

가변선단재하판을 이용한 양방향말뚝재하시험의 치수 효과 A Scale-Effect of O-Cell Pile Load Test with Variable End Plate

주용선¹⁾, Yong-Sun Joo, 김낙경²⁾, Nak-Kyung Kim, 김웅진³⁾, Ung-Jin Kim, 박종식⁴⁾, 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.

³⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ.

⁴⁾ 한화건설 기술연구소 토목연구팀 선임연구원, Senior Researcher, Hanwha Institute of Construction Technology, Hanwha E&C Co, Ltd.

SYNOPSIS : The 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 the bi-direction can be known by using the loading of the end plate and two step procedures. 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, operated with end plate of 3 type on sand layer according to the relative density, loose, medium and dense conditions.

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

1. 서론

Osterberg에 의하여 개발된 양방향말뚝재하시험은 말뚝정재하시험법중 최근 가장 선행하는 시험법으로 말뚝의 선단부에서 상향과 하향으로의 하중을 동시에 작용하여 이때의 변위를 각각 측정하는 시험법이다. 말뚝에 하중을 가하기 위한 추가적인 반력장치가 불필요하여 경제적이고 안전한 시험이 가능하나 지하로 갈수록 경질의 지반이 형성된 국내 지반에 적용할시 선단의 극한지지력을 정확히 측정할 수 없다는 한계점이 있다. 가변선단양방향말뚝재하시험은 개선된 양방향말뚝재하시험으로 지반종류에 따라 그 크기가 결정된 선단재하판을 이용하여 선단에서 첫 번째 하중재하를 하고 주변마찰지지력 산정을 위하여 두 번째 단계의 하중재하를 하는 시험법으로 암질지반에 근입된 말뚝의 극한선단지지력과 극한마찰지지력을 산정하기 위한 시험법이다(그림 1). 가변선단양방향말뚝재하시험에서는 축소된 선단을 이용하여 하중을 재하하고, 이를 이용하여 말뚝전체선단 직경에 대한 극한선단지지력을 추정해야 하므로 말뚝선단의 크기변화에 따른 선단지지력의 연구는 매우 중요하다. 본 연구에서는 가변선단양방향말뚝재하시험에서 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 분석하였다.

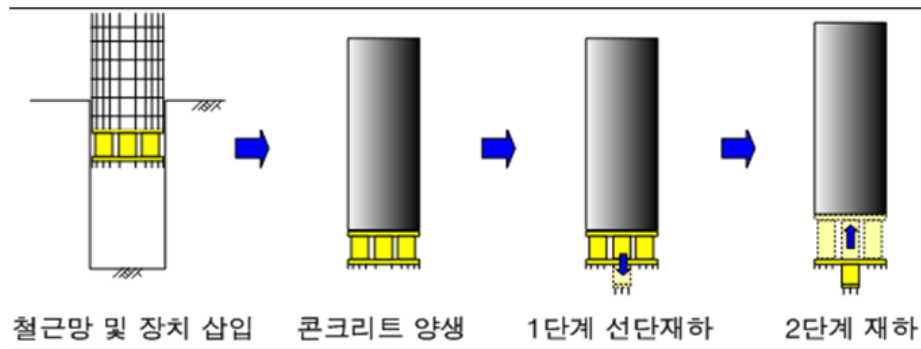


그림 1. 가변선단재하관을 이용한 양방향말뚝재하시험의 시험단계

2. 말뚝의 Scale effect

소성이론을 근거로 한 말뚝의 지지력해석에서 말뚝의 단위면적당 선단지지력은 식 (1)로 표현된다.

$$q_p = cN_c + \sigma' N_q + \frac{1}{2} \gamma' DN_\gamma \quad (1)$$

여기서 q_p : 단위면적당 선단지지력

c : 흙의 점착력

σ' : 말뚝선단부에서의 유효수직응력

γ' : 흙의 유효단위중량

D : 말뚝의 직경

N_c, N_q, N_γ : 지지력 계수

식 (1)에서 $\frac{1}{2} \gamma' DN_\gamma$ 는 $\sigma' N_q$ 값에 비하여 미소하므로 사질토 지반에서 말뚝의 선단지지력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_p = A_p q_p = A_p \sigma' N_q \quad (2)$$

여기서 Q_p : 말뚝선단부의 지지력

A_p : 말뚝선단부의 면적

균질한 사질토 지반에서 지지력계수 N_q 는 일정한 값을 가지게 되고 말뚝의 선단지지력은 관입깊이에 따라 선형증가하게 된다. 따라서 이론적인 말뚝해석시에는 말뚝크기에 관계없이 선단지지력이 계산된다.

1950년대말 Kerisel은 이론해석과는 상이한 실측치들을 보고하였다. 시험결과에서 중요한 점은 말뚝의 선단지지력이 일정한 관입깊이까지는 선형증가하나 그 이상이 되면 일정한 값에 수렴한다는 것이다. 이 이론은 1960년대에 Vesic에 의해 확인되었으며 말뚝의 지지력이 수렴할 때의 깊이를 한계관입깊이 (critical penetration depth)라 한다. Kerisel은 또한 말뚝의 선단지지력은 말뚝의 직경이 거르면 상대적으로 낮은 극한값을 갖고, 작은 직경에서는 높은 극한값을 가진다고 하였다.

신방응 등의 연구결과에서는 말뚝이 한계관입비로 설치된 경우 침하량비로 단위선단지지력을 비교하였을 때 느슨한 지반상태에서는 말뚝직경이 증가할수록 단위선단지지력이 크게 나타나지만, 조밀한 지반상태에서는 말뚝직경이 일정이상 증가하게 되면 말뚝의 지지력은 직경의 크기에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(1998). 또한 이인모 등의 연구결과에서는 말뚝직경이 작은 경우에 대한 말뚝직경이 큰 경

우의 선단지지력의 비는 상당히 큰 분산을 나타내며, 말뚝직경의 4배 이상 관입된 말뚝의 경우에는 말뚝선단부의 크기에 대한 선단지지력의 변화가 크지 않다고 결론짓고 있다.(1992)

3. 가변선단양방향말뚝재하시험의 모형시험

가변선단양방향말뚝재하시험의 모형시험을 수행하기 위하여 모형을 상사법칙을 바탕으로 제작하고 상대밀도를 느슨, 중간 조밀한 조건으로 변화시켜 재하시험을 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 (3)과 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\pi Dk}{AE} u = 0 \quad (3)$$

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 (3)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 \pi_1}{d\pi_2^2} - \frac{\pi k D L^2}{AE} \pi_1 = 0 \quad (4)$$

식 (4)의 두 번째 π_1 항의 계수로부터 π_3 를 결정할 수 있고, 식 (5)과 같이 표현된다.

$$\pi_3 = \frac{\pi k D L^2}{AE} \quad (5)$$

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 직경 1m, 높이 1.5m의 강철 원통형 토조를 사용하였다.



그림 2. 모형말뚝과 가변선단

3.2 모형시험 절차

본 시험에서는 가변선단재하관을 이용한 양방향말뚝재하시험에서 지반조건과 선단축소비에 따른 말뚝의 극한선단지지력과 극한마찰지지력을 측정하기 위하여 가변선단의 직경을 10mm, 15mm, 20mm로 변화시키고 지반의 상대밀도가 40%, 60%, 80%로 조성이 되도록 강사장치를 이용하여 강사하여 각 조건에서 시험을 실시하였다. 그리고 말뚝전체선단의 극한지지력을 구하기 위하여 각 상대밀도별로 정재하시험을 수행하였다.

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

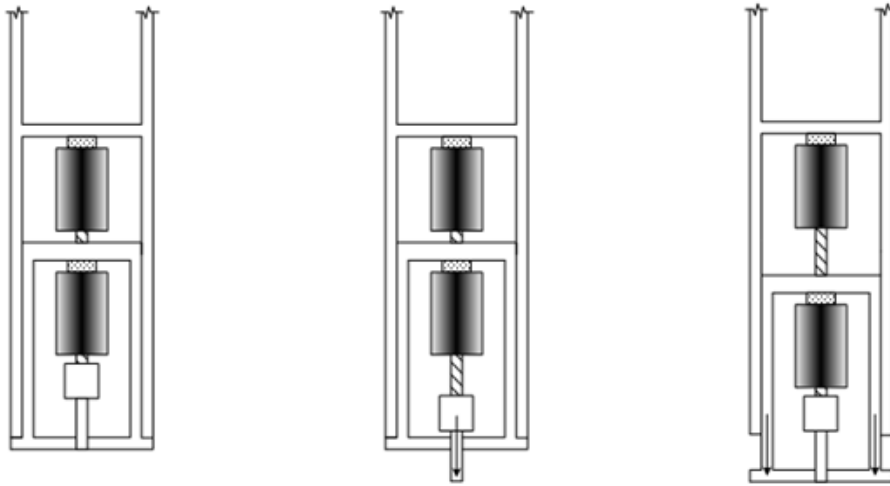


그림 3. 모형시험의 절차

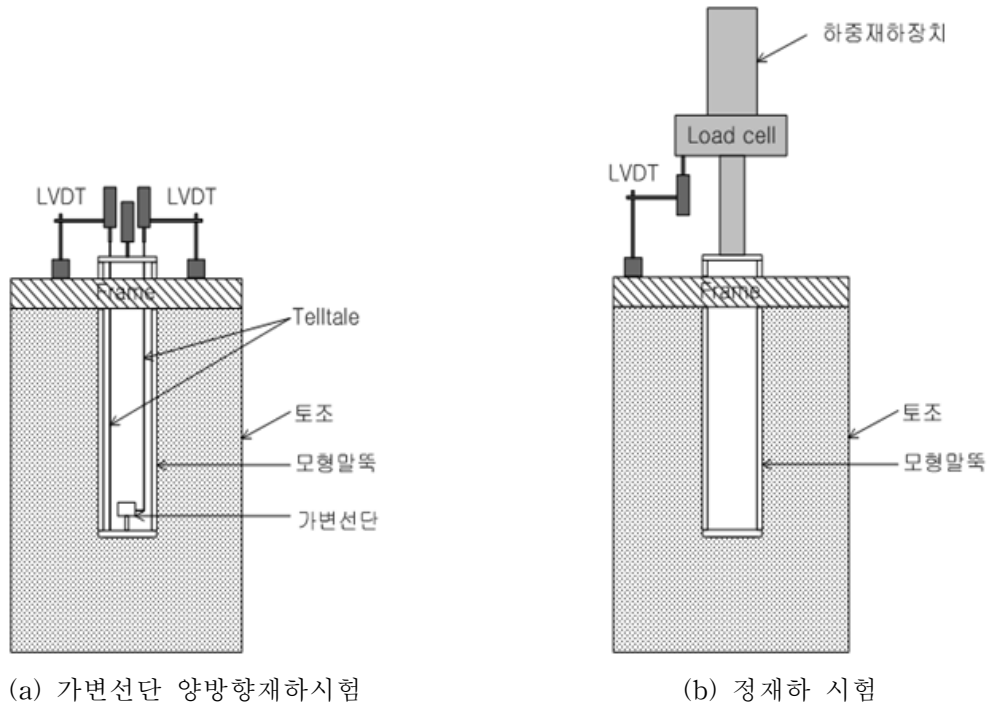
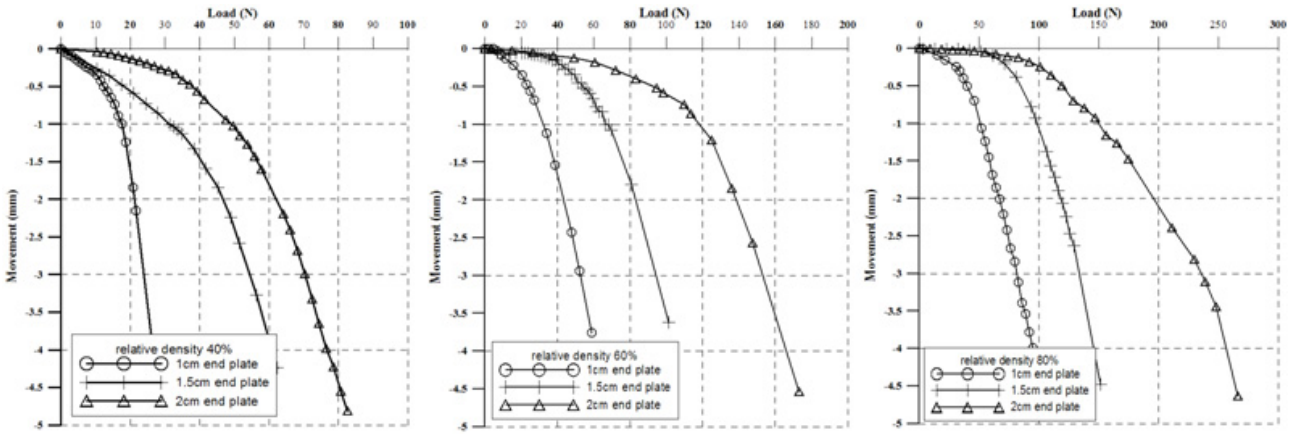


그림 4. 시험장치의 개념도

4. 시험 결과 및 분석

1단계 축소선단에 의한 재하시험결과를 하중-변위곡선으로 나타내면 그림 5와 같다.



(a) 상대밀도 40%

(b) 상대밀도 60%

(c) 상대밀도 80%

그림 5. 축소선단재하에 의한 하중-변위 곡선

각 상대밀도별 정재하시험의 하중-변위 곡선은 그림 6과 같다.

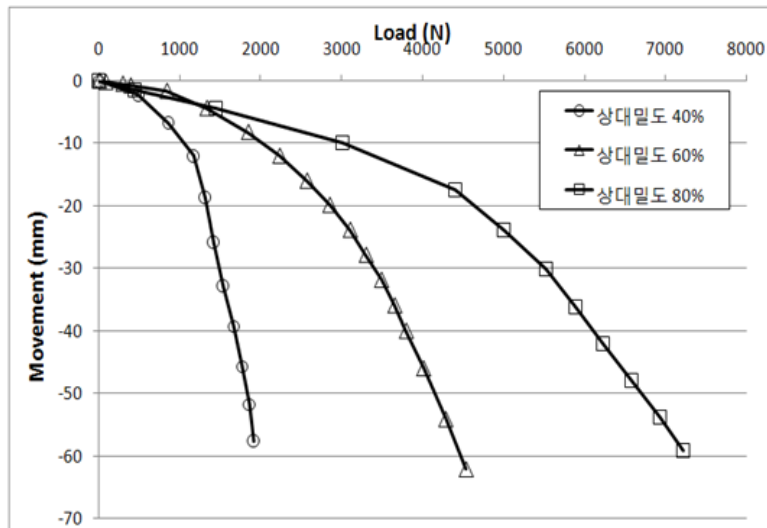


그림 6. 정재하시험의 하중-변위 곡선

극한선단지지력의 산정법은 말뚝의 변위가 말뚝직경의 10%일때의 하중을 극한하중으로 보는 방법을 사용하였으며 각 시험조건별 극한지지력은 표 1과 같다.

표 1. 시험조건별 극한지지력

	상대밀도별 극한선단지지력(N)		
	상대밀도 40%	상대밀도 60%	상대밀도 80%
축소선단직경 10mm	17.44	32.05	50.76
축소선단직경 15mm	40.67	76.15	108.58
축소선단직경 20mm	82.614	138.57	195.02
말뚝전체직경	706.5	1644.9	2494.8

표 1의 결과를 이용하여 선단면적비 R_A (말뚝전체선단직경/축소선단직경)와 극한선단지지력비 R_Q (말뚝전체선단의 극한지지력/축소선단의 극한지지력)을 구하여 표 2에 정리하였고, 그 관계를 그래프로 나타내면 그림 7과 같다.

표 2. 선단면적비와 상대밀도에 따른 극한선단지지력비

		R_Q		
		상대밀도 40%	상대밀도 60%	상대밀도 80%
R_A	1	1	1	1
	25	8.55	11.78	12.80
	44.44	17.37	21.60	22.98
	100	40.50	51.33	49.15

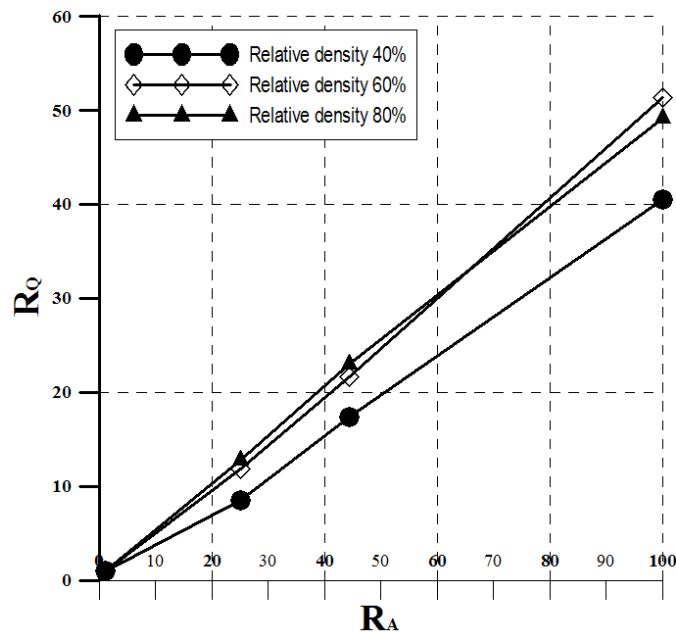


그림 7. 상대밀도별 R_A - R_Q 그래프

표 2와 그림 7에서 확인할 수 있듯이 가변선단 양방향말뚝 재하시험에서 선단직경의 변화에 따른 극한지지력의 Scale effect는 면적비와 비례하지 않으며, 모든 시험조건에서 R_Q 값은 R_A 값보다 작은 것으로 나타났다. 대체적으로 같은 R_A 값 일 때 지반이 조밀할수록 높은 R_Q 값을 가지는 것으로 나타났고, 상대밀도 60%와 80%에서의 R_Q 값은 큰 차이를 보이지 않았다.

5. 결론

본 연구에서 가변선단재하판을 이용한 양방향말뚝재하시험의 모형시험을 수행하였고, 그 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 가변선단 양방향말뚝재하시험에서 선단직경에 따른 극한선단지지력의 변화는 면적비와 비례하지 않으며 1단계 하중재하시험의 결과로 전체선단의 극한지지력을 산정하기 위해서는 Scale effect를 고려

하여야 한다.

2. 극한선단지지력비는 모든 시험 조건에서 선단면적비보다 작은 값을 나타냈다.

3. 같은 선단면적비일때 지반이 조밀할수록 높은 극한선단지지력비를 보이지만 상대밀도 60%와 80%에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

4. 추후 시험을 통하여 측정된 극한지지력을 실제 말뚝직경의 선단극한지지력으로 산정하기 위한 심도있는 연구가 필요하다.

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. 정형식, 김도열, 김정호 (2003), "Scale Effect를 고려한 기초의 지지력 및 침하량 산정을 위한 모형실험", 한국지반공학회 논문집, 제19권, 5호, pp.343-354
4. ASTM D1143-81 (Reapproved by 1994) (1994), "'Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load'".
5. De Beer, E. E., Lousberg, E., De Jonghe, A., Carpentier, R. and Wallays. M. (1979), "analysis of the results of loading tests performed on displacement piles of different types and sizes penetrating at a relatively small depth into a very dense sand layer," Proceedings, Recent Developments in the Design and Construction of Piles, ICE, London, pp.199-211
6. Meyerhof, G. G. (1983), "Scale Effects of Ultimate Pile Capacity," J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.109, No. 6, pp.797-806
7. vesic, A.S. (1970), "Tests on instrumented piles, Ogeechee River site," Journal of Soil Mechanics and foundation Engineering ASCE, Vol.96, SM2, pp.561-584