

양방향말뚝재하시험의 재하용량 기준 설정을 위한 사례분석 연구

A study on case analysis for loading capacity standard establishment of bi-directional pile load test (BD PLT)

최용규¹⁾, Choi, Yongkyu, 서정혜²⁾, Seo, Jeonghae, 김상일³⁾, Kim, Sangil

¹⁾ 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsoong Univ.

²⁾ 한국양방향말뚝재하시험협회 과장, Senior Manager, Korea Bi-Directional Pile Load Test Association.

³⁾ 한국양방향말뚝재하시험협회 사무국장, Secretary General, Korea Bi-Directional Pile Load Test Association.

SYNOPSIS : In the bi-directional pile load test (BD PLT) for pile load test of Mega foundation, loading capacity specification were not specified exactly. Therefore there are so many confusions and variations of maximum 2 times in loading capacity are come out.

In this study, specifications 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 and sufficiency ratio of design load were analyzed. It can be known that the loading capacity specification of bi-directional pile load test must be defined as 1-directional test load that is established as more than 2 times of design load.

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

1. 서 론

양방향말뚝재하시험에 관한 기준은 일본(JGS1812, 2002) 및 한국(KGS TCF S 2-2007 & ATC18 S-2007, 2007)에서만 제정되어 있을 뿐이며 한국 도로교 설계기준해설집(대한토목학회 & 교량핵심설계기술연구단, 2007)에도 주요한 개념이 설명되어 있다. 그리고 각 기준에서도 재하용량의 기준에 관하여 명확하게 규정하고 있지 않은 실정이다. 더욱이 양방향 말뚝재하시험을 최초로 개발하여 가장 많은 실적을 보유하고 있는 OO사에서는 재하용량을 충분하지 않게 설정하여 시험을 수행하고 있으며 이로 인하여 등가실험최대하중으로는 설계하중조차 확인하지 못하는 사례가 빈번하게 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 수행된 양방향 말뚝재하시험 사례들을 분석하여 재하용량 기준을 설정하였다. 즉 1방향 재하하중으로 설계하중의 2배 이상으로 설정하는 것이 합리적임을 알아냈다.

2. 양방향 말뚝재하시험 기준 고찰

2.1 시험 기준 고찰

양방향말뚝재하시험에 관하여 규정하고 있는 국내 기준서들(건축기초구조 설계기준(대한건축학회, 2005), 양방향말뚝재하시험기준(KGS TCF S 2-2007 & ATC18 S-2007)(한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 대형기초위원회, 2007), 한국 도로교 설계기준해설집(대한토목학회 & 교량핵심설계기술연구단, 2007))에 설명되어 있는 주요한 개념을 표 1에 요약하였다.

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 평가 방법을 제시하고 있음
양방향 말뚝재하시험 기준	한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 ATC 18	2007. 10	◦ 재하용량 ◦ 안전율 ◦ 책 및 조립된 재하장치의 보정 ◦ 하중재하 종료 후 그라우팅
도로교 설계기준 해설집	대한토목학회 & 교량설계핵심기술 연구단	2007. 12	◦ 상기 내용 포함 ◦ 사용말뚝 시 유의 사항 ◦ 시험말뚝시 유의 사항 ◦ 양방향 말뚝재하시험 기술의 조기정착을 위한 잠정적인 조치 사항

2.2 재하시험 용량에 관한 고찰

일본재하시험기준에서는 계획최대하중으로 나타내고 있다. 선단지지력이나 주변마찰지지력의 평가에 있는 경우 계획최대하중은 각 성분의 극한지지력 이상이어야 하고 반력의 상한치는 계획최대하중이어야 한다. 설계지지력의 확인시험의 경우 계획최대하중은 설계하중에 안전계수를 고려한 값의 1/2이상으로 정하고 있다. 여기서 계획최대하중은 양방향 합계최대하중을 의미하며 이는 Load Test사의 등가최대하중과 동일한 의미이다.

기준화 되어 있지는 않지만 Load Test사에서도 재하용량을 등가최대하중(Equivalent maximum load)으로 나타내고 있으며 등가최대하중이 설계하중의 2배가 되도록 정하고 있다. 여기서, 등가최대하중은 양방향합계최대재하가능하중과 같은 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 규정하였다. 재하용량은 반드시 1방향 재하하중이 계획최대하중이상이어야 한다.

1방향 재하하중-상/하향 변위 측정 자료를 활용하여 결과를 정리할 때, 동일한 상향 및 하향변위에 해당하는 1방향 하중들을 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 사용해야 하는 상황도 발생 할 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 하여야 한다.

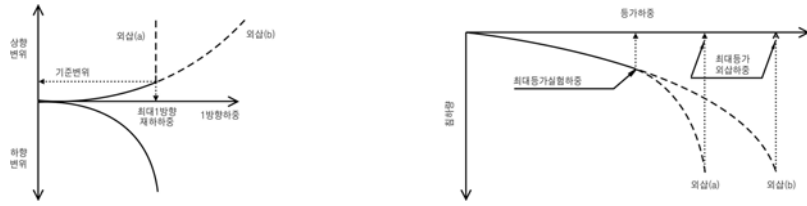
2.3 용어 정의

국내에서 제정된 양방향말뚝재하시험 기준에 설명되어 있는 재하용량 설정과 관련된 주요한 용어를 설명하면 다음과 같다.

·기준변위 : 1방향 최대 재하하중에서 유발된 상향 또는 하향변위 중에서 최소변위로 정의함(그림 1.1(a))

참조)

- 최대등가실험하중 : 기준변위에서 산정된 상향 및 하향으로 작용된 하중의 합계최대하중(즉 최대등가하중), 즉 실험결과만으로 결정할 수 있는 최대 등가하중(그림 1.1(b) 참조)
- 최대등가외삽하중 : 1방향 최대 재하하중에서 유발된 최대 변위 시까지 상향 또는 하향하중을 외삽하여 가정된 최대 등가하중(그림 1.1(b) 참조). 실험하중 이후의 외삽된 등가하중은 실험치가 아니므로 사용상 주의를 요함. 외삽에서는 2가지 가정을 사용하는데 첫 번째 가정은 기준변위에서 취성과괴가 유발된다는 것과 두 번째 가정은 기준변위까지의 경향에 기초하여 최대 변위까지 거동한다는 가정임
- 재하하중 증가비 : 기준변위에서 작용된 1방향 재하하중과 최대 등가실험하중과의 비



(a) 1방향 재하하중 - 변위량 곡선 (b) 등가하중-변위량 곡선

그림 1. 용어 정의

기준서에 설명되어 있지는 않지만 재하용량 기준 설정을 위하여 필요한 용어를 다음과 같이 정의할 수 있으며 이들은 다음 장의 분석에서 사용되었다.

- 재하하중증가비 : 최대등가실험하중을 1방향최대재하하중으로 나눈 값
- 설계하중충족비 : 최대등가실험하중을 설계하중으로 나눈 값

3. 재하용량 기준 설정을 위한 사례 분석

3.1 사례 요약

각각의 분석에 사용한 양방향 말뚝재하시험 사례들을 표 2에 요약하였다. 표 2의 사례들은 국내에서 수행된 시험들이며 BD O-cell PLT의 경우 설계를 위한 시험말뚝에 대한 시험이었으므로 설계 하중이 없는 상태이었다. 그 외 시험에서는 설계하중을 최대한 확인하는 노력을 경주하였다. 설계하중의 확인이 불가능한 사례들은 재하하중 증가비 분석에만 사용하였으며, 설계하중이 확인된 사례들은 재하하중 증가비 뿐만 아니라 설계하중 충족비 분석에도 사용하였다.

또한, 1방향으로 정의한 재하용량을 설계하중의 2.0배(경우 A), 1.5배(경우 B), 1.0배(경우 C)로 설정하였을 경우에 대한 값을 나타내었다. 여기서 경우 A는 '재하용량 = 1방향최대재하하중 = 설계하중 × 2.0'과 동일한 것으로 간주하면 된다.

표 2. 양방향 말뚝재하시험 사례 요약

시험 종류	사례 수(회)	설계하중 확인 사례 수(회)	직경(mm)	년도	분석 내용
양방향 오셀 말뚝재하시험 (BD O-cell PLT)	7	-	1,200~2,850	2005~2006	① ②
양방향 저유압 말뚝재하시험 (BDL PLT)	18	6	1,000~2,500	2002~2,006	① ② ③
양방향 고유압 말뚝재하시험 (BDH PLT)	31	19	1,500~2,500	2005~2007	① ② ③
합계	56	25			

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

3.2 최대등가실험하중 분석

그림 2, 3, 4에는 1방향최대재하하중-최대등가실험하중의 관계를 도시하였다. 경우 A일 때 BD O-cell PLT의 경우 1방향 최대재하하중의 평균 1.46배, BDL PLT의 경우 1방향 최대재하하중의 평균 1.63배, BDH PLT의 경우 평균 1.57배 정도 되는 것을 알 수 있다. 즉, 최대등가실험하중이 1방향최대하중의 2배만큼 유발되지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경우 최대등가실험하중이 1방향 최대하중의 2배와 동일하지 않으므로 재하용량을 양방향합계하중으로 정의할 경우 설계하중도 만족시킬 수 없는 상황이 흔하게 발생할 수 있다. 따라서 양방향말뚝재하시험의 재하용량을 1방향 재하하중으로 정의하는 것이 합리적일 수 있다.

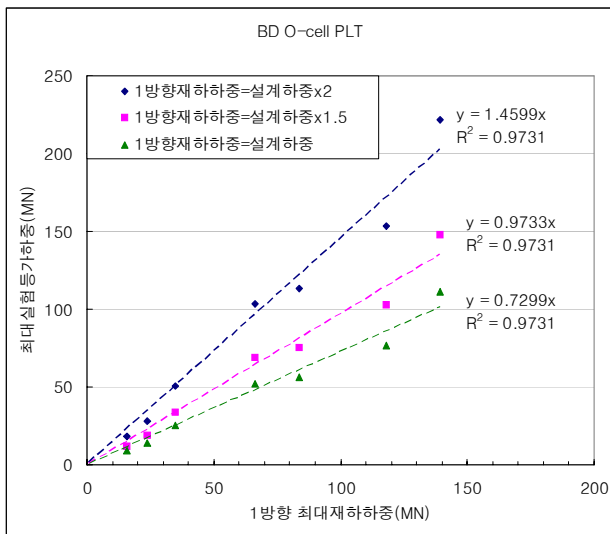


그림 2. 양방향 오셀 말뚝재하시험(BD O-cell PLT)의 1방향 재하하중- 등가실험하중의 관계

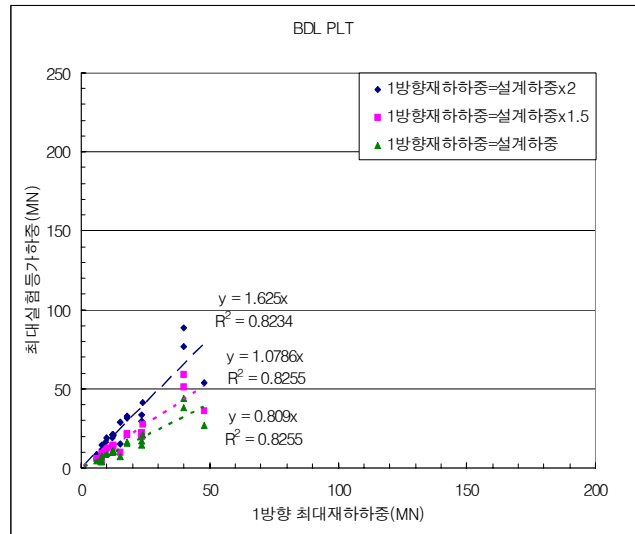


그림 3. 양방향 저유압 말뚝재하시험 (BDL PLT)의 1방향 재하하중-등가실험하중의 관계

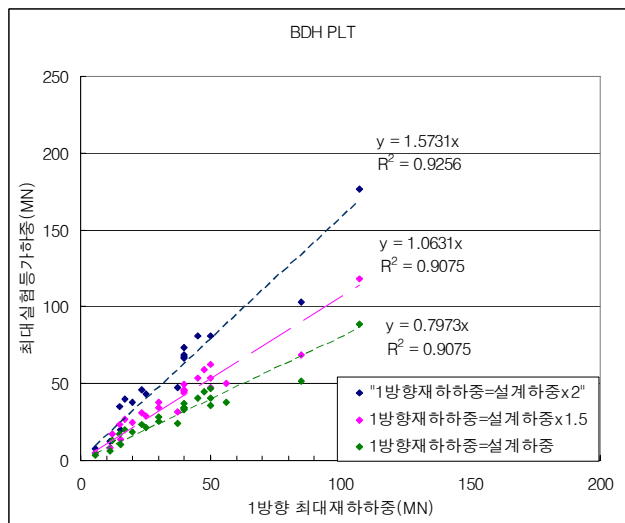


그림 4. 양방향 고유압 말뚝재하시험 (BDH PLT)의 1방향 재하하중-등가실험하중의 관계

3.3 재하하중 증가비 분석

그림 5, 6, 7에는 말뚝직경에 따른 재하하중 증가비를 도시하였다. 경우 A일 때 재하하중증가비가 BD O-cell PLT의 경우 평균 1.38, BDL PLT의 경우 평균 1.59, BDH PLT의 경우 평균 1.71 정도 되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 부터 최대등가실험하중이 양방향함계최대하중만큼 유발되지 않는 것을 알 수 있다. 결국 재하하중 증가비가 2.0이하인 경우 실험결과만으로는 설계하중을 확인하지 못하는 상태임을 알 수 있다.

양방향말뚝재하시험에서는 재하하중 증가비가 2.0 이상이어야 설계하중의 확인이 가능할 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.

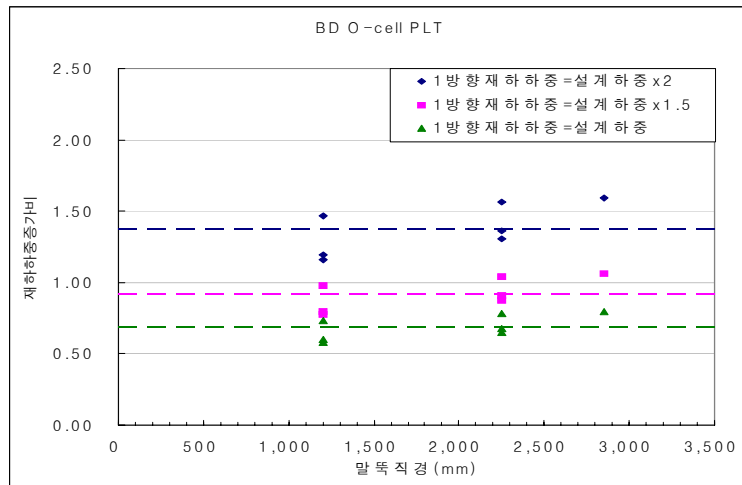


그림 5. 양방향 오셀 말뚝재하시험(BD O-cell PLT)의 말뚝직경에 따른 재하하중 증가비

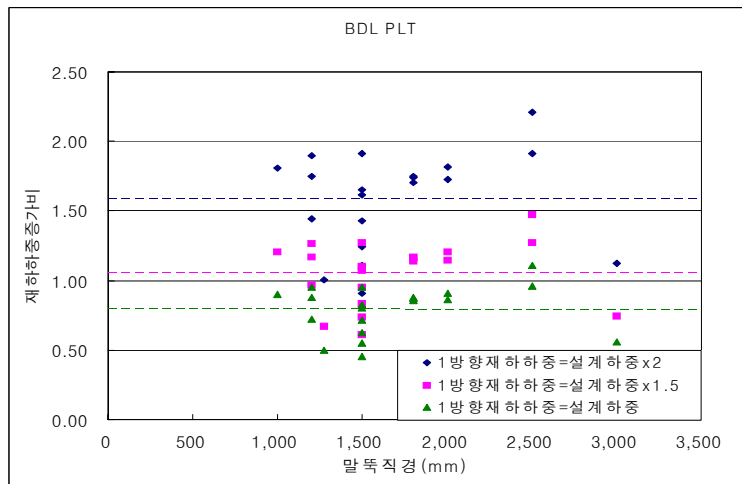


그림 6. 양방향 저유압 말뚝재하시험 (BDL PLT)의 말뚝직경에 따른 재하하중 증가비

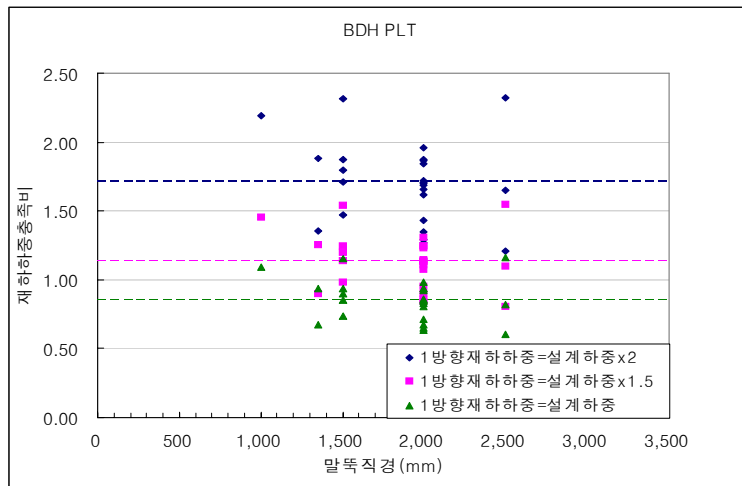


그림 7. 양방향 고유압 말뚝재하시험 (BDH PLT)의 말뚝직경에 따른 재하하중 증가비

3.4 설계하중충족비 분석

그림 8, 9에는 설계하중이 확인된 사례들에 대하여 말뚝직경에 따른 설계하중 충족비를 나타내었다. 설계하중충족비가 2.0이상이어야 실험적으로 설계하중을 확인할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 경우 A(즉, 1방향 재하하중을 설계하중의 2배)를 제외한 나머지 사례들에서는 설계하중의 2배까지 재하할 수 없다는 것을 알 수 있으며 따라서 설계하중을 실증적으로 확인할 수 없다는 것을 알 수 있다. 그러므로 반드시 1방향 재하용량이 설계하중의 2.0배 이상 이어야 설계하중을 확인할 수 있다.

설계하중 충족비의 값이 상당히 큰 폭으로 분산되어 나타나고 있다. BDH PLT에서는 경우 A, B, C일 때 설계하중충족비의 범위는 각각 0.88~6.45, 0.59~4.30, 0.44~3.23 정도로 나타났다. 또한 BDH PLT에서는 경우 A, B, C일 때 설계하중충족비의 범위는 각각 2.04~5.04, 1.36~3.36, 1.02~2.52 정도로 나타났다. 그러나 BD O-cell PLT 사례의 경우 설계하중 자료를 구할 수가 없어 설계하중충족비 분석을 할 수가 없었다. 경우 A를 살펴보면, BDH PLT에서는 모든 경우가 설계하중충족비가 2.0을 상회하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 BDH PLT에서는 4개 사례에서 설계하중충족비가 2.0이하로 나타나고 있는데 이는 재하용량을 작게 설정하였기 때문이다.

상기의 사례들을 통하여 계획최대하중이 설계하중(또는 소정의 지지력)을 안전측으로 만족시키기 위한 방법은 1방향 재하하중(즉, 유압잭 용량)이 계획최대하중 이상으로 되도록 하여야 한다는 것을 알 수 있었다. 상·하 방향으로 작용하는 합계하중을 재하용량으로 설정할 경우에는 설계하중마저도 확인하지 못하는 상황도 발생할 수 있으므로 유의하여야 한다.

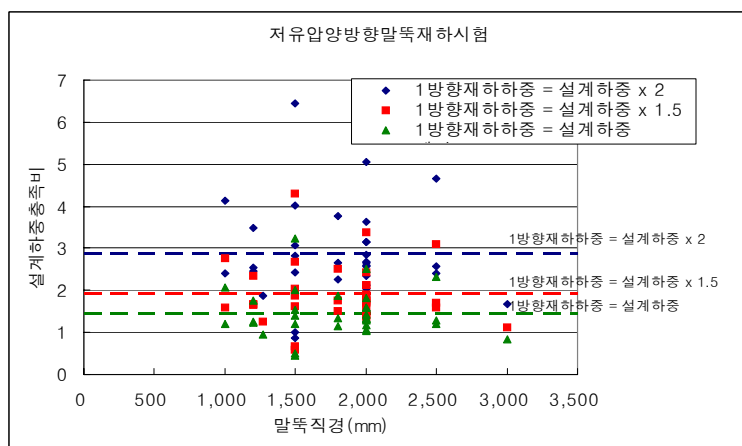


그림 8. 양방향저유압말뚝재하시험(BDL PLT)의 말뚝직경에 따른 설계하중 충족비

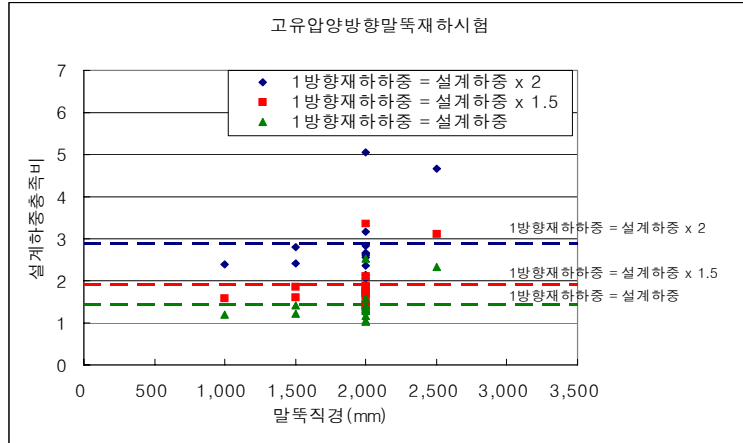


그림 9. 양방향고유압말뚝재하시험(BDH PLT)의 말뚝직경에 따른 설계하중 충족비

3.5 요약

상기의 분석 내용을 요약하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 양방향 재하시험의 재하용량기준 설정을 위한 분석 내용 요약

		BD O-cell PLT	BDL PLT	BDH PLT	평균
최대실험 등가하중	A	1.46	1.63	1.57	1.55
	B	0.97	1.08	1.06	1.04
	C	0.73	0.81	0.80	0.78
	평균	1.05	0.90	1.86	1.27
재하하중 증가비	A	1.16~1.59 (1.38)	0.91~2.21 (1.59)	1.21~2.32 (1.71)	1.56
	B	0.77~1.06 (0.92)	0.61~1.48 (1.06)	0.81~1.55 (1.14)	1.04
	C	0.58~0.80 (0.69)	0.46~1.11 (0.79)	0.61~1.16 (0.85)	0.78
	평균	1.00	1.46	1.23	1.23
설계하중 충족비	A	-	0.88~6.45(2.88)	2.04~5.04(2.88)	2.88
	B	-	0.59~4.30(1.92)	1.36~3.36(1.92)	1.92
	C	-	0.44~3.23(1.44)	1.02~2.52(1.44)	1.44
	평균	-	2.08	2.08	2.08

비고 ; 1. A : 1방향재하용량=설계하중×2.0, B : 1방향재하용량=설계하중×1.5, C : 1방향재하용량=설계하중×1.0
 2. () : 평균값

4. 결론 및 제언

국내에서 수집된 양방향 말뚝재하시험 사례를 분석하여 다음과 같이 요약할 수 있었다.

1. 1방향재하하중이 설계하중의 2배 이상으로 하더라도 최대등가실험하중은 BD O-cell PLT, BDL

PLT, BDH PLT에서 각각 1방향최대재하하중의 평균 1.46배, 1.63배, 1.57배 정도 되는 것을 알 수 있다. 즉, 최대등가실험하중이 1방향최대하중의 2배 이상 유발되지 않는 것을 알 수 있다.

2. 1방향재하하중이 설계하중의 2배 이상으로 하더라도 말뚝직경에 따른 재하하중증가비는 BD O-cell PLT, BDL PLT, BDH PLT에서 각각 평균 1.38, 1.59, 1.71 정도 되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 최대등가실험하중이 양방향합계최대하중만큼 유발되지 않는 것을 알 수 있다.
3. 1방향재하하중이 설계하중의 2배 이상으로 하더라도 말뚝직경에 따른 설계하중충족비는 BDH PLT, BDL PLT에서 각각 평균 2.88, 2.88 정도 되는 것을 알 수 있다. 따라서, 1방향재하하중이 설계하중의 2배 이상일 경우에만 설계하중을 실증적으로 확인할 수 있는 것을 알 수 있었다.
4. 재하용량은 1방향재하하중 즉, 유압잭의 용량으로 정의하여야 하며, 이 재하용량이 계획최대하중 이상이어야 한다. 따라서 상·하 방향으로 작용할 수 있는 합계하중을 재하용량으로 정의하지 않아야 하며, 이 합계하중은 최대재하가능하중이라 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 안전 측으로 만족시키기 위한 방법으로 1방향 재하용량이 계획최대하중 이상이 되도록 하여야 한다.

참고문헌

1. (社)地盤工學會 (2002), “抗の沿直裁何試験方法・同解説-第1會改正版-”
2. 대한건축학회(2005), “건축기초구조설계기준”, 2005. 8.
3. (사)한국지반공학회 (2003), “건설교통부제정 구조물 기초설계기준 해설”, 2003. 2.
4. 한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 ATC-18 (2007), “기초의 재하시험 기준 및 해설”, 한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 ATC-18 (2007) 활동사례집 1, 2007. 10.
5. 한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 ATC-18 (2007), “일본지반공학회기준 말뚝의 연직 재하시험방법 및 해설 - 제1회개정판”, 일본지반공학회 편, 한국지반공학회 기초기술위원회 & 국제지반공학회 ATC-18 (2007) 활동사례집 2, 2007. 10.