

## 양방향 고유압 말뚝재하시험을 이용한 대형건축물 기초의 공사비 절감에 관한 사례 연구

### A Case Study on Construction Cost Reduction of Large-size Building Foundation using Bi-directional High Pressure Pile Load Test(BDHPLT)

김남일<sup>1)</sup>, Nam-il Kim, 김상일<sup>2)</sup>, Sang-il Kim, 최용규<sup>3)</sup>, Yongkyu Choi

<sup>1)</sup> 포스코 건설 차장, Deputy General Manager, POSCO Engineering & Construction Co., Ltd.

<sup>2)</sup> 한국양방향말뚝재하시험협회, 사무국장, Secretary general, Korea Bi-Directional Pile Load Test Association.

<sup>3)</sup> 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsoong Univ.

**SYNOPSIS** : The bi-directional high pressure pile load test(BDH PLT) which is a kind of pile load tests was conducted to find out a reasonable design procedure of large-diameter drilled shafts of large-size building structures. The behaviors of bearing capacity and settlement of the large-diameter drilled shafts were analyzed and the results obtained from BDH PLT were also compared with those obtained from the equations suggested in the specification. In case of the reasonable design procedure adopted, the construction cost could be saved at least 15 ~ 28%. It could be concluded that BDH PLT should be needed for the foundation construction cost reduction of the high-rise building structures.

**Keywords** : High-rise building, large-diameter drilled shafts, Bi-directional high pressure pile load test(BDH PLT), the foundation construction cost reduction

## 1. 서론

일반적으로 초고층 건축물 공사시 기초말뚝의 수량은 주변마찰력과 선단지지력을 구하여 허용지지력을 산정함으로써 결정하게 되는데, 현재 국내에서 사용하고 있는 시방서에서 제시하고 있는 기초말뚝의 설계지지력 공식과 경험식은 기초말뚝 지지능력을 안전측으로 평가하고 있어 과대 설계에 의한 공사비 낭비 우려가 있다.

이러한 문제를 해결할 수 있는 가장 신뢰성 있는 방법으로는 말뚝기초에 실제 하중을 가하여 지지력과 침하량을 확인하는 정재하시험법이 있으나 재하용량에 한계가 있어 대형기초(대구경 현장타설말뚝 및 대단면 바렛말뚝)의 경우 대체 시험법이 필요하게 되었다.

일반적으로 초고층 건축물에서는 다층의 지하층이 시공되므로 건축물 말뚝기초의 시공이 지표 아래에서 마무리가 되고, 탑다운(Top Down)공법이나 오픈컷(Open Cut)공법으로 터파기 한 후, 말뚝 두부를 정리하여 실제 구조물을 시공하고 있다. 이러한 현장조건에서는 정재하시험 시 필요한 반력시스템을 설치하는 것이 불가능하다. 그래서 일반적인 건축현장에서는 말뚝기초에 대한 건전도 시험을 정재하시험의 대체 수단으로 사용하고 있는 실정이다. 그러나 건전도 시험은 말뚝 재료의 건전도를 시험하는 방법이지 지지능력을 확인할 수 있는 방법이 아니므로 말뚝기초의 지지능력에 대한 신뢰성을 확보하기 어렵다.

말뚝정재하시험은 일종의 실물시험으로 말뚝에 실하중을 가하여 실제 상부구조물이 건설되었을 때를

재현하므로 신뢰도가 높다는 장점이 있으나, 하중재하를 위한 사하중 혹은 가압 및 반력 시스템의 종류 및 설치방법, 넓은 시험부지 등과 같은 공기와 현장조건의 제약을 많이 받는다((사)한국지반공학회, 2002). 그리고 현재 건축물의 시공이 초고층을 지향하고 있어 말뚝 기초의 1개당 필요한 지지능력이 크게 증가하고 있으므로 정재하시험으로는 재하용량 한계로 인하여 말뚝의 지지력과 침하량을 확인하는 것은 극히 곤란한 실정이다.

본 연구에서는 초고층 건축물 기초의 지지력과 침하량을 확인 할 수 있는 실용적이고, 신뢰성 있는 양방향 고유압 말뚝재하시험법을 초고층 건축물의 대구경 현장타설말뚝기초에 적용하였으며 이들 사례를 활용하여 대형건축구조물의 대형기초의 기초공사비 절감을 분석하였다.

## 2. 양방향 고유압 말뚝재하시험법

### 2.1 양방향 말뚝재하시험의 개요

말뚝정재하시험의 경우 시험하중만큼의 고정하중이나 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력이 필요하고, 이런 반력하중이 확보되지 않으면 말뚝정재하시험을 할 수 없다. 그러나 양방향 말뚝재하시험에서는 특수하게 제작된 유압식 잭(Jack)이나 셀(Cell)을 일반적으로 말뚝선단 부근에 설치하여 선단지지력과 주면마찰력에 의해 하중재하에 필요한 반력을 상호간에 마련해 주므로 하중재하를 위한 별도의 대형장치가 필요 없고, 좁은 시험공간이나 경사진 곳에서도 적용이 가능하다. 그림 1은 말뚝정재하시험방법과 양방향 말뚝재하시험방법의 차이를 보여준다. 말뚝정재하시험은 두부에서 하중을 재하하게 되므로 사하중이나 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력장치와 큰 재하장치가 필요하다. 양방향 말뚝재하시험의 경우, 지상에서 유압을 가하면 유압잭의 하부는 하향으로 움직여 선단지지력을 발생시키고 상부는 동일한 힘으로 상향으로 움직이면서 말뚝에 주면마찰력을 발생시킨다. 이런 이유로 양방향 말뚝재하시험에서는 별도의 반력시스템이 필요치 않게 된다(최용규 외, 2005).

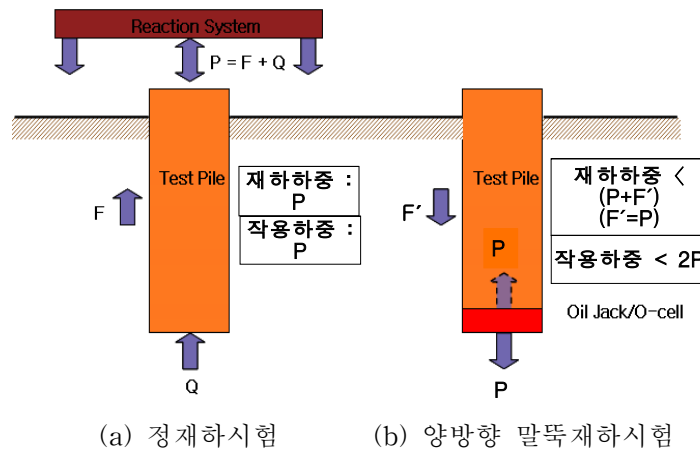
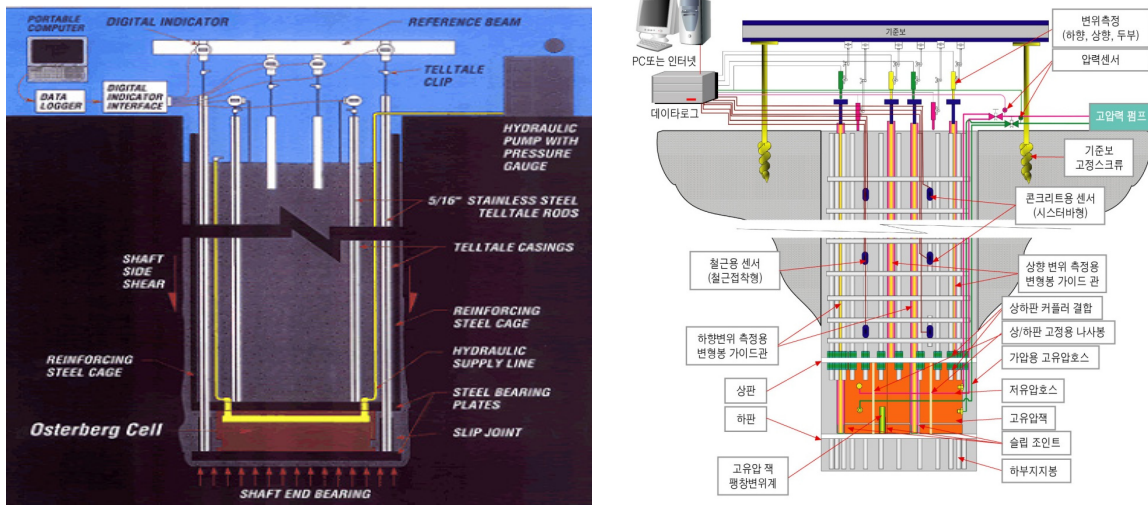


그림 1. 말뚝 정재하시험과 양방향 말뚝재하시험의 비교(정창규, 2004)

양방향 고유압 말뚝재하시험에서는 고압(100MPa이상)의 유압잭과 주변 장치를 사용함으로써 저압 시험시 발생하는 위의 문제점을 해결할 수 있다. 단동식 잭의 경우 재하시험 종료 후 발생된 재하장치 내부의 잔류 공간 제거에 어려움이 있으나 복동식 잭을 이용하면 이러한 문제를 해결할 수 있다. 또한, 고압력을 사용하면 재하용량을 충족시키기 위하여 필요한 유압실린더의 개수를 줄임으로서 유압실린더 배치를 원활하게 할 수 있고 설치상의 애로사항을 해결할 수 있다. 특히 외국에서는 시험말뚝에 대하여 말뚝재하시험을 수행하는 것이 일반적이므로 단동식 재하장치를 사용하더라도 문제가 없다. 그러나 국내의 경우 사용말뚝에 대하여 말뚝재하시험을 직접 수행하고 있는 경우가 대부분이므로 복동식 재하장치의 사용이 더욱 필요한 실정이다.

그림 2는 양방향 말뚝재하시험 장치의 개략도이다. 그림 2(a)는 양방향 오스터버어그 셀 말뚝재하시험의 장치도를 그리고 그림 2(b)는 양방향 고유압 말뚝재하시험의 장치도를 보여주고 있다.



(a) 양방향 오스터버어그 셀 시험(BD O-cell PLT) (b) 양방향고유압말뚝재하시험(BDH PLT)

그림 2. 양방향 말뚝재하시험 장치의 개략도

### 3. 기초공사비 절감 사례 분석

#### 3.1 현장개요

##### 3.1.1 시험말뚝의 제원

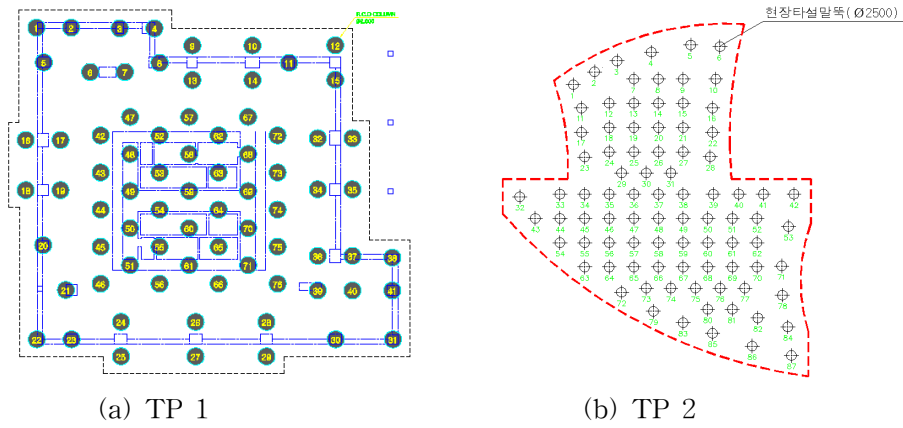
초고층 건축물 현장의 기초로 시공된 대구경 현장타설말뚝에 대하여 양방향 고유압 말뚝재하시험을 실시하였으며, 현장타설말뚝의 선단지지력 및 주변마찰력을 측정하고 하중전이 특성을 확인하여 거동을 분석하였다. 각 현장에서 시공된 시험말뚝의 제원, 설계하중, 시험계획하중 그리고 최대시험하중은 표 1과 같다.

표 1. 각 시험말뚝의 재하시험 계획(김남일, 2008)

사례명	사례 1	사례 2	사례 3
시험말뚝명	TP 1	TP 2	TP 3
말뚝형식	현장타설말뚝	현장타설말뚝	현장타설말뚝
직경(mm)	2000	2,500	2,000
길이(m)	38.5	21.6	42.4
설계 하중(MN)	27	60	32
1방향 최대시험하중(MN)	40	90	56

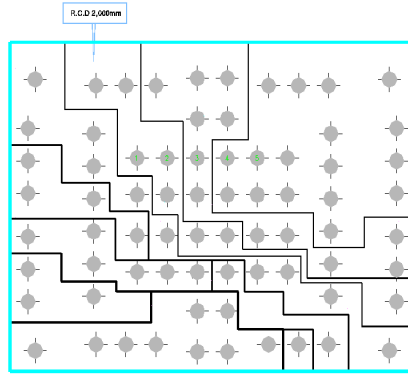
##### 3.1.2 원 설계시 기초말뚝의 배치

대상 현장의 원 설계시 기초말뚝의 배치도를 그림 3에 도시하였다. 사례 1(진영 E&C, 2005)에서는 직경 2,000mm 현장타설말뚝 76본이 배치되어 있으며, 사례 2에서는 직경 2,500mm 현장타설말뚝 87본이 배치되어 있고, 사례 3에서는 직경 2,000mm 현장타설말뚝 72본이 배치되어 있었다.



(a) TP 1

(b) TP 2



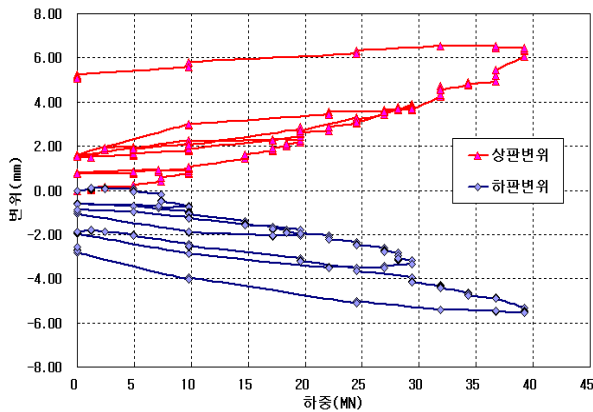
(c) TP 3

그림 3. 원 설계시 기초말뚝의 배치도

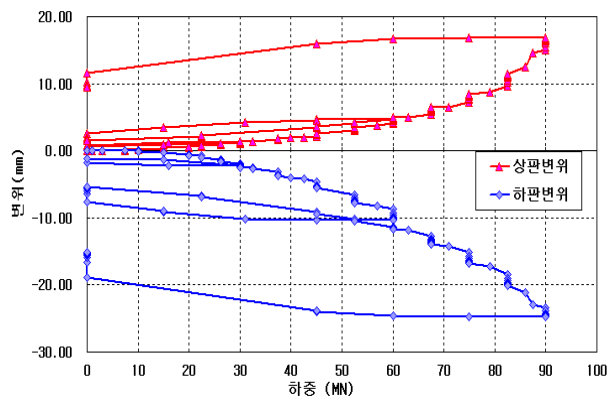
### 3.2 양방향 고유압 말뚝재하시험 결과 분석

#### 3.2.1 주기별 최대하중 - 변위 곡선

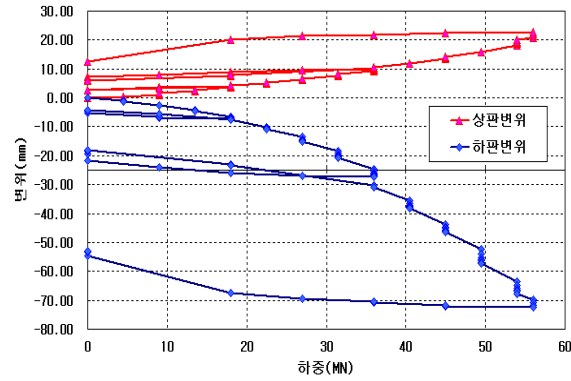
그림 4(a), (b), (c)는 양방향 고유압 말뚝재하시험의 하중단계별 재하시험 결과를 도시한 것으로 양방향 고유압재 하판의 하향변위와 상판의 상향변위를 변위봉을 이용하여 측정하였다. 본 시험에서는 TP 1~3에서 1방향 시험하중을 각각 40MN, 90MN, 56MN까지 하중을 재하하였다. TP 1에서는 상판변위가 최대 6.5mm, 하판변위가 최대 5.5mm 정도 발생하였으며, TP 2에서는 상판변위가 최대 16.9mm, 하판변위가 최대 24.7mm 정도 발생하였다. TP 3에서는 상판변위가 최대 22.8mm, 하판변위가 최대 72.5mm 정도 발생하였다.



(a) TP 1



(b) TP 2



(c) TP 3

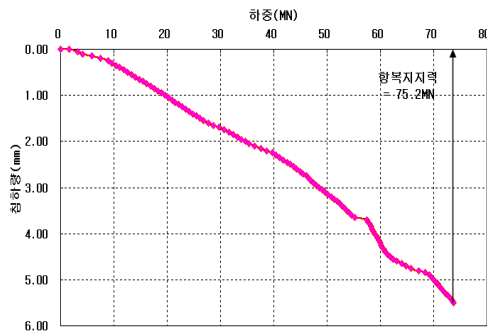
그림 4. 주기별 하중 - 변위 곡선

### 3.2.2 지지력 특성 분석

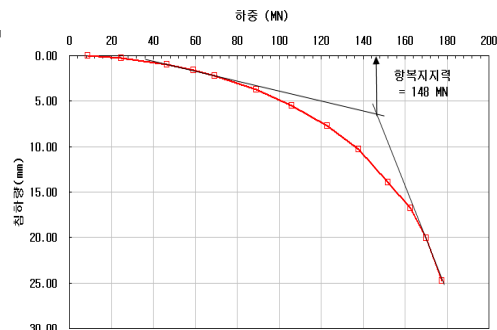
선단에 양방향 재하장치를 설치하여 재하시험을 수행하였으며, P-S곡선과 log P-log s곡선 등의 방법으로 지지력을 분석하여 표 2에 나타내었다. 그림 5에는 등가하중-침하량 곡선에 의한 항복지지력을 도하였다.

표 2. 각 시험말뚝의 지지력 분석

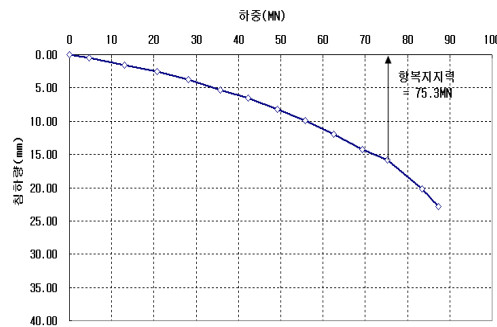
시험말뚝	설계지지력 (MN)	최소항복지지력 (MN)	안전율 (F.S)	최소허용지지력 (MN)
TP 1	27.0	75.2	2.0	37.6
TP 2	60.0	148.0	2.0	74.0
TP 3	32.0	75.3	2.0	37.7



(a) TP 1



(b) TP 2

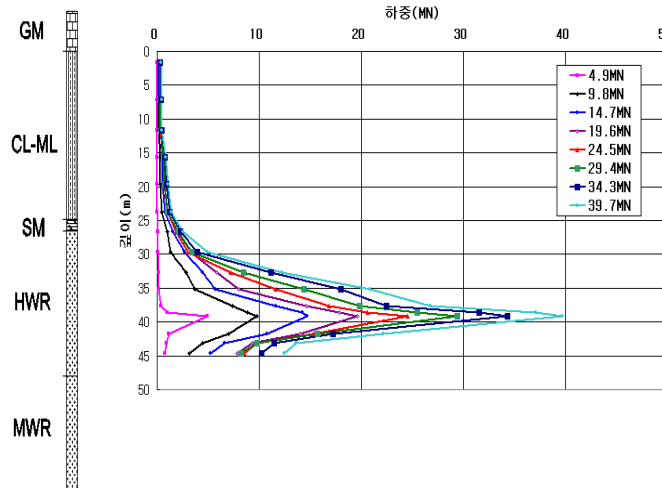


(c) TP 3

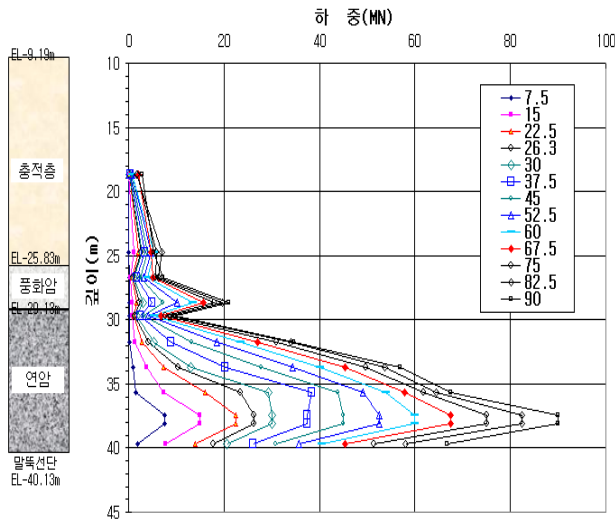
그림 5. 등가 하중 - 침하량 곡선

### 3.2.3 축하중전이 특성 분석

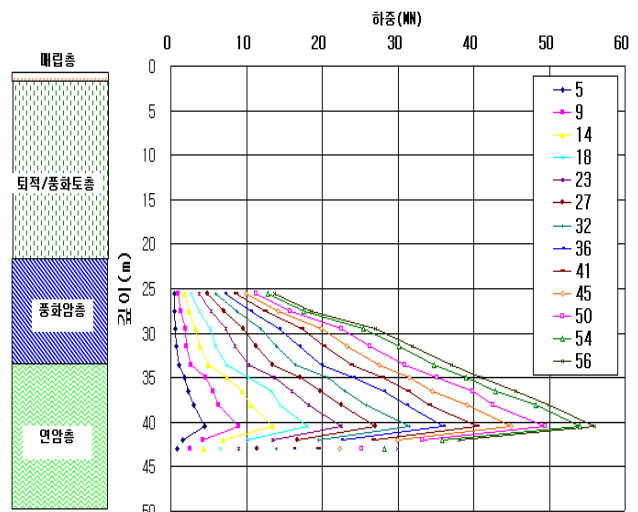
양방향 말뚝재하시험은 일반적으로 장치 상·하부의 주면마찰력과 선단지지력의 상호반력을 사용함으로써 별도의 반력시스템이 필요 없이 시험을 수행할 수 있는 장점이 있다. 그러나 지층별 하중지지특성을 확인하기 위해서는 시험말뚝체에 심도별 축하중센서를 설치하여 하중전이시험을 수행하여야 한다. 하중전이시험에 의한 심도별 마찰력분포도를 그림 6에 나타내었다.



(a) TP 1



(b) TP 2



(c) TP 3

그림 6. 하중단계별 마찰력 분포도

## 3.3 기초공사비 절감 사례 분석

### 3.3.1 지지력 증가율 분석

표 3은 TP 1~3의 재하시험을 실시한 결과를 토대로 지지력 증가율을 나타내었다. 표 3에서 알 수 있듯이 TP 1~3에서 각각 지지력 증가율은 17~39%로 나타났으며, 이와 같이 양방향 고유압 말뚝재하시험을 통하여 합리적 설계를 수행하여 지지력이 증가될 경우 말뚝의 수량이나 길이를 조정하여 기초말뚝의 공사비를 대폭 절감시킬 수 있고, 기초말뚝의 신뢰성 또한 확보할 수 있을 것이다.

표 3. 각 시험말뚝의 지지력 증가율 분석

구분	설계지지력 (MN)	허용지지력/변위 (MN/mm)	지지력 증가율 (%)
TP 1	27.0	37.6/2.1	39.3
TP 2	60.0	74.0/12.8	23.3
TP 3	32.0	37.7/6.1	17.6

### 3.3.2 최적화 설계에 의한 말뚝 재배치 및 경제성 분석

양방향 고유압 말뚝재하시험의 결과를 토대로 분석된 지지력 증가율은 표 3과 같이 17~39%로 나타났으며, 여기서 단순하게 지지력 증가율만큼 말뚝의 수량을 조정하는 것으로 하였다(표 4참조). 표 5에 는 말뚝기초의 시공단가를 분석하였으며, 이를 토대로 각 현장의 기초공사비 절감비용을 표 6에 나타내었다. 표 4에서 보는 바와 같이 각 현장별 기초말뚝의 조정 가능 개수는 10~21본이었으며, 이때 기초공사비가 약 4~8.5억원 정도 절감됨을 알 수 있었다(표 6 참조).

표 4. 합리적 설계에 의한 말뚝 수량 조정

구분	원 설계시 말뚝수량 (개)	말뚝수량 감소율 (%)	조정가능말뚝수량 (개)
사례 1	76	28	-21
사례 2	87	19	-16
사례 3	72	15	-10

표 5. 말뚝기초 시공비 단가 분석(본당)

공종	단위	단가 (원)	Φ2,000 (L=40m)		Φ2,500 (L=20m)	
			수량	금액(원)	수량	금액(원)
RCD 굴착	m	400,000	40	16,000,000	20	8,000,000
케이싱 설치/제작	m	85,000	40	3,400,000	20	1,700,000
철근망 근입	m	35,000	40	1,400,000	20	700,000
철근가공조립	ton	140,000	12.88	1,803,200	10.22	1,430,800
스페이서 제작/설치	ea	3,500	36	126,000	28	98,000
트레미 파이프	m	22,000	40	880,000	20	440,000
레미콘 타설	m³	12,000	251	3,012,000	157	1,884,000
두부 정리	본	600,000	1	600,000	1	600,000
Toe Grouting	m	250,000	3	750,000	3	750,000
철근	ton	950,000	13.268	12,604,600	10.526	9,999,700
계				40,575,800		25,602,500

표 6. 각 현장의 기초공사비 절감금액

구분	말뚝 직경 (mm)	말뚝 길이 (m)	조정가능말뚝수량 (개)	말뚝 본 당 기초공사비 (원)	총 기초공사 절감금액 (원)
사례 1	2,000	38.5	21	40,575,800	852,091,800
사례 2	2,500	21.6	16	25,602,500	409,640,000
사례 3	2,000	42.4	10	40,575,800	405,758,000

#### 4. 결론 및 제언

본 연구에서 대형건축물 기초에 대한 합리적설계절차를 현장에 도입하기 위하여 양방향 고유압 말뚝재하시험을 수행하여 지지력 및 침하 거동을 분석하고, 기초공사비 절감효과를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 양방향 고유압 복동식 재하시험을 적용하여 3개의 초고층 건축물 현장을 대상으로 대구경 말뚝기초에 관한 합리적설계 사례를 분석하였으며, 기초공사비 절감효과가 우수하였다.
- 2) 합리적설계 절차 도입 결과, 공사비 절감효과가 최소 15~28%이었다. 이 때 각 사례에서 절감된 기초공사비는 4~8.5억원 정도이었다.
- 3) 양방향 고유압 말뚝재하시험은 대용량의 대형건축물 기초의 경제적인 시공을 위해서 반드시 필요한 것으로 판단되었다.

#### 참고문헌

1. (사) 한국지반공학회 (2002). “개정판 깊은기초.” 지반공학시리즈 4.
2. 최용규, 이민희, 정창규, 정성민, 황근배 (2005) “양방향 고유압 말뚝재하시험 적용사례 연구”, 한국지반공학회 2005년 기초·연약지반·지반조사 기술위원회 공동 학술발표회 논문집
3. 정창규 (2004). “선단유압재하시험법의 현장적용성에 관한 연구”, 경성대학교 공학박사 학위논문, 2004. 2.
4. 진영 E & C (2005). “송도 신축공사중 R.C.D LOAD TEST 시방서“, 2005. 7.
5. 김남일 (2008), “양방향 말뚝재하시험을 이용한 대형건축물 기초의 합리적설계 적용사례 연구”, 경성대학교 공학석사 학위논문, 2008. 8.