 55%로 나타났다. 여기서, 공사비 절감효과가 0%로 나타난 사례는 말뚝재하시험 용량을 설계하중의 2배로 계획하였기 때문에 말뚝의 지지능력을 더 이상 활용하지 못한 경우에 해당하는 사례이었다. 이 경우를 제외하면 공사비 절감효과는 33 - 55%로 나타나고 있었다.

4. 대구경 말뚝 사례에서 건설공사비 절감효과가 매우 큰 범위로 분산되어 나타나는 원인은 과소평가된 지지력, 검증시험시 극한(또는 항복)지지력의 확인 곤란, 고재하용량 재하시스템의 미비 등을 들 수 있다.

5. 설계목적의 말뚝 재하시험(즉 검증시험)을 시행할 경우 말뚝기초의 경제적인 설계로 인한 건설비용 절감효과가 매우 큰 것을 알 수 있었으며, 국내 현장에서 과거에 시행된 비경제적인 설계 관행을 개선할 경우 국가 경제적으로 막대한 건설비용의 절감이 기대된다. 따라서, 향후 검증시험 자료가 충분하게 축적된다면 말뚝 종류, 지반 종류, 시공법 등에 따른 공사비 절감효과를 체계화할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2001학년도 경성대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

(접수일자 : 2003년 10월 8일)

참 고 문 헌

1. 경성대학교 지반공학연구소 (2000a), 광안대로 건설공사 대구경말뚝 정재하시험과 수치해석을 통한 말뚝기초의 안정성 검토 보고서.
2. 경성대학교 지반공학연구소 (2000b), 왜관 고속철도공사 정재하시험 및 하중전이 측정 보고서.
3. 경성대학교 지반공학연구소 (2002), 부산지하철 3호선 312공구 정재하시험 및 하중전이 측정 보고서.
4. 경성대학교 지반공학연구소 (2002), 수영3호교 건설공사 정재하시험 및 하중전이 측정 보고서.
5. 경성대학교 지반공학연구소 (2003), 남항대교 1공구 건설공사 정재하시험 및 하중전이 측정 보고서.
6. 대한토목학회 (2001), 도로교 설계기준 해설 (하부구조편), pp. 207 - 214.
7. 이명환 (1994), 한국 지반공학 발자취, 한국지반공학회.
8. 정성기, 최용규, 정성교 (1998), 설계 목적의 말뚝 재하시험을 이용한 말뚝기초 건설비용 절감에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제18권 제III-3호, pp 341-352.
9. 한국도로교통협회 & 한국지진공학회 (2000), 도로교 설계기준, p. 441.
10. 한국지반공학회 (2002), 구조물 기초 설계기준.
11. 한국지반공학회 (2003), 구조물 기초 설계기준 해설, pp. 283 - 286.
12. (주)현대건설 (2001), 구미 국가산업단지 제4단지 진입도로 건설공사 재하시험 보고서.
13. AASHTO (1996), Standard specifications for high bridge, 16th edition, p. 69.
14. ASTM D 1143-81 (Reapproved by 1994) (1994), Standard Test Method For Piles Under Static Axial Compressive Load, Annual book of ASTM standards.
15. Tomlinson, M. J. (1994), Pile Design and Construction practice, 4th Ed. p. 134.