연약지반에서 날개벽 기초의 침하량 산정
Settlement Behavior of Wing-wall type Foundation on Soft Grounds

장시경[1], SiKyung Jang, 이광열[2], KwangYeol Lee, 황재홍[3], JaeHong Hwang, 정진교[4], ChinGyo Chung

[1] 동서대학교 건설본부 팀장, Chief of Construction Team, Dongseo University
[2] 동서대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Dongseo University
[3] 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology
[4] 부산정보대학 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Busan Info-tech College

SYNOPSIS : Piled raft foundation is commonly used for structure on deep soft soil deposit rather than end bearing piles to control differential settlement. However, it is still expensive for light weight structures. Wing-wall type foundation has been successfully applied to reduce average settlement for light weight structure. This study will further investigate this type of foundation using bench scale experiments on clay and sand. Numerical analysis and approach method are used to verify load settlement curve of wing-wall foundation on experimentally study. Furthermore, normalized settlement curves are applied to define prediction of settlement on wing-wall foundation. In the result settlement on wing-wall foundation can be effectively done by increasing the length of wall instead of number of walls and equation for calculating average settlement can be derived using normalized load settlement curve.

Keywords : Wing-wall foundation, Numerical analysis, Experiment

1. 서 론

연약지반 위에 구조물을 축조하는 경우 필수적으로 고려해야 할 핵심적인 요소는 지지력과 지반침하이다. 이러한 연약지반에서 지반지지력과 지반침하량은 별도의 거동으로 검토해야한다. 일반적으로 연약지반에서의 기초공법은 말뚝기초가 사용되고 있으나 연약지반의 층후가 깊은 경우에는 비용이 비싸다. 연약지반에 산업단지나 저층구조물로 계획한 단지에서는 말뚝기초 보다는 파일 전면 기초, 팽이기초, 매트기초 또는 확대기초 등의 기초를 많이 사용한다. 팽이기초나 매트기초 등과 같은 대부분의 얕은기초는 지지력 향상 효과는 있으나 지반침하 또는 부등침하를 억제하는 효과는 미약하다. 파일 전면 기초의 경우는 지지력 향상과 지반침하를 억제하는데 효과적인 공법이나 비용이 비싸다. 또한 지반위 구조물이 상대적으로 작은 하중일 경우에는 파일전면기초의 적용이 경제적으로 적당하지 않다. 파일전면기초에 대해서는 기존의 많은 연구가 수행되었다. Liu(1985)는 실트질 사질토에서 천공말뚝으로 이루어진 무리말뚝에 대한 재하시험을 통해 캡-말뚝-지반간의 상호작용을 연구하여 파일전면기초에 있어 상부기초에 비하여 말뚝의 주면 마찰 저항력은 감소되고 선단저항력이 증가한다는 점을 주장하였으며, Randolph(1977)는 단순 모델을 대상으로 파일전면기초의 설계변수들에 대한 매개변수 변화연구를 수행하고 말뚝의 최적위치는 전면기초의 중앙에서 전면기초 전체 면적의 16~25% 범위임을 제시한 바 있으며 이를 원심모형실험을 통해 검증하였다. Katzenbach 등(2000)은 파일 전면 기초의 설계 시에 지반-말뚝, 말뚝-말뚝, 지반-전면기초, 말뚝-전면기초의 상호작용을 고려해야한다고 발표하였다. 하지만, 날개벽

기초에 대한 연구는 국내외로 전무하며, 파일전면기초와 그 메카니즘이 유사하여 설계 시에 파일전면기초의 설계기법을 참조하고 있는 실정이다. 현재 날개벽 기초는 국내에서 거의 적용되지 않고 있으며, 해외에서도 그 적용사례가 매우 드물다. 따라서 날개벽 기초의 설계 시에 기준화 되어 있는 설계기법이 없기 때문에 국내 현장에 적용하기 위해서는 전면기초의 지지력 공식 및 침하 관계식 등의 기존 이론식을 적용하여 설계할 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 날개벽기초의 현장적용을 위한 첫 단계로써 실내모형실험을 통하여 날개벽기초의 응력분포와 침하거동을 분석하고 유한요소법에 의해 실험검증을 통하여 날개벽기초의 역학적 메카니즘을 검토하고자 하였다.

2. 실내모형실험

본 모형실험에서 사용한 날개벽 기초는 강철을 이용하여 현장상황과 유사한 조건으로 설계하였으며, 모형실험에서 그 효과를 확인할 수 있도록 여러 가지 타입별로 제작하였다. 따라서 본 연구에서는 날개벽 기초의 형상 및 지반의 종류에 따른 영향을 검토하기 위하여 모래지반 및 점토지반에 대하여 다양한 타입의 날개벽 기초형식에 관하여 검토하였다.

날개벽 기초는 전면기초와 다수의 날개벽으로 구성되는데, 본 연구에서 사용한 타입은 그림 1과 표 1에 나타낸 바와 같다. 날개벽이 전면기초의 양측에 위치한 WW-2 타입과 중앙부에 날개벽이 한개 더 위치한 WW-3 타입의 총 2가지 타입의 날개벽 기초에 관하여 검토하였으며, 날개벽 길이는 WW-2 타입과 WW-3 타입 모두 날개벽의 두께는 0.4 cm, 길이를 10, 15, 20 cm의 세가지 케이스를 검토하여, 날개벽 기초 형식 및 날개벽 길이에 따른 역학적 거동에 관하여 분석하고자 하였다. 전면기초 모형은 16 × 16 cm의 정사각형 기초로 설정하였으며 두께는 축소비율을 고려하여 1.6 cm로 하였다. 모형토조는 날개벽기초 하중재하에 대한 영향범위를 고려하여 50 × 50 × 50 cm의 아크릴박스를 이용하였다.

표 1. 날개벽기초 모형의 재원

Models	Raft		Wall		
	Sizes (cm)	Thickness (cm)	Thickness (cm)	Length (cm)	개수
WW-2	16x16	1.6	0.4	10, 15, 20	2

그림 1. 날개벽기초 모형

표 2. 모래지반의 재료물성

Properties	Dense Sand	
	Value and Unit	Remarks
Classification	SP	USCS
Relative density	91.9%	Standard proctor test
Water content	19.8%	-
Specific gratify	2.65	-
Total unit weight (ɣ)	17.5 kN/m³	-
Cohesion (c)	17 kPa	compacted cohesion (after USBR,1960)
Internal friction angel	38 º	
Poison ratio	0.277	Jacky 1944 formula
Deformation modulus	19000 kPa	after AASHTO 2004

표 3. 점토지반의 재료물성

Properties	Soft Clay
	Value and unit
Water content	31%
Specific grafity	2.67
Total unit weight (ɣ)	17.4 kN/m³
LL (Liquid Limit) PL (Plastic Limit) PI (Plasticity Index)	42% 11% 31%
Compression Index (Cc)	0.67
Recompression Index (Cr)	0.41
Cohesion (cu)	12 kPa
Internal friction angel	0
Poison ratio	0.5
Deformation modulus (Eu)	600 kPa

본 실험장치는 그림 2에 나타낸 바와 같이 하중 재하 장치, 침하 계측 장치, 지반 깊이별 토압 측정 장치로 구성되어져 있다. 하중 재하 속도는 지반종류에 따라 조절하여 적용하였다. 점토지반에서는 하중 재하 속도에 따라 기초 전반적 거동이 상이하므로 배수 및 비배수 조건을 고려하여 하중 재하 속도를 상이하게 적용하였다. 모래지반에서는 배수조건에서 하중 재하 속도를 0.5 cm/mm 로 적용하였으며 5초마다 침하량을 계측하였다.

모형지반은 함수비를 조절하여 아크릴 모형박스에 조성하여, 10 cm 높이에서의 자유낙하에 의하여 다짐을 실시한 후에, 날개벽 기초를 지반상 중앙부에 수평으로 거치하였다. 모형지반 및 날개벽 기초가 설치된 후에, 하중 재하에 따른 실험이 진행되었으며, 각 계측은 5초당 1회씩 실시되었다.

그림 2. 모형실험 전경

3. 유한요소법을 이용한 수치해석

본 연구에서는 2차원 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS (version 8.2)를 이용하여 수치해석을 실시하여 날개벽 기초의 하중재하와 침하량의 상관관계에 관하여 검토하였다. 또한 모형실험과 같이 점토지반과 모래지반에 대하여 날개벽 길이 10, 15, 20 cm 조건으로 수치해석을 수행하여 지반조건, 날개벽 길이 등에 따른 기초의 침하거동에 관하여 분석하였다. 또한 본 연구에서는 수치해석결과를 이용하여 모형실험에서 측정하지 않았거나 측정이 힘들었던 위치에서의 토압 및 변형을 포함한 지반거동에 관하여 고찰을 더하였는데, 본 논무에서는 수록하지 않았다.

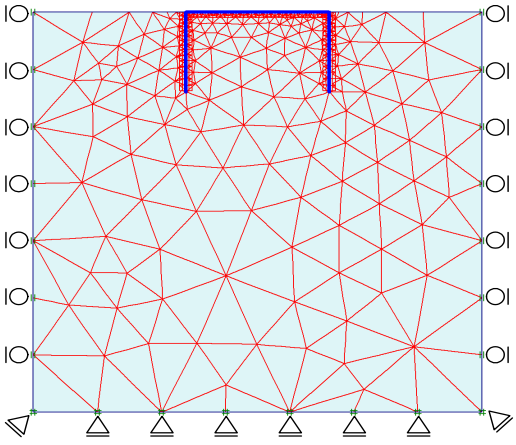
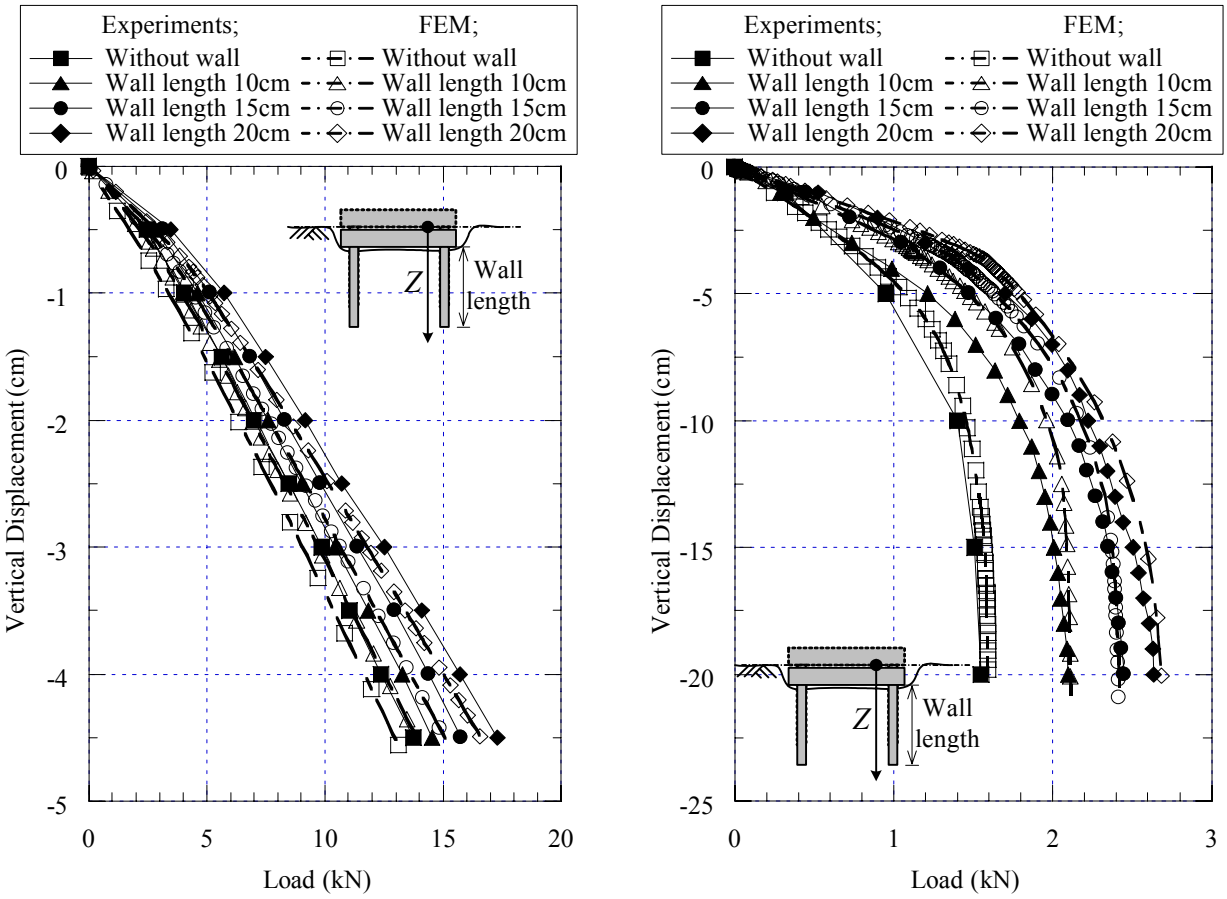


그림 3. 수치해석메쉬(날개벽길이 10cm)

본 수치해석에서의 하중 및 경계조건은 모형실험과 같은 조건으로 수행되었다. 2차원 평면변형을 기본으로 단위미터당 하중을 계산하여(Prakoso and Kulhway, 2001) 전면기초의 상부 중앙지점에 하중을 점진적으로 증가시켰다. 경계조건은 그림 3에서 나타낸 바와 같이 하부는 상하좌우 변위를 고정조건으로 설정하였으며, 좌우양측 경계부는 수평변위만을 고정하였다.

4. 모형실험 및 수치해석 결과 비교

그림 4에 실내모형실험과 수치해석 결과를 이용하여 날개벽 길이, 지반종류에 따른 하중-침하의 상관관계를 도시하였다. 점토지반에서는 날개벽 길이에 상관없이 전체적으로 모형실험과 수치해석의 결과가 같은 경향을 나타내었으며, 모래지반에서는 수치해석결과가 모형실험 결과보다 조금 작은 지지력을 나타내었다. 이와 같은 결과는, 인터페이스요소를 사용하였지만 날개벽과 지반의 마찰력과 관련한 파라메타 산정에서의 오차가 영향으로 작용한 것으로 판단된다. 하지만 전체적으로 모형실험과 수치해석 결과가 유사하여 유한요소법을 이용하여 지반과 구조물의 상호작용을 적절히 모델링 한 것으로 판단되며, 따라서 날개벽 기초 공법을 적용할 때 날개벽 길이에 의해 지지력을 산정 가능한 것으로 나타났다.

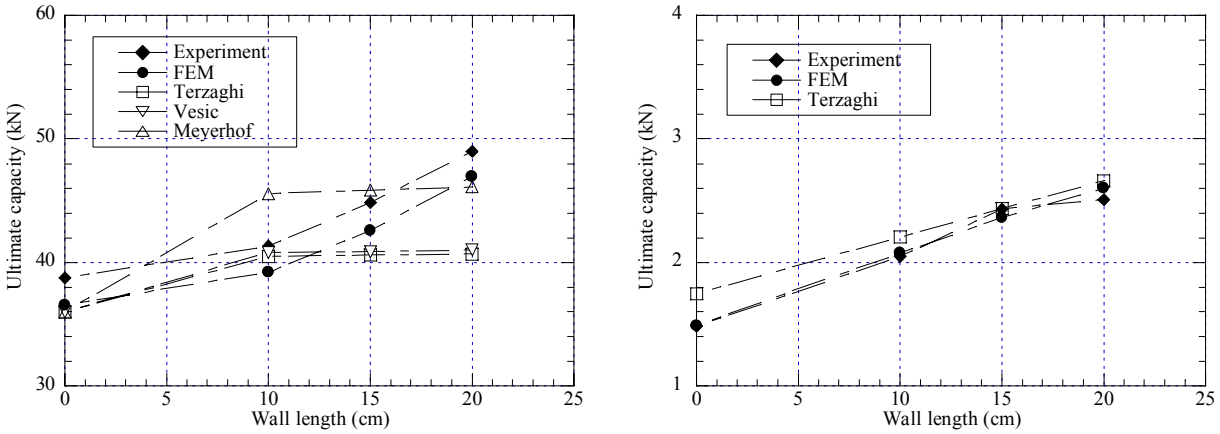


(a) 모래지반 (b) 점토지반

그림 4. 날개벽 길이에 따른 하중과 침하의 상관관계

모형실험과 수치해석를 토대로 날개벽 기초의 극한 지지력을 산정하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 모형실험과 수치해석 결과가 유사한 경향을 나타내어 극한 지지력도 날개벽의 길이, 지반조건 등의 모든 케이스가 유사하게 나타났다. 또한 본 연구에서는 기존 설계시에 자주 이용되는 이론식(참고문헌 참

조)을 근거로 극한 지지력을 산정하여 비교/검토하였다. 그림 5에 모래지반 및 점토지반에서의 날개벽 길이에 따른 극한 지지력을 나타내었다. 모래지반에서는 이론식보다 실험 및 수치해석을 통하여 구한 극한지지력이 큰 경향을 나타내었으며, 점토지반에서는 이와 상반되는 경향을 보였다. 또한 모래지반에서는 이론식에 의한 극한지지력이 날개벽 길이에 따른 영향을 충분히 고려하기 힘든 것으로 보였다. 점토지반은 이론식에 의한 극한 지지력이 실험 및 수치해석과 유사하게 나타났지만, 그 값이 크게 나타나 과대설계가 될 가능성이 높은 것으로 판단된다.



(a) 모래지반 (b) 점토지반

그림 5. 날개벽 길이에 따른 극한 지지력

5. 결 론

본 연구에서는 날개벽 기초의 현장적용 및 설계법 정립을 위하여, 날개벽 기초의 날개벽 길이 및 지반종류 등 다양한 파라메타에 대하여 모형실험 및 수치해석을 수행하였다. 연구결과를 정리하면 아래와 같다.

(1) 날개벽 길이 및 지반종류에 따른 하중-침하의 상관관계는, 점토지반 및 모래지반 등의 조건에 의한 영향이 크지만, 같은 지반에서는 날개벽의 길이에 의해 기초 침하량이 좌우되는 것으로 나타났다. 따라서 연약지반의 지층이 깊거나 강도가 낮은 경우에 날개벽 기초의 양측 날개벽 길이를 증가시키는 방법에 의하여 날개벽 기초의 침하량을 줄일 수 있는 것으로 판단된다.

(2) 모형실험과 수치해석을 수행하여 날개벽 기초의 극한 지지력에 대하여 검토한 결과와 기존 이론식에 의하여 계산한 극한 지지력을 검토하였는데, 기존 이론식에 의한 지지력 산정은 날개벽 기초의 형식에 따른 요소를 적절히 고려하는 것이 어려워 오차가 크게 나타났으며, 특히 모래지반에서는 실험 및 수치해석을 통하여 구한 극한지지력이 이론식에 의한 값보다 큰 경향을 나타내어, 이론식에 의한 극한지지력이 날개벽 길이에 따른 영향을 충분히 고려하기 힘든 것으로 보였다. 점토지반은 이론식에 의한 극한 지지력이 실험 및 수치해석과 유사하게 나타났지만, 기존 이론식에 의해 산정한 극한지지력은 그 값이 크게 나타나 과다설계가 될 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 날개벽 기초는 지반과 흙과의 상호작용을 고려한 해석을 수행하여 기초의 거동을 검토한 후 설계에 반영하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. AASHTO (2004), Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
2. Jacky, J. (1944), The Coefficient of Earth Pressure at Rest, Journal of the Society of Hungarian.
3. Meyerhof, G.G. (1976), Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation, JGED, ASCE, Vol.102, GT3.
4. Katzenbach. R., Arslan. U. and Moormann. C. (2000), "Piled raft foundation project in Germany", Design application of raft foundation, Thomas Telford, Inc.
5. Liu, J. L., Yuan, Z. L. and Shang, K. P. (1985), "Cap-pile-soil interaction of bored pile group", Proceeding 11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 3, pp. 1433~1436.
6. Randolph, M. F. (1994), "Design methods for pile group and piled raft", CSMFE, pp. 61~82.
7. Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. (1996), Soil mechanics in engineering practice, 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
8. USBR (1960), Design of Small Dams. U.S. Bureau of Reclamation, Washington, D.C.
9. Vesic, A.S. (1975), Bearing Capacity of Shallow Foundations, Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, New York.