

## 고층 건물 현장타설말뚝기초의 설계 및 품질확인시험 Design and Quality Assurance Tests of Drilled Shafts of High Rise Buildings

조찬환<sup>1)</sup>, Chun-Whan Cho, 석정우<sup>2)</sup>, Jeong-Woo Seok

<sup>1)</sup> 삼성물산 건설부문 T.A Team 전문위원, Geotechnical Expert, T.A Team, Samsung Corporation

<sup>2)</sup> 삼성물산 건설부문 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, R & D Team, Samsung Corporation

**SYNOPSIS** : Recently, many high rise buildings is planning and under construction over the world. The drilled shafts as a foundation of high rise buildings are often adopted for the purpose of construction safety and construction cost effectiveness. It is common that the capacity of drilled shafts is beyond conventional conception. The reasonable design and quality assurance for the drilled shaft as foundation of high rise building become much more important since the drilled shafts should bear much higher working load. This paper reviews state of the art of the design and quality assurance for the drilled shafts as foundation of high rise buildings. And also some related suggestions are given in this paper.

**Key words** : Drilled Shaft, SPS, Load transfer, Load distribution, Osterberg cell test

### 1. 서 언

세계적으로 최고층인 160여 층의 버즈두바이가 건설되고 있고, 국내에서도 110여 층의 초고층 건물이 서울, 부산, 인천 등 여러 곳에 계획되고 있다. 이와 같이 최근의 건축구조물은 대규모화되고 고층화되며, 지하층도 깊어지는 경향이다. 따라서 건축구조물의 기초가 받는 하중은 증가 하고 있으며 기초도 단단한 지지층을 이용하고 있다.

고층 건물 공사에서 공기단축과 경제성 개선을 위해 지하층과 지상층 공사를 동시에 수행할 수 있는 Top-Down 공법이 적용되는 사례도 많아 정확한 조사와 기초 설계에 대한 신속한 판단이 중요하게 된다. 더욱이 구조물의 설계와 시공이 동시에 이루어지는 Fast Track 방식이 추진되는 경우는 그 중요성이 더욱 커진다.

대형 고층 건물의 기초로 현장타설말뚝공법이 많이 이용되고 있으며 현장조건에 따라 RCD(reverse circulation drill)공법, PRD(percussion rotary drill)공법이 이용되고 있다.

고층 건물의 기초로 암반위에 기초판을 설치할 경우라도 흙막이 공법으로 SPS(Slab as a Permanent System) 공법을 채택하는 경우가 있는데 여기서는 지하 굴착공사가 완료되는 시점까지의 가설하중을 지지하기 위해 현장타설말뚝을 설치하고 지하 굴착이 완료되면 푸팅을 타설하여 이 후의 하중을 말뚝과 분담하게 된다. 이러한 조건에서는 설계 시 공사 단계를 고려하는 것이 필요하다.

하중이 커짐에 따라 현장타설말뚝이 받는 단위 면적당 압축방향 작용 하중은 1000 tonf/m<sup>2</sup>

에 이르고 있으며 당연히 현장타설말뚝의 시공관리는 물론 품질확인 중요해 졌다. 현장타설 말뚝의 주요 품질확인 항목으로는 지지력, 건전도 등이 있다.

본고에서는 고층건물의 현장타설말뚝의 설계 및 품질확인시험에 대해 살펴보고 주요 개선 사항에 대해서 고찰하였다.

## 2. 설 계

고층 건물의 현장타설말뚝 설계시 고려사항이 많이 있지만 여기서는 현업에서 주로 논의 되는 지반조사, 재료허용하중, 시험시공, 기초의 하중 전이와 분배 등에 대해서 고찰하였다.

### 2.1 지반조사

최근의 고층건물의 공사에서 공기단축과 경제성 개선을 위해 구조물의 설계와 시공이 동시에 이루어지는 Fast Track 방식으로 추진되는 경우가 증가하고 있다. 또한, 공사기간이 충분 하지 못해서 지하층과 지상층 공사를 동시에 수행할 수 있는 Top-Down 공법이 적용되기도 한다. 기초는 구조물 전체의 안정성을 담보하는 것이므로 Fast Track 방식, Top-Down 공법과 같이 제한된 공사기간에 따라 신속한 판단이 요구되는 건물공사에서는 지반조사가 더욱 강조될 필요가 있다.

고층 건물 현장타설말뚝의 설계 시 불확실성이 많은 지반조건에서 충분하지 못한 지반 조사 결과에 근거하고 있는 경우가 많이 있다. 일반적으로 불충분한 지반조사의 형태는 시추공의 부족, 필요한 시험의 누락, 시추 깊이의 부족 등으로 나타나고 있다. 건물의 설계에서 지반조사는 설계승인을 얻기 위한 의외적인 절차가 아니며, 최소한 해당 현장에서 신뢰도 있는 설계정수의 결정, 지지층의 위치를 결정할 수 있도록 계획 시행되어야 한다.

### 2.2 재료허용하중의 결정

말뚝의 설계 시에는 두 가지 관점이 고려되어야 하는데, 하나는 재료의 허용하중이며 다른 하나는 지지력이다. 말뚝의 최종적인 설계지지력은 두 값 중 작은 것 이하로 결정된다.

국내의 설계기준에 의한 현장타설말뚝의 재료하중은 콘크리트와 철근을 합성재료로 가정하여 결정되며 이는 콘크리트의 강도 반영 방법에 따라 크게 두 가지 방법으로 분류된다. 하나는 구조물기초설계기준해설(2003)에서처럼 콘크리트의 허용응력을 일정치 이하( $0.25f_{ck} \leq 60 \text{ kg/cm}^2$ , 여기서  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도)로 제한하는 경우이며, 다른 하나는 강구조지침(2003) 또한 도로교설계기준(2005)에서처럼 콘크리트의 허용응력을 설계강도에 비례하여 인정하는 것이다. 전자는 보수적인 설계를 유도하는 반면, 조건에 따라서는 현장타설말뚝의 본체의 콘크리트강도를 고강도로 하여도 설계하중을 증가시킬 수 없는 비합리적인 상황이 연출되기도 한다.

이와 같이 재료하중 결정방식의 차이는 압축방향 작용하중이 상대적으로 크지 않은 토목 구조물의 경우는 의미가 작지만, 건축구조물의 기초와 같이 압축방향 작용하중이 큰 경우는 현장타설말뚝의 크기를 변경하거나 철근 구조를 변경해야 하는 경우도 있다. 따라서 이에 대한 고려와 설계기준들의 통합의 고려가 필요하다.

### 2.3 시험시공

시험시공은 설계에서 결정한 지지력 및 시공성을 확인하고 본시공의 관리기준을 정하기 위하여 본시공전에 실시하는 중요 공정이다. 특히 Fast Track 공사에서는 본시공의 조건에 대한 예측이 틀릴 경우, 공기 지연의 직접적 원인이 되므로 시험시공은 필수적이다.

시험시공에서는 재하시험을 계획하여 설계 시 고려한 지지력의 적정성을 판단하고 최적의 설계조건으로 변경할 수도 있다. 또한 시험시공 시 제반 설계에 대한 검토를 토대로 실시공 조건과 동일한 조건으로 시험시공을 실시하여 본시공시 발생할 수 있는 잠재적인 문제점들을 도출하고 시공관리기준을 결정하여 본시공에 대비할 수 있다.

일반적으로 현장타설말뚝의 시험시공에서는 시험 시 시험말뚝에 충분한 변위를 유도하는 것이 중요하다. 실제 말뚝으로는 이러한 조건을 얻기가 곤란한 경우가 많으므로 소구경말뚝을 이용하

여 재하시험을 하거나 말뚝의 길이를 줄여 양방향재하시험(또는 Osterberg cell test)을 실시할 수 있다. 소구경 말뚝인 경우는 지지력의 치수효과를 고려해야한다(조천환 등, 2004). 어느 방법이던 스트레인게이지 등을 이용하여 하중전이를 측정하는 것이 바람직하다.

## 2.4 기초의 하중전이와 하중분배

고층 건물의 기초를 암반위에 설치할 경우라도 SPS공법을 채택함으로써 말뚝과 기초판(푸팅)을 조합하여 이용하게 된다. SPS공법에서는 현장타설말뚝이 먼저 타설되고 상부와 하부 구조물을 동시 진행해가면서 흙막이 벽은 슬래브로 지지되고 굴착전 까지 기둥에 걸리는 하중은 말뚝이 받게 되며, 지하층의 굴착이 완료되면 푸팅을 타설하여 이 후 하중은 푸팅이 부담하는 개념으로 설계된다.

일반적으로 SPS 공법에서는 말뚝을 포함하는 하부기초는 토목기술자가, 푸팅을 포함한 상부기초는 건축기술자가 설계를 하게 되어, 토목기술자는 기둥에 걸리는 하중을 말뚝으로 지지하는 설계를 하려는 경향이 있고, 건축기술자는 기둥에 걸리는 모든 하중을 푸팅으로 지지하는 설계를 하게 된다. 그러나 기초에 가해지는 하중은 전술한 설계 개념대로 작용되지 않을 것이며, 실제로는 푸팅이 설치된 이후에도 말뚝에 하중이 지속적으로 가해지게 될 것이다(그림 1 참조).

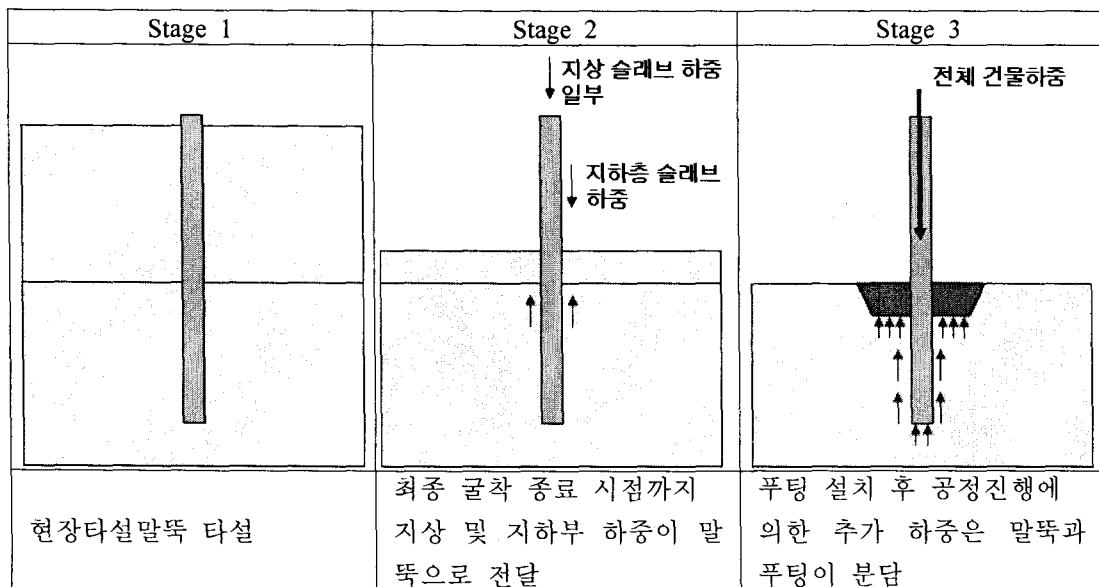


그림 1. SPS공법에서 기초의 하중지지 개념

그림 1과 같은 개념은 현장타설말뚝 내에서의 하중전이와 말뚝과 푸팅간의 하중분배에 대한 일련의 계측으로 확인할 수 있다. 그림 2는 Stage 1과 Stage 2에 이르는 기간(약 1년) 동안 현장타설말뚝의 직상부에 설치된 스트레인게이지의 계측(그림 3참조)을 통해 축하중의 변화를 측정 한 사례를 나타낸 것이다. 그림 2를 통해 지하 굴착과 상부구조물이 진행됨에 따라 말뚝에 가해지는 하중이 증가함을 알 수가 있으며 계산값과 계측값은 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 그림 2의 하중이 말뚝에 작용되었을 때 말뚝 내에 매설된 스트레인게이지(그림 3 참조)를 통해 80일간의 하중전이를 보여주고 있다. 그림 4에서와 같이 80일간 말뚝내 전달된 하중이 크게 증가했음을 볼 수 있고, 푸팅이 설치되기 직전까지도 하중은 말뚝의 선단부 까지 전달되지 않고 있음을 알 수 있다. 본 계측 사례는 1년 전부터 현재까지의 계측결과이다. 따라서 향후 시공이 계속될 경우에 대한 변화를 해석을 실시하여 예측해 보았다.

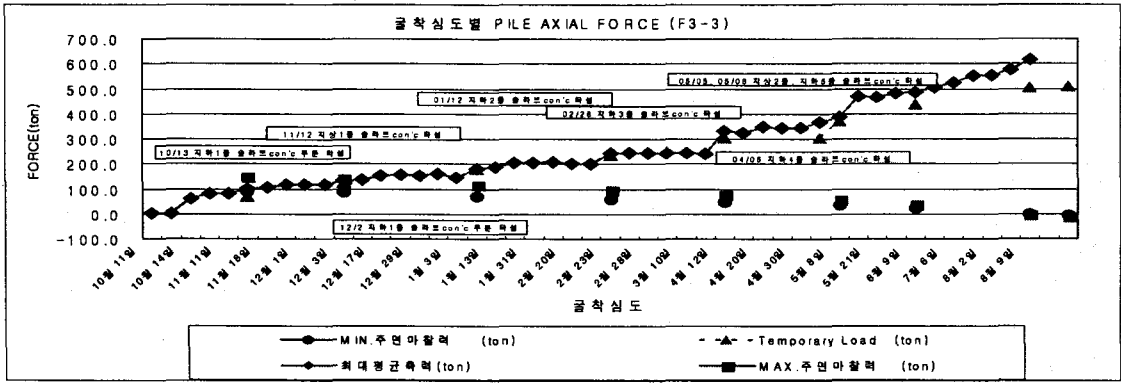


그림 2. 시간 경과별 축하중 변화

푸팅과 말뚝으로 이루어진 기초(그림 5, 그림 6 참조)에 대해 건물의 완공 시점에서의 하중전이 및 분배 양상을 예측해보기 위하여 3차원 유한차분 상용 프로그램(FAC 3D ver2.0)을 사용하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 가장 큰 하중이 작용하는 RCD말뚝과 이에 인접한 PRD 말뚝을 대상으로 실시하였다.

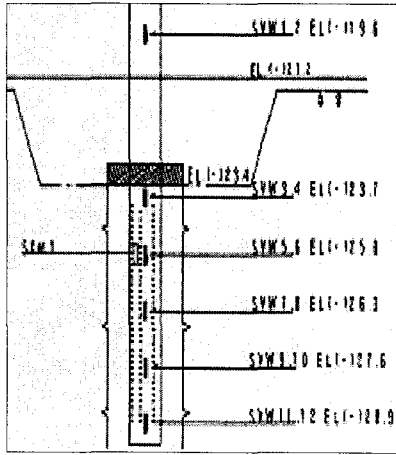


그림 3. 말뚝의 계측기 배치도

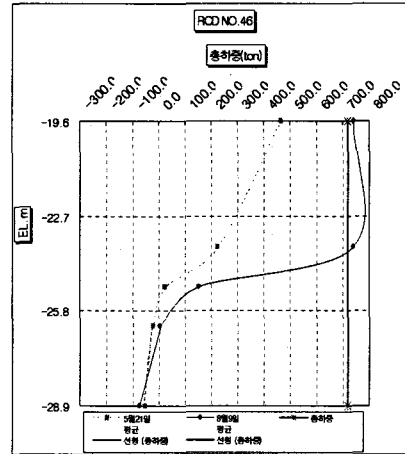


그림 4. 기간별 말뚝의 깊이별 하중전이

그림 7의 해석 결과에 의하면 푸팅 바닥면을 기준으로 할 때 상부 구조물로부터 전달되는 하중에 대한 말뚝과 푸팅의 분담 비율은 약 9:1 정도였으며 말뚝선단부의 변위는 2mm 미만으로 나타났다. 이 결과로부터 말뚝이 상부하중을 지지하고 있는 상태에서 푸팅이 설치되면 말뚝의 변위가 어느 정도 허용되기 전까지는 푸팅으로 분배되는 하중의 크기가 크지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉 SPS공법에서 기초의 실제 거동은 현재의 설계개념과 다르다는 것을 시사하고 있는 것이다. 이러한 예측은 향후 계속적인 계측으로 확인되고 수정될 것이다. 본 연구를 통해 SPS공법의 경제적이고 안정적인 설계 및 시공이 이루어 질 것으로 기대된다.

### 3. 품질확인시험

#### 3.1 지지력

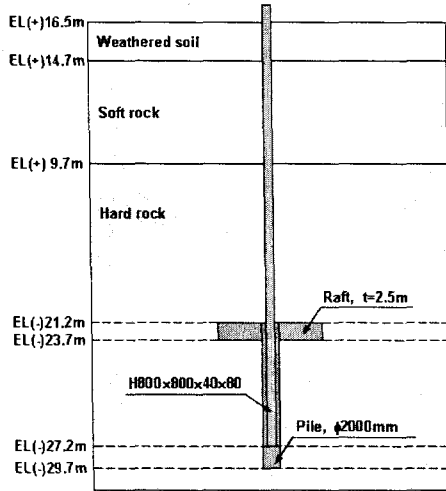


그림 5. 해석 지층 단면도

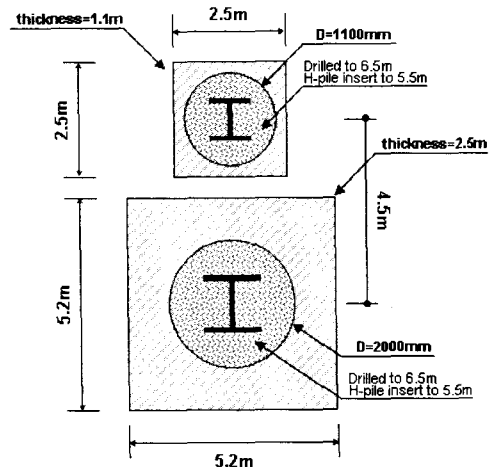


그림 6. 해석 배치 평면도

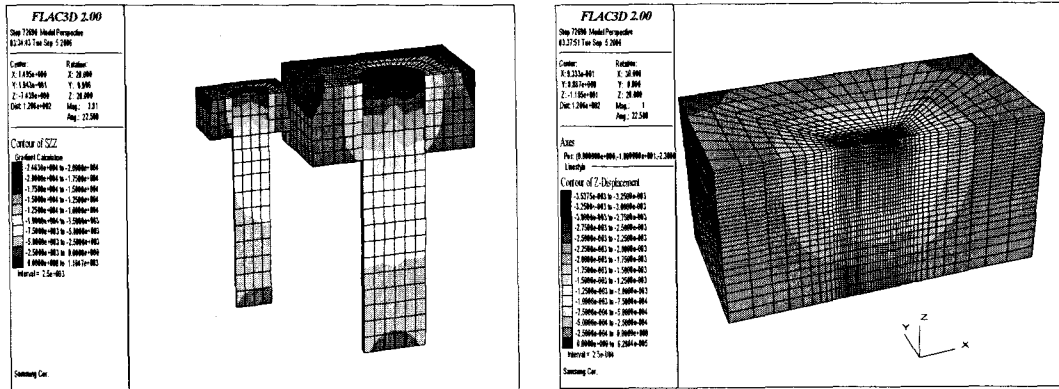


그림 7. 말뚝의 축력분포 및 주변의 수직변위

고층 건물의 기초로 채택되는 현장타설말뚝은 매우 큰 하중을 지지하도록 설계되므로 실 시공 말뚝에 대한 전통적인 재하시험(정재하시험)의 적용이 곤란한 경우가 일반적이다. 따라서 현장타설말뚝의 재하시험방법으로 양방향재하시험(또는 Osterberg cell test)이 많이 이용 되고 있다.

품질확인시험으로 양방향재하시험은 시공 시 시험말뚝을 미리 지정한 후 시험을 실시한다 는 의미에서 품질확인으로서 의미가 반감된다는 것을 이해할 필요가 있다. 또한 품질확인 시험으로 양방향재하시험은 본말뚝을 변위시키는 것이므로 시험 후 전단으로 생긴 공간에 대해 보강이 고려되어야 한다.

#### 3.2 건전도

일반적으로 현장타설말뚝의 건전도 확인시험에는 공대공 탄성과 탐사시험(cross-hole sonic logging test), 탄성과 반향시험법(sonic pulse echo test)이 있다. 전자는 보다 실질적인 정보를 주는 반면 초기 시설이 필요하고 조사튜브의 바깥공간은 확인할 수 없다는 단점이 있다. 후자는 측정이 간편하고 경제적인 반면 해머의 타격 에너지가 작아 말뚝깊이의 제한( $\leq 30D$ ,  $D$ 는 말뚝 직경)이 있으며 해석에 경험이 필요하다. 일반적으로 고층 건물의 현장타설말뚝에서는 철근 외에 철골을 삽입하는데 이러한 경우는 이들 시험방법의 적용이 곤란하다.

이외 말뚝의 건전도를 확인할 수 있는 방법으로 코어링이 있다. 코어링 방법은 토그라우팅(toe

grouting)이 계획되어 있는 경우 그라우팅 파이프를 이용하여 코어링을 실시함으로써 경제적으로 간단히 수행할 수 있는 잇점이 있다. 또한 코어링 방법은 콘크리트 본체의 건전도 확인은 물론 콘크리트와 암반 접촉부의 슬라임 상태, 지지암반의 강도확인 등을 확인할 수 있다는 점에서 매우 유용한 시험방법이다. 코어링에서는 후 그라우팅 처리(시멘트 풀의 완전한 충전, 가압 등)가 매우 중요하다.

### 3.3 양방향 재하시험 사례

시험 현장은 지상 43층 지하 8층의 고층 건물 공사현장이다. 지하 굴착 흙막이는 SPS공법, 기초공법은 현장타설말뚝이 채택되었으며, 현장타설말뚝은 소구경(1m 이하)은 PRD공법, 대구경(2.0m)은 RCD공법을 적용하였다.

구분		서초
말뚝직경(mm)		1000
천공장비		PRD
시험방법		양방향재하시험
시험 하중(tonf)	일방향	1350
	양방향	2700
시험말뚝길이/ 심도(G.L.)		2.55m / -22.05~-19.50m
레미콘 타설 일자 / 시험 일자		2005. 4. 6. / 2005. 4.26~27.
Strain 측정	강재	KM-100B 6ea
	콘크리트	KM-100B 2ea
수직도 관리		레이저/ KODEN
셀 하부 처리		레미탈 600 주입
말뚝 재료	콘크리트	$\sigma_k=500\text{kgf/cm}^2$
	강재(SS490)	H570x570x40x40

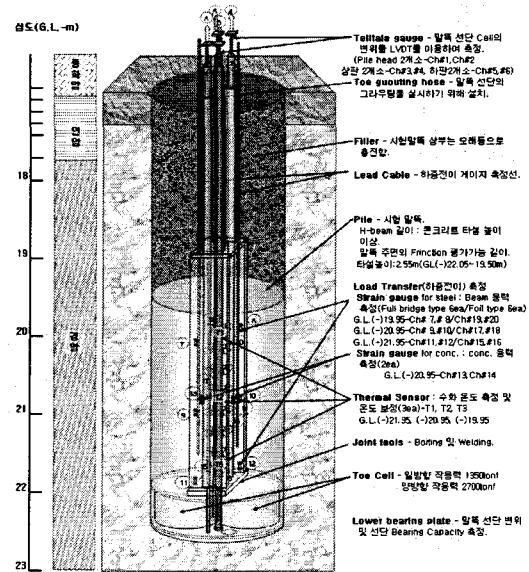


그림 8. 시험말뚝 제원 및 시험말뚝 단면도

시험 말뚝은 PRD 공법으로 직경 1m, 길이 2.55m(심도 19.5~22.05m)를 경암층에 설치하였다. 철골은 시험 말뚝부에는 본 시공 제원(570x570x40x40mm, L=3m)을 사용하고 연결부에는 소형 H-beam(300x300x10x12, L=22m)를 연결하여 사용하였다(그림 8 참조). 그림 9은 계측기 부착이 완료된 시험말뚝의 조립상태를 나타내었다.

표 1에는 시험 현장의 현장타설말뚝의 최대 하중 및 설계 지지력을 나타내었다. 표 1의 자료를 바탕으로 시험하중은 설계조건, 현장여건, 지반조건, 말뚝의 크기 등을 고려하여 결정하였다. 따라서 시험하중은 시험말뚝(D1000, L=2.55m)의 극한지지력을 확인하기 위해 계산된 허용지지력의 3배 이상이 되도록 양방향 2700tonf 으로 결정하였다.

표 1. 현장타설말뚝의 구경별 설계하중 및 설계지지력

구경	설계하중(tonf)	시공방법	설계지지력
D1000mm	859~1705	PRD공법	주면: 49.2 tonf/m <sup>2</sup> 선단: 701.3 tonf/m <sup>2</sup>
D2000mm	3137~4522	RCD공법	

하중 재하 시 말뚝에서의 하중전이현상을 파악하기 위하여 시험말뚝 본체 내에 진동현식 변형률계를 500mm 간격으로 대칭으로 배치하였다(그림 8, 그림 9 참조). 또한 재하 셀의 상부와 하단부에서의 변위측정을 위해 변위계(telltale)를 설치하였다.

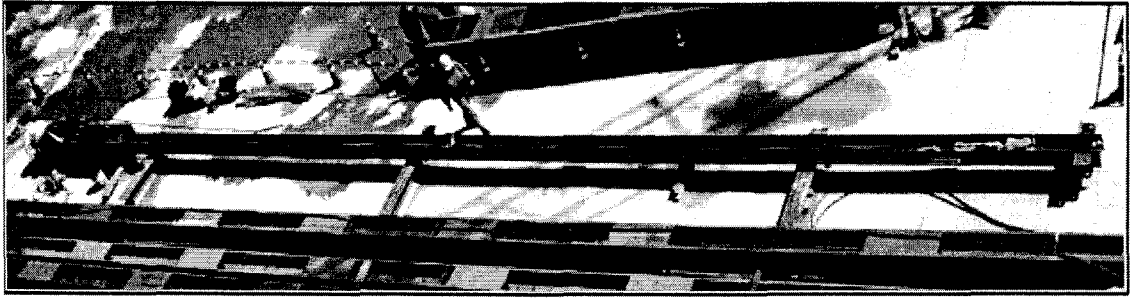


그림 9. 시험 말뚝 조립

그림 10는 양방향 재하시험의 시험결과를 나타낸 것이다. 양방향재하시험은 두부재하방식 시험과는 달리 말뚝 선단부에서 재하하는 방식이므로 말뚝 두부의 하중-변위 곡선을 직접 구할 수 없다. 따라서 양방향재하시험에서는 말뚝이 비압축성이라는 가정 하에 두부의 하중-변위 곡선을 산출하는데, 본 시험에서도 같은 방법으로 분석하였다. 또한 그림 9에는 말뚝의 두부재하조건의 하중조건이 결과가 도시되었는데, 이는 재하하중에 대한 하중조건상태를 측정된 후 계측기 설치위치를 기준으로 선단부에서부터 구간별로 계산된 주변마찰력을 상향으로 누적시키는 환산과정을 거쳐 정리한 것이다.

표 2는 설계조건과 재하시험결과를 비교 평가한 결과이다. 표 2에서 D2000의 결과는 시험 말뚝(D1000)의 결과에 치수효과를 고려하여 분석한 것이다. 치수효과 분석에는 조천환 등 (2004)의 방법을 이용하였다.

표 2. 재하시험 결과 요약

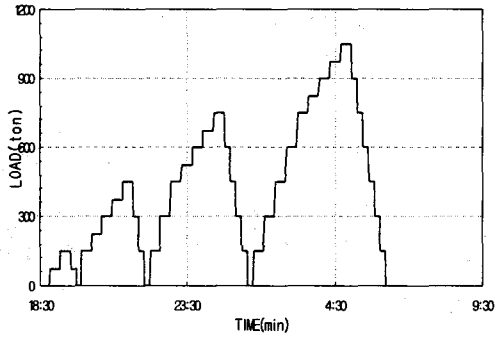
구 분	허용 주변마찰력(tonf/m')			허용 선단지지력(tonf/m')			비고
	설계 조건	시험 결과	설계적정성 평가결과	설계 조건	시험 결과	설계적정성 평가결과	
D1000	49.2	97.0	O.K	701.3	1109.8	O.K	시험
D2000	49.2	56.5	O.K	701.3	1159.5	O.K	분석

#### 4. 결 언

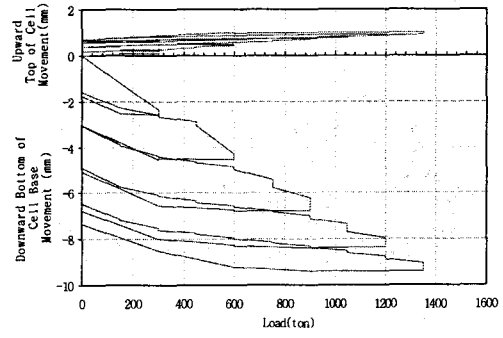
고층 건물의 현장타설말뚝의 설계 시 보다 신뢰도 있는 지반조사 실시, 합리적인 재료하중의 결정, 설계 적정성의 확인 및 시공관리기준 확립을 위한 시험시공의 실시, 그리고 시질적인 설계를 위한 계측과 피드백 등이 필요한 것으로 나타났다.

고층 건물의 현장타설말뚝의 품질확인을 위해서는 지지력 및 건전도 시험이 중요하다. 건물기초의 현장타설말뚝에 대해 두 가지 항목을 효과적으로 확인할 수 있는 방법이 현실적으로 흔치 않다. 따라서 이를 위해 코어링의 활용이 기대된다.

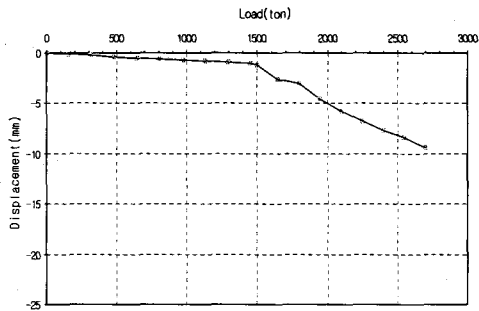
고층 건물 공사에서 기초공과 구조물공을 분리하기가 쉽지가 않다. 따라서 설계 및 시공의 전 과정에서 건축구조 기술자와 지반 기술자의 원활한 커뮤니케이션을 유지하는 것이 매우 중요하다.



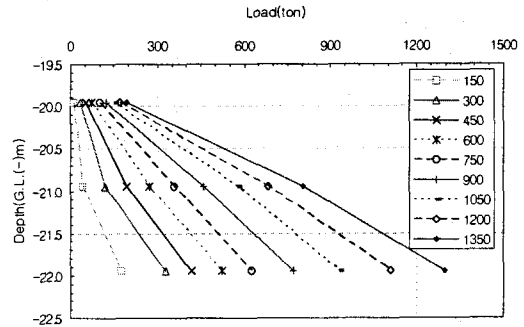
㉑ 시간별 하중 재하 곡선



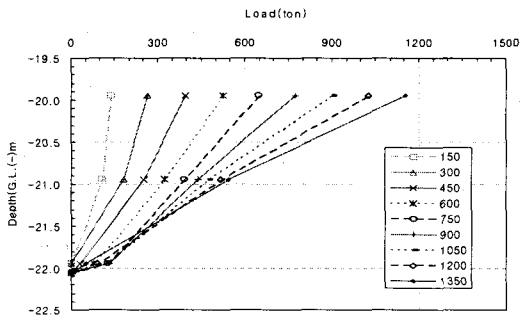
㉒ 양방향 하중-침하 곡선



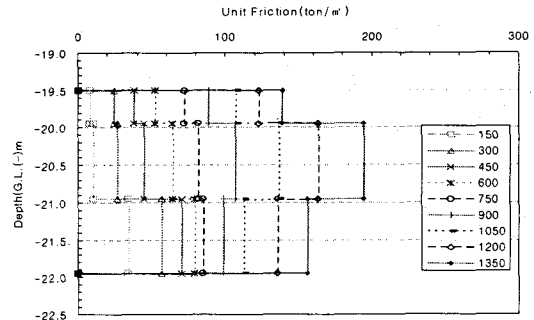
㉓ 등가 하중-침하 곡선



㉔ 하중전이 곡선



㉕ 하중전이곡선(두부재하조건)



㉖ 단위면적당 주변 마찰력

그림 10. 양방향재하시험 결과

## 참고문헌

1. 서초 C 프로젝트 (2005), 현장타설말뚝 선단재하시험보고서.
2. 조천환, 김홍목, 김용규(2003), "축소모형말뚝을 이용한 현장타설말뚝의 지지력평가"한 국지반공학회 논문집, Vol. 20, No.5, pp117~126.
3. 한국강관구조학회(2003), 콘크리트 충전 강관구조 설계 및 시공 지침.
4. 한국도로교통협회(2005), 도로교 설계기준.
5. 한국지반공학회(2003), 구조물 기초 설계 기준 해설.