양방향말뚝재하시험의 재하용량 기준에 관한 연구

A Study on the Loading Capacity Standard of Bi-directional Pile Load Test (BD PLT)

최용규*

Choi, Yongkyu

Abstract

In the bi-directional pile load test (BD PLT) for pile load tests of Mega pile foundations, loading capacity standard is not specified exactly. Therefore there are so many confusions in performing the BD PLT and variations up to maximum 2 times in loading capacity are come out. In this study, standards of bi-directional pile load test (BD PLT) were considered. Based on cases of the bi-directional pile load test performed in domestic areas, maximum equivalent test load, test load increasing ratio, loading capacity increasing ratio and sufficiency ratio of design load were analyzed. It could be known that the loading capacity standard of bi-directional pile load test must be defined as 1-directional loading capacity and also must be established as more than 2 times of design load.

Keywords: bi-directional pile load test (BD PLT), loading capacity standard, 1-directional test load, maximum equivalent test load, test load increasing ratio, loading capacity increasing ratio, sufficiency ratio of design load

요 지

대형말뚝기초의 양방향 재하시험에서 재하용량 기준이 정확하게 규정되어 있지 않다. 그래서 양방향말뚝재하시험을 수행함에 있어 많은 혼란이 발생하고 있으며 재하용량에서 최대 2배까지의 차이가 나타나고 있다. 본 연구에서는 양방향 말뚝재하시험 기준들을 고찰하였으며, 국내에서 수행된 양방향 말뚝재하시험 사례들에 기초하여 최대등가시험하중, 재하하중 증가비, 재하용량 증가비 및 설계하중 충족비를 분석하였다. 양방향 말뚝재하시험 기준은 1방향 재하용량으로 정의되어야 하며, 1방향 재하용량은 설계하중의 2배 이상 이어야 한다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 앙방향말뚝재하시험, 재하용량기준, 1방향재하용량, 최대등가시험하중, 재하하중 증가비, 재하용량 증가비, 설계 하중 충족비

1. 서 론

일반적으로 기초말뚝의 허용지지력을 산정함에 있어 가장 신뢰성 있는 방법으로 정재하시험법을 이용한 지지력 결정 방법(한국지반공학회, 2003)을 들 수 있다. 그러나 정재하시 험법은 재하용량의 한계와 현장 시공여건의 제한성으로 인 하여 대형말뚝기초(대구경 현장타설말뚝 및 대단면바렛트말 뚝)에는 적용이 곤란한 경우가 흔하게 나타나고 있다. 따라 서 대형말뚝기초의 경우 대체 시험법이 필요하게 되었다. 또 한, 고하중의 현장타설말뚝의 설계 및 시공이 급격하게 증가 하는 상황에서 양방향 말뚝재하시험은 대형기초의 지지력을 확인할 수 있는 가장 실용적인 방법으로 사용할 수 있다. 건축기초구조설계기준(대한건축학회, 2005)에서는 건축구조 물의 기초에 대한 재하시험방법으로 선단재하시험법을 추천 하고 있는데 이 시험법의 일반적인 용어는 양방향 말뚝재하 시험(BD PLT; Bi-Directional Pile Load Test)이라고 할 수 있다.

양방향말뚝재하시험방법은 일본((社)日本地盤工學會, 2002) 및 한국(KGS TCF S 2-2007 & ATC18 S-2007, 2007a) 에서만 제정되어 있다. 여기에서도 재하용량의 기준에 관하 여 명확하게 규정하고 있지 않은 실정이다. 더욱이 양방향 말뚝재하시험을 최초로 개발하여 가장 많은 실적을 보유하 고 있는 OO사에서도 재하용량을 충분하지 않게 설정하여 시험을 수행하고 있으며 이로 인하여 최대등가시험하중으로 는 설계하중조차 확인하지 못하는 사례가 빈번하게 나타나 고 있다.

따라서 본 연구는 국내에서 수행된 양방향 말뚝재하시험 사례들을 분석하여 재하용량 기준을 설정하는 것을 목적으 로 한다.

^{*}정회원·교신저자·경성대학교 건설·환경공학부 교수 (E-mail: ykchoi@ksu.ac.kr)

2. 양방향 말뚝재하시험 방법 고찰

2.1 양방향말뚝재하시험방법 고찰

양방향말뚝재하시험에 관하여 규정하고 있는 국내 기준서들, 즉, 건축기초구조 설계기준(대한건축학회, 2005) 및 양방향말뚝재하시험기준(KGS TCF S 2-2007 & ATC18 S-2007)(한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 대형기초위원회, 2007a)에 설명되어 있는 주요한 개념을 표 1에 요약하였다. 또한 JGS1812(한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 대형기초위원회, 2007b)에 규정된 주요개념도 같이 요약하였다.

JGS1812((社)日本地盤工學會, 2002)에서는 양방향말뚝재하시험의 목적을 말뚝의 선단지지력 특성 또는 주면지지력 특성, 혹은 양자에 관한 자료를 얻는 것 그리고 말뚝의 설계 연직지지력의 타당성 확인으로 정하고 있으며 계획최대하중은 시험목적에 따라 다르게 설정하였다.

2.2 재하시험 용량에 관한 고찰

JGS1812에서는 계획최대하중으로 설명하고 있다. 시험의 목적이 선단지지력이나 주면마찰지지력의 평가에 있는 경우 계획최대하중은 각 성분의 극한지지력 이상이어야 하고 반 력의 상한치는 계획최대하중이어야 한다. 설계지지력의 확인 시험의 경우 계획최대하중은 설계하중에 안전계수를 고려한 값의 1/2 이상으로 정하고 있다. 여기서 계획최대하중은 양 방향 합계최대하중을 의미하며 이는 Load Test사의 최대등 가하중과 동일한 의미이다.

기준화 되어 있지는 않지만 양방향말뚝재하시험을 국제적으로 보급하는데 큰 기여를 한 Load Test사에서는 재하용량을 최대등가하중(maximum Equivalent load)으로 나타내고있으며 최대등가하중이 설계하중의 2~3배가 되도록 정하고있다. 여기서, 등가최대하중은 양방향합계최대재하기능하중과같은 의미이므로 1방향 하중이 설계하중과 같은 정도의 하중 수준이라고 할 수 있다.

국내 재하시험 기준의 경우 재하용량은 1방향 재하하중 즉, 유압잭의 용량으로 정의하며, 이 용량이 계획최대하중 이상이어야 한다. 따라서 상·하 방향으로 작용할 수 있는 합계하중을 재하용량으로 하지 않도록 정하였다. 재하용량은 반드시 1방향 재하하중이 계획최대하중이상이어야 한다.

1방향 재하하중-상/하향 변위 측정 자료를 활용하여 결과

를 정리할 때, 동일한 상향 및 하향변위에 해당하는 1방향하중들을 합하여 말뚝머리 등가하중으로 환산을 하게 된다. 따라서 상향 또는 하향변위가 상대적으로 큰 차이가 날 경우에는 변위가 작게 유발된 쪽의 하중만 사용하여야 할 상황이 발생할 수 있다. 이런 경우에는 1방향하중 밖에 사용할 수 없으며, 심지어는 (1방향하중-말뚝자중)만큼 사용해야하는 상황도 발생할 수 있다.

이런 이유에서 상·하 방향으로 작용하는 합계하중을 재하용량으로 설정할 경우에는 설계하중마저도 확인하지 못하는 상황도 발생할 수 있으므로 유의하여야 한다. 계획최대하중을 안전 측으로 만족시키기 위한 방법으로 1방향 재하하중(즉, 유압잭용량)이 계획최대하중 이상이 되도록 하여야한다.

2.3 용어 정의

재하용량 설정과 관련된 주요한 용어를 설명하면 다음과 같다.

- 재하용량 : 1방향 최대 재하하중. 따라서 양방향 합계하중 으로 정의하지 않아야 함
- 기준변위 : 1방향 최대 재하하중에서 유발된 상향 또는 하 향변위 중에서 최소변위로 정의함(그림 1(a) 참조)
- 최대등가시험하중 : 기준변위에서 산정된 상향 및 하향으로 작용된 하중의 최대합계하중(즉 최대등가하중), 즉 시험결 과만으로 결정할 수 있는 최대 등가하중(그림 1(b) 참조)
- 최대등가외삽하중 : 1방향 최대 재하하중에서 유발된 최대 변위 시까지 상향 또는 하향하중을 외삽하여 가정된 최대 등가하중(그림 1.1(b) 참조). 시험하중 이후의 외삽된 등가 하중은 시험치가 아니므로 사용상 주의를 요함. 외삽에서 는 2가지 가정을 사용하는데 첫 번째 가정은 기준변위에서 취성파괴가 유발된다는 것과 두 번째 가정은 기준변위까지 의 경향에 기초하여 최대 변위까지 거동한다는 가정임
- 재하하중 증가비 : 기준변위에서 작용된 1방향 재하하중과 최대등가시험하중과의 비

재하용량 기준 설정을 위하여 필요한 용어를 다음과 같이 정의하였으며 4장의 분석에서 사용되었다.

• 재하하중증가비 : 최대등가시험하중을 1방향최대재하하중으

표 1. 양방향말뚝재하시험에 관한 기준서 및 관련 내용 요약

기준서	관리 주체	년도	주요 내용
건축기초구조 설계기준	대한건축학회	2005. 7	• p 173; 말뚝의 한계지지력 평가방법으로 선단재하시험에 의한 연직지지력 평 가 방법을 제시하고 있음
양방향말뚝 재하시험 기준	한국지반공학회기초 기술위원회 & 국제지반 공학회 ATC 18	2007. 10	대하용량 안전율 잭 및 조립된 재하장치의 보정 하중재하 종료 후 그라우팅
말뚝의 선단재하 시험방법	일본지반공학회	2002.	시험의 목적 : 말뚝의 선단지지력 특성 또는 주면지지력 특성, 혹은 양자에 관한 자료를 얻는 것, 말뚝의 설계연직지지력의 타당성 확인 계획최대하중 : 목적에 따라 다르게 설정 선단지지력특성평가 : 극한선단지지력 이상의 값 주면지지력특성평가 : 압상저항(말뚝의 주면저항력과 자중)의 극한지지력 이상의 값 상의 값 설계지지력 확인 : 설계하중에 안전계수를 고려한 값에 대하여 1/2 이상의 값

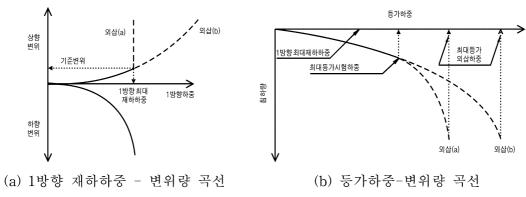


그림 1. 용어 정의

로 나눈 값

- 재하용량증가비 : 최대등가시험하중을 1방향재하용량으로 나는 값
- 설계하중충족비 : 최대등가시험하중을 설계하중으로 나눈 값

3. 사례분석을 통한 양방향말뚝재하시험의 유형 고찰

3.1 사례고찰을 통한 파괴 유형

양방향 말뚝재하시험을 다음과 같이 3종류로 구분하고 있다. 여기서 통상적으로 저압은 70MPa 이하의 압력을 사용하고 고압은 100MPa 이상의 압력을 사용하는데 150 및 200MPa이 일반적으로 사용되고 있다. 또한 단동식의 경우 재하 후 잭내부에 빈공간이 잔류하게 되어 그라우팅을 하여야 하지만 복동식의 경우 재하 후 밀려나온 피스톤을 복귀

시켜 빈공간을 잔류시키지 않는다.

- 양방향 오스터버어그셀 말뚝재하시험(BD O-cell PLT) : 수압식, 저압, 단동식
- 양방향 저유압 말뚝재하시험(BDL PLT) : 유압식 또는 수 압식, 저압, 단동식
- 양방향 고유압 말뚝재하시험(BDH PLT) : 유압식, 고압, 복동식

본 연구에서는 BD O-cell PLT의 국내외 수행 사례 28개, BDL PLT의 국내 수행 사례 20개 및 BDH PLT의 국내 수행 사례 32개 등 총 80개의 사례를 분석하였다. 여기서 재하시험에서 나타난 파괴유형을 분석하여 그림 2 및 표 2에 나타내었다.

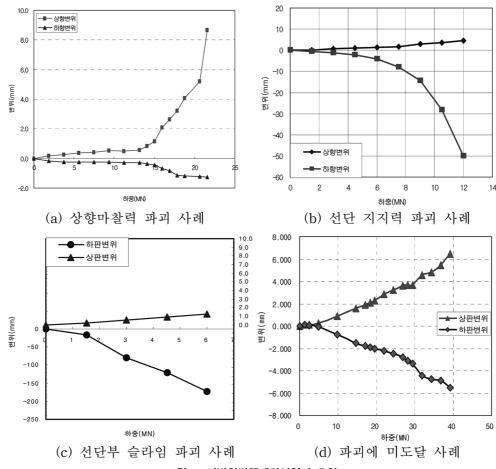


그림 2. 양방향말뚝재하시험의 유형

표 2. 양방향 말뚝재하시험의 유형 분석

ılλ	시험종류		상향파괴 (개)	<u> </u>	미파괴	
^1 원				선단지반 파괴	슬라임부 파괴 ¹⁾	(개)
BD O-cell	국외	7	-	4	1	2
PLT	국내	21	2	6	6	7
BDL PLT	국외	1	-	-	-	1
BDL I LI	국내	19	1	-	4	14
BDH PLT		32	5	2	5	20
소계		80	8	12	16	44

비고: 1) 선단부 지반파괴는 아니므로 파괴사례의 집계에서는 제외하여야 함

최대하중까지 재하 하더라도 파괴를 확인할 수 없는 경우가 다수를 차지하고 있었다. 이것으로 판단해 볼 때 현재까지 사용하고 있는 재하용량은 말뚝의 하중지지능력을 확인 하기에는 상당히 부족한 수준인 것으로 생각되었다. 따라서 말뚝의 지지능력을 충분히 활용하기 위하여 재하용량을 더 상향시킬 필요성이 있는 것으로 판단되었다.

양방향 말뚝재하시험에서는 상향의 마찰 반력과 하향의 반력(마찰력 + 선단력)이 평형이 되고 상향과 하향의 변위가 동일하게 발생할 수 있도록 계획하지만 지반의 불확실성, 시험말뚝의 시공 시 품질확보의 어려움 등으로 인하여 반력의 평형과 상하향으로 동등한 변위의 유발이라는 2가지 조건을 동시에 만족시키는 것은 너무나 어려운 것이 사실이다. 최대재하용량까지 재하 하였으나 상향변위와 하향변위가 상대적으로 크게 차이가 날 경우에는 최대등가시험하중까지 재하하더라도 설계하중을 확인하지 못하는 상황이 흔하게 발생할 수 있으며 이에 대한 대책으로는 계획최대하중을 상향시키는 방안을 들 수 있다.

그러나 선단부에 굴착슬라임이 잔류하여 선단변위가 과도하게 발생하는 경우에는 계획최대하증까지 재하하지 못하고 그 이전 하중에서 파괴가 유발되는 상황이 발생할 수 있는데 이 경우에도 설계하중을 확인하는 것이 곤란할 수 있다. 선단부에 슬라임이 잔류되는 사례는 시공불량으로 보아야 한다. 이 경우에는 어떠한 방법으로 시험하더라도 1방향최대 재하용량에 훨씬 미달되는 수준에서 재하를 종료할 수 밖에 없다(그림 2(c) 참조). 그러므로 최대재하용량까지 재하하지 못하고 시험이 종료되는 것은 실패한 시험으로 볼 수 없으며 파괴 이후의 잉여재하용량은 낭비요인이라고 볼 수는 없다.

하중재하 도중 파괴가 유발된 사례는 36개인 데 이 중 상향의 주면마찰력 파괴는 8개 뿐이며 대부분은 하향의 파 괴가 유발되는 것을 알 수 있었다. 여기서 하향의 파괴는 선단지반의 지지력 부족으로 인한 선단지반 파괴는 12개이 었으며 굴착슬라임의 잔류로 인한 파괴 사례가 16개인 것으 로 분석되었다. 따라서 시험용 말뚝의 시공 시 선단부에 잔 류하기 쉬운 굴착슬라임을 제대로 제거하는 것이 양방향 말 뚝재하시험의 승패를 좌우하는 중요한 요인이 될 수 있을 것으로 생각되었다.

굴착슬라임 잔류로 인하여 하향의 파괴가 유발되는 경우 시험말뚝의 시공 불완전성으로 인한 것이 대부분이므로 굴 착슬라임만 제대로 배제시킨다면 설정된 재하용량에 근접하 역 시험할 수 있을 것으로 생각되었다. 따라서 대형말뚝의 지지능력을 충분하게 확인하기 위해서는 재하용량을 증가시 키는 것이 무엇보다 중요한 사항임을 알 수 있었다.

상향의 파괴가 유발된 경우는 재하장치의 설치위치 예측이 잘못되어 발생할 수 있으며 파괴이후의 잉여재하용량은 낭비요인이 될 수도 있다. 그러나 반력이나 변위 2가지를 모두 정확하게 예측하는 것은 극히 어려운 문제일 수 있다. 이 경우에는 부족한 반력을 말뚝 두부에서 제공하는 방식(즉보조반력 병용 방식((社)日本地盤工學會, 2002))을 사용하면 계획한 재하용량까지 재하를 실시할 수 있다.

3.2 재하하중증가비가 최소인 사례 분석

그림 3에는 재하하중증가비가 최소인 사례의 재하시험 결과를 도시하였는데 이런 경우에는 최대등가시험하중으로 설계하중을 확인하는 것은 불가능하게 되고 최대등가시험하중이 설계하중에 미달되는 상황도 발생하게 된다. 이 사례도 선단부 지반의 파괴로 인하여 시험이 종료된 것이 아니라 선단부에 굴착슬라임이 잔류하여 선단부 콘크리트의 건전성결여되어 발생된 변위증가로 인하여 시험이 종료된 것이었다. 따라서 시험말뚝이 건전하게 시공되었다면 설정한 재하용량까지는 재하할 수 있었을 것으로 예상되었다.

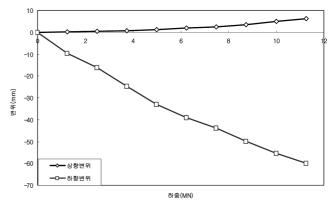


그림 3. 재하하중증가비가 최소(1.02)인 사례

3.3 재하하중증가비가 최대인 사례 분석

그림 4에는 재하하중증가비가 최대인 사례의 재하시험 결과를 도시하였다. 이 시험에서는 상향과 하향의 변위가 거의 동일하게 발생하였다.

양방향 말뚝재하시험에서 사용할 수 있는 등가하중은 재하 하중의 최소 1.0배에서 최대 2.0배까지 사용할 수 있다. 따 라서 등가하중을 1방향재하하중의 2배로 정의하는 것은 곤란하다.

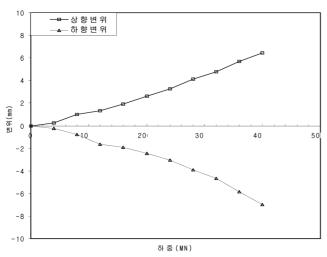


그림 4. 재하하중증가비가 최대(2.00)인 사례

4. 재하용량 기준 설정을 위한 사례 분석

4.1 사례 요약

분석에 사용한 양방향 말뚝재하시험 사례들을 표 3에 요 약하였다. 표 3의 사례들은 대부분 국내에서 수행된 시험들이며 BD O-cell PLT의 경우 국외에서 수행된 사례(7개)도일부 포함하고 있다. 모든 시험사례들에서 설계하중 및 정격재하용량을 보고된 자료에서 구하고자 노력하였으나 설계를위한 시험말뚝의 경우 또는 문헌자료를 구할 수 없는 경우에는 설계하중을 알아낼 수가 없었으며 BD O-cell PLT의경우 정격재하용량을 제대로 파악하는 것은 곤란하였다. 설계하중의 확인이 불가능한 사례들은 최대등가시험하중, 재하하중 증가비, 재하용량증가비 분석에만 사용하였으며, 설계하중이 확인된 사례들은 최대등가시험하중, 재하하중 증가비, 재하용량 증가비 뿐만 아니라 설계하중 충족비 분석에도 사용하였다. 또한 정격재하용량을 알 수 없는 경우에는 재하용량 증가비 분석은 할 수 없었다.

또한, 분석에서 사용하는 용어들('경우 A', '경우 B', '경우 C' 및 '실험값')은 다음과 같은 의미를 가진다. 예를 들면 '경우 A는 재하용량(=1방향최대재하하중) = 설계하중 ×2.0'로 간주하면 된다.

- 경우 A : 재하용량(1방향재하하중) = 설계하중 * 2.0
- 경우 B : 재하용량(1방향재하하중) = 설계하중 * 1.5
- 경우 C: 재하용량(1방향재하하중) = 설계하중 * 1.0
- 실험값 : 실제 시험에서 재하한 1방향 최대재하하중(설정한 정격재하용량에 상관없음)

4.2 최대등가시험하중 분석

그림 5, 6, 7에는 1방향최대재하하중-최대등가시험하중의 관계를 도시하였다. 각 그림에서 점선으로 나타낸 것은 각 분석방법에서 구한 평균치를 도시하였다.

경우 A일 때 BD O-cell PLT의 경우 1방향 최대재하하 중의 평균 1.32배, BDL PLT의 경우 1방향 최대재하하중의 평균 1.56배, BDH PLT의 경우 평균 1.59배정도 되는 것을 알 수 있었다. 즉, 최대등가시험하중이 1방향최대하중의 2배만큼 유발되지 않는 것을 알 수 있었다.

경우 B와 경우 C에서는 최대등가시험하중이 잭용량(즉 1 방향 재하하중)만큼도 유발되지 않는 것을 알 수 있는 데이 재하용량으로는 설계하중을 확인하는 것은 불가능하다.

최대등가시험하중분석에서는 어떠한 경우에도 설계하중의 확인이 곤란하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 양방향말뚝재 하시험의 재하용량을 1방향 재하하중으로 정의하지 않고 양 방향합계하중으로 정의하는 것은 다소 무리가 있을 것으로 판단되었다.

그림 5의 BD O-cell PLT의 경우 1방향재하용량이 100

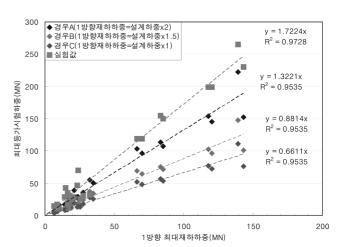


그림 5. BD O-cell PLT의 1방향 재하하중-최대등가시험하중의 관계

#	3	얀반향	막띂재하시헌	사례	은양

시험 종류		사례 수 (회)	설계하중 확인된 사례 수(회) ¹⁾	직경(mm)	년도	분석 내용
양방향 오셀 말뚝재하시험	국외	7	5	760~1,800	2003~2006	
(BD O-cell PLT)	국내	21	6	1,200~2,850	2005~2006	
양방향 저유압 말뚝재 (BDL PLT)	20	18	1,000~2,500	2002~2006		
양방향 고유압 말뚝재 (BDH PLT)	32	19	1,500~2,500	2005~2007		
합계	80	48				

비고; ①: 재하하중증가비, ②: 재하용량증가비, ③: 설계하중충족비

¹⁾ 설계자료 등을 통하여 설계하중이 확인가능한 사례만 사용하였음. 설계하중이 미확인된 사례들은 설계자료를 구할 수 없는 사례(10개)이거나 설계를 위한 시험말뚝에 대한 사례(22개)임

MN을 초과한 사례가 4개, 50~100MN인 사례가 4개 나타나 있는데 이것은 국내장대교량건설현장에서 설계목적으로 시험말뚝에 실시된 시험이었으므로 재하용량이 크게 설정되었다. 그 외 대부분의 사례는 1방향재하용량이 40MN이하인 것으로 나타났으며 이는 사용말뚝의 설계하중확인목적으로 시행된 사례들이었다.

그림 6의 BDL PLT에서는 1방향재하용량이 40~50MN인 사례가 2개이며 나머지 사례는 25MN이하이었다. BDL PLT에서는 1방향재하용량이 매우 작게 설정된 것을 알 수 있었다.

그림 7의 BDH PLT에서는 1방향재하용량이 100MN내외인 사례가 1개이며 50MN내외인 사례가 다수 나타나 있다. 이것으로 보아 BDH PLT에서는 재하용량을 다소 크게 설정하고 있는 것을 알 수 있었다.

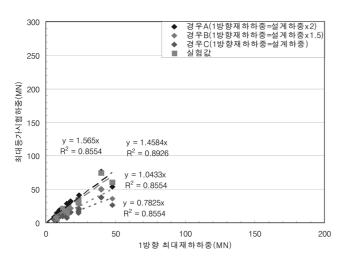


그림 6. BDL PLT의 1방향 재하하중-최대등가시험 하중의 관계

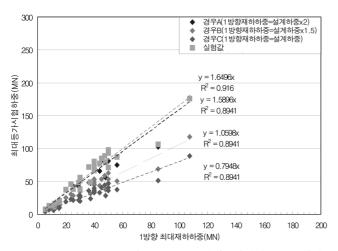


그림 7. BDH PLT의 1방향 재하하중-최대등가시험하중의 관계

4.3 재하하중 증가비 분석

그림 8, 9, 10에는 재하하중 증가비를 도시하였다. 그림 5~7에 나타낸 것과 동일한 것이지만 비교 및 분석의 편의를 위하여 말뚝 직경을 변수로 하여 도시하였다. 여기서 직경의 증가에 따라 재하하중이 반드시 증가하는 것은 아니므로 직경을 변수로 하여 도시하는 것은 의미가 크지 않으나 작도 및 분석의 편의를 위한 것으로 이해하면 될 것이다. 각 그림에서 점선으로 나타낸 것은 각 분석 방법에서 구한 값의

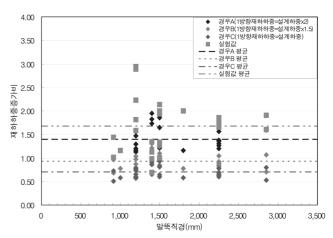


그림 8. BD O-cell PLT에서 재하하중 증가비의 분석

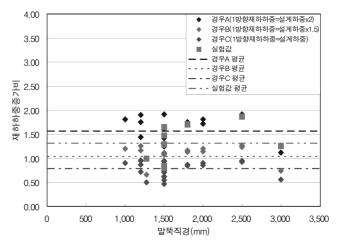


그림 9. BDL PLT에서 재하하중 증가비의 분석

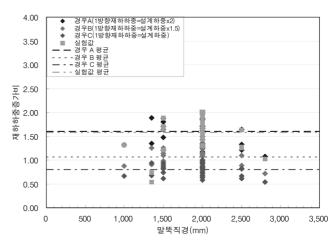


그림 10. BDH PLT에서 재하하중 증가비의 분석

평균값을 도시한 것이다.

재하하중 증가비의 값이 상당히 큰 폭으로 분산되어 나타 나고 있다. BD O-cell PLT 사례의 '경우 A', 'B', 'C'일 때 재하하중 증가비의 범위는 각각 1.02~1.95, 0.68~1.30, 0.51~0.98 정도로 나타났다. BDL PLT에서는 경우 A, B, C일 때 재하하중 증가비의 범위는 각각 0.94~1.91, 0.61 ~1.28, 0.46~0.96 정도로 나타났다. 또한 BDH PLT에서는 '경우 A', 'B', 'C'일 때 재하하중 증가비의 범위는 각각 1.07~2.00, 0.71~1.31, 0.54~0.98정도로 나타났다.

'경우 A'일 때 재하하중증가비가 BD O-cell PLT의 경우

평균 1.40, BDL PLT의 경우 평균 1.59, BDH PLT의 경우 평균 1.60 정도 되는 것을 알 수 있다. 재하하중 증가비분석에서 어떠한 경우에도 설계하중의 확인이 곤란한 것을 알 수 있었다. 앙방향말뚝재하시험에서는 산술적으로 재하하중 증가비가 2.0 이상이어야 설계하중의 확인이 가능할 수 있다. 재하하중 증가비가 2.0 이하인 경우 시험결과만으로는 설계하중을 확인하지 못하는 상태임을 알 수 있다.

설정된 재하용량으로 설계하중의 확인이 불가능한 경우에는 상향 또는 하향 변위 중 변위가 작게 발생된 쪽의 변위를 외삽법에 의하여 연장하고 이를 이용하여 등가하중-침하량 곡선을 생성시켜 설계하중의 만족여부를 검토하는 실증적이지 못한 방법을 사용할 수밖에 없다.

4.4 재하용량증가비 분석

그림 11, 12에는 재하용량 증가비를 도시하였다. 여기서 직경의 증가에 따라 재하하중이 증가하는 것은 아니므로 직경을 변수로 하여 도시하는 것은 의미가 크지 않으나 작도 및 분석의 편의를 위한 것으로 이해해야 할 것이다. 각 그림에서 점선으로 나타낸 것은 각 분석 방법에서 구한 값의 평균값을 도시한 것이다. BD O-cell PLT의 경우 설정된 재하용량을 알 수가 없어 도시하지 않았다.

재하용량 증가비의 값이 상당히 큰 폭으로 분산되어 나타 나고 있다. BDL PLT에서는 '경우 A', 'B', 'C'일 때 재하 용량 증가비의 범위는 각각 1.31~1.82, 0.21~1.21, 0.15 ~0.91 정도로 나타났다. 또한 BDH PLT에서는 '경우 A',

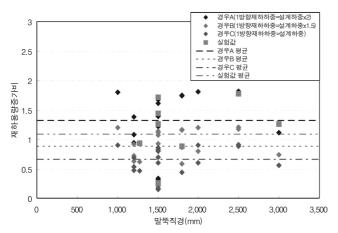


그림 11. BDL PLT에서 재하용량 증가비의 분석

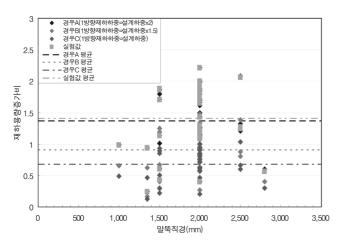


그림 12. BDH PLT에서 재하하중 증가비의 분석

'B', 'C'일 때 재하용량 증가비의 범위는 각각 0.25~2.22, 0.17~1.48, 0.23~1.12 정도로 나타났다.

'경우 A'일 때 재하용량 증가비가 BDL PLT의 경우 평균 1.33, BDH PLT의 경우 평균 1.37 정도 되는 것을 알 수 있다. 당연한 결과이지만 재하하중 증가비보다 다소 낮은 값으로 나타났다. 이것은 하중 재하 시 설정된 최대용량까지 재하하지 못하는 상황이 발생하기 때문이다.

4.5 설계하중충족비 분석

4.5.1 설계하중충족비 분석을 통한 재하용량 설정

그림 13, 14, 15에는 설계하중이 확인된 사례들에 대하여 설계하중 충족비를 나타내었다. 여기서 직경의 증가에 따라 재하하중이 증가하는 것은 아니므로 직경을 변수로 하여 도시하는 것은 의미가 크지 않으나 작도 및 분석의 편의를 위한 것으로 이해해야 할 것이다. 각 그림에서 점선으로 나타낸 것은 각 분석 방법에서 구한 값의 평균값을 도시한 것이다.

설계하중 충족비의 값이 상당히 큰 폭으로 분산되어 나타 나고 있다. BD O-cell PLT 사례의 '경우 A', 'B', 'C'일 때 설계하중충족비의 범위는 각각 1.60~6.50, 1.07~4.33, 0.80~3.25 정도로 나타났다. BDL PLT에서는 '경우 A', 'B', 'C'일 때 설계하중충족비의 범위는 각각 0.90~6.45, 0.60~4.30, 0.45~3.23 정도로 나타났다. 또한 BDH PLT에서는 '경우 A', 'B', 'C'일 때 설계하중충족비의 범위는 각 각 0.77~5.04, 0.52~3.36, 0.39~2.52 정도로 나타났다.

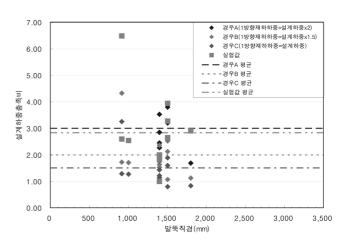


그림 13. BD O-cell PLT에서 설계하중 충족비의 분석

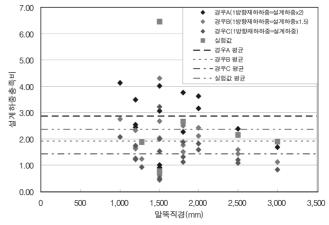


그림 14. BDL PLT에서 설계하중 충족비의 분석

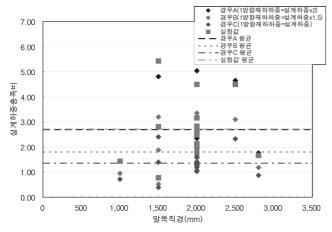


그림 15. BDH PLT에서 설계하중 충족비의 분석

그림 13~15에 나타낸 분석값들을 요약하여 표 4에 나타내었다. 설계하중 충족비의 분석에서는 재하용량기준 설정이가능한 것으로 판단되었으므로 엄밀한 분석을 위하여 설계하중 충족비가 2를 초과하는 사례와 미달하는 사례로 구분하여 나타내었다.

표 4. 설계하중 확인가능 여부에 대한 사례수 집계

항목	시험 종류	BD O-cell PLT	BDL PLT	BDH PLT
설계하중이 확인된	틴 사례수 (개)	11	18	18
	실험값	4	3	17
I. 설계하중 중촉비 ≥ 2인	경우 A	9	14	17
중독미 2 2인 사례 수 (개)	경우 B	4	8	4
	경우 C	1	2	3
	실험값	3	4	1
II. 설계하중 중촉비 < 2인	경우 A	2	4	1
중독미 < 2인 사례 수 (개)	경우 B	7	10	14
	경우 C	10	16	15

경우 A를 살펴보면, 시험방법에 상관없이 일부 사례를 제외하면 설계하중충족비가 2.0을 상회하고 있는 것으로 나타났으므로 설계하중의 확인이 가능한 것으로 판단되었다. 설계하중충족비가 2.0이하인 7개 사례에 대한 분석은 다음 절에서 설명하였다. 그러나 '경우 B'와 '경우 C'에서는 모든실험방법에서 많은 사례들이 설계하중충족비가 2.0 이하이었으므로 설계하중의 확인이 곤란할 것으로 생각되었다.

설계하중 충족비 분석에서는 '경우 A'(즉, 1방향 재하하중을 설계하중의 2배)에서는 대부분의 사례들에서 설계하중을 확인하는 것이 가능할 수 있었고 '경우 B'와 '경우 C'에서는 대부분의 사례들에서 설계하중을 확인하는 것이 곤란하였다. 그러므로 반드시 1방향 재하용량이 설계하중의 2.0배이상 이어야 설계하중을 확인할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

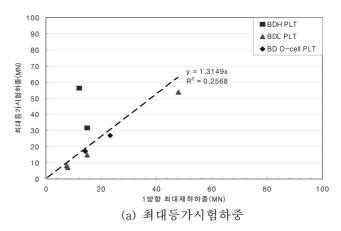
상기의 사례들을 통하여 계획최대하중이 설계하중(또는 지지력)을 안전측으로 민족시키기 위한 방법은 1방향 재하허중(즉, 유압잭 용량)이 계획최대하중 이상으로 되도록 하여야한다는 것을 알 수 있었다. 상·하 방향으로 작용하는 합계하중을 재하용량으로 설정할 경우에는 설계하중마저도 확인

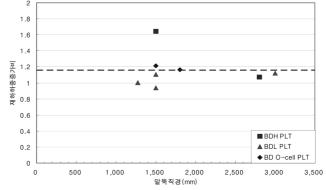
하지 못하는 상황도 발생할 수 있음을 유의하여야 한다.

4.5.2 '경우 A'일 때 설계하중충족비가 2.0 이하인 사례들 에 대한 분석

'경우 A'(즉, 1방향 재하용량을 설계하중의 2배로 설정한 경우)일 때 설계하중충족비가 2.0 이하인 사례 7개(표 8 참조)에 대하여 분석을 실시하였으며 그 결과를 그림 16에 도시하였다. 여기서 그림 14(a), (b), (c)에는 각각 최대등가시험하중, 재하하중증가비, 설계하중충족비를 도시하였다.

'경우 A'일 때 설계하중충족비가 2.0 이하인 사례 BD Ocell PLT, BDL PLT, BDH PLT에서 각각 1, 4, 2개로 나타나고 있었으므로 시험방법에 따른 차이는 없는 것으로 볼수 있었다. 7개 사례에 대한 파괴유형은 선단지반파괴, 슬라임부 파괴 및 미파괴가 각각 3, 3, 1개로 나타났으므로 파괴유형에 따른 차이도 아닌 것으로 볼 수 있었다. 7개 사례





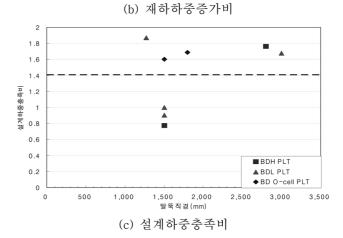


그림 16. 경우 A'일 때 설계하중충족비가 2.0 이하인 사례들에 대한 분석

표 5. 양방향 재하시험의 재하용량기준 설정을 위한 분석 내용 요약

	# 0.000 Material Materials 12 E 1 Mo # 1					
		BD O-cell PLT	BDL PLT	BDH PLT	평균	
	실험값	0.69~2.94(1.68)	0.81~1.86(1.36)	0.53~2.00(1.58)	1.53	
0-1-1-	경우 A	1.02~1.95(1.40)	0.94~1.91(1.59)	1.07~2.00(1.60)	1.52	
재하하중 증가비 ¹⁾	경우 B	0.68~1.30(0.93)	0.61~1.28(1.06)	0.71~1.31(1.07)	1.02	
0 > 11	경우 C	0.51~0.98(0.70)	0.46~0.96(0.79)	0.54~0.98(0.80)	0.76	
	평균	1.18	1.19	1.26	1.21	
	실험값		0.27~1.77(1.09)	0.25~2.22(1.41)	1.25	
	경우 A		0.31~1.82(1.33)	0.25~2.22(1.37)	1.35	
재하용량 증가비	경우 B		0.21~1.21(0.89)	0.17~1.48(0.91)	0.90	
0 / 1 / 1	경우 C		0.15~0.91(0.66)	0.23~1.12(0.68)	0.67	
	평균		0.99	1.09	1.04	
	실험값	1.01~6.50(2.84)	0.77~6.45(2.43)	0.77~5.43(2.71)	2.64	
	경우 A	1.60~6.50(3.00)	0.90~6.45(2.89)	0.77~5.04(2.70)	2.86	
설계하중 충 족 비	경우 B	1.07~4.33(2.00)	0.60~4.30(1.93)	0.52~3.36(1.80)	1.90	
0-11	경우 C	0.80~3.25(1.50)	0.45~3.23(1.44)	0.39~2.52(1.35)	1.43	
	평균	2.34	2.14	2.14	2.21	

비고; () : 평균값

모두에서 재하하중 증가비가 1에 근접하고 있는 것을 볼 수 있었으므로 상향변위와 하향변위가 상대적으로 크게 차이가 나고 있어 최대등가시험하중을 큰 값으로 구할 수 없었기 때문이었다(그림 16(a) 참조).

4.6 요약

상기의 분석 내용을 요약하여 표 5에 나타내었다. 여기서 재하히중증가비 및 재하용량증가비 분석 결과에서는 재하용 량 기준 설정이 쉽지 않았다. 그러나 설계하중 충족비 분석 에서는 재하용량기준을 설정하는 것이 가능할 수 있었는데 여기서 1방향재하용량이 설계하중의 2배 이상이어야 한다는 것을 알 수 있었다.

표 5에서 알 수 있듯이 재하하중증가비 9또는 최대등가시험하중/1방향최대재하하중) 및 재하용량중가비에서는 모든 경우('경우 A', '경우 B', '경우 C')에서 재하용량설정이 가능하지 않았다. 그러나 설계하중충족비에서는 '경우 A'에서만재하용량기준설정이 가능하였는데 이 때 설계하중충족비가 2.0 이하인 사례들에 대하여 그 원인을 분석하여 4.5.2절에서 상세하게 설명하였다.

5. 결언 및 제언

양방향 말뚝재하시험 사례를 분석하여 다음과 같이 요약할 수 있었다.

- 1. 최대하중까지 재하 하더라도 파괴를 확인할 수 없는 경우 가 다수 나타나고 있었다. 이것으로 판단해 볼 때 현재까 지 사용하고 있는 재하용량은 말뚝의 하중지지능력을 확 인하기에는 상당히 부족한 수준인 것을 알 수 있었으며 따라서 말뚝의 지지능력을 충분히 활용하기 위하여 재하 용량을 더 상향시킬 필요성이 있었다.
- 2. 1방향재하하중을 설계하중의 2배 이상('경우 A')으로 하더

라도 재하하중증가비(또는 최대등가시험하중/1방향최대재 하하중) 및 재하용량증가비는 BD O-cell PLT, BDL PLT, BDH PLT에서 평균적으로 2.0에 미달되었으므로 재 하용량 기준설정에는 활용할 수 없었다.

- 3. 1방향재하허중을 설계하중의 2배 이상으로 설정할 경우설계하중충족비는 BD O-cell PLT, BDH PLT, BDL PLT에서 각각 평균 3.00, 2.89, 2.70 정도 되는 것을 알수 있었으며 1.60~6.50, 0.90~6.45, 0.77~5.04의 범위에 있었다. 따라서, 1방향재하하중이 설계하중의 2배 이상일 경우에만 설계하중을 실증적으로 확인할 수 있는 것을 알수 있었다.
- 4. 재하용량은 1방향재하하중 즉, 유압잭의 용량으로 정의하여야 하며, 이 재하용량이 계획최대하중 이상이어야 한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 상·하 방향으로 작용할수 있는 합계하중을 재하용량으로 정의하지 않아야 하며, 이 합계하중은 최대재하기능하중이라 부를 수 있으나 공학적 의미는 크지 않다.
- 5. 양방향말뚝재하시험에서는 상향 및 하향 변위가 상대적으로 크게 차이가 날 경우에는 1방향 하중밖에 사용할 수 없는 한계가 있다. 따라서 계획최대하중을 안전측으로 만족시키기 위한 방법으로 1방향 재하용량이 계획최대하중이상이 되도록 하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2006학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

대한건축학회(2005) 건축기초구조설계기준.

¹⁾ 이것은 최대등가시험하중분석에서 '최대등가시험하중/1방향최대재하히중'과 동일함

- (사)한국지반공학회(2003) **구조물 기초설계기준 해설**, 건설교통부 제정.
- 한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 ATC-18(2007a) 기초의 재하시험 기준 및 해설, 한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 ATC-18 (2007) 활동사례 집 1.
- 한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 ATC-18
- (2007b) **일본지반공학회기준 말뚝의 연직재하시험방법 및 해설 제1회개정판**, 일본지반공학회 편, 한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 ATC-18 (2007) 활동사례 집 2.
- (社)地盤工學會(2002) 抗の沿直裁何試驗方法同解說-第1會改正版.

(접수일: 2008.9.23/심사일: 2008.10.26/심사완료일: 2008.11.4)