

양방향 고유압 말뚝재하시험(BDH PLT)의 개발 및 적용성에 관한 연구

Study on Development of the Bi-directional High Pressure Pile Load Test (BDH PLT) and Its Application

이 충 숙¹ Lee, Chung-Sook

이 민 희² Lee, Min-Hee

김 상 일³ Kim, Sang-Il

최 용 규⁴ Choi, Yongkyu

Abstract

To overcome the limits of the static pile load test for large diameter drilled shafts, bi-directional low pressure pile load test (BDL PLT) has been used but this test method contains some problems that has not been solved basically. That is, BDL PLT has some problems: difficulty in jack (or cell) arrangement for large test capacity, void remain inside jack (or cell) due to the unrecovery of piston after test etc. In this study, bi-directional double-acting high pressure pile load test (BDH PLT w/DOJ) was developed and confirmed for a in-situ large diameter drilled shaft. At present, test specification of bi-directional pile load test (BDPLT) is being made, and severd main issues (such as, test kinds, test capacity, necessity of use of double-acting and attention of application to service pile) will be contained at the specification.

요 지

대구경 현장타설말뚝에 대한 정재하시험의 한계를 극복하기 위하여 양방향 저압 말뚝재하시험이 개발되어 사용되어 오고 있으나 이 방법 또한 근원적으로 해결되지 않은 문제점을 내포하고 있다. 즉, 양방향 저압 말뚝재하시험은 대용량 실린더의 배치공간 및 시험 종료 후 실린더의 미복원에 따른 장치 내 빈 공간잔류 등의 문제점을 내포하고 있다. 본 연구에서는 양방향 복동식 고유압 말뚝재하시험(BDH PLT ; Bi-directional High Pressure Pile Load Test)을 개발하였으며 실제 현장에서 시행된 사례를 분석하여 양방향 복동식 고유압 말뚝재하시험에 대한 적용성을 확보하였다. 현재 양방향 말뚝재하시험 규정이 제정 중에 있으며, 시험종류, 재하용량, 복동식 잭 사용 필요성, 사용말뚝에 적용 시 주의점 등의 주요개념이 포함될 것이다.

Keywords : Double-acting oil jack, Bi-directional high pressure pile load test (BDH PLT), Large diameter drilled shafts, Specification of BD PLT

1. 서 론

말뚝정재하시험은 일종의 실물시험으로 말뚝에 실하중을 가하여 실제 상부구조물이 건설되었을 때를 재현

하므로 신뢰도가 높다는 장점이 있다. 그러나, 하중재하를 위한 가압 및 반력 시스템의 선택 및 설치방법, 넓은 시험부지 등이 필요하므로 공기와 현장조건 등의 제약을 많이 받으며 특히, 대구경 말뚝의 경우 재하용

1 정회원, (주)동성 엔지니어링 (Member, Dongsung Engrg., Co. Ltd.)

2 정회원, 경성대학교 건설환경공학부 겸임교수 (Member, Adjunct Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Kyungsung Univ.)

3 정회원, 한국양방향말뚝재하시험협회 사무국장 (Member, Secretary General, Korea Bi-directional Pile Load Test Association)

4 정회원, 경성대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Kyungsung Univ, ykchoi@ksu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

량의 한계로 인하여 적용성이 크게 제한을 받을 수 있다. 그리고 대구경 현장타설말뚝은 말뚝 하나에 작용하는 하중이 매우 크기 때문에 따라서, 대구경 현장타설말뚝에 대한 경제적인 설계수행 뿐만 아니라 설계하중 확인을 위하여 재하용량을 확대시킬 필요성이 크게 대두되었다. 이에 따라 양방향 저압 말뚝재하시험이 개발되어 사용되어 오고 있으나 이 방법 또한 근원적인 문제점을 내포하고 있어 이에 대한 개선이 필요하게 되었다.

재하시험을 통해 말뚝의 정확한 정보를 알아낼 수 있다면 설계 시 최적화 설계 또는 경제적인 설계를 할 수 있을 것이다. 그러나 대구경 현장타설말뚝의 경우 정재하시험을 실시하기 위해서는 반력을 제공하기 위한 지중 앵커 등을 별도로 시공하고 대구경의 재하프레임을 설치하여야 하기 때문에 많은 비용이 소요되며, 해상부의 경우 해상심도 및 시공여건에 따른 제약이 있어 심각한 문제점이 야기된다. 따라서 극히 제한적인 경우에만 재하시험이 실시되었고, 재하시험을 통해 확인된 말뚝의 하중 지지능력을 이용하여 설계를 수행한 사례는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 양방향저압말뚝재하시험이 내포하고 있는 문제점들을 극복할 수 있는 양방향고유압 말뚝재하시험 장치를 개발하였으며 현장에서의 적용성을 검증하였다. 또한 현재 제정중인 양방향말뚝재하시험 기준의 주요 개념에 관하여 설명하였다.

2. 양방향 말뚝재하시험

2.1 양방향 말뚝재하시험의 개요

양방향 말뚝재하시험(BD PLT ; Bi-directional Pile

Load Test)은 크게 다음과 같이 구분할 수 있으며 재하 장치의 종류에 따라 표 1과 같이 구분할 수 있다. 양방향 말뚝재하시험에 대한 특징을 표 2에 나타내었다.

말뚝정재하시험의 경우 시험하중만큼의 사하중, 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 재하하므로 사하중, 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력장치와 큰 재하장치가 필요하다. 이때 말뚝두부에 재하되는 하중 P는 주면마찰력 F와 선단지지력 Q에 의해 지지되고, 이 두 지지력을 분리하기 위해서는 말뚝의 하중전이측정이 반드시 수행되어야 한다.

양방향 말뚝재하시험의 경우, 지상에서 유압을 가하면 유압잭의 하부는 하향으로 움직여 선단지지력을 발생시키고 상부는 동일한 힘으로 상향으로 움직이면서 말뚝에 주면마찰력을 발생시킨다. 또한 말뚝선단이나 말뚝의 임의 위치에서 하중을 재하하므로 주면마찰력 F와 선단지지력 P는 서로에 대해 반력으로 작용하게 된다. 이런 이유로 양방향 말뚝재하시험에서는 별도의 반력시스템이 필요치 않게 된다.

양방향 말뚝재하시험은 유압잭이나 셀이 팽창함에 따라 선단지지력이나 주면마찰력중 하나가 극한에 도

표 1. 양방향 말뚝재하시험의 종류 및 개발자

시험명		약어	영문명	특징	특허관련		개발자
					국내	국외	
저압 방식	오스터버그 셀 시험	BD O-cell PLT	Osterberg cell test	·저유압, 단동식 ·항타/현타 말뚝	등록	등록	Osterberg
	저유압 재하시험	BDL PLT w/SOJ	BDL PLT w/Single-acting Oil Jack	·저유압, 단동식 ·대구경 현타 말뚝	등록	-	최용규, 박봉근, 정창규
고압 방식	고유압 재하시험	고유압 복동식 잭	BDH PLT w/DOJ	·고유압, 복동식 ·대구경 현타 말뚝 ·시험비 저렴	등록	출원	최용규, 이민희, 정창규
		고유압 단동스프링 복원형 잭	BDH PLT w/SSOJ	BDH PLT w/Single-acting Spring-controlled Oil Jack	·고유압, 단동식, 스프링 복원형 ·대구경 현타 말뚝 ·시험비 저렴	출원	-

표 2. 양방향 말뚝재하시험의 특징 요약표

구분	저유압 방식, 단동식	고유압 방식, 복동식
	양방향 오스터버그 말뚝재하시험(BD O-cell PLT)	양방향 고유압 말뚝재하시험(BDH PLT)
가력장치 (잭/셀)	<ul style="list-style-type: none"> ·저압력(700kgf/cm²) 셀 사용 ·가급적 단수 셀 사용(원특허) ·시험말뚝 단면 크기에 대한 시험용량 한계 ·대형 셀 제작은 기술적으로 많은 어려움이 있으며, 제작비가 많이 소요됨 ·규격화된 셀 사용 	<ul style="list-style-type: none"> ·고압력(1000kgf/cm²이상) 유압잭 사용 ·유압실린더의 개수를 줄여 시험장치 제작비 감소 ·복수의 유압잭; 연동하여 작동 ·복동식의 실린더를 사용 : 반복 하중재하 가능 및 시험 후 유압잭 내 잔류 공간 제거
안전율	·1.3~1.5(작동압력 10,000psi를 기준으로 계산)	·3.0(유압잭 재료의 안전율)
재하용량 기준	<ul style="list-style-type: none"> ·양방향 합계하중 ·재하용량 부족으로 설계하중마저도 재하 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> ·잭 용량 즉, 1방향 재하하중 ·따라서 BD O-cell PLT 용량의 2배
시험 후 처리	<ul style="list-style-type: none"> ·셀 내부와 말뚝 내부공간 : 그라우팅으로 충전 ·셀 내부 충전의 안정성 : 공식적인 보고 없음 	<ul style="list-style-type: none"> ·말뚝내부 공간만 그라우팅 실시 ·복동식 잭 사용으로 잭 내부 빈 공간 잔류 없음
적용성	<ul style="list-style-type: none"> ·시험말뚝 : 가능 ·사용말뚝 : 가능(?) 	<ul style="list-style-type: none"> ·시험말뚝 : 가능 ·사용말뚝 : 가능
셀/잭 배치	·어려움 있음(기성제품사용)	·원활함
상·하 변위 측정	<ul style="list-style-type: none"> ·진동현식 변위계 사용 ·변위계 정도 0.0254 mm ·변위봉 사용 ·상/하판, 두부 변위측정 	<ul style="list-style-type: none"> ·전기저항식 변위계 사용 ·변위계 정도 0.001mm ·변위봉 사용 ·상/하판, 두부 변위측정
콘크리트 타설의 건전성	<ul style="list-style-type: none"> ·단일 셀의 경우 측면으로 트레미관 설치 ·재하장치 부근의 건전성 불량 우려 높음 ·고하중인 경우 다수의 실린더 배치로 인하여 하부 레미콘의 건전성 불량 우려 	<ul style="list-style-type: none"> ·강철재 깔때기를 사용 → 중앙부에 트레미관 삽입 ·재하장치 부근의 건전성 불량 우려 낮음 ·레미콘타설 비교적 용이함
재하장치 연결	<ul style="list-style-type: none"> ·상/하판과 재하장치를 용접 결합 ·주철근과 상판을 용접 결합 ·주철근의 열에 의한 손상 우려 	<ul style="list-style-type: none"> ·상/하판과 재하장치를 볼트 결합 ·주철근과 상판을 U볼트(상부) 및 커플러(하부)로 결합 ·주철근의 열에 의한 손상 없음 ·상/하판 고정 시 볼트 결합력 최소화 가능
축하중 전이 분포	<ul style="list-style-type: none"> ·원특허에는 청구항 없음 ·소량의 센서 사용 ·정확한 축하중 분포를 측정 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> ·말뚝 깊이별 축하중 계측용 센서 규격대로 설치 ·축하중전이 분포의 신뢰성 확보 가능 ·말뚝축하중 분포도 작성 절차 기술

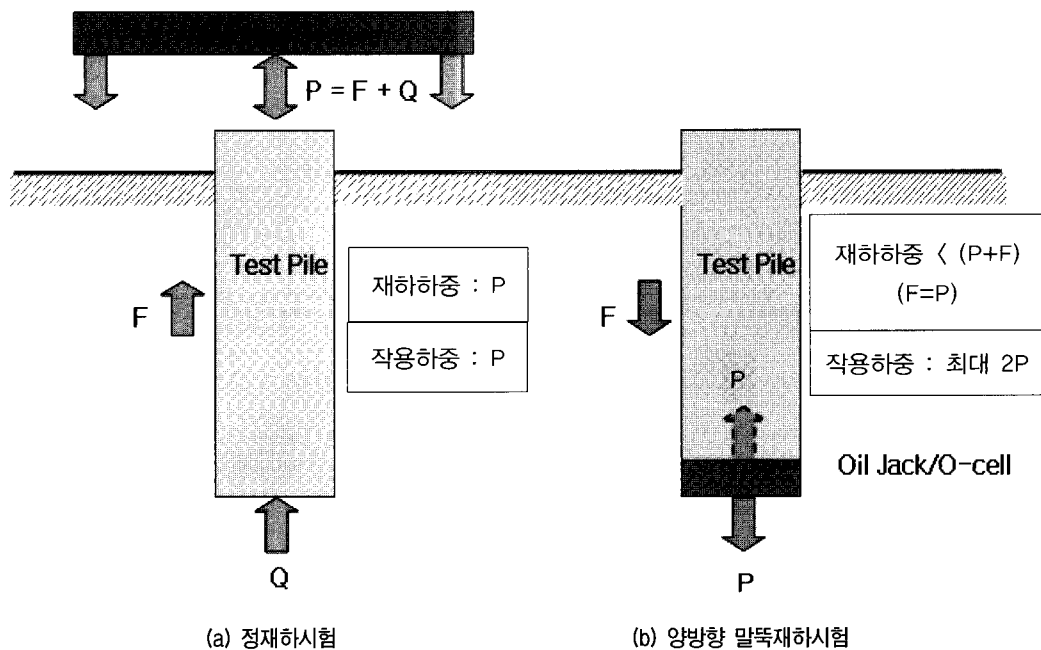
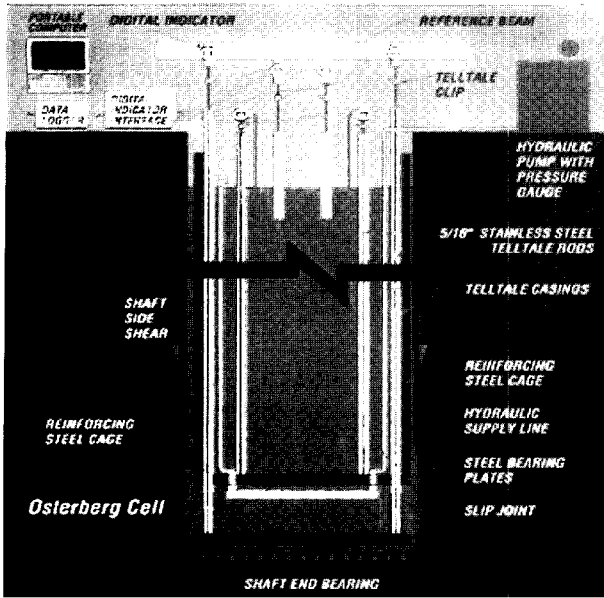
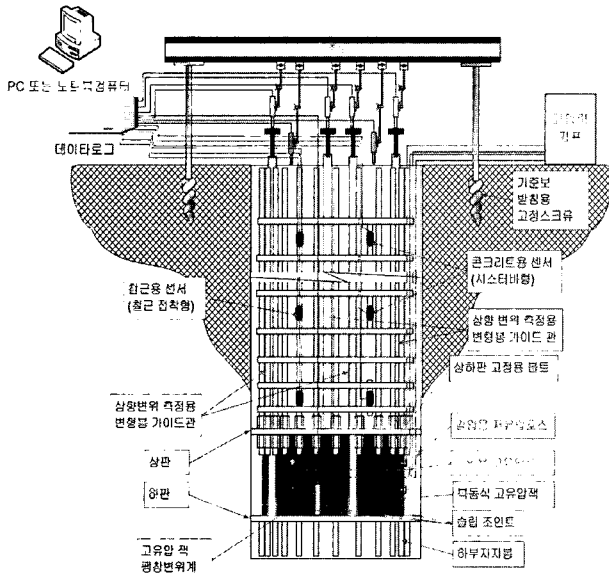


그림 1. 정재하시험과 양방향 재하시험의 비교(정창규, 2004)



(a) 오스터버그셀 말뚝재하시험



(b) 양방향 고압 말뚝재하시험

그림 2. 양방향 말뚝재하시험 개략도

달하거나, 잭 또는 셀의 최대재하용량에 도달할 때 시험을 종료한다.

그림 2는 양방향 유압 말뚝재하시험 장치의 개략도이다.

2.2 양방향 말뚝재하장치 설치위치

말뚝재하시험은 최대의 정보를 얻을 수 있도록 계획되고 수행되어야 한다. 그러므로, 지반조사로부터 얻어진 지반 조건 및 실내시험 결과들을 세밀히 고려하여 양방향 말뚝재하장치의 설치 위치를 결정하는 것이 중요하다. 그림 3은 현장타설말뚝에서의 시험 목적에 따른 양방향 말뚝재하장치의 설치 위치를 나타낸 것이다.

2.3 등가하중-침하량 곡선

양방향 말뚝재하시험은 선단지지력과 주변마찰력이 상호간에 반력으로 작용하여 동시에 측정된다. 따라서 여기서 얻은 두 개의 하중 - 변위 곡선(선단지지력 - 하향변위 곡선, 주변마찰력 - 상향변위 곡선)을 이용하여 등가 하중 - 침하량 곡선을 그릴 수 있다.

등가 하중 - 침하량 곡선은 양방향 말뚝재하시험에서 구한 주변마찰력 - 상향변위 곡선과 선단재하하중 - 하향변위 곡선으로부터 결정할 수 있으며, 이것은 정재하시험 시 측정된 말뚝머리 하중 - 침하량 곡선에 해당하는 것으로 볼 수 있다.

등가 하중 - 침하량 곡선 작도 시 말뚝체를 변형이 없는 강체로 가정하면, 말뚝두부와 바닥에서의 변위는 같다. 따라서 같은 변위에서의 선단재하하중과 주변마찰력을 합하면 등가 하중 - 침하량 관계에서의 하나의 점으로 표시할 수 있고, 각각의 변위에서 같은 방법으로 점을 찍어 연결하면 등가 하중 - 침하량 곡선을 그릴 수

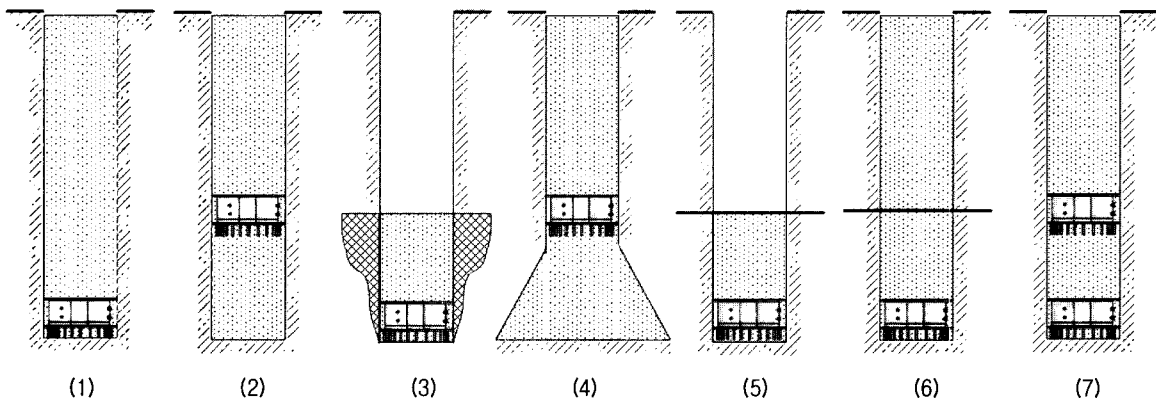


그림 3. 시험 목적에 따른 양방향 말뚝재하장치의 설치 위치(Osterberg, 2001)

있다.

등가 하중 - 침하량 곡선은 다음과 같은 가정 하에서 결정된다.

- (1) 양방향 말뚝재하장치 상판의 상향변위에 의한 주면 마찰력 - 변위 곡선은 말뚝정재하시험에서의 하향 주면마찰력 - 변위 곡선과 같다.
- (2) 양방향 말뚝재하장치 하판의 하향변위에 의한 선단 재하하중 - 변위 곡선은 말뚝정재하시험에서의 선단하중 - 변위 곡선과 같다.
- (3) 압축에 의한 말뚝 몸체의 변위는 무시할 수 있을 정도이므로 말뚝은 강체로 가정한다. 일반적으로 현장 타설말뚝의 압축량은 1~3mm이다(Schmertmann & Hayes, 1997).

양방향 말뚝재하시험은 선단하중이나 주면마찰력이 극한에 도달하거나 셀 또는 유압 잭(jack)의 용량이 한계에 이르면 시험을 종료하게 된다. 그림 4는 양방향 말뚝재하시험 결과를 나타내는 예이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 양방향 말뚝재하장치의 작용하중은 양방향으로

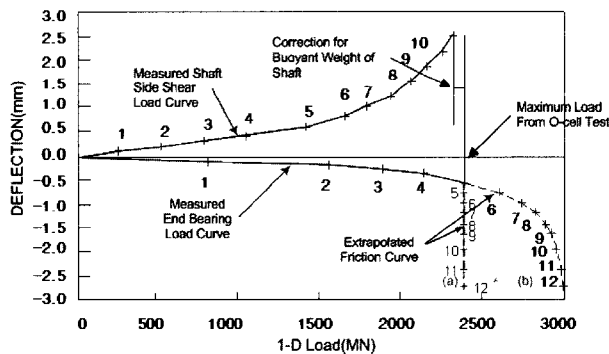


그림 4. 하중 - 변위 곡선의 예(전준수, 1996)

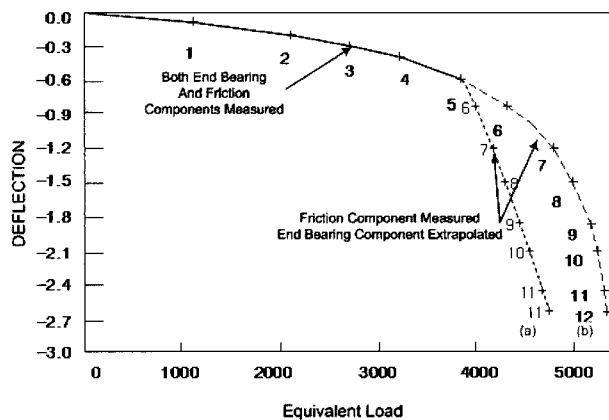


그림 5. 등가 하중 - 침하량 곡선의 예

각각 24.5MN 씩 가해졌고, 선단하중이 먼저 극한에 도달하였다.

이 때 점 4에서의 상향변위는 약 0.4mm이고, 작용된 주면마찰력은 약 10.2MN이다. 그리고, 선단하중 - 변위 곡선에서 같은 크기의 하향변위를 보이는 점(점 4)을 찾으면 작용된 선단지지력은 21MN임을 알 수 있다. 따라서 점 4에서의 변위가 0.4mm일 때, 이 두 하중을 합하여 말뚝머리 등가 하중을 구할 수 있으며, 본 사례의 경우 말뚝머리에서 작용된 하중은 31.2MN이 된다.

이런 방식으로 각각의 변위에서 상응하는 하중들을 구하고 이들을 도시하면 그림 5와 같은 등가 하중 - 침하량 곡선을 그릴 수 있다. 여기서 보듯이 점 5까지는 측정된 결과를 이용한 곡선이고, 그 이상의 점들에 대해서는 외삽법을 이용하여 추정된 곡선이다. 이것은 양방향 말뚝재하시험의 단점 중 하나로 선단하중과 주면마찰력 중 어느 한쪽이 극한에 도달하면 더 이상 시험을 진행할 수 없으므로 등가 하중 - 침하량 곡선에서 극한 지지력이 분명하게 판별되지 않을 경우가 발생하는데, 이 경우 외삽법에 의한 추정곡선을 사용할 수 있으나 실험에 의한 결과는 아니므로 극히 제한적으로만 사용하여야 한다.

선단지지력과 주면마찰력 중 어느 한쪽이 극한에 도달할 경우, 다른 한 쪽을 추정하는 방법에는 두 가지가 있다. 첫 번째는 매우 보수적인 방법으로 다른 한쪽도 극한에 도달하여 침하에 대한 하중의 증가가 더 이상 없다고 가정하는 것이고(예, 그림 5의 (a) 선), 두 번째는 보다 합리적인 방법으로 다른 한쪽도 극한에 도달하지 않았다고 보아 외삽법으로 추세선을 가정하는 것이다(예, 그림 5의 (b) 선).

3. 양방향 고유압 말뚝재하시험의 특징

3.1 개발 필요성

양방향 오스터버어그 셀 시험 및 양방향 저유압 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 고압 말뚝재하시험에서는 고압(98MPa이상)의 유압잭과 주변 장치를 사용함으로써 위와 같은 문제점을 해결할 수 있다. 저압방식의 말뚝재하시험(O-Cell PLT, BDL PLT)에서 사용하는 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 배치 및 설치상의 문제점을 보완할 수 있다.

고압(98MPa이상)의 유압잭을 사용하면 유압잭 단면이 동일할 경우 저유압 잭보다 많은 하중 능력을 확보할 수 있다. 그림 6은 국내 건축현장의 한 사례를 보여주고 있는데 직경 2,000mm의 현장타설말뚝에 설계하중 26.5MN이 작용하는 것으로 설계되어 있는 바 이 경우에 대해 각 시험법에서 가능한 재하장치 배치를 검토하였다(표 3).

1방향 재하하중이 설계하중의 2배 이상이어야 하므로 본 사례에서는 53MN 이상의 재하용량이 되어야 한다. O-cell(PLT)의 경우 11.8MN 용량의 셀을 5개 또는 29.4MN 용량의 셀을 2개 배치하여야 하는데, 이러한 배치는 가능한 것으로 나타났으나 레미콘 타설 시 레미콘의 압출공간이 부족하여 레미콘 타설이 용이하지 않을 것으로 판단되었다. 그리고 O-cell은 단동식 셀이지만 셀 내부 공간을 그라우팅으로 충전하므로 사용말뚝에의 적용도 가능할 수는 있으나 원만하지는 않을 것으로 보인다. 저유압잭(5.9MN 기준)을 사용하면 최소 10개의 유압잭이 필요하므로 배치가 불가능하게 되는 반면, 고유압잭(147MPa, 9.8MN 기준)을 사용하면 6개 정도의 잭이 필요하므로 배치가 원활하게 되어 시험 수행이 훨씬 용이해진다. 또한, 유압실린더의 개수를 줄임으로서 시험장치 제작비가 감소하게 되어 경제성에서도 탁월함을 알 수 있다.

표 3. 재하장치의 종류에 따른 배치방안 검토 예

시험법	O-cell PLT		BDL PLT	BDH PLT				
	사용잭 용량 (MN)	11.8	29.4	5.9	9.8	19.6	29.4	
·재하시험 용량(잭용량) : 53MN 이상 (1방향 재하하중)	잭의 제원	직경 (mm)	540	870	430	400	665	810
		높이 (mm)	295	283	595	660	885	1060
·말뚝직경 : 2,000mm	소요개수(개)	5	2	10	6	3	2	
·설계하중 : 26.5MN	배치여부판정	C	B	D	A	A	B	
	배치예(그림 6)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
	적용성 검토	가능	양호	배치불가	극히 양호		양호	

* A : 극히 양호, B : 양호, C : 가능, D : 불가능

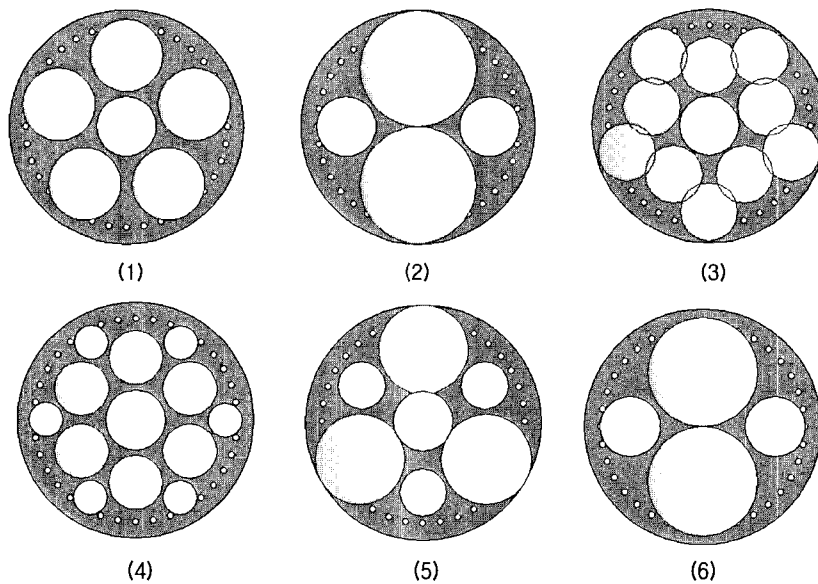


그림 6. 저압 말뚝재하시험과 고유압 말뚝재하시험의 재하장치 배치양상 비교(표 3 참조)

3.2 양방향 고유압 말뚝재하시험 장치 예

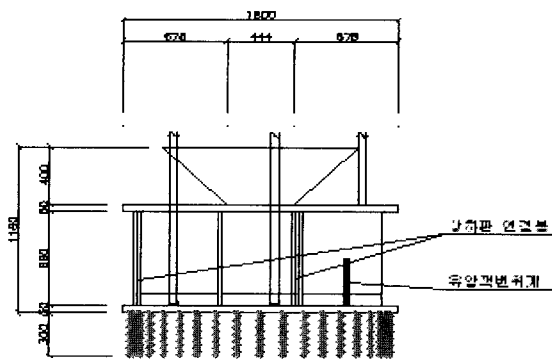
00대교 건설공사 육상부 PJ4-18에서 실시된 재하시험에서 사용한 양방향 고유압 말뚝재하장치 예를 표 4에 수록하였다.

3.3 재하장치의 설치 예

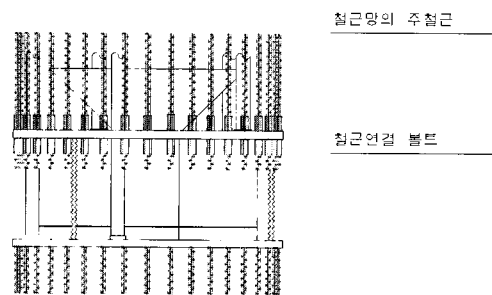
본 시험에 사용된 재하장치에는 최대용량이 9.8MN인 고유압잭 3개가 사용되었고, 재하장치를 철근망 최하부에 고정시키고 변위측정용 변위봉(telltale)을 상판에 2개, 하판에 3개를 설치하여 상판 및 하판의 변위를 측정하였다. 또 상판과 하판 사이에는 LVDT를 1개 설

표 4. 양방향 고유압 말뚝재하장치 시스템 구성 제원 예

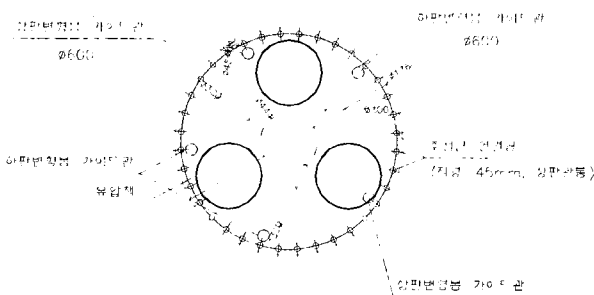
장비명	규격	수량
1. 고유압잭 및 펌프	- 고유압잭(사용압력 : 147 MPa, 최대하중 : 11.8MN), (최대스트로크 : 100mm)	3 개
	- 펌프(최대 압력 : 176.5MPa)	1 개
2. 유압호스	- 고압력 호스(176.5MPa) : 80m	3 개
	- 저압력 호스(68.6MPa) : 80m	3 개
3. 고유압잭 변위계	- LVDT : 방수식	1 개
4. 상/하향 변위계(LVDT)	- 최대 범위 : 200mm	8 개
	- 정도 : 1/1000mm	
5. 마그네틱 베이스	- 영구 자석식	8 개
6. 기준보 및 고정앵커	- I형 보 : 5m	2 개
	- 고정앵커 스크류 : 1m 60cm	4 개
7. 변위봉	- 개당 길이 : 1m - 60m × 5 개소 / 1m = 300개	1 식
8. 유압 연결 장치 및 부속장비	- 고압용 연결 장치, 멩키스페너, 바이스 플라이어, 렌치 등	1 식
9. 자동화 계측 시스템	- TDS 303	1 식
	- 스위치박스(30 채널 : 1개 50 채널 : 2개)	
	- 노트북 컴퓨터	



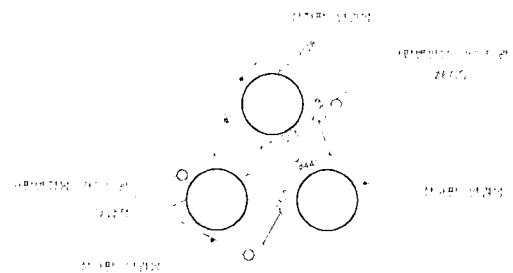
(a) 양방향 고유압 재하장치 정면도



(b) 양방향 고유압 재하장치 철근조립도



(c) 양방향 고유압 말뚝재하장치 평면도(상판)



(d) 양방향 고유압 말뚝재하장치 평면도(하판)

그림 7. 재하장치 설치 상세도

치하여 실린더의 변위를 측정하였다. 재하장치 설치 상세도는 그림 7에 나타내었다.

3.4 축하중 분포도 결정방법

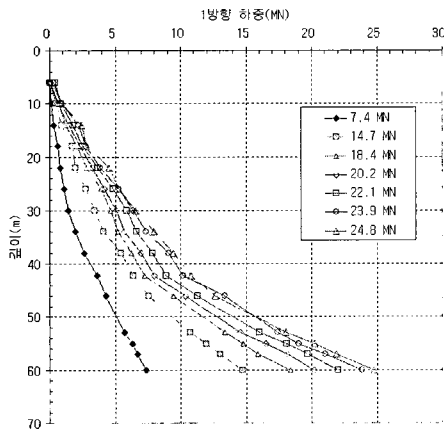
(1) 재하장치가 선단에 설치된 경우

재하장치가 선단에 설치된 경우 축하중 분포도를 작성하는 순서는 다음과 같다.

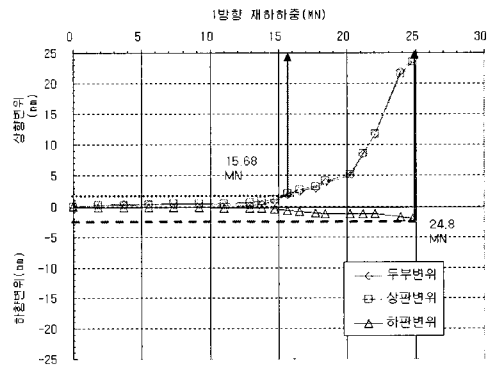
- ① 재하장치의 상부에 설치된 말뚝 축하중 계측용 센서의 값을 재하단계별로 측정한다.
- ② 측정된 센서의 값을 이용하여 임의 재하단계에서 말뚝주면마찰력을 계산하고 깊이에 따른 분포도를 작성한다(그림 8(a)). 이때 말뚝의 자중을 감하여 순주면마찰력을 구하여야 한다. 이 때, 재하장치의 높이에 해당하는 주면마찰력은 고려할 수가 없다.
- ③ ②에서 작성된 주면마찰력 분포도의 방향을 전환하

여 축하중 분포도의 작성에 활용될 수 있도록 한다(그림 8(c)).

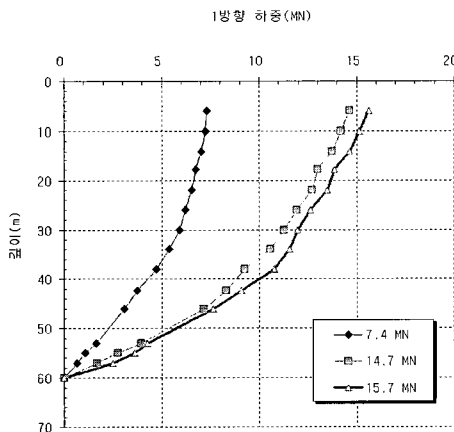
- ④ 임의 재하단계에서 측정된 상향 변위와 동일한 하향 변위에 상응하는 선단지지력을 찾아낸다. 또는, 동일한 하향변위에 상응하는 상향변위에서 주면마찰력을 찾아낸다. 예를 들면, 그림 8(b)에서는 하향최대변위(2 mm)에서 선단하중 24.8MN과 동일한 상향 변위(2 mm)에서 마찰력 15.7MN을 구할 수 있다.
- ⑤ ④에서 구한 선단지지력을 ③에서 작도된 주면마찰력에 합하여 임의 하중단계에서의 축하중 분포도를 작도한다. 여기서, 사용 가능한 최대 하중범위는 상/하부 변위 중 작은 변위에 해당하는 상부하중(마찰력)과 하부하중(선단력)의 합계이며, 이들은 모두 실측치에 의한 것들이다.
- ⑥ 대표적인 하중단계에 대하여 ②~⑤의 과정을 반복하여 축하중 분포도를 완성한다(그림 8(d)).



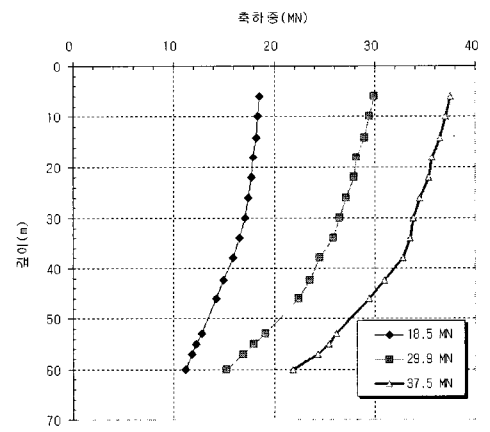
(a) 측정된 주면마찰력



(b) 상향/하향 변위 - 1방향 재하하중



(c) 마찰력 분포도



(d) 축하중 분포도

그림 8. 축하중분포도 작도방법 예(재하장치가 선단에 있는 경우)

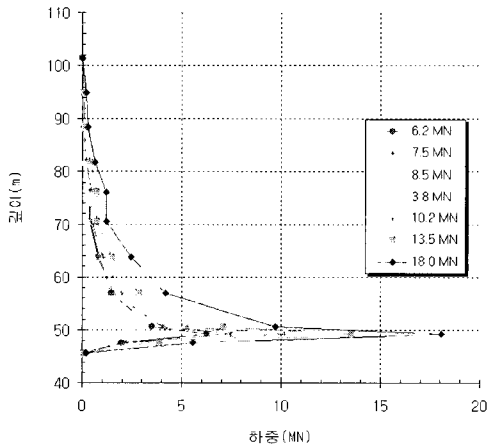
(2) 재하장치가 중간에 설치된 경우

재하장치가 중간에 설치된 경우의 축하중 분포도를 작성하는 순서는 다음과 같다.

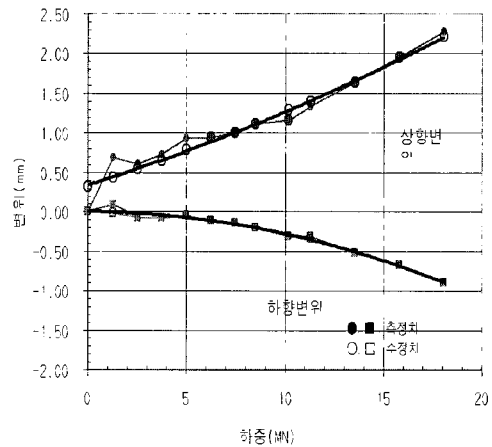
- ① 재하장치의 상부와 하부에 설치된 말뚝 축하중 계측용 센서의 값을 재하단계별로 측정한다.
- ② 측정된 센서의 값을 이용하여 임의의 재하단계에서 말뚝주면마찰력을 계산하고 깊이에 따른 분포도를 작성한다(그림 9(a)). 이때 유압잭 높이에 해당하는 주면마찰력은 고려되지 않았다.
- ③ ②에서 작성된 그림 9(a)에서 임의의 하향하중 단계에서의 침하량과 동일한 상향하중에 대한 마찰력의 크기를 구하고(그림 9(b)) 이때의 하향하중에 대한 재하장치 하부의 마찰력분포와 상향하중에 대한 재하장치 상부의 마찰력 분포를 결합하고 재하장치 하부의 마찰력 분포를 방향 전환한다. 즉, 상향변위 5.2mm에 해당하는 상향 마찰력 5.3MN 일 때의 마

찰력 분포도와 하향변위 5.2mm에 해당하는 하향 마찰력 13.6MN 일 때의 마찰력 분포도를 상향 마찰력 5.3MN을 기준으로 방향 전환하여 결합하면 총마찰력 분포도를 구할 수 있다(그림 9(c)).

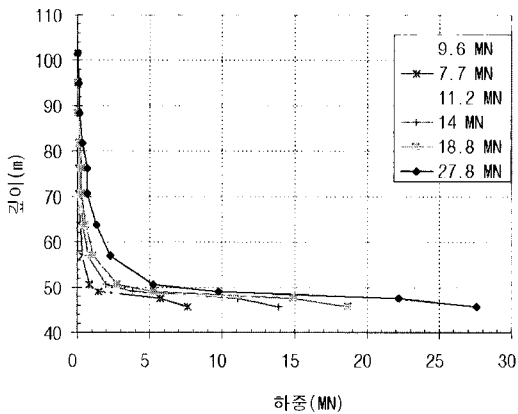
- ④ 축하중 분포도의 작성 시 ③에서 구한 총마찰력 분포를 방향 전환하고 ②에서의 말뚝선단부의 선단지지력 성분을 더하여 임의의 하중단계의 축하중 분포도를 작성할 수 있다. 본 사례의 경우, 선단부 센서의 고장으로 인하여 선단지지력이 측정되지 않았으므로 선단지지력은 나타낼 수 없었다.
- ⑤ 대표적인 하중단계에 대하여 ②~④의 과정을 반복하여 축하중 분포도를 완성한다(그림 9(d)). 여기서, 사용 가능한 최대 하중범위는 상/하부 변위 중 작은 변위에 해당하는 상부하중과 하부하중의 합계이며, 이들은 모두 실측치에 의한 것들이다.



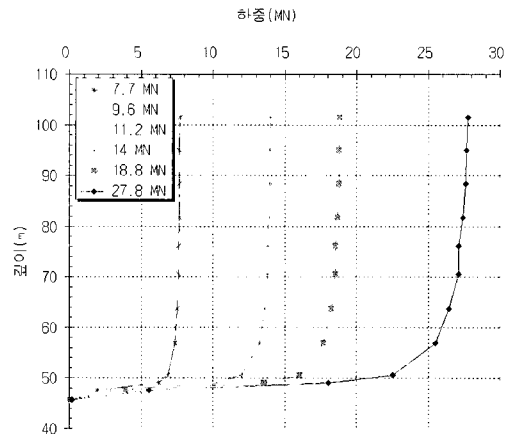
(a) 측정된 주면마찰력



(b) 상향/하향 변위 - 1방향 재하하중



(c) 마찰력 분포도



(d) 축하중 분포도

그림 9. 축하중분포도 작도방법 예(재하장치가 중간에 있는 경우)

3.5 안전율

개발된 고유압 잭은 소요의 안전율(S.F. = 3.0)을 충분히 만족하도록 설계 및 제작되었다. 고압을 견딜 수 있도록 재료가 선정되었고 실린더의 벽두께도 충분하게 확보되었다.

4. 양방향 복동식 고유압 말뚝재하시험(BDH PLT) 현장 적용성 확보

4.1 개요

본 재하시험은 00대교 건설공사 육상부 PJ4-18에서 실시되었으며, 현장타설말뚝의 선단지지력 및 주변마찰력을 측정하고 하중전이 특성을 확인하여 거동을 분석함으로써 양방향 고유압 말뚝재하시험의 적용성을 확인하였다.

시험말뚝의 제원, 설계하중, 시험계획하중 그리고 최대시험하중은 표 5와 같다.

설계시 지반조사결과(부산광역시, 2001)에 의하면 지

표 5. 시험말뚝의 제원

시험말뚝명	PJ4-18
말뚝 형식	대구경 현장타설말뚝
직경(mm)	2,000
길이(m)	약 60
설계하중(MN)	8.4(평상시 교축직각 방향)
시험계획하중(MN)	1방향 재하하중 고유압 잭 용량 39.4, 양방향 최대 합계 재하하중 58.8
최대시험하중(MN)	24.8(1방향 재하 시)

층은 연약 저소성 점토(CL), 저소성 점토(CL), 입도불량 자갈(GP), 연암으로 구성되어 있었으나 말뚝의 시공시 지층의 분포는 매립층, 저소성 점토(CL), 입도불량 자갈(GP), 연암으로 분포함을 확인하였다. 시험말뚝 시공시 확인된 지층분포(PJ4-18)가 설계시 지반조사자료(BH-11)와 다소의 차이가 있었으므로 본 연구에서는 시공시의 지층구분도를 참고하였다(그림 10 참조).

본 연구에서는 한 깊이에 철근용 센서와 콘크리트용 센서를 90°방향으로 4개를 각각 설치하였다. 설치위치는 그림 10에 나타내었다.

4.2 시험수행

말뚝재하시험은 축하중계측용센서 제작 및 설치, 재

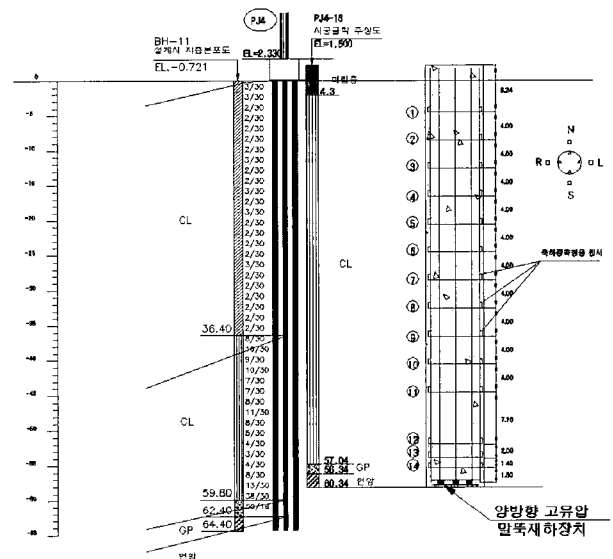


그림 10. 지층개요 및 계측센서 설치위치도

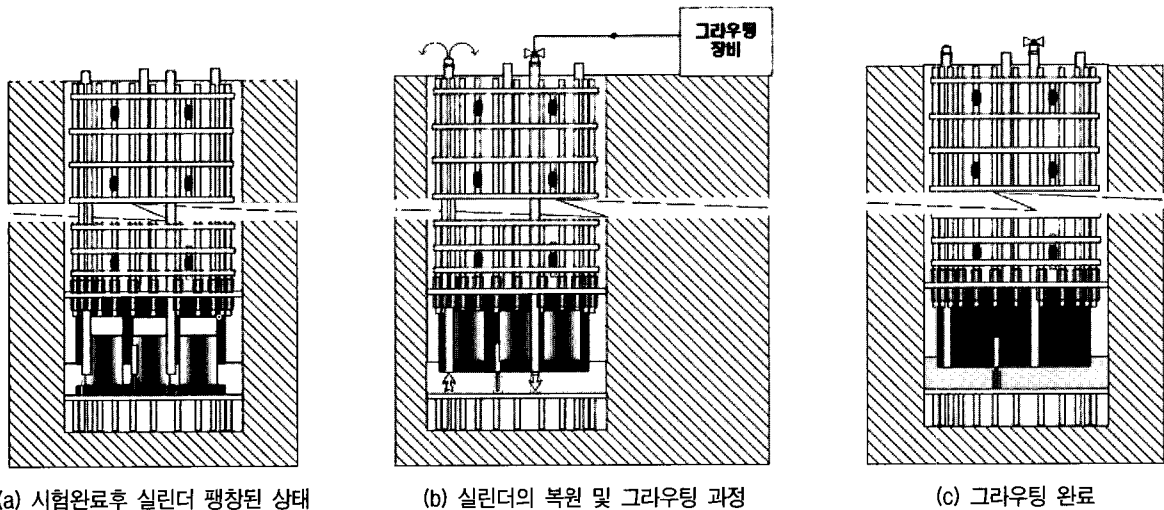


그림 11. 시험완료 후 실린더하부의 그라우팅 과정

하장치의 제작, 재하장치와 철근망의 조립, 시험말뚝시공(굴착공 형성, 굴착공내 재하장치와 철근망의 삽입, 콘크리트의 타설), 시험말뚝의 양생, 하중재하, 그라우팅의 과정으로 진행되었다. 상세한 시험절차는 참고문헌(경성대학교 지반공학연구소, 2005)를 참고할 수 있을 것이다. 하중재하는 ASTM D1143-81(1994)에 규정되어 있는 완속재하방식과 주기재하방식에 의하여 이루어졌으며, 하중, 침하량, 말뚝부재의 변형률 등은 자동화 계측 시스템에 의해 측정되었다.

그림 11에는 시험완료 후 실린더 하부의 복귀모습과 그라우팅을 하는 과정이다.

4.3 시험 결과 및 분석

(1) 등가 하중 - 침하량 곡선

그림 12은 각 주기에서의 최대하중과 변위의 관계를 도시한 것으로 상판변위가 하판변위보다 상대적으로 더 많이 발생하였다. 즉, 상향으로 파괴가 유발되었는데, 이것으로부터 주면마찰력에서 극한상태가 유발되었음을 알 수 있다. 그러나 선단부에서는 2.0mm의 변위가 발생하였고 선단하중-변위관계가 탄성적인 거동 범위 내에 있음을 알 수 있다. 본 시험에서는 1방향 시험최대 하중인 24.8MN에서 하판변위는 2.0mm, 상판변위는 23.5mm가 발생하였다.

양방향 말뚝재하시험에서 측정한 두 개의 하중 - 변위 곡선(그림 12 참조)으로부터 등가 하중 - 침하량 곡선을 작도하여 그림 13에 나타내었다.

상/하향의 실측자료만을 이용하여 작성된 등가하중 - 침하량 관계를 그림 13에서 실선으로 나타내었다. 그리

고 본 시험의 결과에서는 선단지지력이 항복을 나타내지 않았으며 변위 또한 약 2mm 정도로 매우 작게 나타났으므로 상향 최대변위인 23.5mm까지의 결과를 활용할 수 있도록 하향하중 - 하향변위의 관계를 외삽하여 그 결과를 그림 13에 점선으로 나타내었다. 즉, 첫 번째 안전측으로 지지력을 판단하고자 최대재하하중에서 선단지반이 파괴되었다고 가정(가정 a)할 수 있었고, 두 번째 하중 - 변위 관계 양상을 반영하여 추세선(가정 b)을 가정할 수 있었다. 그러나, 이와 같이 외삽하여 추정된 등가하중-침하량 곡선은 실험결과에 의해 작도된 것이 아니므로 극히 제한적인 경우 이외에는 사용하지 않는 것이 좋다.

(2) 축하중 분포 특성

양방향 말뚝재하시험은 선단하중과 주면마찰력이 상호간 반력에 의해 실시되는 시스템이므로 주면마찰력의 총계만을 측정할 수 있으며 축하중 전이측정실험을 수행하면 상향마찰력의 분포도를 활용하여 깊이별 주면마찰력의 분포도를 작도할 수 있는데 각 하중 단계별로 도시하면 그림 14와 같다.

양방향 말뚝재하시험 결과(그림 12)와 하중전이측정 결과(그림 14)를 이용하여 축하중 분포도를 작도할 수 있는데 그 절차는 다음과 같다. 예를 들어, 하향 최대재하하중인 24.8MN을 발생시키는 하향변위 2.0mm와 동일한 상향변위 2.0mm에서 발휘되는 마찰력 분포도를 합치면 축하중 분포도가 된다. 작도된 축하중 분포도를 그림 15에 도시하였다.

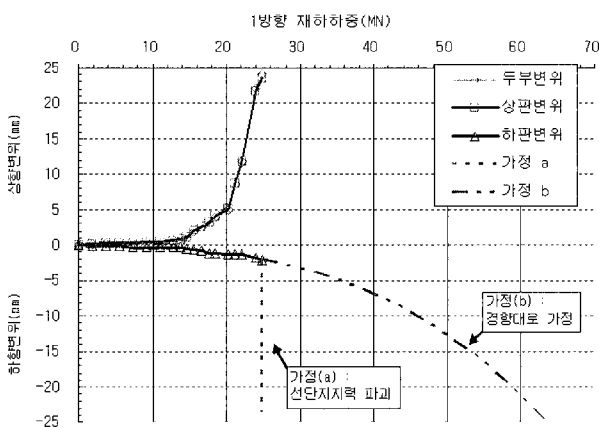


그림 12. 하중-변위 곡선

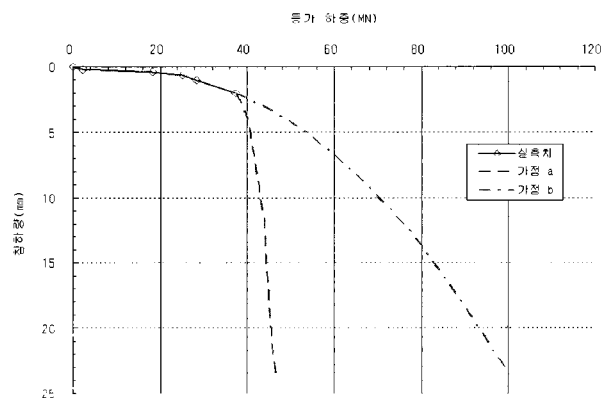
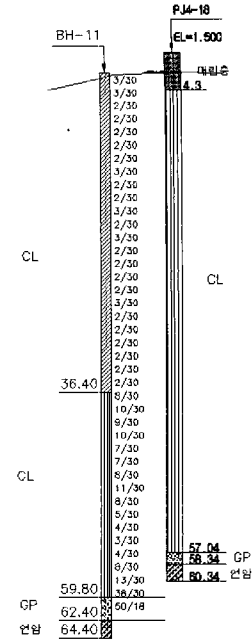
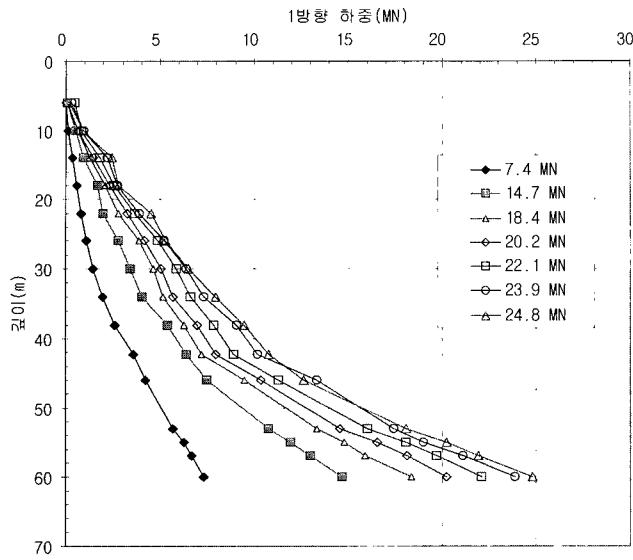
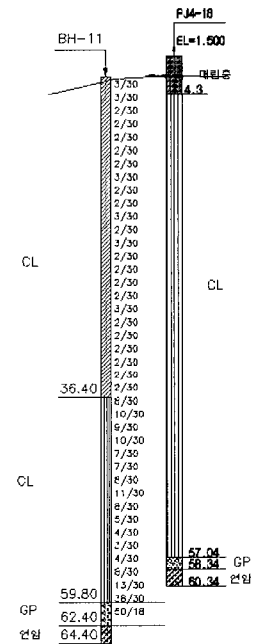
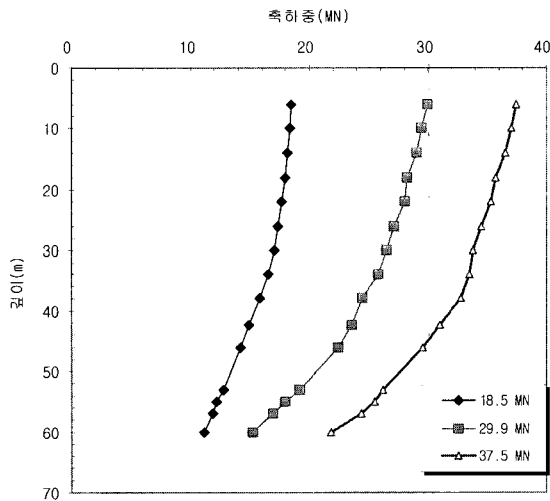


그림 13. 등가 하중 - 침하량 곡선



(*) BH-11 : 설계시 지반조사, (**) PJ4-18 : 시공시 지층분포

그림 14. 하중단계별 마찰력 분포도



(*) BH-11 : 설계시 지반조사, (**) PJ4-18 : 시공시 지층분포

그림 15. 축하중 분포도

5. 양방향 말뚝재하시험의 향후 발전 방향

5.1 양방향 단동식 스프링 복원형 고유압 말뚝재하시험의 개발

양방향 재하시험은 단동식 저압 셀/저유압잭에서 출발하였는데 단동식의 경우 장치 내부의 빈 공간을 발생

시키게 되었다(그림 16 참조). 그러나, 양방향 O-cell 시험에서는 장치 내부 공간을 그라우팅으로 충전시킬 수 있다고 하지만 이 경우에도 시료를 채취하여 강도시험이나 육안관찰을 수행한 사례를 찾아볼 수 없었다. 그리고 저유압잭 시험에서는 장치 내부 그라우팅이 곤란하여 시험말뚝에는 사용할 수 있으나 사용말뚝에서는 장기적인 안정성에서 적용성이 문제가 될 수도 있다. 또한

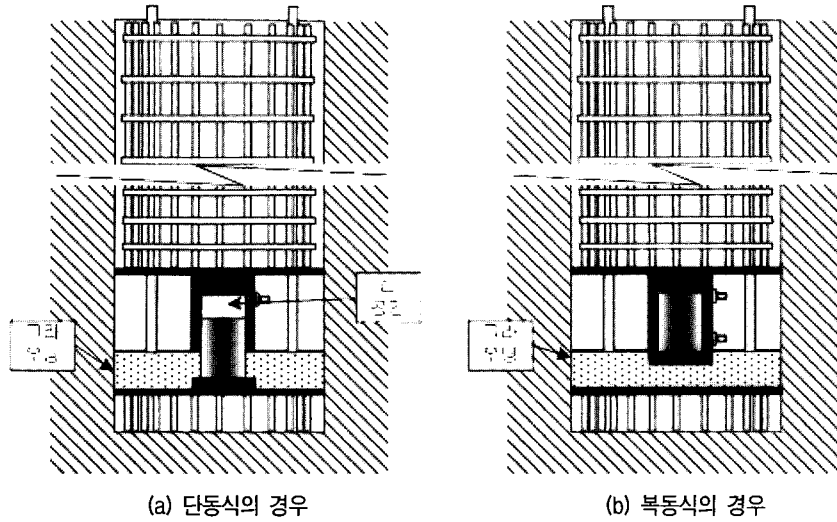


그림 16. 재하시험 종료 후의 모습

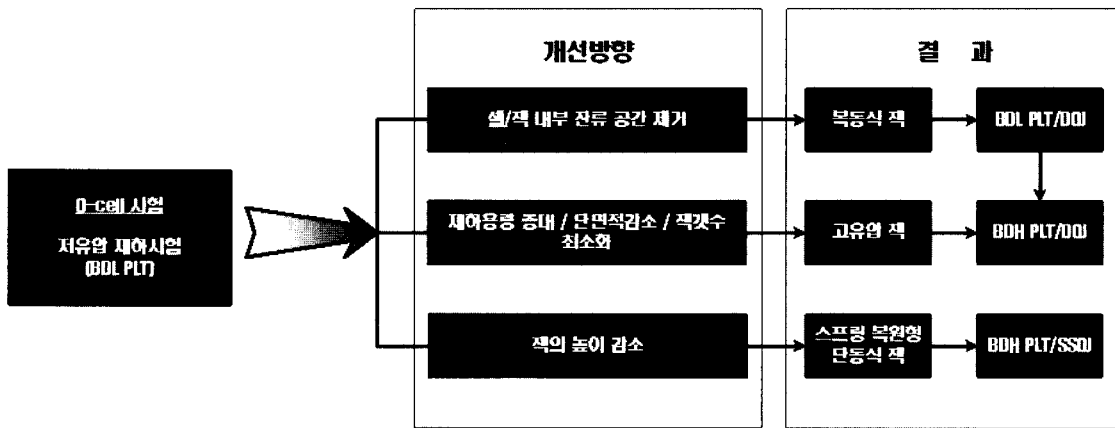


그림 17. 양방향 말뚝재하시험(BD PLT)의 개선방향

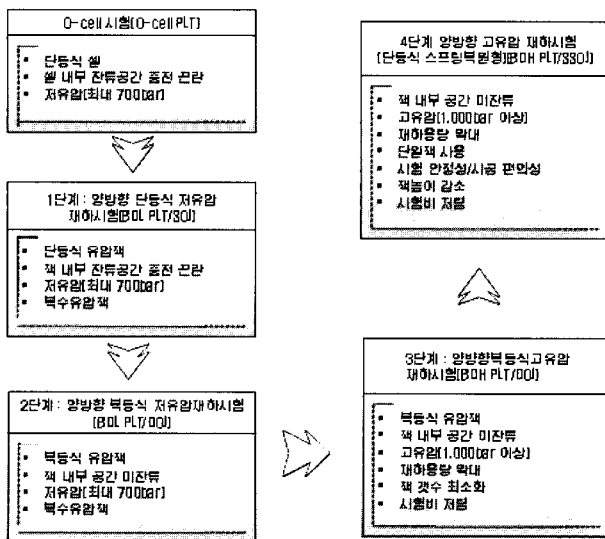


그림 18. 양방향 말뚝재하시험(BD PLT)의 발전단계

대용량 재하가 필요한 경우에는 저압방식으로 셀(또는 책)의 배치가 곤란한 상황이 발생할 수도 있다.

양방향 유압 재하시험은 단동식 저유압방식(O'Cell, BDL w/SOJ) ; 1단계), 복동식 저유압방식(BDL w/DOJ ; 2단계), 복동식 고유압방식(BDH w/DOJ ; 3단계)로 발전해 왔으며, 향후 단동식 스프링복원방식(BDH w/SSOJ)이 개발될 예정이다. 양방향 재하시험의 개선방향 및 발전 단계를 각각 그림 17과 18에 나타내었다.

5.2 양방향 말뚝재하시험 규정의 제정

한국지반공학회 기초기술위원회에서는 말뚝재하시험 규정 제정을 위한 소위원회를 운영 중에 있다. 여기서는 우리나라에서 흔하게 사용하고 있는 시험방법인 정재하시험, PDA 뿐만 아니라 양방향 말뚝재하시험에 관한 규정의 제정 과업을 수행하고 있으며 향후 한국지반공학회의 규정으로 제정하여 2007년 7월경 학회기준으로 공표할 예정이다.

양방향 말뚝재하시험 규정과 관련하여 다음과 같은 주요한 내용이 포함될 것이다.

① 재하용량에 관한 정의 및 기준

양방향 말뚝재하시험의 재하용량은 책 용량 즉, 1방향 재하용량으로 정의 하여야 한다. 즉, 책(또는 셀) 용량이 설계하중의 2배 이상이어야 하며, 양방향 합계하중이 설계하중의 2배 이상이 되어야 한다고 하는 기존의 잘못된 오류를 탈피하여야 할 것이다. 실험에서 구한 최대등가하중(즉 실험최대등가하중)이 설계하중의 2배 이상이 되어야 하므로 1방향 재하용량이 설계하중의 2배 이상이 되도록 하여야 한다.

즉, 상향 변위와 하향 변위가 상대적으로 크게 차이가 날 경우에도 1방향 재하용량 만큼의 등가하중을 발생시킬 수 있고 따라서 설계하중을 확인할 수 있게 된다. 만약 상향 변위와 하향 변위가 아주 비슷한 크기로 발생한다면 1방향 재하하중의 2배의 등가하중을 발생시킬 수도 있다. 따라서 양방향 재하시험의 실험등가하중은 상/하향 변위의 상대적인 크기에 따라 1방향 재하하중의 1~2배까지 발생시킬 수 있다.

② 복동식 유압잭의 사용

양방향 말뚝재하시험에서 단동식 재하장치를 사용하면 재하시험 종료 후 재하장치 내부에 빈 공간을 잔류시키게 되는데, 이 잔류공간은 일반적인 방법으로 충전시키는 것이 곤란할 수 있다.

그러나 복동식 재하장치를 사용하면 시험 종료 후 감압용 압력주입구를 통하여 저유압을 작용시키면 피스톤이 원래의 위치로 회복되어 빈 공간이 제거되어진다. 따라서 기존 단동식 시험방식에서 원천적인 문제점으로 지적되어온 애로사항인 장치내부 공간잔류 문제는 복동식 재하장치의 사용으로 완전 해결되었다.

③ 재하장치의 안전율

양방향 말뚝재하시험장치에서 가장 중요한 부분이 셀 또는 유압잭인데, 이 가력장치는 소요의 안전율(통상 3.0)을 만족시켜야 한다. 또한 셀 또는 잭의 강재재질특성 및 사용압력의 크기를 고려한 안전율 검토결과를 반드시 제출하여야 한다.

④ 재하시험 후 그라우팅

재하시험 후 말뚝내부에 발생된 빈 공간은 고강도 마이크로 시멘트의 고압주입에 의한 그라우팅으로 충전하여야 한다. 그러나, O-cell 시험과 BDL PLT에서는 재하장치 내부에 발생된 공간까지 그라우팅으로 충전시켜야 한다.

⑤ 재하방법

O-cell 시험에서는 급속재하방법을 제안하고 있다. 국내 양방향 말뚝재하시험 기준 제정 시 ASTM D1143-81의 표준재하방법과 주기재하방법을 병행하여 사용하도록 할 예정이다.

6. 결론 및 제언

- (1) 양방향 재하시험은 4단계로 발전을 이루어 왔는데, 즉 단동식 저유압방식(1단계), 복동식 저유압방식(2단계), 복동식 고유압방식(3단계)이 개발되었으며, 향후 단동식 스프링 복원 방식이 개발될 예정이다.
- (2) 단동식 재하장치는 재하시험 종료 후 재하장치 내부에 빈 공간을 발생시키게 되는데, 이와 같은 결점은 복동식 재하장치의 개발과 함께 완전하게 해결하였다. 단동식 유압재하장치를 사용말뚝에 적용시키는 것은 곤란할 것으로 판단되었다.
- (3) 고유압 재하방식은 잭의 개수를 줄여줌으로써 시험비용을 저렴하게 할 수 있다. 또한, 잭의 면적을 확대하여 제작한다면 더욱 경제성을 제고할 수 있을 것이다.
- (4) 양방향 고유압 재하시험 결과를 활용하여 말뚝머리 등가하중-침하량의 관계 및 축하중 분포도를 작성하였으며 여기서, 실무적으로 설계하중 및 하중지지 거동을 확인함으로써 양방향 고유압 재하시험의 현장적용성을 검증하였다.

참 고 문 헌

1. 전준수 (1996), "Osterberg - cell을 사용한 말뚝 재하시험", *대한토목학회지*, 제44권, 제1호, pp. 72-80.
2. 경성대학교 지반공학연구소 (2005), "가덕대교 건설공사 육상부 현장타설말뚝(PJ4-18, $\Phi = 2000\text{mm}$)의 양방향 고유압 말뚝재하시험 및 하중전이특정 연구용역 보고서", 2005. 6.
3. 부산광역시 (2001), "가덕도-녹산간 도로(가덕대교) 기본 및 실시 설계용역 지반조사보고서", 2001. 4.
4. 정창규 (2004), "선단유압재하시험법의 현장적용성에 관한 연구", 경성대학교 공학박사 학위논문, 2004. 2.
5. ASTM D1143-81 (Reapproved by 1994) (1994), "Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load".
6. Osterberg, J. O. (2001), "Load testing high capacity piles what have we Learned?", Published in the Proceedings of the International Conference on Deep Foundation Practice, Singapore, April 2001.
7. Schmertmann, J. H. and Hayes, J. A. (1997), "The Osterberg Cell and Bored Pile Testing - A Symbiosis", Proceedings: 3rd International Geotechnical Engineering Conference, Cairo University, Cairo, Egypt. January, 1997.

(접수일자 2006. 8. 28, 심사완료일 2007. 6. 5)