

모형시험을 통한 Smart 양방향말뚝 재하시험에 관한 연구 Study of Smart Bi-directional Pile Load Test by Model Test

김낙경¹⁾, Nak-Kyung Kim, 김웅진²⁾, Ung-Jin Kim, 주용선³⁾, Yong-Sun Joo, 김성규⁴⁾, Sung-Kyu Kim

- 1) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, SungKyunKwan Univ.
- 2) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, SungKyunKwan Univ.
- 3) 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology
- 4) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, SungKyunKwan Univ.

SYNOPSIS : The Smart bi-directional pile load test with variable end plate overcomes the shortcoming of the Osterberg cell test. It is possible that the ultimate bearing capacity of piles can be known by using two different end plates. The first step is to measure end bearing capacity with smaller end plate and the second step is similar to the conventional O-cell test. In this study, model test was performed to evaluate the smart bi-directional pile load test in sand. Vertical displacement of the model pile were measured at the axial loading condition.

Keywords : Smart Bi-directional Pile load test, Scale effect, Equivalent Load-Settlement Curve

1. 서 론

일반적인 말뚝재하시험은 두부 정재하 말뚝재하시험이 지반공학분야에서 가장 신뢰성이 뛰어난 시험 방법으로 말뚝의 두부에 하중을 가하여 시험을 실시한다. 정재하 실험은 하중을 가하기 위한 반력시스템과 두부에 하중을 재하 할 장비가 요구된다. 재하 하중이 큰 경우, 정재하 시험은 공간 활용성과 안전성 측면에서 부적합한 요인이 있으므로 Osterberg에 의하여 개발된 Osterberg cell을 이용한 양방향말뚝재하시험법이 대형 말뚝 기초 재하시험에 빈번히 사용되고 있다. 양방향 말뚝재하시험은 중량/대규모의 반력시스템이나 재하프레임이 불필요함은 물론 말뚝의 선단부에서 상향과 하향으로의 하중을 동시에 작용시켜 이때의 변위를 각각 측정함으로써 한번의 말뚝재하시험으로 시험을 완료할 수 있는 장점이 있다. 그러나 국내 지반조건 및 말뚝 설계·시공 특성 상 경질의 지반에 근입할 경우에는 말뚝의 극한선단지지력이 극한주면마찰력 보다 일반적으로 월등히 크고 이러한 경우에 기존의 양방향 말뚝재하시험을 실시할 경우 극한선단지지력까지 하중을 재하하기 전에 주면마찰력이 극한에 도달하여 시험은 중단하게 된다. 이와 같은 경우 양방향말뚝 재하시험을 통하여 산정된 극한지지력은 실제 극한지지력보다 작게 되고 그러므로 실제적인 말뚝 설계에 불확실성을 가지게 된다. 현재 양방향 말뚝 재하시험 결과를 바탕으로 극한 지지력을 산정하는 방법은 선단지지력 측과 주면마찰 측 둘 중에 한 쪽이라도 극한에 도달하게 되어 시험이 중단된 시점부터는 외삽에 의한 추정치로써 극한지지력을 산정하는 방법을 적용하고 있다.

2. Smart Bi-Directional Pile Load Test 개요

Smart Bi-directional pile load test는 축소선단 재하장치를 이용한 실험으로서 2단계에 걸쳐 실시되는 시험법이다. 1단계로 선단에서 첫 번째 하중재하를 하고 2단계로 기존의 O-Cell 시험과 같이 양방향으로 하중을 재하한다. 그림 1은 기존 O-cell test와 Smart pile load test간의 차이점을 보여준다.

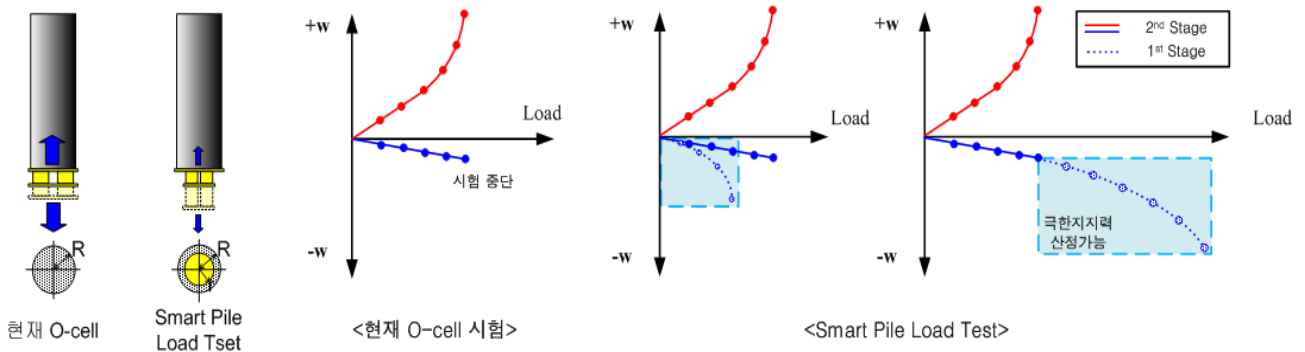


그림 1. Smart Pile Load Test와 기존 O-Cell Pile Load Test의 차이점

Smart 양방향말뚝재하시험에서는 축소된 선단을 이용하여 하중을 재하하고, 이를 이용하여 말뚝전체 선단 직경에 대한 극한선단지지력을 추정해야 하므로 말뚝선단의 크기변화에 따른 선단지지력의 연구는 매우 중요하다. 본 연구에서는 Smart 양방향말뚝재하시험에서 축소선단의 직경변화에 따른 극한지지력의 변화를 분석하기 위하여 모형시험을 수행하였다. 차원해석을 통한 상사이론을 배경으로 모형말뚝을 설계하고, 모형지반의 상대밀도와 말뚝의 축소선단의 직경을 변화하여 모형시험을 수행하여 가변선단양방향말뚝시험에서의 치수효과에 대해 분석하고, Smart 양방향말뚝시험의 결과를 이용한 말뚝의 극한지지력 산정법을 제안하였다.

3. Smart 양방향 말뚝재하시험의 모형시험

가변선단양방향말뚝재하시험의 모형시험을 수행하기 위하여 모형을 상사법칙을 바탕으로 제작하였으며 상대밀도 40%에서 모형시험을 수행하였다.

3.1 모형말뚝의 설계

본 연구에서는 Buckingham π -theory를 바탕으로 차원해석을 실시하였다. 말뚝의 지배방정식을 이용하여 무차원 매개변수를 구하고, 이로부터 모형말뚝의 제원을 결정하였다. 말뚝을 일차원 요소로 분할하고 지반을 스프링으로 모사하면 말뚝의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\pi Dk}{AE} u = 0 \quad (1)$$

지배방정식을 통해 산출한 무차원 계수를 이용하여 길이 1.0m, 직경은 0.1m의 모형말뚝을 제작하였다. 모형말뚝은 아크릴로 제작 되었으며 지반조성에는 주문진 표준사를 사용하였으며 토조는 직경 1m, 높이 1.5m의 강철 원통형 토조를 사용하였다.

3.2 모형시험 절차

본 시험에서는 지반 조건과 선단축소비에 따른 말뚝의 극한선단지지력과 극한마찰지지력을 측정하기 위하여 가변선단의 직경을 10mm, 15mm, 20mm로 변화시키고 지반의 상대밀도가 40%로 강사하여 각 조건에서 시험을 실시하였다. 그리고 말뚝전체선단의 극한지지력을 구하기 위하여 정재하 시험을 추가로 수행하였다. Smart Bi-directional Pile Load test 시험 절차는 하부실린더를 이용하여 축소선단에 하중을 재하하는 1단계와 상부실린더를 이용하여 본선단에 하중을 재하 하는 2단계로 나누어 수행되었다 (그림 2). 하중재하 방식은 ASTM D1143-81에서 규정하고 있는 급속재하방식에 따라 각 하중재하단계마다 설계하중의 5%의 하중을 증가시켜 하중을 재하 하였고, 각 하중단계별로 0.5분, 1분, 2분, 4분이 후의 변위를 가변선단과 말뚝선단, 말뚝두부에서 각각 LVDT를 이용하여 분당 60회로 측정하였다. 그림 3은 모형 시험 계측 모습을 보여주고 있다.

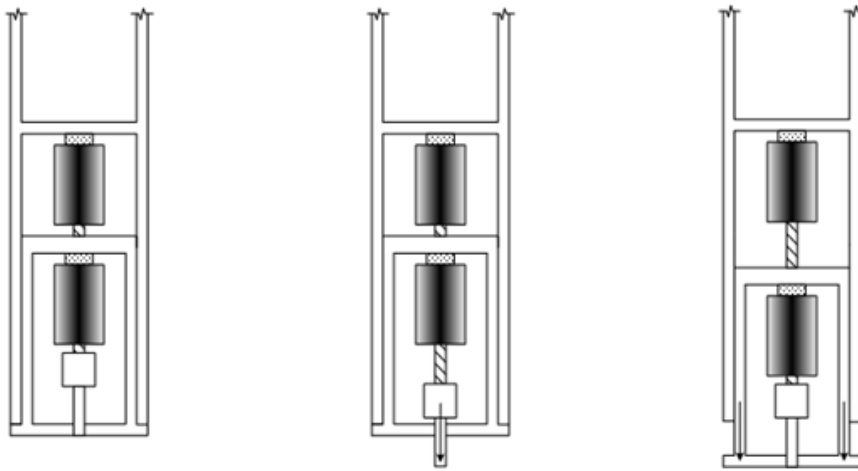


그림 2. 모형시험의 절차



그림 3. 모형시험 사진

4. 모형시험결과

모형시험 결과 중 상대밀도 40%에 대한 재하시험결과를 하중-변위곡선으로 나타내면 그림 4와 같다. 그림 5는 동일한 지반조건과 말뚝크기에서 수행한 정재하시험 결과이다.

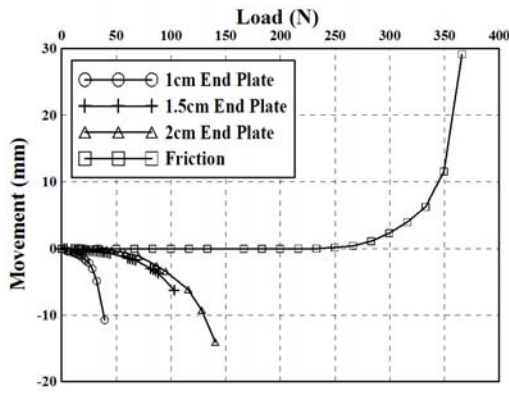


그림 4. Smart 양방향 하중-변위 실험

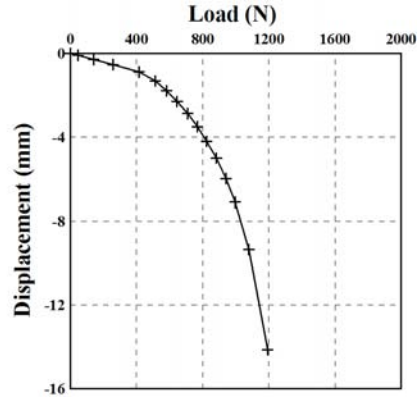


그림 5. Static Pile Load Test

Chin's method를 사용하여 산정한 축소선단비(B/P)에 따른 극한하중은 표 1과 같다.

표 1. 상대밀도 40%에서 극한하중

상대밀도(%)		40
주면마찰력 (N)		363.3
선단지지력 (N)	축소선단직경10mm (B/P=0.1)	시험1 : 54.4 시험2 : 50.3
	축소선단직경15mm (B/P=0.15)	시험1 : 82.9 시험2 : 77.7
	축소선단직경20mm (B/P=0.2)	시험1 : 115.4 시험2 : 118.3
정재하시험 (N)		1420.4

그림 5에서 볼 수 있듯이 선단지지력은 선단 축소비(B/P)가 감소함에 따라 선단지지력은 증가하고 낮은 선단축소비에서 급격히 증가하는 경향을 보인다.

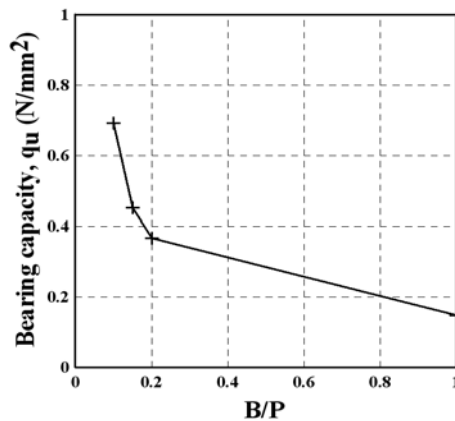


그림 6. 축소선단비에 따른 지지력

5. Smart Bi-directional Pile Load test 등가 하중-변위곡선 산정

Smart 양방향 말뚝재하시험의 결과를 이용하여 등가 하중-변위 곡선을 산정하기 위해 축소선단의 하중-변위 곡선을 변환하여 말뚝 전체선단의 하중-변위 곡선을 추정하였다. 추정된 하중-변위 곡선은 그림 7에 나타나 있다. 그림 7의 하중-변위 곡선으로부터 같은 상향변위와 하향변위에 해당하는 하중을 더하여 등가 하중-변위 곡선을 산정하였다. 각각의 등가 하중-변위 곡선과 정재하 시험의 결과를 비교하여 그림 8에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 등가 하중-변위 곡선과 정재하 시험결과와 거의 일치하는 경향을 보였다.

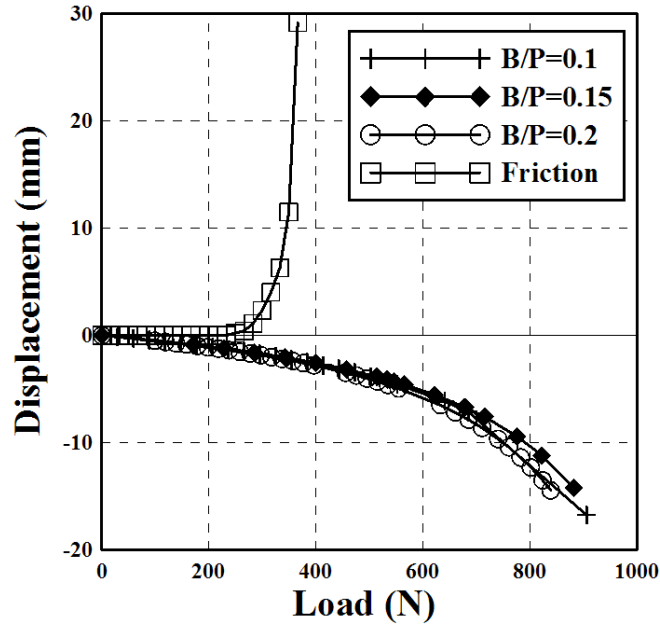
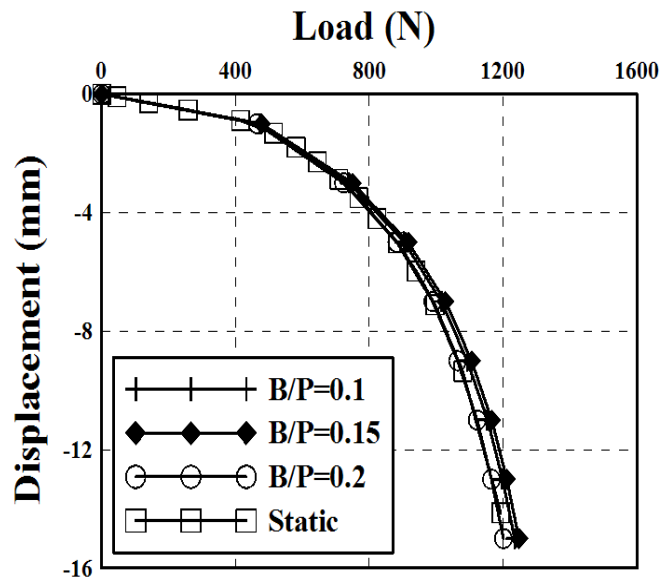


그림 7. 변환된 하중 변위곡선



6. 결론

본 연구에서는 Smart 양방향 말뚝재하시험의 결과 값을 바탕으로 말뚝의 극한 지지력을 산정하는 방법을 연구하기 위하여 실내 모형시험을 수행하였다. 그 결과 지반상태와 선단의 축소비에 따른 선단지지력의 변화를 확인할 수 있었다. 또한 실내 모형시험의 데이터를 토대로 Smart 양방향 말뚝재하시험에서의 말뚝의 극한지지력 산정법을 제안하고 시험결과에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 축소선단의 극한지지력은 선단축소비가 작을수록 급격히 증가하는 것을 확인하였다.
2. 모형시험 데이터에 등가 하중-변위 곡선 산정법과 Smart 양방향 말뚝재하시험의 결과를 이용한 등가 하중-변위곡선을 작성하였다. 모형시험에서는 등가 하중-변위 곡선과 정재하 시험결과가 거의 일치하는 경향을 보였다.
3. 지반의 조밀도에 따른 축소선단의 극한지지력 등을 확인하기 위해 다양한 상대밀도에서 추가적인 연구가 진행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 기초과학연구과제(KRFB00797)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 신방웅, 이광동, 오세욱, 안병철(1998), “말뚝직경의 변화가 지지력에 미치는 영향”, *건설기술논문집*, Vol. 17, No.2, pp. 63-71.
2. 이인모, 이명환, 백세환, 이정학, 김동현, 임병석(1992), “모형토조실험을 통한 말뚝지지력의 평가”, *한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집*, pp. 13-40
3. 이인모, 이명환, 백세환, 김동현, 이정학(1992), “하중방향(압축-인발)과 말뚝 직경이 말뚝의 지지력에 미치는 영향에 관한 연구”, *한국지반공학회지*, 8권, 3호, pp. 13.23.
4. American Society for Testing and Materials ASTM D1143-81(1989). “Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load”, Vol. 04.08, Philadelphia, pp. 179-189.
5. Chin, F. K.(1970), “Estimate of the Ultimate Load of Piles not Carried to Failure” *Proceedings 2nd Southeast asian Conference on Soil Engineering*, singapore, pp. 81-90.
6. Chin, F. K.(1971), “Discussion, Pile Test - Arkansas River Project”, *J.soil Mech. Found. Div. ASCE*, Vol. 97, No. SM6, pp.930-932.
7. Fleming, W. G. K.(1992), “A new method for single pile settlement prediction and analysis”, *Geotechnique* 42, No. 3, pp. 411-425.
8. Osterberg, J. O.(1984). “New Device for Load Testing Driven Piles and Drilled Shafts Separates Friction and End Bearing”, *Proceedings : International Conference on Piling and Deep Foundations*, London, A. A. Balkema, p. 421.
9. Prakash, S. and Sharma, H. D.(1990), “Pile Foundations in Engineering Practice”, *John Wiley and sons, Inc. NY, NY*.