

가변선단재하판을 이용한 양방향말뚝재하시험의 모형실험 Model Test of O-Cell Pile Load Test with Variable End Plate

주용선¹⁾, Yong-Sun Joo, 김낙경²⁾, Nak-Kyung Kim, 김성규³⁾, Sung-Kyu Kim, 김웅진⁴⁾, Ung-Jin Kim, 박종식⁵⁾, Jong-sik Park

- ¹⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ.
²⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ.
⁴⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ.
⁵⁾ 한화건설 기술연구소 토목연구팀 선임연구원, Senior Researcher, Hanwha Institute of Construction Technology, Hanwha E&C Co, Ltd.

SYNOPSIS : Bi-directional load test is one of O-cell tests. The O-cell test is a system which may be used for performing static load tests on cast in situ reinforced concrete bored piles. The technique was devised and developed by Osterberg of Northwestern University(USA) and has been in use around the world. The principle of the method is that an O-cell is installed in a cast in situ bored pile base. Once the pile concrete reaches its design strength the cell is connected to an hydraulic pump and pressured. Pressurization causes the cell to expand, developing an upward force on the section of pile above the cell loads, pile movements and strains within the pile then enable the capacity of the pile and its load settlement curves to be ascertained. The O-cell pile load test with variable end plate is operated on second steps - the first step is to confirming end bearing capacity with variable end plate and the second step is similar to the conventional O-cell test. In the study, To calculate ultimate capacity of bi-directional load test using model with the pile with variable end plate O-cell.

Keywords : Variable end plate, O-cell, Model test, Ultimate bearing capacity

1. 서론

양방향말뚝재하시험은 말뚝정재하시험법 중 최근 들어 성행하고 있는 시험법이다. 양방향말뚝재하시험은 Osterberg에 의하여 개발된 Osterberg Cell을 이용한 시험법(이후 O-cell 시험법)으로 말뚝의 선단부에서 상향과 하향으로의 하중을 동시에 작용시켜 이때의 변위를 각각 측정하는 말뚝재하시험으로 말뚝에 하중을 가하기 위한 반력장치가 불필요하기 때문에 경제적이고 안전한 시험이 가능한 장점을 가지고 있다. 가변선단양방향말뚝재하시험은 지반종류에 따라 그 크기가 결정된 선단재하판을 이용하여 선단에서 첫 번째 단계의 재하를 하고 주변마찰지지력 산정을 위하여 두 번째 단계의 재하를 하는 시험법으로, 암질지반에 근입된 말뚝의 극한선단지지력과 극한마찰지지력을 시험을 통하여 산정하기 위한 시험이다. 본 연구에서는 가변선단을 이용한 양방향말뚝재하시험에서 지반종류, 선단축소비에 따른 말뚝의 극한지지력을 분석하기 위하여 모형시험을 수행하였다. 모형시험은 차원해석을 통한 상사이론을 배경으

로 한 모형말뚝을 설계하여 상대밀도에 따른 극한지지력의 변화와 가변선단의 면적비에 따른 극한선단 지지력의 변화를 분석하여 이를 토대로 각 상대밀도에 따른 말뚝의 극한지지력을 산정하였다.

2. 말뚝의 지지력과 Scale effect

말뚝이 한계근입비로 설치된 경우 침하량비로 단위선단지지력을 비교하였을 때 느슨한 지반상태에서는 말뚝직경이 증가할수록 단위선단지지력이 크게 나타나지만, 조밀한 지반상태에서는 말뚝직경이 일정 이상 증가하게 되면 말뚝의 지지력은 직경의 크기에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(신방웅 외, 1998).

또한 이인모 등(1992)의 연구결과에서는 말뚝직경이 작은 경우에 대한 말뚝직경이 큰 경우의 선단지지력의 비는 상당히 큰 분산을 나타내며, 말뚝직경의 4배 이상 관입된 말뚝의 경우에는 말뚝선단부의 크기에 대한 선단지지력의 변화가 크지 않다고 결론짓고 있다.

하중에 의해 기초지반이 파괴되는 형태는 그림 1의 (a)~(c)처럼 일반전단 파괴(a), 국부전단 파괴(b), 편칭(Punching)전단 파괴(c)의 세 종류로 나누어진다(Vesic, 1973). 일반전단 파괴는 기초판이 표면재하시에 일반적으로 일어나는 모습으로, 하중이 어떤 임계점에 달한 이후에 기초침하는 급격하게 증가하여 기초판 주위의 토질이 현저히 부풀어 오른다. 국부전단파괴는 그 형태가 기초판 바로 밑에만 역학적 상태로 이루어지는 것으로 이때에는 기초판 밑의 썩기 부분은 일반전단 파괴시와 같고, 기초판 주위가 부풀어 오르는 모습도 눈으로 확인할 수 있다. 기초판의 침하는 일반전단 파괴처럼 응력이 어떤 임계점에 달하면 급격하게 증가하지 않고, 일반전단 파괴시와 편칭전단 파괴시의 중간 형태를 나타낸다. 편칭전단 파괴는 기초판 주위의 토질이 부풀어 오르는 모습을 관측하기에 힘들며, 기초침하도 급격하지 않고 기초판이 수직방향으로 침하할 때 계속해서 추가하중이 요구되는 경우이다. 조밀한 지반에 비압축성 토질로 그 전단력이 큰 경우에는 일반전단 파괴를 일으키며, 느슨한 지반에 압축성 토질일 때는 편칭전단 파괴를 일으킨다. 그러나 단단한 지반의 경우에도 그 기초판의 위치가 상대적으로 깊이 놓여 있으면 편칭전단 파괴를 일으킨다.

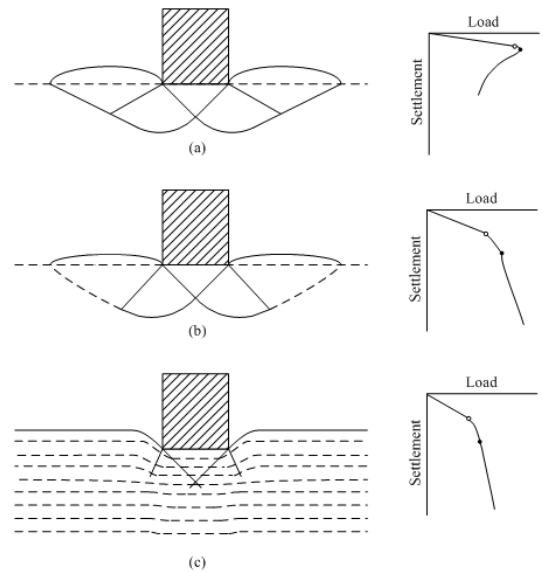


그림 1. 기초의 파괴형태에 따른 지지력

3. 가변선단양방향말뚝재하 모형시험

가변선단양방향말뚝재하 모형시험을 수행하기 하여 모형을 상사법칙을 바탕으로 제작하고 상대밀도를 느슨, 중간, 조밀한 조건으로 변화시켜 가변선단의 크기와 상대밀도에 따른 재하시험을 수행하였다.

3.1 차원해석 및 상사

모형시험을 하기 위해서는 모형의 물성 및 제원을 결정하기 위하여 차원해석을 통한 상사법칙을 적용하여야 한다. 본 연구에서는 Buckingham π -theory를 바탕으로 차원해석을 실시하였다. 차원해석의 과정은 다음과 같다.

말뚝의 지배방정식을 이용하여 무차원 매개변수를 구하고, 이로부터 모형말뚝의 제원을 결정하였다. 말뚝을 일차원 요소로 분할하고 지반을 스프링으로 모사하면 말뚝의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

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

여기서 $z(m)$ 는 말뚝의 길이방향 좌표, $u(m)$ 는 변위, $D(m)$ 는 말뚝의 직경, $k(kN/m^2)$ 는 지반반력계수, $A(m^2)$ 는 말뚝의 단면적, $E(kN/m^2)$ 는 말뚝의 탄성계수이다. 무차원 계수를 $\pi_1 = u/D$, $\pi_2 = z/L$ 로 놓으면 식 (1)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 \pi_1}{d\pi_2^2} - \frac{\pi kDL^2}{AE} \pi_1 = 0 \quad (2)$$

식 (2)의 두 번째 π_1 항의 계수로부터 π_3 를 결정할 수 있고, 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\pi_3 = \frac{\pi kDL^2}{AE} \quad (3)$$

차원해석을 통해 얻은 무차원계수 π_3 를 이용하여 모형말뚝의 길이는 1.0m, 직경은 0.1m로 결정하였다. 차원해석을 통하여 모형말뚝의 재료는 아크릴로 결정하였다. 지반조성에는 주문진 표준사를 사용하였으며 토조는 강철 원통형이며 토조직경은 높이는 로써 각각 말뚝직경의 10배와 10배를 만족하도록 하였다. 가변선단은 그림 1과 같이 모형말뚝 본체와 가변선단에 하중을 재하할 수 있도록 압축공기압실린더를 모형말뚝내부에 설치하였다. 본선단과 가변선단의 변위를 측정하기 위하여 본선단과 가변선단에 변위봉을 연결하여 각각의 변위를 측정할 수 있도록 하였다. 가변선단의 축소비는 말뚝직경의 1/10과 1/5의 조건으로 제작하였다.

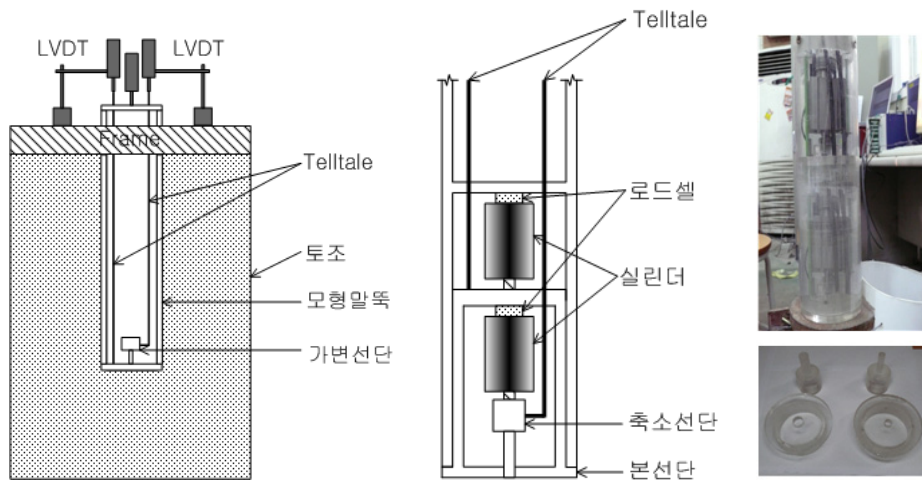


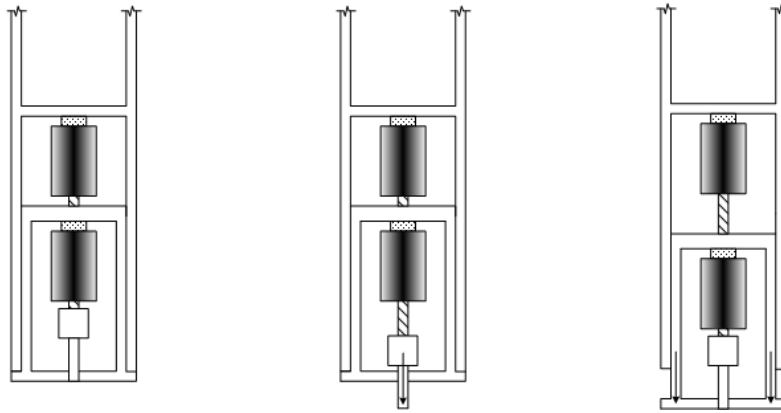
그림 2. 시험장치의 개념도 및 모형 사진

3.2 시험 조건

본 시험에서는 가변선단재하판을 이용한 양방향말뚝재하시험에서 지반조건과 선단축소비에 따른 말뚝의 극한선단지지력과 극한마찰지지력을 측정하기 위하여 가변선단의 직경을 말뚝직경의 1/10과 1/5로 변화시키고 지반의 상대밀도가 40%, 60%, 80%로 조성이 되도록 강사장치를 이용하여 강사하여 각 조건에서 시험을 실시하였다.

시험방법은 하부실린더를 이용하여 가변선단에 하중을 재하하는 1단계와 상부실린더를 이용하여 본선단에 하중을 재하 하는 2단계로 나누어 수행되었다(그림 3). 하중재하 방식은 ASTM D1143-81에서 규

정하고 있는 급속재하방식에 따라 각 하중재하단계마다 설계하중의 5%의 하중을 증가시켜 하중을 재하하였고, 각 하중단계별로 0.5분, 1분, 2분, 4분이 후의 변위를 가변선단과 말뚝선단, 말뚝두부에서 각각 LVDT를 이용하여 분당 60회로 측정하였다.



(a) 하중재하전 (b) 1단계 하중재하 (c) 2단계 하중재하
그림 3. 가변선단양방향 모형말뚝시험의 절차

3.3 설계하중 산정

재하시험의 하중단계를 결정하기 위하여 가변선단의 선단지지력의 설계하중과 주변마찰력의 설계하중은 Meyerhof의 지지력공식을 이용하여 각각 식 (4)와 식 (5)를 산정하였다.

$$Q_p = A_p \sigma_v' N_q \quad (4)$$

$$Q_f = p K_s \tan \delta \sum_{L=0}^{L=L} \sigma_{vl}' \Delta L \quad (5)$$

여기서 A_p 은 가변선단의 면적, σ_v' 은 말뚝선단에서의 유효상재압력, p 는 말뚝의 둘레, K_s 는 토압계수, σ_{vl}' 은 깊이 l 에서의 유효상재압력, L 은 말뚝의 길이이다. N_q 값은 Meyerhof(1976)가 제안한 지지력계수를 적용하고, 말뚝과 흙의 마찰각 δ 는 아크릴과 주문진 표준사의 직접전단시험으로부터 구한 아크릴과 모래의 마찰각을 구한 결과이며 이는 각 상대밀도에 따른 내부마찰각의 1/2과 거의 유사하였다. 설계하중 계산에 적용된 지반물성치는 표 1과 같다.

표 1. 상대밀도와 가변선단축소비에 따른 설계하중

설계정수		상대밀도		
		40%	60%	80%
단위 중량(kN/m ³)		1.52	1.56	1.58
내부마찰각(degree)		31.8	35.1	37.5
N _q		30	35	42
하중(N)	주변마찰측	332.68	373.00	416.59
	가변선단축소비 1/10	20.65	30.75	45.91
	가변선단축소비 1/5	85.59	120.99	183.62

4. 시험 결과 및 분석

1단계 가변선단재하판에 의한 시험 결과는 그림 4와 같다. 극한선단지지력은 P-S법에 의하여 산정하였으며 시험 결과, Meyerhof의 제안식에 의하여 산정한 설계하중과 유사하였다.

가변선단에 의한 극한지지력의 Scale effect는 면적에 비례하지는 않았다. 가변선단의 직경/말뚝직경과 실험을 통하여 확인된 가변선단극한지지력의 관계(선형)를 통하여 말뚝직경 10cm에서의 선단극한지지력은 상대밀도 40%일때는 (직경비*0.98)², 60%일때는 (직경비*0.945)², (직경비*0.9)²의 관계로 증가되어 면적비로 증가하지 않음을 알 수 있었다.

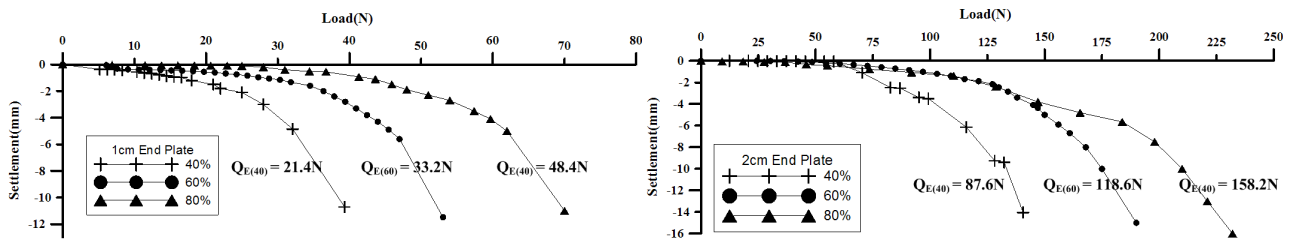


그림 4. 상대밀도에 따른 가변선단재하에 의한 하중-침하 곡선

시험 결과에 의한 가변선단의 직경/말뚝직경과 극한지지력의 증가비를 고려하여 모형말뚝의 극한지지력을 산정하기 위해서 Lee and Park(2008)이 제안한 O-cell test를 이용한 말뚝의 극한지지력 산정법을 적용하였다. 가변선단극한지지력과 말뚝직경 10cm에서의 선단극한지지력과의 관계를 적용한 하중-변위 곡선은 그림 5와 같다.

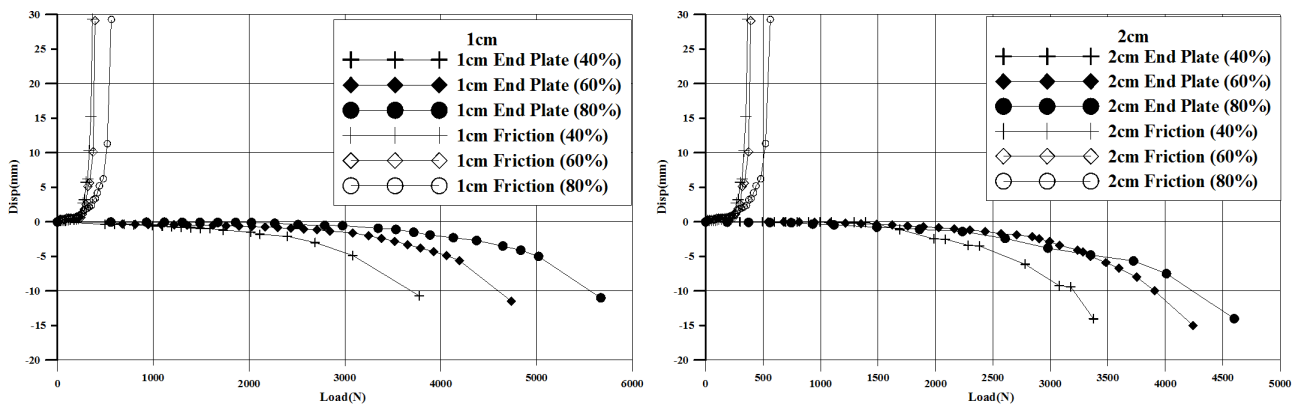


그림 5. 가변선단재하를 이용하여 산정한 극한선단지지력을 고려한 양방향말뚝재하시험 결과

모형시험 결과를 통하여 작도한 등가하중-변위 곡선은 그림 6과 같다. 결과에 의하면 각각의 상대밀도에서의 말뚝의 극한지지력은 가변선단재하판의 직경을 달리한 결과와 유사한 경향을 나타냈다.

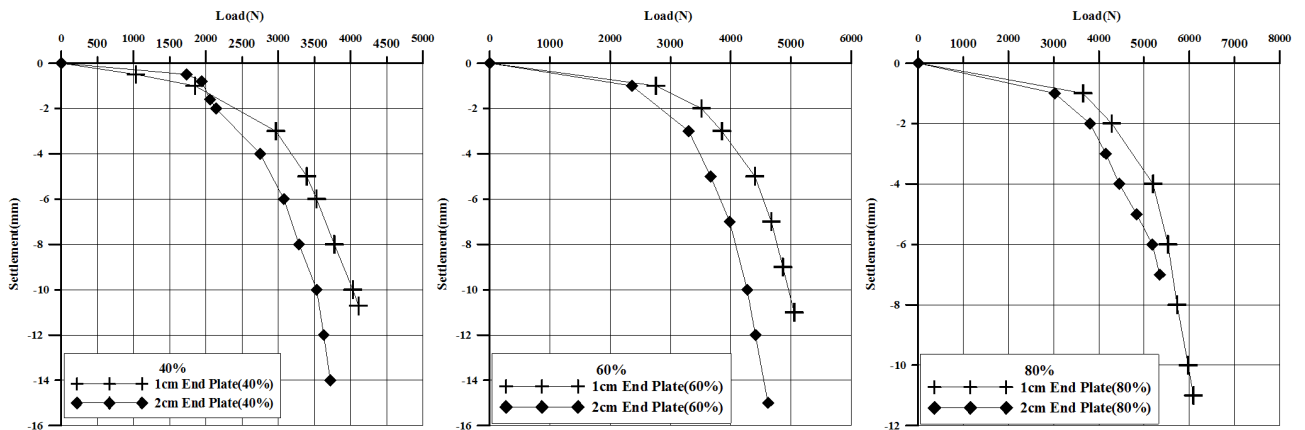


그림 6. 상대밀도에 따른 등가하중-변위 곡선

5. 결 론

본 연구에서는 가변선단재하판을 이용한 양방향말뚝재하의 모형시험 수행한 결론은 다음과 같다.

1. 가변선단재하판을 이용한 양방향말뚝재하 모형시험을 성공적으로 수행하였다.
2. 가변선단재하판을 이용하여 주문진 표준사를 강사하여 느슨, 중간, 조밀의 상대밀도를 조성하여 선단극한지지력을 시험한 결과 상대밀도 40%일때는 (직경비*0.98)², 60%일때는 (직경비*0.945)², (직경비*0.9)²의 관계로 증가되어 단순하게 면적비로 증가하지 않음을 알 수 있었다.
3. 가변선단재하판을 이용한 양방향말뚝재하의 모형시험을 통하여 말뚝의 극한지지력 산정한 결과 그 결과가 유사하고 허용오차범위내에 있으므로 실제 수행이 가능함을 알 수 있었다.
4. 추후 가변선단재하판의 직경을 결정하고 또한 시험을 통하여 측정된 극한지지력을 실제 말뚝직경의 선단극한지지력으로 산정하기 위한 심도있는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 기초과학연구과제(KRFB00797)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김낙경 (2001), “풍화토 지반에 설치된 앵커의 인발특성”, 한국지반공학회지논문집, 제17권, 4호. pp. 231-239
2. 김성규 (2000), “압축형 그라운드 앵커의 하중전이에 관한 연구” 공학석사 학위논문, 성균관 대학교
3. 신방웅, 이광동, 오세욱, 안병철 (1998), “말뚝직경의 변화가 지지력에 미치는 영향”, 건설기술논문집, Vol. 17, No. 2, pp. 63-71
4. ASTM D1143-81 (Reapproved by 1994) (1994), “Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load”.
5. Briaud, J. L., Powers, W. F., Weatherby, D. E. (1998), “Should Grouted Anchors Have Short Tendon Bond Length?”, ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 2, pp. 110-119
6. Kim, Nak-kyung (2000), “Load Transfer on Ground Anchors in Weathered Soil”, Ground International Conf. On Improvement Technique, Singapore, pp.217-226.
7. Kim, Nak-Kyung (2003), “Performance of Tension and Compression Anchors in Weathered Soil”, ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No.2, pp. 1138-1150
8. Littlejohn, G. S. (1970a), “Soil Anchors”, Proceedings of a Conference Organized by the Institution of Civil Engineers in London, pp. 33-44
9. Littlejohn, G. S. (1980), “Design Estimation of the Ultimate Load-Holding Capacity of Ground Anchors”, Journal of the Boston Society of Civil Engineers Section, American Society of Civil Engineers, v.67, no.3, pp. 131-154
10. Lee, Jong-Sub and Park, Yung-Ho (2008), “Equivalent Pile Load-head Settlement Curve Using a Bi-directional Pile Load Test”, Computers and Geotechnics 35 (2008), pp. 124-133