

말뚝두부구속조건을 고려한 말뚝지지 전면기초의 최적단면 설계

A Study on the Optimum Design of Piled-raft Foundation Considering Pile Head Condition

조 재 연¹ Cho, Jae-Yeon
이 성 준² Lee, Sung-June
정 상 섬³ Jeong, Sang-Seom

Abstract

This study describes the three-dimensional behavior of pile foundations based on a numerical study. A series of numerical analyses were performed for connectivity conditions between piles and cap under vertical and lateral loadings. It is shown that a fixed connection between pile and cap is able to transfer significant bending moment through the connection and increases the pile lateral stiffness and the bending moment. Based on the results obtained, it was found that the cross sectional shear force in the raft with fixed head condition was larger than that of pinned head condition. Thus, the reinforcement of pile head and thickness of the raft also increases in fixed pile head condition. From the results, it is found that the overall behavior and cross sectional forces of pile foundations is affected significantly by the pile head conditions. Furthermore, the design of pile foundations with pinned head condition was judged to be less costly and very useful for preliminary design stages.

요 지

본 연구에서는 수직 및 수평하중을 받는 말뚝기초의 두부구속조건(고정단, 힌지단)에 따른 3차원 수치해석을 수행하였다. 수평하중과 수직하중 작용 시 말뚝과 기초의 강결합(고정단)이 힌지결합에 비하여 말뚝두부에서 횡방향 강성 및 단면 발생모멘트(휨모멘트)가 크게 나타나고 전면기초(raft)에서 발생하는 전단력도 크게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 말뚝의 두부구속조건이 말뚝기초 전체의 거동에 지대한 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 힌지결합이 강결합과 비교하여 전면기초의 두께 및 말뚝의 철근 배근량을 감소시킬 수 있기 때문에 허용변위를 만족하는 선에서 경제적인 말뚝기초의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : FBPIer 3.0, High-rise building, Pile foundations, Pile head condition

1. 서 론

초고층 건물 및 초장대 교량의 기초형식으로 말뚝지지 전면기초(piled-raft) 혹은 군말뚝(pile groups)형태의 말뚝기초가 종종 사용되고 있으며, 이러한 말뚝기초들

들은 수직 및 수평하중과 같이 다양한 하중형태를 고려한 설계가 이루어져야 한다. 그러나 지금까지 설계들은 각각의 하중에 대한 말뚝기초의 거동을 분리하여 해석하거나 말뚝기초 및 지반사이에 발생 가능한 상호작용을 고려하지 않은 해석을 통하여 기초의 지지력 및 단

1 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사 후 연구원 (Member, Post-Doc., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

3 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

면을 결정하였고, 주로 지지력 측면의 설계(capacity-based design) 로 인한 과대설계를 야기하였다. 앞으로의 말뚝 기초 설계가 지지력 측면의 설계에서 항복 이후 극한까지 이르는 비선형 거동을 포함하고, 기준 이내의 침하량과 수평변위를 허용하는 사용 한계 상태(serviceability limit state)의 설계방향으로 변하고 있기 때문에 비선형 지반특성과 구조물-지반 또는 구조물-구조물 사이의 상호작용을 고려한 해석이 필요하다.

말뚝기초에서 고려할 수 있는 상호작용으로는 크게 두 가지가 있는데 첫째, 말뚝-지반-말뚝사이의 상호작용과 둘째, 말뚝-캡(혹은, raft) 사이의 상호작용이 대표적이다. 특히 균말뚝 및 말뚝지지 전면기초의 경우 말뚝간의 간섭효과 및 말뚝의 배열에 따라 달라지는 상호작용들로 인하여 매우 복잡한 거동형태를 나타내게 된다. 말뚝-지반-말뚝 사이의 상호작용에 대한 연구는 이론적인 방법이나 수치해석적인 접근으로 다양하게 진행되어 왔는데, 이러한 방법들의 형태로는: (1) 유한요소법(Ottaviani, 1975; Randolph, 1981, Jeong 등, 2004; Lee 등, 2010); (2) 경계요소법(Butterfield 등, 1971); (3) Mindlin solution을 기반으로 한 탄성해석법(O'Neill 등, 1977; Poulos, 1979); (4) 하중전이곡선법(Reese 등, 1990)으로 나눌 수 있다. 이와는 반대로 말뚝과 캡(혹은, raft)사이의 접합조건이나 말뚝의 배열에 따라 달라지는 말뚝-캡의 상호작용에 대한 연구는 미진한 실정이며, 최근 McVay 등(1996)은 사질토 지반에서 균말뚝 기초의 말뚝두부 구속조건에 대한 영향을 원심모형실험을 통하여 연구하였고, 원진오 & 정상섭(2005), Won 등(2006)은 말뚝두부 조건을 반영한 균말뚝의 3차원 해석 프로그램을 개발하여 결과가 보

고되고 있다.

말뚝과 기초의 연결방식으로는 일반적으로 강결합과 힌지결합이 있다. 이러한 연결방식은 구조물의 형식과 기능, 확대기초의 형태와 치수, 말뚝의 종류, 지반조건, 시공 난이도 등을 고려하여 결정하여야 한다. 일반적으로 토목구조물은 강결합이 주로 사용되며(대한토목학회 & 교량설계 핵심기술연구단, 2008), 건축구조물에서는 특성에 따라 선택적으로 채택된다. 채택된 방식에 대해서는 압입력, 인발력, 수평력 등이 검토되어 소정의 안전율이 확보될 수 있도록 설계한다(한국지반공학회, 2009).

이에 본 연구에서는 3차원 상용프로그램인 FBPIer 3.0(Hoit 등, 1996)을 통하여 말뚝두부의 구속조건을 고려한 사질토 지반에 시공된 균말뚝(PG) 및 말뚝지지 전면기초(PR)의 거동 및 구조물에 발생하는 단면력을 다양한 하중조건을 이용하여 비교·분석하였으며 이에 따른 말뚝 기초의 경제적인 설계방안을 제시하였다.

2. 말뚝 두부의 구속조건

말뚝두부의 구속조건으로는 말뚝의 시공 상태에 따라 자유단, 힌지, 고정단의 구속조건으로 분류할 수 있다. 일반적으로 구속조건이 고정단(fixed head)인 경우 말뚝두부에서의 횡방향 강성(lateral stiffness)과 모멘트가 힌지(hinged head)인 경우보다 증가한다. 또한 고정단의 경우 말뚝과 캡 사이에서의 모멘트의 전달이 가능하다. 국내에 적용되고 있는 말뚝두부의 결합방식으로는 일반적으로 강결합(fixed head)과 힌지 결합(hinge head)이 있고, 교량기초의 경우에는 말뚝머리 고정, 즉 강결합으로

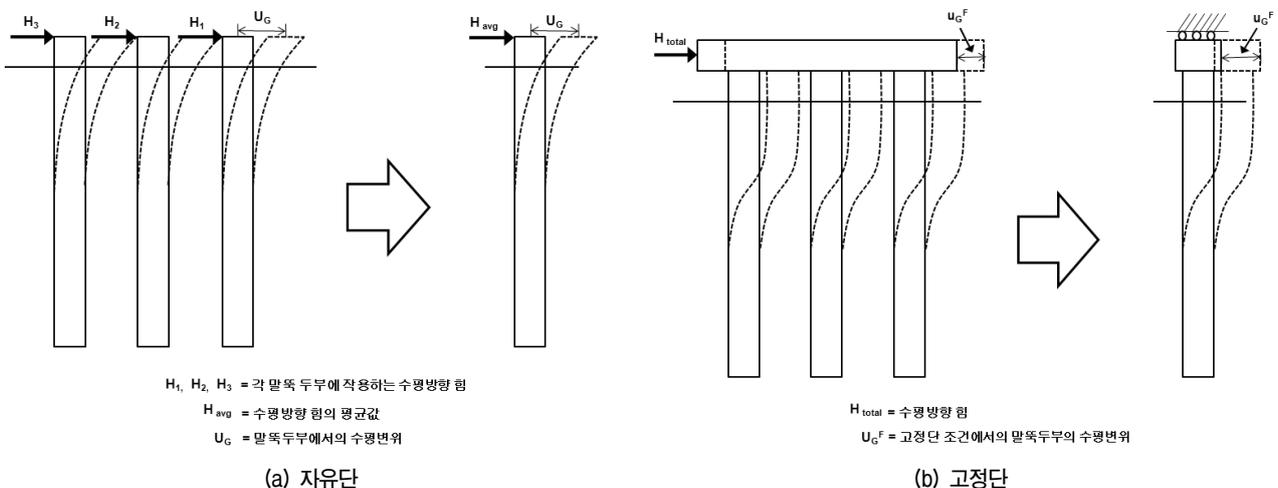


그림 1. 말뚝두부의 구속조건 형태

설계하는 것을 원칙으로 하며, 그 이유는 수평변위량에 따라 설계가 지배되는 경우 유리하고 부정정차수가 높아 내진상의 안정성이 유리하기 때문이다(대한토목학회 & 교량설계 핵심기술연구단, 2008). 그림 1은 말뚝두부에서의 구속조건 중 자유단과 고정단의 경우를 도시하였다. 자유단의 경우 말뚝 두부에서의 휨모멘트와 전단력이 0이며, 힌지구속의 경우 처짐과 휨모멘트, 고정단의 경우 처짐과 처짐각이 0인 조건을 의미한다. 식 (1)~(3)은 각각 자유단과 힌지 그리고 고정단의 경우 말뚝머리에서의 경계조건을 나타내었다.

$$\text{자유단} : [M]_z = -EI \left[\frac{d^2 y_1}{dz^2} \right]_z = 0 \quad (1a)$$

$$[V]_z = -EI \left[\frac{d^3 y_1}{dz^3} \right]_z = 0 \quad (1b)$$

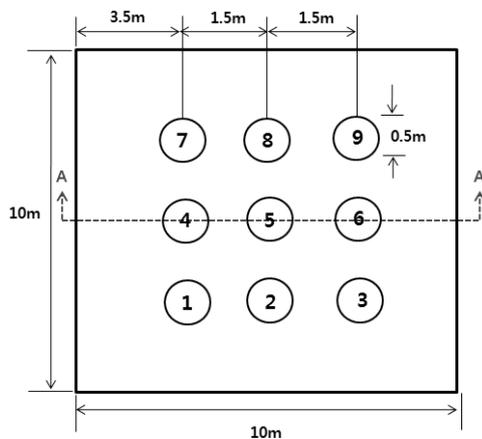
$$\text{힌지} : [y]_z = [y_1]_z = 0 \quad (2a)$$

$$[M]_z = -EI \left[\frac{d^2 y_1}{dz^2} \right]_z = 0 \quad (2b)$$

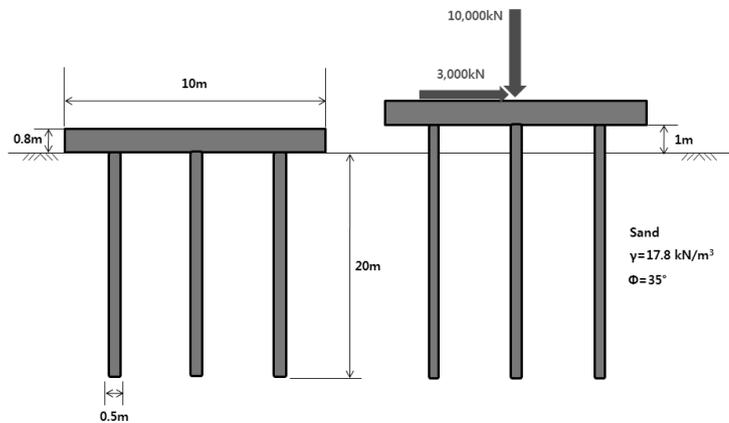
$$\text{고정단} : [y]_z = [y_1]_z = 0 \quad (3a)$$

$$[\theta]_z = \left[\frac{dy_1}{dz} \right]_z = 0 \quad (3b)$$

여기서, E는 말뚝의 탄성계수이고, I는 말뚝의 단면2차모멘트, y는 지점에서 처짐이다.



(a) 자유단



(b) 고정단

그림 2. 해석대상의 모식도

3. 말뚝지지 전면기초 및 군말뚝의 거동분석

3.1 해석 개요

본 연구에서는 말뚝두부의 구속조건에 따른 말뚝지지 전면기초 및 군말뚝의 거동분석을 위하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 말뚝 및 캡(혹은, raft)의 거동을 비교하였다. 해석대상인 말뚝지지 전면기초와 군말뚝기초는 그림 2와 같이 단일 사질토 지반에 시공된 3×3 배열의 말뚝기초이며 군말뚝 기초의 캡과 지반과의 거리는 1m이다. 말뚝의 직경(D)은 0.5m 이며 길이는 20m의 사질토에 근입된 마찰말뚝의 형태로 가정하였으며, 철근배근에 대한 사항은 고려하지 않았다. 말뚝두부 구속조건은 고정단과 힌지 조건이며, 말뚝, 캡의 제원 및 물성치와 지반의 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 구조물 및 지반의 물성치

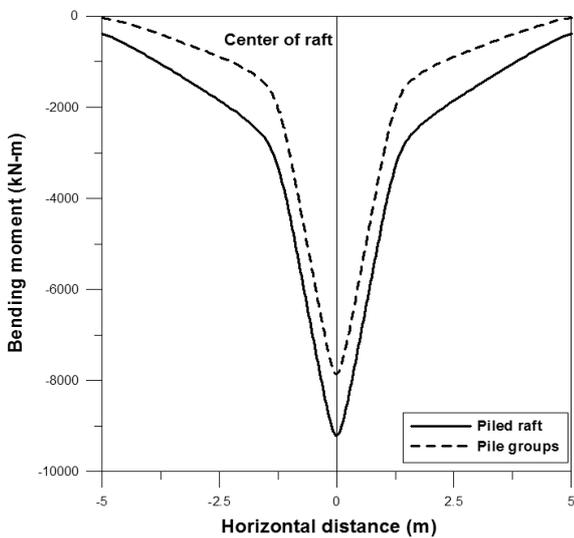
캡(raft)	탄성계수(E), kPa	28,000,000
	포아송 비(v)	0.15
	단위중량(γ), kN/m ³	24
	두께(t), m	0.8
말뚝	탄성계수(E), kPa	12,500,000
	포아송 비(v)	0.25
	단위중량(γ), kN/m ³	24
	단면적(A), m ²	0.196
지반	단면2차모멘트(Ix, Iy), m ⁴	0.00306
	탄성계수(E), kPa	125,000
	포아송 비(v)	0.3
	단위중량(γ), kN/m ³	17.8
	내부마찰각(Φ), deg.	35

각 두부조건에 따른 기초의 거동차이를 비교하기 위하여 외부하중은 단순화시켜 말뚝캡(raft)중앙에 수직하중만이 작용하는 경우와 수평하중만이 작용하는 경우, 또는 수직과 수평하중이 동시에 작용하는 경우로 나누어 해석을 수행하였다.

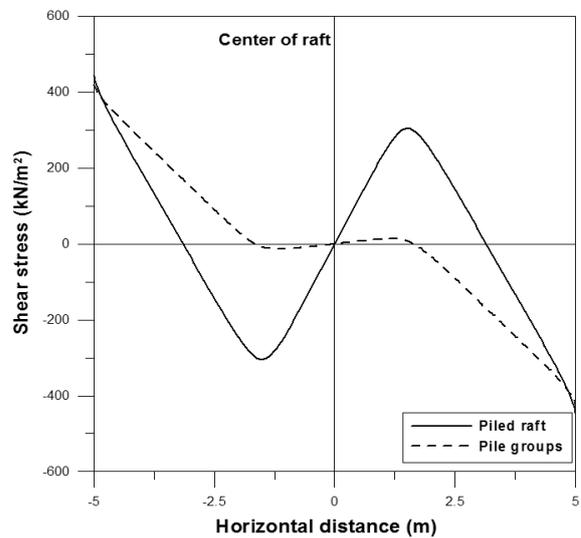
3.2 수직하중 작용 시

수직하중이 작용하는 경우 말뚝기초의 거동은 캡의 휨변형과 말뚝의 축방향 지지력에 의해 결정된다. 말뚝 지지 전면기초의 경우 전면기초의 지지력과 말뚝의 지지력을 동시에 고려할 수 있기 때문에 말뚝에 작용하는 축하중을 분담할 수 있다는 장점이 있다.

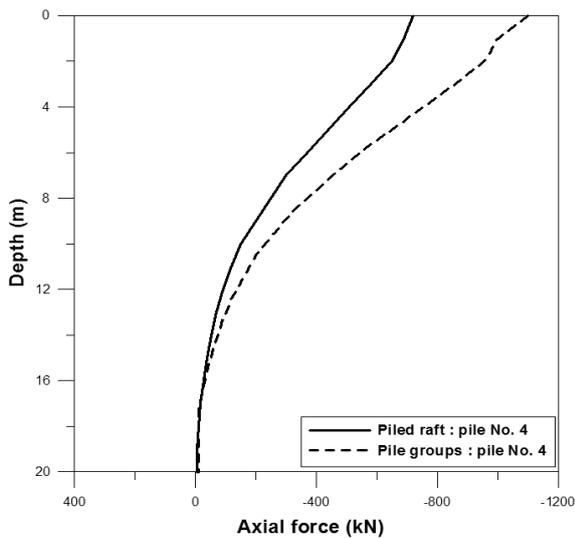
그림 3(a)~(d)는 수직하중 작용 시 말뚝지지 전면기초(PR)와 균말뚝(PG)의 거동분석 결과를 나타내었다. 그림 3(a)는 말뚝캡(혹은, raft)의 단면 A-A'에 대하여 발생하는 모멘트 분포이며 말뚝두부의 구속조건이 고정단일 경우와 힌지의 경우 동일하게 발생한다. 휨모멘트는 하중작용 및 전단력(그림 3(b) 참조)이 가장 작은 지점인 중앙에서 최대값으로 나타났다. 말뚝의 축력분포는 말뚝지지전면기초의 경우 각각의 말뚝두부에서 구속조건과 관계없이 720kN씩 지지하였으며 균말뚝의 경우 캡의 지지력을 고려할 수 없기 때문에 말뚝 1본당 1,110kN을 지지하였다(그림 3(c) 참조). 두부의 구속조건에 의해 영향을 받는 것은 말뚝의 휨모멘트 분포이다(그림 3(d) 참조). 힌지의 경우 고정단과 같이 캡(혹은, raft)에서 발생하는 모멘트가



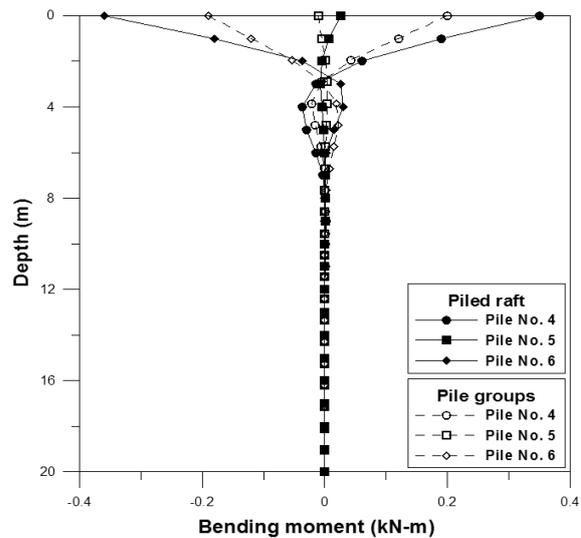
(a) 전면기초 단면의 휨모멘트 분포



(b) 전면기초 단면의 전단응력 분포



(c) 말뚝의 축력분포



(d) 말뚝의 휨모멘트 분포

그림 3. 수직하중 작용시 말뚝지지 전면기초(PR), 균말뚝(PG)의 거동

말뚝으로 전달이 되지 않기 때문에 말뚝의 모멘트 분포가 0인 것으로 나타났다. 그러나 고정단의 경우 수직하중에 의해 발생된 캡에서의 모멘트가 말뚝으로 전달이 되어 말뚝두부에서 휨모멘트가 발생하는 것으로 나타났다. 하중이 작용하는 지점인 5번 말뚝의 경우 휨모멘트의 크기가 가장 작았으며, 4번과 6번 말뚝은 크기는 같고 방향이 반대인 휨모멘트가 발생하였다. 고정단의 경우 수직하중에 의한 말뚝두부에서의 휨모멘트가 발생하였기 때문에 이를 고려한 철근보강이 이루어져야 할 것으로 보인다.

3.3 수평하중 작용 시

전면기초의 중앙에 수평하중이 작용한 경우 산정된

말뚝지지 전면기초의 거동은 그림 4와 같다. 고정단의 경우 힌지와 비교하였을 때 말뚝의 수평변위가 작게 발생하였고, 말뚝두부에서 부(-) 모멘트가 발생하였다.

수평하중이 작용할 경우 전면기초에 발생하는 모멘트는 말뚝두부에서 발생한 모멘트가 전면기초로 전달되는 것으로 판단되며, 힌지의 경우 말뚝 두부에서 모멘트와 전면기초에서의 발생모멘트 모두 0인 것으로 나타났다. 특히 고정단의 경우 말뚝-전면기초사이의 모멘트 및 전달력의 자유로운 전달로 인하여 4번 말뚝의 경우 추가적인 압축력이 말뚝에 작용하였고, 5,6번 말뚝의 경우 인장력이 작용하였다. 이는 기존의 McVay 등(1996)이 균말뚝을 대상으로 연구한 결과와 유사한 경향이며, 그림 5에서 균말뚝의 거동 또한 유사함을 알 수 있었다. 따라서

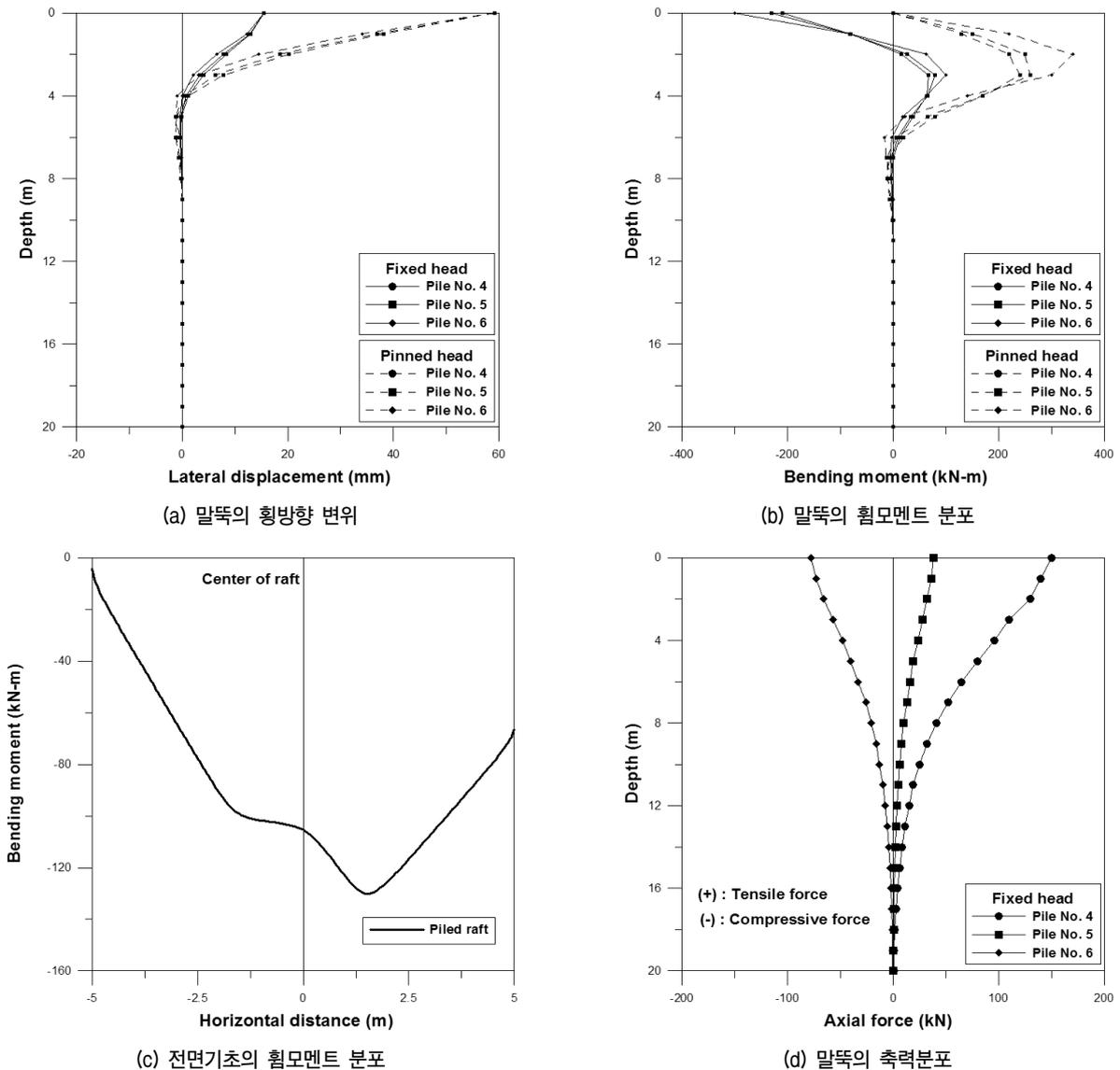
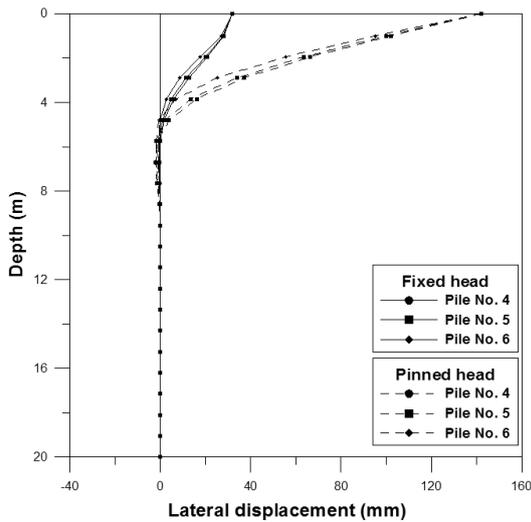
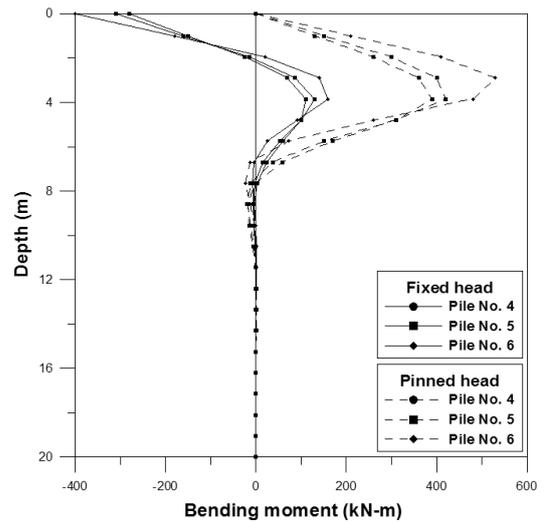


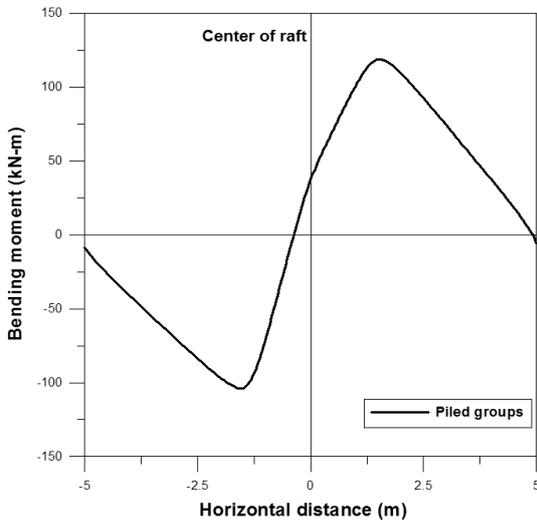
그림 4. 수평하중 작용시 말뚝지지 전면기초(PR)의 거동



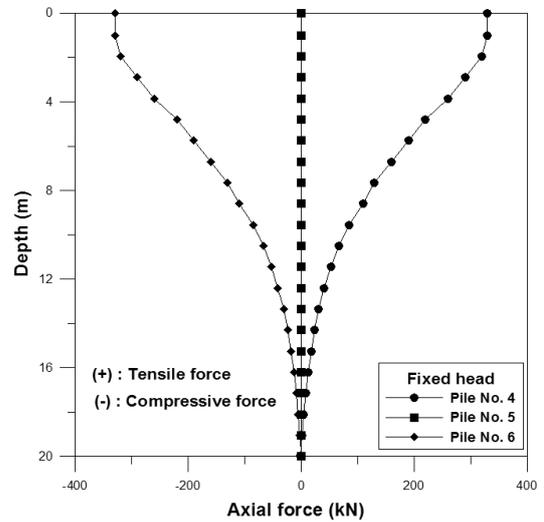
(a) 말뚝의 횡방향 변위



(b) 말뚝의 휨모멘트 분포



(c) 말뚝캡의 휨모멘트 분포



(d) 말뚝의 축력분포

그림 5. 수평하중 작용시 군말뚝(PG)의 거동

고정단의 경우 말뚝에 추가적인 인장력 혹은 압축력을 발생시킬 가능성이 높고, 이는 말뚝의 설계에 반영되어야 할 것으로 판단된다.

3.4 수직하중 및 수평하중 작용 시

(1) 말뚝의 거동 및 부재력

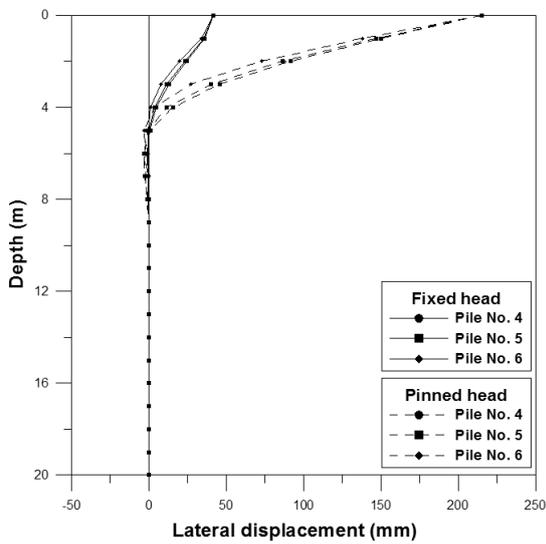
전면기초의 중앙에 수직 및 수평하중이 동시에 작용한 경우 말뚝기초의 거동특성을 분석하였다(그림 6, 7 참조). 앞서 살펴본 수직하중 혹은 수평하중만 작용하는 경우의 거동을 살펴보기 위하여 분석한 결과이다. 수직 및 수평하중이 동시에 작용할 경우는 일반적인 교량이

나 구조물의 기초에서 작용할 수 있는 하중형태를 고려하기 위하여 해석을 수행하였다.

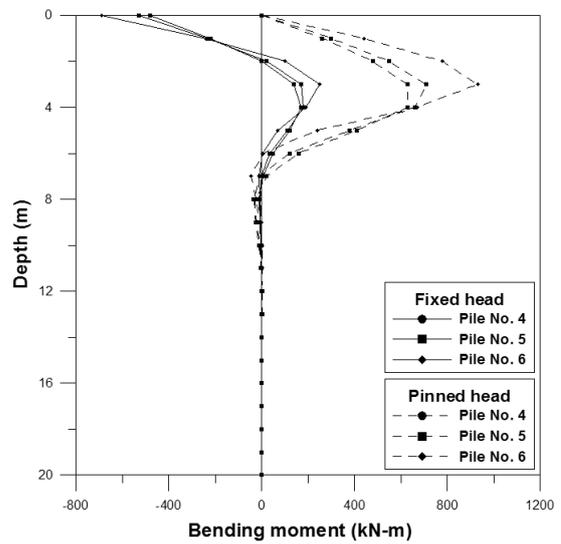
복합하중이 작용하는 경우 말뚝의 횡방향 변위는 수평하중 단독으로 작용하는 경우보다 두부 구속조건에 관계없이 증가하였고 각각의 말뚝에 대하여 일정하였다. 그러나 말뚝의 침하량은 고정단의 경우 가력방향의 말뚝 즉, 3, 6, 9번 말뚝의 침하량이 가장 크고, 1, 4, 7번 말뚝의 침하량이 나머지 말뚝과 비교하여 작은 경향을 보였다. 그 차이는 횡방향 하중의 크기가 증가할수록 크게 나타날 것으로 판단된다. 이것은 힌지 구속조건인 경우 말뚝의 침하량이 일정한 경우와 다른 거동을 보이고 있으며, 이러한 현상이 발생하는 이유는 고정단의 말뚝과 전면기초사이에서 휨모멘트 전이현상으로 인해 발생

표 2. 구속조건에 따른 말뚝의 침하량 및 축력

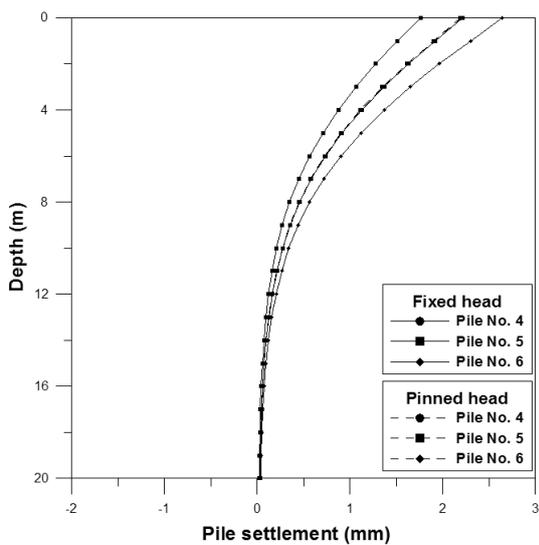
구분	말뚝지지 전면기초(PR)				군말뚝(PG)			
	고정단		힌지		고정단		힌지	
	침하량 (mm)	축력 (kN)	침하량 (mm)	축력 (kN)	침하량 (mm)	축력 (kN)	침하량 (mm)	축력 (kN)
1	1.75	590	2.19	720	1.06	330	4.12	1,100
2	2.20	720	2.19	720	4.44	1,200	4.13	1,100
3	2.63	840	2.19	720	7.81	1,800	4.12	1,100
4	1.76	590	2.19	720	1.06	330	4.14	1,100
5	2.22	730	2.19	730	4.45	1,200	4.13	1,100
6	2.64	850	2.19	720	7.82	1,800	4.12	1,100
7	1.75	590	2.19	720	1.06	330	4.13	1,100
8	2.20	720	2.19	720	4.44	1,200	4.13	1,100
9	2.63	840	2.19	720	7.81	1,800	4.12	1,100



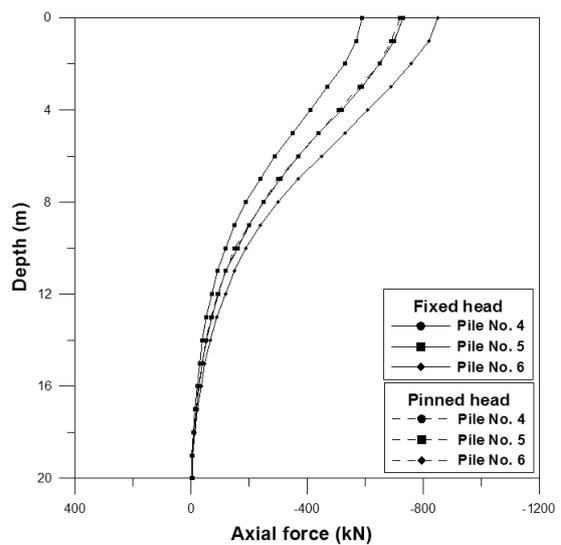
(a) 말뚝의 횡방향 변위



(b) 말뚝의 휨모멘트 분포



(c) 말뚝의 침하량



(d) 말뚝의 축력분포

그림 6. 복합하중 작용시 말뚝지지 전면기초(PR)의 거동

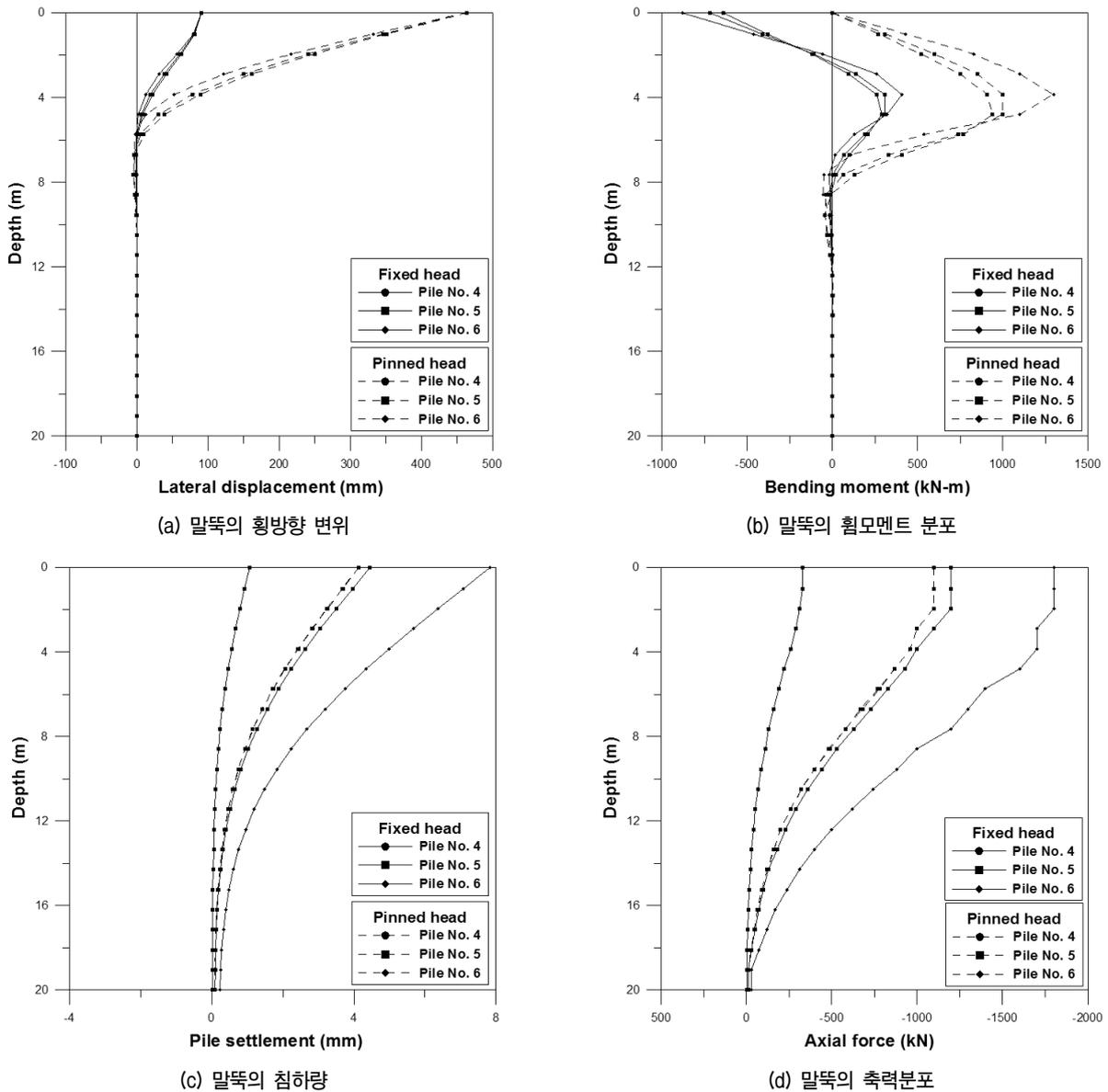


그림 7. 복합하중 작용시 군말뚝(PG)의 거동

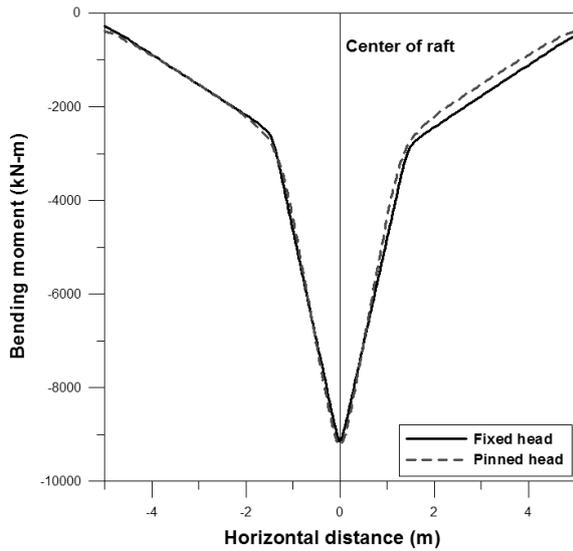
한 부등침하로 판단된다. 또한 말뚝의 침하량과 비례하여 말뚝의 축력분포 또한 3, 6, 9번 말뚝이 가장 크게 산정되었다. 표 2는 말뚝지지 전면기초 및 군말뚝에서 두 부구속조건에 따른 말뚝 두부에서의 침하량 및 축력분포를 비교하였다.

(2) 전면기초의 부재력

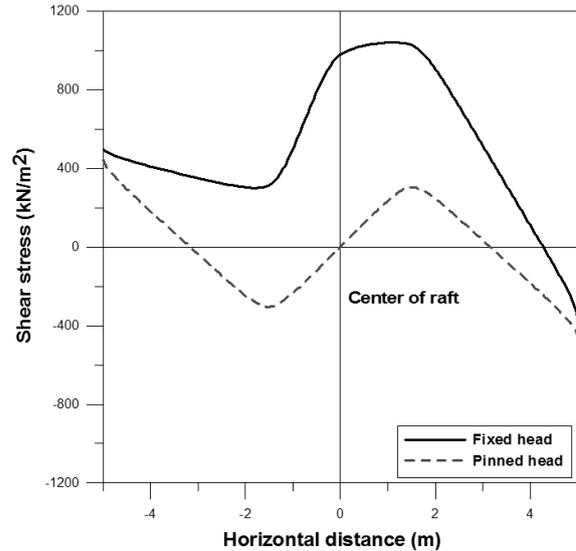
그림 8은 복합하중이 작용하였을 때 전면기초 A-A'단면에서 발생하는 휨모멘트 및 전단응력의 분포를 도시하였다. 휨모멘트 분포는 말뚝두부 구속조건에 관계없이 두 경우 모두 크기와 경향이 비슷하게 산정되었는데, 이는 전면기초의 발생모멘트는 복합하중 중 수직하중에

의해 지배되어 발생하는 것으로 판단된다(그림 3, 4참조). 그 이유는 수직하중 작용 시 두부조건에 관계없이 전면기초에서의 전단력과 모멘트 분포가 동일하였고 모멘트의 최대값은 약 9,000kN-m인 것과 비교하여, 횡방향 하중 작용 시 고정단의 경우에서만 전단력과 모멘트가 발생하였는데, 그 크기가 약 140kN-m로 매우 작기 때문에 수평하중에 의한 전면기초 단면에서의 휨모멘트 영향이 매우 미미할 것으로 보인다.

그림 8(b)에서는 전면기초에서 발생하는 전단력을 나타내었다. 고정단의 경우 전면기초 단면에 휨모멘트가 더욱 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 수직하중에 의한 전면기초의 모멘트와 수평하중에 의한 말뚝에



(a) 휨모멘트 분포



(b) 전단응력분포

그림 8. 복합하중 작용시 전면기초의 부재력

서의 모멘트가 서로 전달되면서 힌지 조건과 다른 전단력분포의 경향을 보이는 것으로 판단된다. 전단력이 크게 발생하면 전면기초 설계 시 두께를 결정하는데 있어서 과다설계의 우려가 있을 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 사질토 지반에 시공된 말뚝지지 전면기초 및 균말뚝의 거동을 말뚝두부의 구속조건에 따라 비교·분석하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수직하중이 작용하는 말뚝기초에서 말뚝두부조건이 고정단인 경우 말뚝캡(혹은, raft)에 작용하는 모멘트가 말뚝의 두부에 전달되었다. 이에 따라 수직하중만 작용한 경우에서도 말뚝두부에서 휨모멘트가 발생하였고, 말뚝의 축방향 지지력뿐만 아니라 휨에 대한 검토가 추가적으로 필요함을 알 수 있었다. 그러나 힌지고정의 경우 전면기초에 발생하는 모멘트의 분포는 고정단과 동일하지만, 말뚝으로 모멘트가 전달되지 않기 때문에 설계 시 두부에서의 발생모멘트에 대한 철근 배근량을 감소시킬 수 있다.
- (2) 또한, 수평하중이 작용할 경우 말뚝캡(혹은, raft)에 발생하는 모멘트는 말뚝두부에서 발생한 모멘트가 말뚝캡(혹은, raft)으로 전달되는 것으로 판단되며, 이에 따라 고정단의 경우 전면기초 단면에 발생한

- 모멘트에 대한 철근배근을 고려해야 될 것으로 보인다. 힌지의 경우 말뚝 두부에서 모멘트와 전면기초에서의 발생모멘트 모두 0인 것으로 나타났다. 따라서 고정단의 경우 말뚝에 추가적인 인장력 혹은 압축력에 대한 단면설계가 수행되어야 하며, 두부에서의 휨 모멘트에 대한 철근보강도 고려해야 하겠다.
- (3) 복합하중이 작용하는 경우 말뚝의 횡방향 변위는 수평하중 단독으로 작용하는 경우보다 두부 구속조건에 관계없이 증가하였고 그 크기는 일정하였다. 그러나 말뚝의 침하량은 고정단의 경우 가력방향의 말뚝에서 크게 발생하는데 이는 횡방향 하중의 크기가 증가할수록 크게 나타날 것으로 판단된다. 이러한 현상은 고정단의 말뚝과 전면기초사이에서 모멘트 및 전단력의 전이현상으로 인해 발생한 부등침하로 판단된다.
 - (4) 고정단의 경우 말뚝의 두부에서 발생하는 부(-) 모멘트의 발생으로 철근보강이 필요할 것으로 판단되며, 전면기초 단면에서의 전단력이 더욱 크게 발생하는 것은 힌지구속의 경우와 비교하여 단면의 두께가 커질 수 있기 때문에 과다설계의 가능성이 있다.
 - (5) 힌지구속의 경우 말뚝두부에서의 모멘트가 발생하지 않고 전면기초에 발생하는 전단력의 크기가 고정단의 경우와 비교하여 작기 때문에 기존의 고정단 설계와 비교하여 말뚝에서의 철근량 및 전면기초의 두께를 감소시킬 수 있어 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다. 단, 수평방향 하중에 대한 변위가

고정단보다 크기 때문에 설계 시 허용수평변위 기준에 대한 검토가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호# 09 첨단도시 A01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 한국지반공학회 (2009), 구조물기초설계기준 해설, 구미서관, pp. 373.
2. 대한토목학회·교량설계핵심기술연구단 (2008), 도로교설계기준 해설, 기문당, pp.905-914.
3. 원진오, 정상섭 (2005), “교량 말뚝기초 해석기법의 적용성 분석”, *한국지반공학회 논문집*, 제 21권, 4호, pp.123-134.
4. Butterfield, R., and P. K. Banerjee (1971), “The problem of pile group-cap interaction”, *Geotechnique*, 21, pp.135-142.
5. Hoit, M. I., Mcvay, M., Hays, C., and Andrade, P. W. (1996), “Nonlinear pile foundation analysis using Florida-Pier”, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.1, No.4, pp. 135-142.
5. Jeong, S. S., Lee, J. H. and Lee, C. J. (2004), “Slip effect at the pile-soil interface on dragload”, *Computers & Geotechnics*, Vol. 31, pp.115-126.
7. Lee, J. H., Kim, Y. H., and Jeong, S. S. (2010), “Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay”, *Computers & Geotechnics*, Vol.37, pp.103-114.
8. McVay, M. C., T. Shang, and R. Casper (1996), “Centrifuge testing of Fixed-head laterally loaded battered and plumb pile groups in sand”, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol.19, No.3, pp.41-50.
9. O'Neill, M. W., O. I. Ghazzaly., and H. B. Ha (1977), “Analysis of Three-dimensional Pile Groups with Nonlinear Soil Response and Pile-Soil-Pile Interaction”, *Proceedings, Ninth offshore Technology Conference*, Vol.II, pp.245-256.
10. Ottaviani, M. (1975), “Three-Dimensional Finite element Analysis of Vertically loaded pile groups”, *Geotechnique*, 25, pp.159-174.
11. Poulos, H. G. (1979), “Group factors for pile-deflection estimation”, *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol.105, No.12, pp.1489-1509.
12. Randolph, M. F. (1981), “The response of flexible piles to lateral loading”, *Geotechnique*, 31, pp.247-259.
13. Reese, L. C., K. Awoshika., P. H. Lam., and S. T. Wang (1990), “Analysis of a group of piles subjected to axial and lateral loading”, Group version 2.0, Ensoft, Austin, TX.
14. Won, J. O., Jeong, S. S., Lee, J. H. and Jang, S. Y. (2006), “Nonlinear three-dimensional analysis of pile group supported columns considering pile cap flexibility”, *Computers & Geotechnics*, Vol.33, pp.355-370.

(접수일자 2010. 9. 6, 심사완료일 2010. 10. 18)