

초고용량 양방향 말뚝재하시험(BDH PLT) 수행사례 분석

A Case Study of High Capacity Bi-Directional High Pressure Pile Load Test

김상일¹⁾, Sang-Il Kim, 이민희²⁾, Min-Hee Lee, 정성민³⁾, Sung-Min Jeong, 정은택⁴⁾, Eun-Taeg Jeong, 최용규⁵⁾, Yong-Kyu Choi

¹⁾ 한국양방향말뚝재하시험협회, 사무국장, Secretary general, Korea Bi-Directional Pile Load Test Association.

²⁾ (주)지텍크, 대표이사, CEO, G-TEC Ltd.

³⁾ (주)지텍크, 과장, Manager, G-TEC Ltd.

⁴⁾ 현대산업개발, 부장, General Manager, Hyundai Development Company Engineering & Construction Co., Ltd.

⁵⁾ 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungseong Univ.

SYNOPSIS : The bi-directional high pile load test(BDH PLT) does not have weaknesses found in the existing bi-directional low pile load test(BDL PLT); it has strong economics, is unbound by load capacity limit and secures quality stability of working piles.

In this study, Verification the field found a very high capacity level of stability and reliability of the BDH PLT, as well as outstanding field applicability. Field verifications reaffirmed the advantage of the BDH PLT device, which was capable of loading 90 MN capacities as maximum. It was also found to be durable enough to load high capacity with ease.

Keywords : High capacity, Bi-directional low pile load test(BDL PLT), Bi-directional high pressure pile load test(BDH PLT)

1. 서 론

대형 토목 및 건축 구조물에 대한 수요가 늘어남에 따라 상부구조물에서 구조물 기초로 작용하는 하중이 커져가고 있고, 이러한 대형 구조물의 기초로서 대형말뚝의 사용이 점점 늘어나고 있는 추세이다. 대형말뚝 적용시에 지지력을 확인하기 위하여 일반적으로 수행하는 말뚝정재하시험(conventional static pile load tests)의 경우에 신뢰도가 높다는 장점이 있으나, 재하용량이 함께 커져야 하는데 이러한 재하용량의 한계를 극복할 수 없다는 단점이 있다. 이에 대한 대안으로 양방향 말뚝재하시험 (Bi-directional Pile Load Test, BDPLT)이 개발되었고, 이 중에 하나인 오스터버그셀 시험(O-cell test)이 현재 전세계적으로 널리 사용되고 있다 (Osterberg, 1986). 오스터버그셀 시험은 저압 방식의 단동식 재하장치(single acting hydraulic cylinder)를 사용하고, 이에 따라 재하시험 종료 후 셀 장치 내부에 빈 공간이 발생하게 된다. 이 빈 공간을 그라우팅으로 채우더라도 채움부의 그라우팅 건전성의 확실성이 보고되어 있지 않거나, 그라우팅 자체가 불가능할 수 있어 사용말뚝에서는 장기적인 안정성이 문제가 될 수 있다. 또한, 소요되는 재하용량을 충족하기 위하여 유압실린더 개수의 증가로 유압실린더의 배치 및 설치상의 문제가 발생할 수도 있다.

이러한 저유압 단동식 양방향 말뚝재하시험의 불안정성을 극복하기 위하여 고유압 복동식 양방향 재하시험장치를 개발하였다. 고유압 복동식 양방향 재하장치를 사용할 경우 경제성 확보뿐만 아니라 재하용량의 한계도 극복할 수 있는 장점이 있으며, 또한 사용말뚝의 품질안정성을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 초고용량 초고층 건축물 기초의 지지력과 침하량을 확인 할 수 있는 실용적이고, 신뢰성 있는 양방향 고유압 말뚝재하시험법을 초고층 건축물의 대구경 현장타설말뚝기초에 적용한 사례에 대하여 분석하였다.

2. 양방향 고유압 말뚝재하시험법

2.1 양방향 말뚝재하시험의 개요

양방향 말뚝재하시험(BD PLT)은 사용압력의 크기에 따라 저압시험과 고압시험으로 구분할 수 있다.

기존 양방향 말뚝재하시험에서는 다음과 같은 문제점들이 발생할 수 있다.

- ① 말뚝재하시험 후 잭 또는 셀 내부에 빈 공간 발생
- ② 재하용량의 확보를 위한 실린더 개수 증가와 장치의 단가 상승
- ③ 실린더 개수 증가로 인한 실린더 배치 곤란

양방향 고유압 말뚝재하시험에서는 고압(100MPa이상)의 유압잭과 주변 장치를 사용함으로써 저압 시험시 발생하는 위의 문제점을 해결할 수 있었다. 단동식 잭의 경우 재하시험 종료 후 발생한 재하 장치 내부의 잔류 공간 제거에 어려움이 있으나 복동식 잭을 이용하면 이러한 문제를 해결할 수 있었다. 또한, 고압(100MPa이상)의 유압잭을 사용하면 유압잭 단면이 동일할 경우 저유압 잭보다 많은 하중 능력을 확보할 수 있는데 따라서 고압력을 사용하면 재하용량을 충족시키기 위하여 필요한 유압실린더의 개수를 줄임으로서 유압실린더 배치를 원활하게 할 수 있고 설치상의 애로사항을 해결할 수 있었다.

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.

2.2 재하시험 종료 후 처리

사용말뚝의 경우 재하장치 내부에 빈 공간을 잔류시키지 않는 장치를 사용하는 것이 가장 좋지만 단동식 장치를 사용할 경우 장치내부에 잔류하는 빈 공간을 확실한 방법으로 그라우팅하고 그라우팅부의 견전성을 확인하여야 한다.

사용말뚝의 경우 말뚝내부에 잔류된 빈 공간을 일반적으로는 포트랜드 시멘트와 물로 그라우트를 하나 시멘트 강도가 40Mpa이상일 경우 고강도 조강 시멘트 페이스트로 충분하게 충전 시켜야 한다. 충전 후에는 그라우팅부의 충전 여부를 적절한 방법으로 확인하여야 한다. 하중재하 완료 후 말뚝 내부에 발생한 빈 공간에 대한 그라우팅을 실시하여야 한다.

국내에서 사용하고 있는 양방향말뚝재하시험장치들에 대한 재하시험 종료 후의 처리상황을 그림 1에 나타내었다.

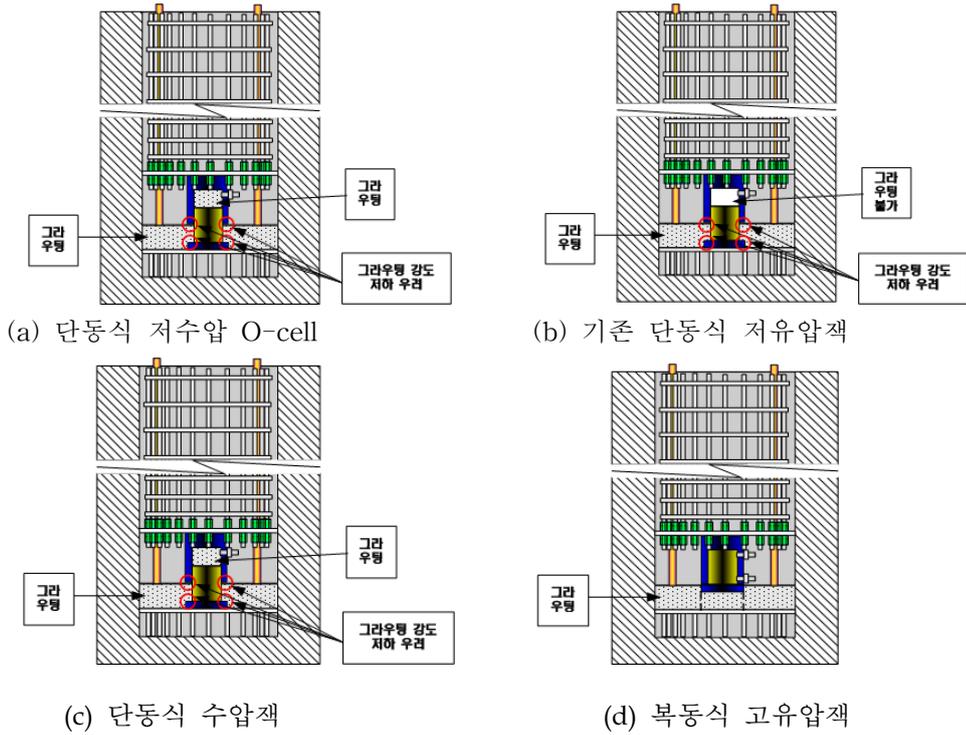


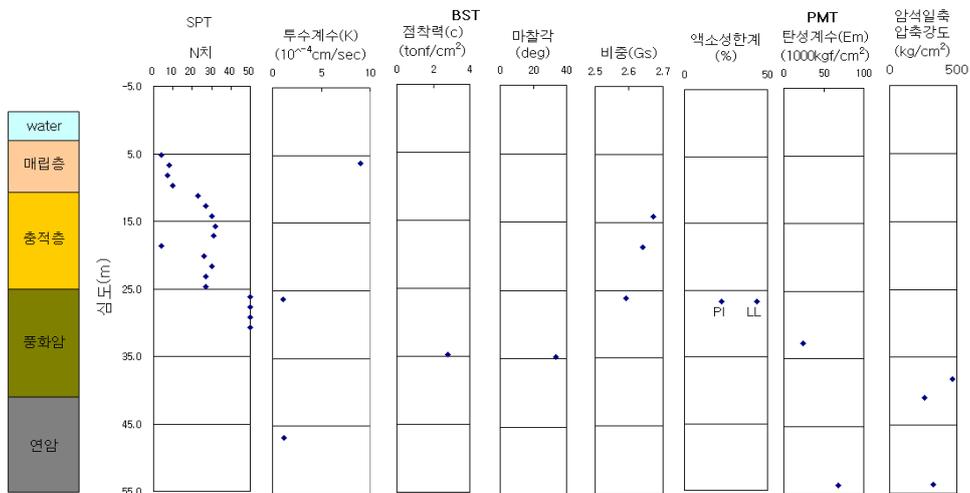
그림 1. 재하완료 후 각 재하장치의 장치내부 및 말뚝내부의 그라우팅 된 모습

3. 초고용량 양방향 고유압 말뚝재하시험 적용사례 분석

3.1 사례개요

본 연구에서는 설계시 연암 11m 소켓 부분의 허용주면마찰력은 48.6MN, 연암의 허용선단지지력은 30MN으로 검토되었다((주)새길이앤씨, 2007). 따라서, 준비된 재하용량을 충분히 활용하기 위하여 재하장치를 선단부에서 2m 상부에 설치하였다.

본 시험에 사용된 재하장치는 최대용량이 20MN인 실린더 6개로 구성되었고, 재하장치를 하부철근망 2m의 상부에 고정시키고 변위측정용 강봉(telltale)을 상판에 2개, 하판에 2개를 설치하여 상판, 하판의 변위를 측정하도록 하였다. 그림 2에는 적용사례 현장의 개요를 나타내었다.



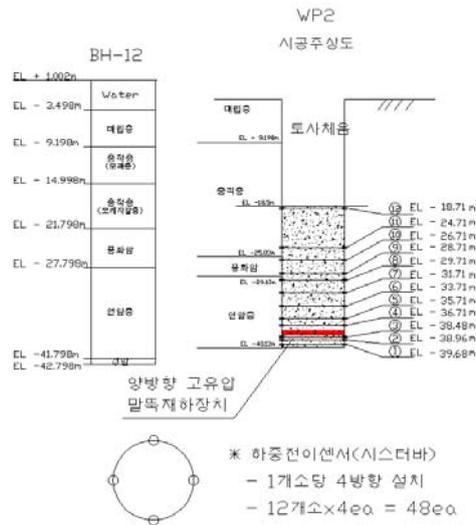
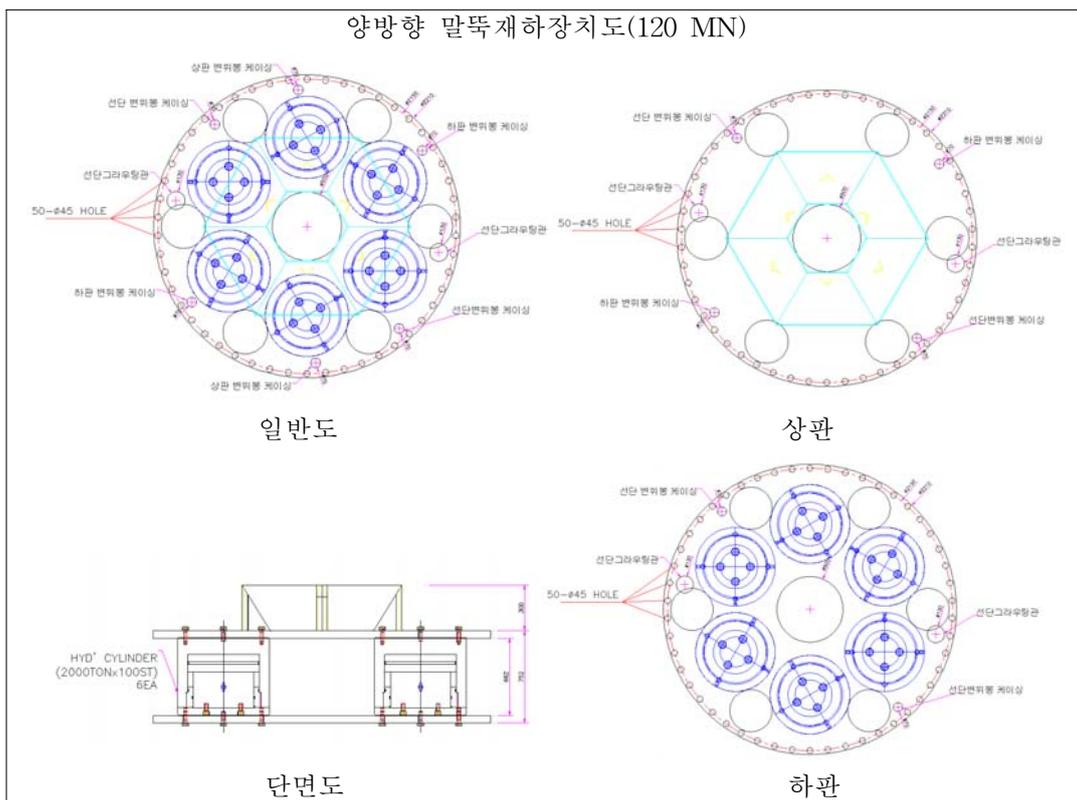


그림 2. 선정 사례 현장의 개요

본 시험에 사용된 재하장치의 장치도, 설치위치도 및 현장에서 사용된 시험장치를 그림 3에 나타내었다.



(a) 재하장치 평면도



(b) 말뚝 중간부에 설치된 재하장치 사진
그림 3. OO 현장의 사례(지테크, 2008)

3.2 양방향 고유압 말뚝재하시험 수행

양방향 고유압 말뚝재하시험에서는 ASTM D1143-81(1994)에서 규정하고 있는 완속표준재하시험방법과 반복재하방법을 혼합한 형태로 실시하였고, 하중 재하 주기는 표 1과 같이 계획하였다.

표 1. 계획된 하중재하주기표

주 기	재 하 단 계 (MN)
1	0 ⇒ 7.5 ⇒ 15.0 ⇒ 22.5 ⇒ 26.25 ⇒ 30.0 ⇒ 15.0 ⇒ 0 ⇒ Next
2	0 ⇒ 15.0 ⇒ 30.0 ⇒ 37.5 ⇒ 45.0 ⇒ 52.5 ⇒ 60.0 ⇒ 45.0 ⇒ 30.0 ⇒ 0 ⇒ Next
3	0 ⇒ 22.5 ⇒ 45.0 ⇒ 52.5 ⇒ 60.0 ⇒ 67.5 ⇒ 75.0 ⇒ 82.5 ⇒ 90.0 ⇒ 75.0 ⇒ 60.0 ⇒ 45.0 ⇒ 0 ⇒ Next
4	0 ⇒ 30.0 ⇒ 60.0 ⇒ 67.5 ⇒ 75.0 ⇒ 82.5 ⇒ 90.0 ⇒ 97.5 ⇒ 105.0 ⇒ 112.5 ⇒ 120.0 ⇒ 105.0 ⇒ 90.0 ⇒ 75.0 ⇒ 60.0 ⇒ 0 ⇒ End

본 시험은 변위 측정용 변위봉(Telltale)을 탐사관내에 삽입하고 작업대 및 고정정보(Reference beam)를 설치 후 장비의 이동 및 주변 말뚝시공작업에 의한 영향을 최소화 하고자 야간에 시험을 수행하였다.

본 시험말뚝(T2 Pile No. 65)은 구조물 기초로 사용되는 말뚝으로서 말뚝체의 파손과 과도한 변위발생에 대하여 주의하면서 시험을 수행 하였다. 하중재하단계는 표 1의 하중재하단계로 재하하여, 3주기 90MN의 재하하중에서 16.885 mm, 하판변위 24.719 mm으로서 나타났다. 본 시험말뚝이 사용말뚝임을 감안하여 3주기 90MN 까지 하중을 재하하고 제하하여 시험을 종료하였다.

본 시험말뚝의 시간별 재하하중을 그림 4에 나타내었다. 또한, 시간에 따른 상판변위와 하판변위를 그림 5에 나타내었다.

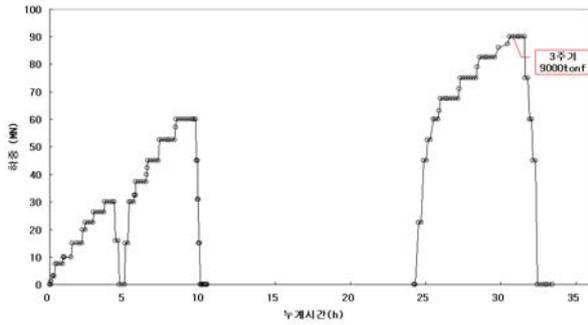


그림 4. 양방향 고유압 말뚝재하시험시 시간별 하중재하 곡선

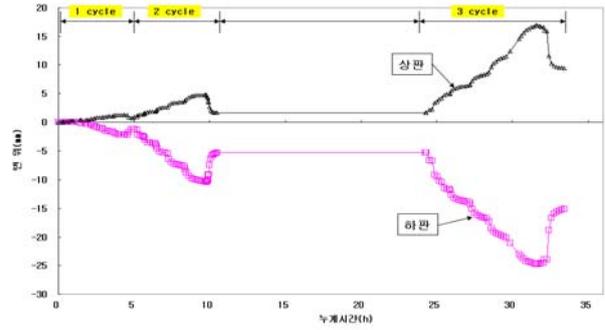


그림 5. 양방향 고유압 말뚝재하시험시 시간별 상판·하판변위 곡선

3.3 양방향 고유압 말뚝재하시험 결과 및 분석

그림 6은 양방향 재하시험의 하중단계별 재하시험 결과를 도시한 것으로 양방향 고유압 재하장치의 하판 하향변위와 상판 상향변위를 변위봉을 이용하여 계측하였다. 그림 7은 각 주기에서의 최초재하하중과 변위의 관계를 도시한 것으로 최대재하하중 90MN에서 상판변위 16.89 mm, 하판변위 24.72 mm가 발생하였다. 말뚝 몸체의 변형을 무시하면 말뚝두부에 하중재하시 주면과 선단에서의 침하량은 같다. 따라서 양방향 말뚝재하시험에서 측정된 두 개의 하중 - 변위 곡선으로부터 같은 변위량에서의 재하장치 하부 지지력과 순주면마찰력을 합하여 말뚝의 전체 하중지지능력으로 볼 수 있다. 여기서 순주면마찰력은 측정된 주면마찰력에서 말뚝의 부양자중을 빼주면 된다. 이렇게 하여 구한 하중과 변위량을 좌표로 나타낼 수 있다. 등가하중-변위곡선에서 실선으로 나타낸 부분은 실험결과만을 활용한 것이며, 점선으로 나타낸 부분은 기준변위이후의 상향변위를 가정하여 외삽한 결과이다. 그림 7(d)에는 3가지 방법에 의한 수정등가하중-침하량을 계산하여 나타내었다.

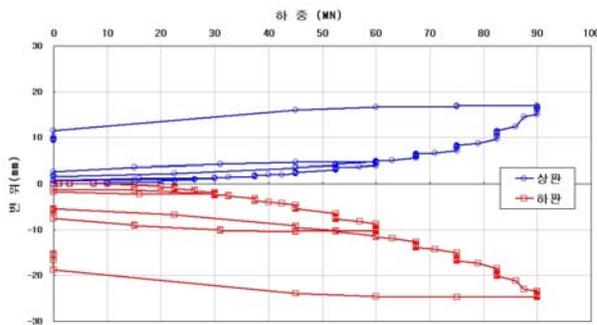
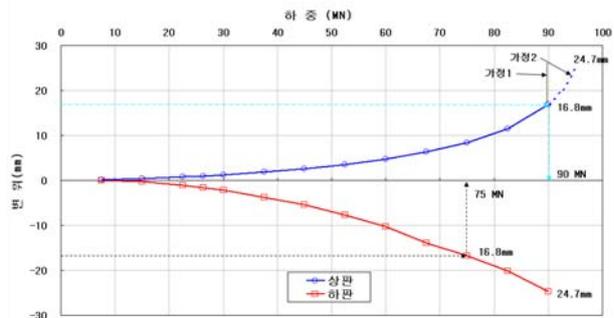
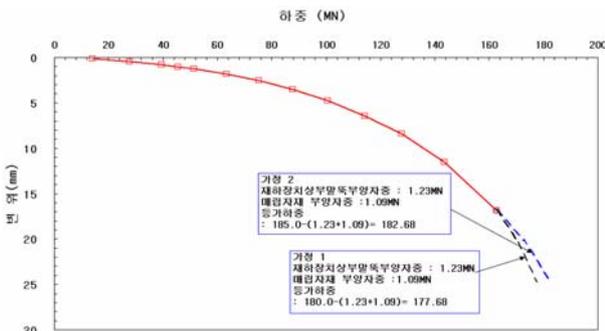


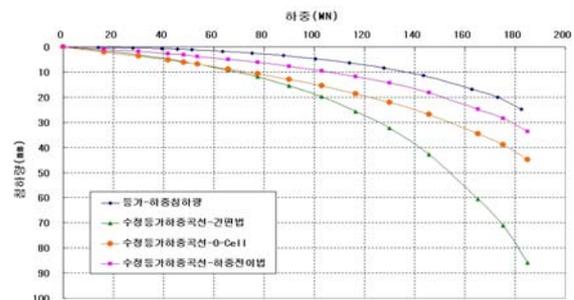
그림 6. 주기별 하중 - 상향변위, 하향변위 곡선



(a) 임의 변위의 상향 및 하향 지지력



(b) 등가하중 - 변위 곡선



(c) 수정등가하중-침하량 곡선

그림 7. 등가하중 - 변위 곡선 작도

양방향 말뚝재하시험은 일반적으로 장치상부의 주면마찰력과 장치하부의 지지력(선단지지력 또는 선단지지력+장치 하부 주면마찰력)의 상호 반력을 사용함으로써 별도의 반력시스템이 없이 시험을 수행할 수 있는 장점이 있다. 여기서 상부반력의 합과 하부반력의 합을 구할 수는 있으나 각 지층별 하중지지 특성을 알수가 없다. 따라서 지층별 하중지지특성을 확인하기 위해서는 시험말뚝체에 심도별 축하중센서를 설치하여 하중전이시험을 수행하여야 한다. 본 시험에서는 심도별 12개소에 각 개소별 4개의 센서를 설치하였으며, 하중단계별 마찰력 분포도를 그림 8에 나타내었으며, 축하중분포도는 그림 9에 나타내었다.

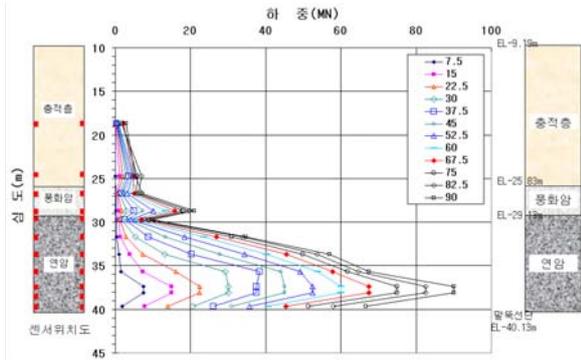


그림 8. 하중단계별 마찰력 분포도

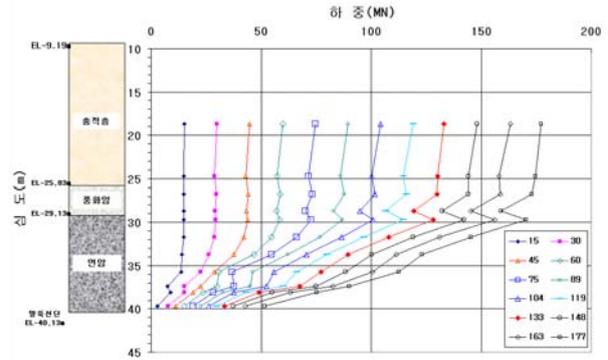


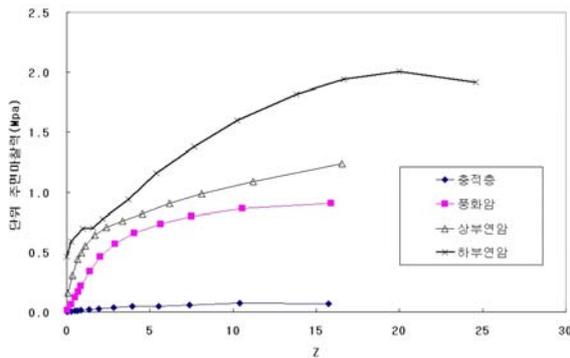
그림 9. 축하중 분포도

구간별 변위량은 변형을 측정점간의 평균변위량을 의미하며, 재하판으로 부터 다음 임의 위치의 변위량은 식 (1)으로 계산한다. 그리고, 구간별 변위량은 식 (2)으로 계산한다.

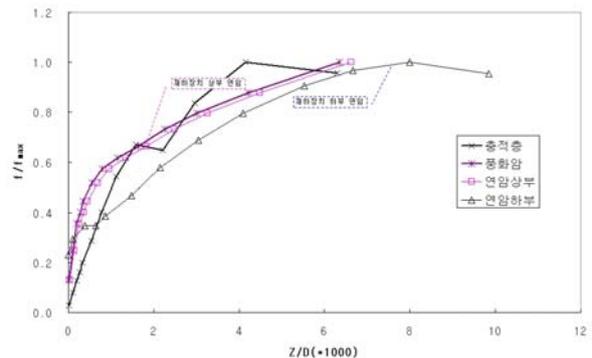
$$S_{i+1} = S_i - \frac{(P_i - P_{i+1}) \times (z_i - z_{i+1})}{AE} \quad (1)$$

$$S_{i,i+1} = \frac{S_i + S_{i+1}}{2} \quad (2)$$

지층별 t-z의 관계를 그림 10(a)에 나타내었으며 정규화된 t-z 관계를 그림 10(b)에 나타내었다. 여기서, t는 마찰응력을 z는 말뚝의 변위를 그리고 D는 말뚝의 직경을 나타낸다.



(a) t-z 관계

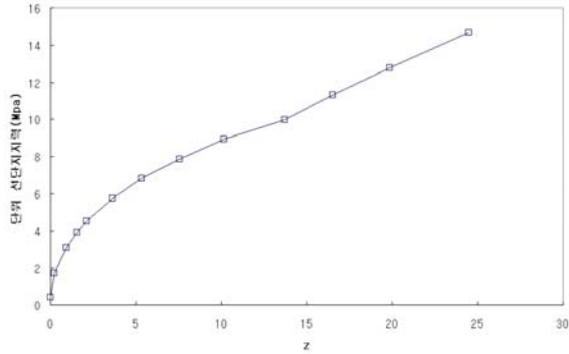


(b) 정규화된 t-z 관계

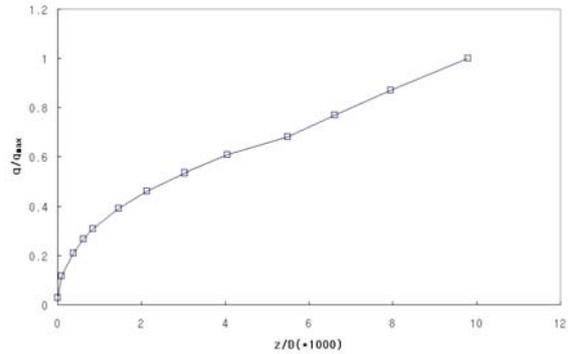
그림 10. 지층별 하중전이 분석

그림 9의 하중단계별 축하중 분포도로부터 말뚝선단에 작용되는 선단하중을 확인할 수 있었으며, 선단지반(연암)의 단위선단지지력과 변위의 관계를 그림 11에 나타낼 수 있었다. 여기서, q는 단위선단응

력을 나타낸다.



(a) q-z 관계



(b) 정규화된 q-z 관계

그림 11. q-z 관계 분석

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 초고층 건축물 기초의 고용량 하중 지지능력을 확인 할 수 있는 가장 현실적인 대안으로 고유압방식의 양방향 말뚝재하시험을 제안하였으며, 현장시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 양방향 복동식고유압 말뚝재하시험을 적용하여 대구경 현장타설말뚝의 고용량 하중지지능력 확인할 수 있었으며, 이 방법은 정재하시험시 재하용량 한계와 현장조건의 제약을 극복할 수 있는 가장 현실적인 대안으로 볼 수 있었다.
- 2) 고유압 복동식 양방향 재하장치는 재하후 재하장치 내부에 빈 공간을 잔류시키지 않으므로 사용말뚝의 재하시험에 유일한 대안으로 사용될 수 있으며, 재하용량을 크게 늘일 수 있으므로 고재하용량이 필요한 시험말뚝에 대한 재하시험에 매우 유용한 시험방법이다.
- 3) 현장 검증결과에 의하면, 최대작용하중으로 90 MN에 달하는 대용량 하중을 재하할 수 있는 고유압 재하장치의 장점을 유감없이 발휘하였고, 대용량의 재하하중을 별다른 문제없이 재하할 수 있는 내구성까지 갖춘 것으로 판명되었다.

참고문헌

1. (주)새길이엔씨(2007), “부산 해운대 우동 프로젝트 지반분석 및 기초검토(현장타설말뚝) 부록 3”, 2007. 12.
2. (주)지텍크(2008), “해운대 우동 PROJECT 현장타설말뚝(Φ2,000, Φ2,500) 및 소구경 현장타설말뚝(Φ500)의 재하시험보고서”, 2008.
3. ASTM D1143-81(Reapproved by 1994) (1994). "Standard Testmethod for Piles Under Static Axial Compressive Load."
4. Osterberg Jorj O.(1986) Device for testing the load bearing capacity of concrete-filled earthen shafts. US-4614110