양방향 말뚝재하시험 기준 제정에 나타난 주요 개념
Principal Concepts on Bi-directional Pile Load Test Specification

최용규[1], Choi, Yongkyu, 정성민[2], Jung, Sungmin

[1] 경성대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsung University
[2] (주) 지 텍크 과장, manager, G-TEC.

SYNOPSIS : In this paper, principal concepts on bi-directional pile load test(BD PLT) specification were explained. These main concepts are kinds of BD PLT, loading capacity, reporting the test results to relevant association etc.

Keywords : principal concepts, bi-directional pile load test specification, kinds of BD PLT, loading capacity

1. 서 론

일반적으로 기초말뚝의 허용지지력을 산정함에 있어 가장 신뢰성 있는 방법으로 정재하시험법을 이용한 지지력 결정방법(한국지반공학회, 2003)을 들 수 있다. 그러나 정재하시험법은 재하용량의 한계와 현장 시공여건의 특수성으로 대구경 현장타설말뚝, 바렛트말뚝의 경우 대체 시험법이 필요하게 되었다. 또한, 고하중의 현장타설말뚝의 설계 및 시공이 계속적으로 증가하는 실정에서 양방향 말뚝재하시험은 고하중의 말뚝에 대한 지지력을 확인할 수 있는 가장 실용적인 방법으로 사용할 수 있다. 건축기초구조설계기준(대한건축학회, 2005)에서는 선단재하시험법을 추천하고 있는데 이 시험법의 일반적인 용어는 양방향 말뚝재하시험(BD PLT; Bi- directional, Pile Load Test)이라고 할 수 있다.

양방향 말뚝재하시험은 하중재하용 반력장치 및 재하대가 필요 없고, 좁은 시험공간이나 경사진 곳에서도 적용이 가능하다는 장점으로 인해 미국에서는 현장타설말뚝에 대한 재하시험의 90% 이상을 이 시험법으로 수행하고 있으며, 일본과 유럽 등 세계 10여개국 이상에서 이 시험법을 적용하였다. 또한 최근 3년 동안 국내에서 수행된 양방향 말뚝재하시험 사례가 30개 이상으로 많이 이용되고 있으며, 향후 더욱 더 많은 시험이 수행될 것으로 판단된다.

그러나, 국내에서 아직 양방향 재하시험은 보급단계로서 기술자들에게 생소하며, 이 시험에 대한 국내 기준이 없어 분석방법이나 시험방법이 상이한 경우가 많다. 또한, 양방향 말뚝재하시험에 대한 시험기준은 FHWA RD-99-025(O'Neill & Reese, 1999)에 단지 소개만 되었으며 시험기준이 설정되어 있지 않았다(표 1. 참조).

최근 일본에서는 말뚝의 연직재하시험방법•동해설(지반공학회, 2003)에는 말뚝선단재하시험법으로 동일개념의 시험방법이 정립되어 시험기준이 제정되었다(표 1. 참조). 그러나 국내에서는 아직 양방향 말뚝재하시험에 대한 기준이 제정되지 않아 많은 기술자들이 양방향 말뚝재하시험에 대한 정확한 내용을 숙지하지 못한 상태이다. 따라서 이 시험에 대한 국내의 기준을 제정하여 양방향 말뚝재하시험의 적용을 확대하고자 하였다.

표 1. 말뚝재하시험 기준

일본			미국			유로코드			한국		
기준명	규격번호	제정년도	기준명	규격번호	제정년도	기준명	규격번호	제정년도	제정기준명	제정주체	제정년도
말뚝의압입시험방법	JGS 1811	2002	Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load	ASTM D1143-81	1994	Pile load test by static axially loaded compression test	ISO 22477-1		말뚝연직압축정재하시험	한국지반공학회	2007
말뚝의선단재하시험방법	JGS 1812	2002							양방향 말뚝재하시험	한국지반공학회	2007
말뚝의인발시험방법	JGS 1813	2002	Test Method for Individual Piles Under Static Axial Tensile Load	ASTM D3689-90	1995	Pile load test by static axially loaded tension test	ISO 22477-2		말뚝연직인발정재하시험	한국지반공학회	2007
말뚝의연직반복재하시험방법	JGS 1814	2002									
말뚝의급속재하시험방법	JGS 1815	2002									
말뚝의충격재하시험방법	JGS 1816	2002	Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles	ASTM D4945-00		Pile load test by dynamic axially loaded compression test	ISO 22477-4		PDA/말뚝동재하시험	한국지반공학회	2007
말뚝의수평재하시험방법	JSF : T32-83	83	Test Method for Piles Under Lateral Loads	ASTM D3966-90	1995	Pile load test by static transversally loaded tension	ISO 22477-3		말뚝 수평정재하시험	한국지반공학회	2007

2. 양방향 말뚝재하시험 기준의 주요개념

2.1 양방향 말뚝재하시험의 종류 및 특징

양방향 말뚝재하시험은 다음과 같은 분류기준에 따라 구분할 수 있으며, 그 종류를 표 2에 나타내었다.

표 2. 양방향 말뚝재하시험의 종류

비교항목 / 시험종류	사용압력의 크기		사용유체 종류		작동방식		사용말뚝에의 적용성	안전율 (SF=3)
	저유압 (<70 MPa)	고유압 (>100MPa)	혼합액 (물/유류)	유류	단동식	복동식		
양방향 오스터버어그 셀 말뚝재하시험 (BD O-cell PLT)	○		○		○		?	?
양방향 저유압잭 말뚝재하시험 (BDL PLT)	○			○	○		×	미달
양방향 고유압잭 말뚝재하시험 (BDH PLT)		○		○		○	○	만족
착안점	▸실린더 배치 가능성 ▸재하용량충족여부 ▸시험비용절감여부 ▸재하시스템 결정기술		▸내구성판단		▸그라우팅 방식 결정			▸장치의 안정성 판단

양방향 말뚝재하시험(BD PLT)은 사용압력의 크기에 따라 저압시험과 고압시험으로 구분할 수 있으며, 그 특징을 표 3에 나타내었다.

양방향 고유압 말뚝재하시험에서는 고압(100MPa이상)의 유압잭과 주변 장치를 사용함으로써 저유압 시험시 발생하는 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.

표 3. 양방향 말뚝재하시험의 특징

구분	저유압 방식, 단동식	고유압 방식, 복동식
	양방향 오스터버그셀 말뚝재하시험 (BD O-cell PLT)	양방향 고유압 말뚝재하시험 (BDH PLT)
재하장치	• 저압력(70MPa)셀 사용 • 시험말뚝 단면 크기에 대한 시험용량 한계 • 대형 셀 제작은 기술적으로 많은 어려움이 있으며, 제작비가 많이 소요됨 • 규격화된 셀 사용	• 고압력(100MPa이상) 유압잭 사용 • 유압실린더의 개수를 줄여 시험장치 제작비 감소 • 복수의 유압잭 ; 개별적 조정 • 복동식의 실린더를 사용 : 반복 하중재하 가능 및 시험 후 유압잭 내 잔류 공간 제거
재하용량 기준	• 양방향 합계하중(즉 최대재하가능하중) • 설계하중까지 재하 곤란	• 잭 용량 즉, 1방향재하하중(= O-cell 용량의 2배)
시험 후 처리	• 셀 내부와 말뚝내부공간 그라우팅으로 충전 • 셀 내부 충전 : 확인사례 없음	• 말뚝내부 공간만 그라우팅 실시 • 복동식 잭 사용으로 잭 내부 빈 공간 잔류 없음
적용성	• 시험말뚝 : 가능 • 사용말뚝 : 가능 (경우에 따라 곤란할 수 있음)	• 시험말뚝 : 가능 • 사용말뚝 : 가능
셀 또는 잭 배치	• 어려움 있음(주로 기성제품사용)	• 원활함
상·하 변위 측정	• 진동현식 변위계 사용 • 변위계 정도 0.0254 mm • 변위봉 사용 • 상/하판, 두부 변위측정	• 전기저항식 변위계 사용 • 변위계 정도 0.001mm • 변위봉 사용 • 상/하판, 두부 변위측정
콘크리트 타설의 건전성	• 단일 셀의 경우 측면으로 트레미관 설치 • 재하장치 부근의 건전성 불량 우려 높음	• 강철재 깔때기를 사용 • 중앙부에 트레미관 삽입 • 재하장치 부근의 건전성 불량 우려 낮음 • 고하중인 경우 다수의 실린더 배치로 인하여 하부 레미콘의 건전성 불량 우려 • 레미콘타설 비교적 용이함
재하장치 연결	• 상/하판과 재하장치를 용접 결합 • 주철근과 상판을 용접 결합 • 주철근의 열에 의한 손상 우려	• 상/하판과 재하장치를 볼트 결합 • 주철근과 상/하판을 U볼트(상부) 및 커플러(하부)로 결합 • 주철근의 열에 의한 손상 없음 • 상/하판 고정시 볼트 결합력 최소화 가능
축하중 전이분포	• 원특허에는 청구항 없음 • 소량의 센서 사용 • 정확한 축하중 분포를 측정 곤란	• 말뚝 깊이별 축하중 계측용 센서 규정대로 설치 • 축하중전이 분포의 신뢰성 확보 가능 • 말뚝축하중 분포도 작성 절차 기술

2.2 재하용량

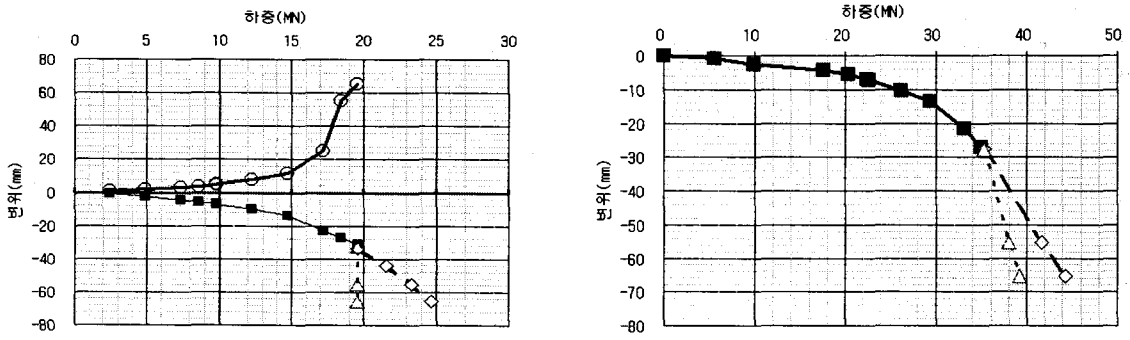
재하용량은 1방향재하하중(즉, 유압잭 또는 O-cell의 용량)으로 정의하여야 하며, 양방향합계하중(즉, 최대재하가능하중)으로 정의하지 않아야 한다. 이 재하용량은 반드시 계획최대하중이상이어야 한다.

1방향 재하하중 - 상/하향 변위 측정 자료를 활용하여 결과를 정리할 때, 동일한 상향/하향변위의 1방향 하중을 합하여 말뚝머리 등가하중으로 환산을 하게 된다. 따라서 상향 또는 하향변위가 상대적으로 다소 차이가 날 경우에는 1방향하중 밖에 사용할 수 없는 경우도 있으며, 심한 경우에는 (1방향하중-말뚝자중)만큼 사용해야하는 경우도 발생 할 수 있다.

표 4에는 각 시험 사례별 최대등가하중과 최대재하하중의 비를 나타내었으며, 비율이 가장 큰 TP1과 가장 작은 TP7에 대한 각각의 시험결과와 등가하중 그래프를 그림 1 및 2에 나타내었다.

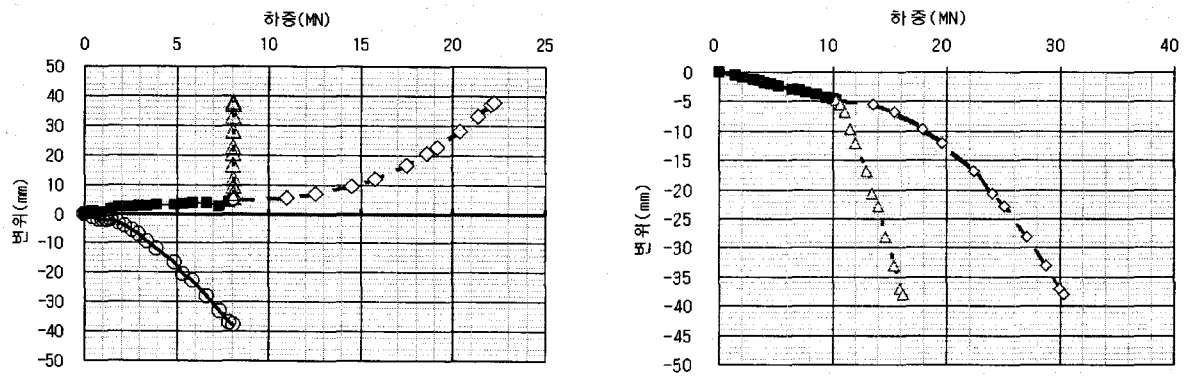
표 4. 시험 사례별 최대등가하중과 최대 재하하중의 비

사 례	(1) 1방향 재하용량 (MN)	(2) 최대재하 하중 (MN)	(3) 최대상향 변위 (mm)	(4) 최대하향 변위 (mm)	기준변위가 최대일 때				
					(5) 기준변위 (mm)	(6) 상향하중 (MN)	(7) 하향하중 (MN)	(8) 등가하중 (MN)	(9) 재하하중 증가비 ((8)/(2))
TP1	39.20	19.60	65.20	27.10	27.10	17.25	19.60	36.85	1.88
TP2	29.40	20.21	30.90	13.50	13.50	17.64	20.21	37.85	1.87
TP3	39.20	39.20	2.95	3.67	2.95	39.20	31.36	70.56	1.80
TP4	29.40	24.80	23.50	2.00	2.00	15.61	24.80	40.42	1.63
TP5	29.40	29.40	3.00	20.40	3.00	29.40	10.29	39.69	1.35
TP6	29.40	5.52	16.50	74.80	16.50	5.52	1.76	7.28	1.32
TP7	15.68	8.09	4.70	38.00	4.70	8.09	2.21	10.29	1.27



(a) 재하시험 결과 (b) 등가하중으로 환산한 경우

그림 1. 재하하중비가 최대인 사례 (TP1)



(a) 재하시험 결과 (b) 등가하중으로 환산한 경우

그림 2. 재하하중비가 최소인 사례 (TP7)

상기의 사례들을 통하여 계획최대하중을 안전측으로 만족시키기 위한 방법은 1방향 재하하중(즉, 유압잭용량)이 계획최대하중 이상으로 되도록 하여야 한다. 상·하 방향으로 작용하는 합계하중을 재하용량으로 설정할 경우에는 설계하중마저도 확인하지 못하는 상황도 발생할 수 있으므로 크게 유의하여야 한다.
계획최대하중은 시험의 주목적에 따라 다음과 같이 정의 한다.

① 선단지지력 특성을 평가하는 경우 : 예상되는 극한선단저항력 이상의 값
② 주면지지력 특성의 평가하는 경우 : 예상되는 극한주면마찰저항력 보다 큰 값
③ 말뚝의 설계하중의 확인하는 경우 : 설계하중에 안전계수를 고려한 값 이상

2.3 자체평가서의 보고

국내 양방향 말뚝재하시험에 대한 데이터베이스의 작성과 국내기술자들이 시험결과를 편리하게 이용할 수 있도록 시험자는 학회 또는 협회에서 제공하는 양식의 자체평가서를 작성하고 이를 학회 또는 협회 홈페이지 자료실에 게시하도록 의무화하였다.

2.4 기타 기준 내용

상기 2.1절 ~ 2.3절에 나타낸 주요 개념 외에 다음의 항목들을 양방향말뚝재하시험 기준에 수록하였다.

1) 견적 시 필요사항
2) 재하장치 안전율
3) 하중재하방법
4) 말뚝머리 등가하중-침하량 곡선 작도
5) 축하중전이 측정 및 축하중 분포도 작성
6) 재하시험 종료후 말뚝내부공간 그라우팅

3. 결언 및 제언

1) 고하중을 지지하는 대구경 말뚝의 지지력을 확인할 수 있는 가장 실용적인 방법인 양방향 말뚝재하시험이 국내에서 급속도로 널리 활용되는 시점에서 본 시험에 대한 기술자들의 이해를 높이기 위하여 시험기준을 제정 중에 있으며 향후 한국지반공학회 기준으로 공표될 것이다.
2) 양방향 말뚝재하시험(BD PLT)의 시험 종류는 양방향 오스터버어그셀 말뚝재하시험(BD O-cell PLT), 양방향 저유압 말뚝재하시험(BDL PLT), 그리고 양방향 고유압말뚝재하시험(BDH PLT)이 있으며, 사용압력에 따라 저압시험과 고압시험을 구분할 수 있다.
3) 재하용량은 1방향 재하하중(즉, 유압잭 용량)으로 정의하였으며 양방향합계하중(즉 최대재하가능하중)으로 정의하여서는 안된다. 또한 이 재하용량은 계획최대하중이상이어야 한다.
4) 그 외 양방향 말뚝재하시험의 기준에 수록된 주요 개념으로는 견적 시 필요 사항, 재하장치의 안전율, 하중재하방법, 말뚝머리 등가하중 침하량 곡선의 작도 방법, 축하중전이 측정 및 축하중분포도 작성 방법, 재하시험 종료후 말뚝내부공간 그라우팅, 자체평가서의 보고 등을 들 수 있다.

참고문헌

1. 대한건축학회 (2005), "건축기초구조설계기준".
2. (사) 지반공학회 (2003), "구조물설계기준" 및 해설.
3. 地盤工學會(2003),"地盤工學會 基準集 くいの鉛直在荷試驗方法•同解設".
4. ASTM D1143-81(Reapprovbed BY 1994) (1994), "Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load."
5. O'Neil M. W. and Reese L. C. (1999), "Drilled Shafts : Construction procedures and Design Methods", Publication No. FHWA-RD-99-025, pp.393～399.