

말뚝지지 전면기초¹

Piled Raft Foundations

1. 서론²

2. 말뚝지지 전면기초의 개념³

3. 국내 · 외 기술개발 현황⁴

4. 현장계측사례⁵

5. 모형실험결과⁶

6. 결론⁷

권오균⁸

Oh-Kyun Kwon

계명대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ⁹

이 환¹⁰

Whoal Lee

계명대학교 토목공학과 박사과정

Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ.¹¹

말뚝지지 전면기초 Piled Raft Foundations

권 오 균¹⁾, Ohkyun Kwon, 이 활²⁾, Whoal Lee

¹⁾ 계명대학교 공학부 토목공학전공 부교수
Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ.

²⁾ 계명대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료
Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ.

개요(SYNOPSIS)

The general design practice for piled footings is based on the assumption that the piles are free-standing, and that all the external loads are carried by the piles, with any contribution of the footing being ignored. This approach is not reasonable, because the footing itself is actually in direct contact with the soil, and thus carries a significant fraction of the loads. In the case of not considering the bearing capacity of footing, the bearing capacity of group piles can be evaluated conservatively in the designing the group piles. There are a number of reasons why the idea of piled raft design with considering the capacity of footing has not become widely used. One of the reasons is the lack of reliable calculation methods for estimating the behavior of piled raft. In this study the bearing capacity, settlement, load distribution, etc. of piled raft footing are studied.

Key Words : piled raft footing, group pile, group efficiency, load sharing ratio

1 서론

구조물 기초에 대한 설계는 충분한 지지력 확보와 함께 구조물의 안전성과 사용성에 합당한 침하기준 등을 충족시켜야 한다. 현재까지 국내에서 말뚝지지 전면기초에 대한 설계는 주로 지지력에 대한 검토가 이루어져 왔으며, 대부분의 설계과정에서도 지지력은 말뚝만으로 지지되는 것으로 계산되고 래프트(raft)의 지지력 분담효과 등은 무시되어 왔다. 그러나, 실제 무리말뚝에 대한 공사현장에서는 래프트가 얹은 기초형식으로 공사가 이루어지고 있으므로 이를 무시한 설계는 경제적으로도 비합리적인 설계가 될 수 있다. 또한, 최근에 순수한 얹은 기초형식의 기초에서 지지력은 확보되나 침하기준 등을 충족시키지 못할 경우에 침하감소를 목적으로 말뚝을 배치하는 새로운 개념의 설계방식도 외국의 경우에서 실시되고 있다. 따라서, 래프트(raft)의 하중분담효과와 말뚝의 효율적 배치를 통한 지지력 향상과 기초의 침하감소 등을 목적으로 한 말뚝지지 전면기초에 대한 새로운 인식이 필요한 시점이다.

그러나 현재 합리적인 말뚝지지 전면기초의 설계를 위한 연구는 미흡한 실정이며, 이는 현장제하시험이나 계측결과를 통한 말뚝지지 전면기초의 실제 지지 거동에 대한 규명이 제대로 이루어지지 않고 있기 때문이다.

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초의 지지력, 침하, 하중분포 등에 관한 내용을 파악하고 말뚝지지 전면기초에 대한 이해를 높이고자 한다.

2 말뚝지지 전면기초의 개념

말뚝지지 전면기초는 크게 2종류의 개념으로 파악할 수 있다. 첫 번째는 그림 2.1과 같이 전면기초만으로도 충분한 지지력이 확보되어 지지력 측면에서는 문제점이 없으나, 기초의 침하측면에서 허용침하량을 초과하게 되어 침하를 감소시킬 목적으로 말뚝을 보조적인 관점에서 사용하는 것이다. 두 번째의 경우는 그림 2.2와 같이 무리말뚝이 주요 지지력 요소이지만, 구조물 공사시에 함께 시공되는 래프트(raft)도 동시에 기초로 거동하므로, 래프트의 지지력을 고려한다면 말뚝의 수량이나 길이 등을 감소시킬 수 있어 좀더 경제적이고 효율적인 무리말뚝 설계방법(강인규, 2001)에 대한 접근 방법을 제시할 수 있다.

말뚝지지 전면기초는 그림 2.2와 같이 말뚝과 래프트, 기초지반과의 지지요소로 구성된 복합기초로서 거동특성을 나타내며 상부구조물의 하중은 식 (1)과 같이 말뚝과 래프트가 동시에 지반에 전달하는 기초형태로 되어 있다.

$$R_{tot} = R_{raft} + \sum R_p \quad (1)$$

여기서, R_{tot} : 말뚝지지 전면기초에 가해지는 전체하중

R_{raft} : 말뚝지지 전면기초에서 래프트가 분담하는 하중

R_p : 말뚝지지 전면기초에서 말뚝이 분담하는 하중

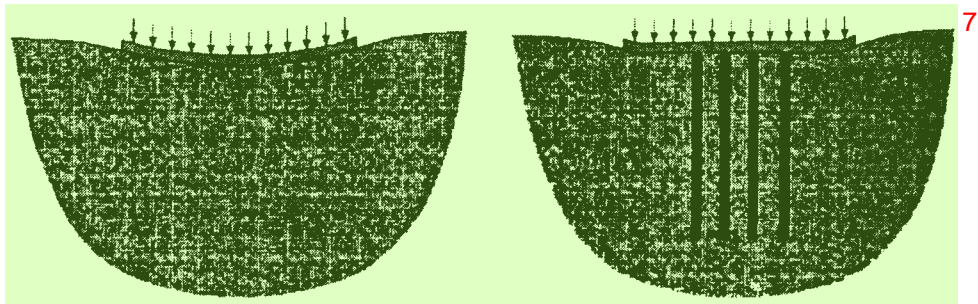


그림 2.1 기초 침하 감소 목적의 말뚝지지 전면기초

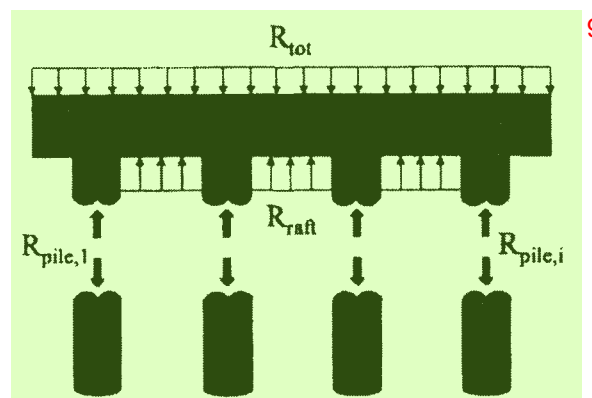


그림 2.2 말뚝 중심의 말뚝지지 전면기초(Katzenbach & Reul, 1997)

말뚝지지 전면기초는 말뚝과 얇은 기초의 복합적인 거동특성을 나타내므로 이 기초의 장점은 좀더 효율적인 기초로서 거동을 한다는 것이며, 다음과 같은 장점들을 나타낼 수 있다. ¹

- 말뚝지지 전면기초는 순수한 무리말뚝기초와 비교하여 말뚝수와 길이를 감소시킬 수 있다. ²
- 얇은 기초의 침하와 부등침하 등을 감소시켜 기초의 효율성을 증대시킬 수 있다.
- 얇은 기초 하부에 말뚝을 효율적으로 배치시킴으로써 얇은 기초내부의 응력과 모멘트 등을 감소시킬 수 있다.
- 말뚝과 얇은 기초가 지지하중을 공동부담함으로써 기초전체의 지지력을 증가시킬 수 있다.
- 기초의 굴착공정 전단계에서 미리 말뚝을 설치함으로써 굴착에 따른 지반의 이완현상과 heaving 현상 등을 억제할 수 있다.
- 얇은 기초에서 편심하중이나 집중하중이 발생하는 지점에 말뚝을 설치함으로써 전체적인 하중의 중심을 기초의 중심부로 유도할 수 있다.

말뚝지지 전면기초의 이러한 장점들은 기초지반의 강성이 깊이에 따라 증가할수록 더욱 양호해질 수 있으며 래프트(raft) 하부지반이 연약할 경우에는 말뚝지지 전면기초의 장점이 약화될 수 있다. ³

3 국내 · 외 기술개발 현황 ⁴

3.1 말뚝지지 전면기초의 말뚝하중분포 ⁵

일반적으로 말뚝지지 전면기초내에 존재하는 각각의 말뚝에 작용하는 하중의 분포는 말뚝의 위치에 따라 다르게 나타나는 경향들이 많은 것으로 보고되고 있다. 말뚝지지 전면기초의 현장계측, 모형실험, 수치해석 등에 의한 기존의 연구들을 정리하면 다음의 표 3.1과 같다. 현재까지 보고된 여러 형태의 말뚝하중 분포사례를 분석해보면 서로 상반된 결과들을 나타내고 있는 것을 알 수 있는데, 일부는 래프트의 중앙부분에 위치하고 있는 말뚝의 하중분포가 크다고 하고, 일부는 반대로 래프트의 외곽부분에 위 ⁶

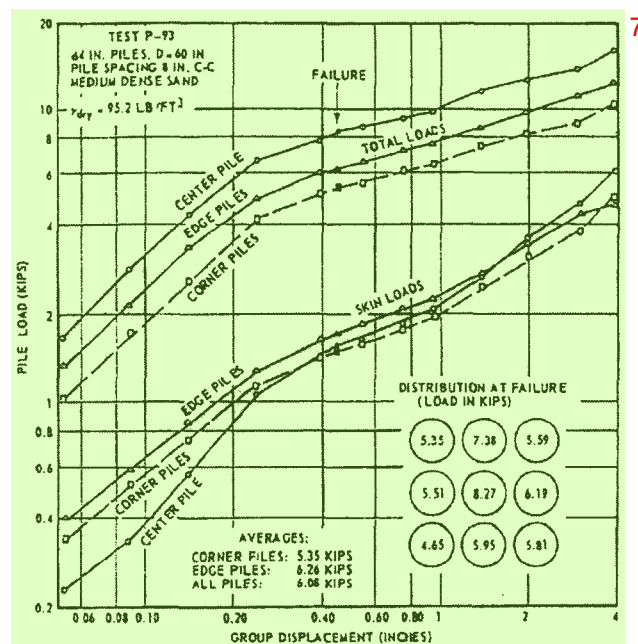


그림 3.1 말뚝지지 전면기초에서의 말뚝하중분포 (Vesic, 1969) ⁸

1
 치한 말뚝의 하중분포가 크다고 주장하고 있다. 그러나, 표 3.1과 기타 다른 자료들을 비교해 보면, 래프트의 외곽부분에 위치한 말뚝의 하중분포가 우세하다고 보고된 자료들은 대부분 수치해석결과이거나 점성토 지반에서의 모형실험이나 현장계측결과들이다. 반면에 래프트의 중앙부분에 위치한 말뚝들의 하중이 우세하다고 보고된 자료들은 대체적으로 사질토지반에 대한 현장계측이거나 모형실험결과이므로 지반조건에 따라 말뚝의 하중분포가 다르게 나타날 수도 있는 것으로 판단된다. 또한, 래프트의 강성이나 두께에 따라 말뚝들의 하중분포가 다르게 나타날 수 있는데(Hain & Lee, 1978 ; Franke, 1991), 강성기초에서의 하중분포는 균일하지 않게 나타나며 연성기초일수록 말뚝들의 하중분포는 균일하게 나타나는 것으로 보고된 바 있다. Cooke 등(1981)은 말뚝지지 전면기초에서 말뚝들의 하중분포는 말뚝수, 말뚝길이, 말뚝간격 등에 따라서도 영향을 받을 수 있다고 보고한 바 있다.

2
 표 3.1 말뚝지지 전면기초의 말뚝하중분포

3

제안자	년도	대상지반	연구방법	말뚝형식	말뚝하중분포		비고
					중앙부	외곽부	
Hain & Lee	1978	homogeneous soil	수치해석	6 ²	大 小 균등		raft : 강성 raft : 연성
Yamashita et al	1993	kanto loam sand silty sand	수치해석 현장계측비교	twenty bored pile	大 小		
Poulos & Aust	1968	homogeneous soil	수치해석	3 ² , 4 ² , 5 ²	小 大		
Cooke	1986	stiff clay	모형실험	3 ² , 5 ² , 7 ² , 9 ²	小 大		
Whitaker	1957	London Clay	모형실험	3 ² , 5 ²	小 大		모든 간격
				5 ²	1 6		간격 : 2D
					1 2		간격 : 4D
Sower et al	1961	homogeneous clay	모형실험	3 ²	1 4 1 2		간격 : 2D 간격 : 5D
Franke	1991	homogeneous soil	수치해석 현장계측 비교	4 ²	小 大		수치해석
					大 小		현장계측
Cooke et al	1981	Loadon clay	현장계측	351 EA bored pile	小 大		모든 간격
					1 2		간격 : 4D
					1 2.2		간격 : 3.5D
Kuwabara	1989	homogeneous soil	수치해석	3 ²	小 大		
진봉근	1999	모래	모형실험	3 ²	大 小		free standing 2D, 3D
					모든 하중 비슷		free standing 4D, 5D
					大 小		piled raft 모든 간격
Ottaviani	1975	homogeneous soil	수치해석	3 ² , 5×3	小 大		
Vesic	1969	medium-dens e sand	실대형 모형실험	2 ² , 3 ²	큼 작음		-

3.2 말뚝지지 전면기초의 침하¹

말뚝지지 전면기초와 얇은 기초의 침하비교에서 동일한 하중에 대하여 얇은 기초에서의 침하가 크게 발생한다는 연구결과(Hain & Lee, 1978 ; Garg, 1979)는 침하문제에 있어서 말뚝지지 전면기초가 래프트만의 얇은 기초에 비해 더 효율적인 것을 의미한다. 이러한 경향은 말뚝지지 전면기초에 대한 모형실험에서 래프트만 있는 경우에 비하여 침하량이 50%이하로 감소하였다고 보고된 자료(진봉근, 1999)를 통해서도 파악할 수 있다. 말뚝지지 전면기초의 침하에 영향을 미치는 요소로는 말뚝수, 말뚝간격, 말뚝길이, 래프트의 강성, 지지층과 말뚝선단과의 이격거리 등이 있으며(Poulos, 1968 ; Poulos & Davis, 1980), 래프트의 폭도 침하에 영향을 미칠 수 있다(Cooke, 1986)고 보고된 바 있다. 또한 Cooke은 동일한 지반조건에서 순수 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초와의 침하량 비교에서 말뚝간격이 $2.5 D$ 이내인 경우에 침하량은 큰 차이를 보이지 않지만, 말뚝간격이 $2.5 D$ 이상이면 말뚝지지 전면기초의 침하량이 순수한 무리말뚝 상태보다 작게 발생한다고 주장하였다. Horikoshi & Randolph(1996)는 동일한 크기의 래프트 기초에 대하여 말뚝수량을 9개, 21개, 69개로 변화시켜 모형실험을 실시한 결과에서 9개의 말뚝을 사용한 기초의 침하는 얇은 기초에 비하여 큰 차이를 나타내지 않았지만, 69개의 말뚝을 사용한 기초는 얇은 기초에 비해 침하량이 크게 감소된 것으로 보고하였다. 이러한 결과는 말뚝지지 전면기초에 사용된 말뚝들의 지지력이 순수한 무리말뚝 상태의 말뚝보다 더 크며, 말뚝지지 전면기초에서 래프트가 전체 지지력 중에서 상당한 부분을 부담한 것으로 판단하여, 말뚝지지 전면기초에서의 래프트의 역할을 설명하기도 하였다.

3.3 말뚝지지 전면기초의 지지력³

말뚝지지 전면기초의 지지력은 말뚝과 래프트가 복합된 기초로서의 거동특성을 나타내므로 말뚝의 지지력만으로는 말뚝지지 전면기초의 지지력을 과소평가할 수 있다. 그러나, 말뚝의 지지력과 래프트 지지력의 산술적인 합(Akinmusuru, 1980)으로 평가할 수도 없는데, 이는 그림 3.2에 나타난 바와 같이 복합기초로서의 말뚝지지 전면기초의 거동특성이 매우 복잡하고 그 거동특성 또한 명확히 규명되지 못했기 때문이다. 말뚝지지 전면기초의 지지력을 평가하는 방법은 크게 2가지로 나눌 수 있는데, 첫번째는 정역

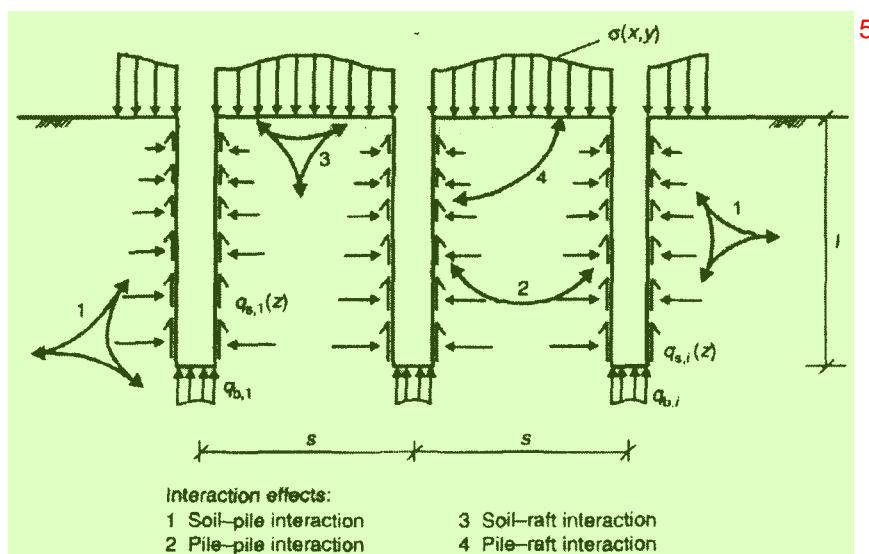
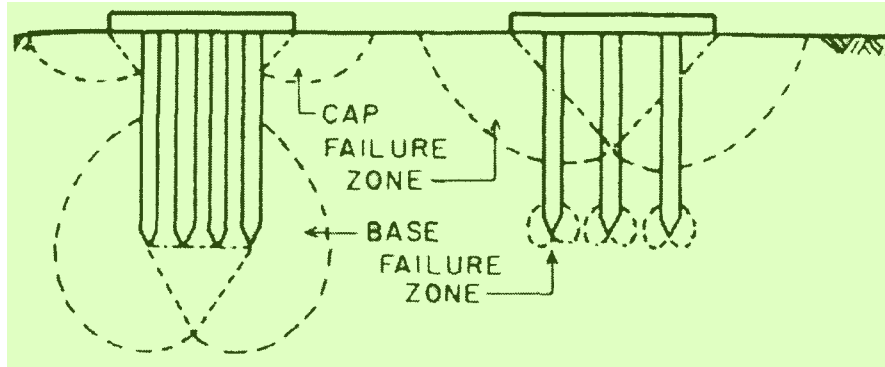


그림 3.2 Piled Raft 기초에서의 상호간섭적 거동특성(Katzenbach et al, 2000)⁶

학적 방법으로 캡(cap)과 말뚝의 지지면적을 고려하는 방법(Kishida & Meyerhof, 1965 ; Vesic, 1969)이고, 두번째는 말뚝지지 전면기초의 지지력 계수들을 고려하는 방법(Phung, 1993 ; Liu & Yuan & Zhang, 1985)이다. 정역학적 방법은 그림 3.3에서 보는 바와 같이 크게 무리말뚝군 외부의 래프트 면적에 의한 지지력과 무리말뚝블록(block)의 선단지지력의 합으로 말뚝지지 전면기초 지지력을 결정하는 유효캡 지지면적을 고려한 방법과 래프트 전체의 지지력과 각 말뚝들의 선단지지력의 합을 말뚝지지 전면기초의 지지력으로 결정하는 전체 캡 지지면적을 고려한 방법으로 구분된다.



(a) pier failure (b) individual failure

그림 3.3 말뚝기초의 파괴영역 (Kishida & Meyerhof, 1965)

말뚝지지 전면기초의 지지력 계수를 이용하여 지지력을 결정하는 방법은 대개의 경우 모형실험결과를 이용하여 연구되었다. 먼저 단말뚝에 대한 하중재하실험을 실시하여 지지력을 결정한 후, 동일한 지반조건에서 순수 무리말뚝조건과 복합기초 형태인 말뚝지지 전면기초 조건에 대하여 실험을 실시하여 말뚝의 선단효율과 주면효율 그리고, 말뚝지지 전면기초에서의 래프트 하중분담을 등을 분석하여 말뚝지지 전면기초의 지지력을 결정하는 방법으로서 선단효율보다는 말뚝 사이에 발생하는 주면효율이 더 중요하다고 언급되고 있다. 영향계수를 이용하는 말뚝지지 전면기초의 지지력을 결정하는 방법은 그림 3.4를 통하여 설명될 수 있다. 이 그림에서 제시한 바와 같이 단말뚝과 순수 무리말뚝 상태의 무리말뚝을 구성하는 한개의 말뚝 사이의 지지력 비를 영향계수 δ 를 사용하여 나타내고, 순수한 무리말뚝을 구성하는 하나의 말뚝과 말뚝지지 전면기초를 구성하는 하나의 말뚝 사이의 지지력 비를 영향계수 β 를 사용하여 나타내었다. 또한, 단독 래프트와 말뚝지지 전면기초를 구성하는 래프트의 지지력 비를 영향계수 β_c 로 나타내었다. 이러한 각각의 관계를 식 (2)와 같이 표현하여 말뚝지지 전면기초의 지지력을 계산한다.

$$P_{ft} = n(\beta_s \delta_s P_{ss} + \beta_b \delta_b P_{sb}) + \beta_c P_c \quad (2)$$

여기서 n : 말뚝지지 전면기초를 구성하는 말뚝갯수

P_{ss}, P_{sb} : 기준 단말뚝의 주면지지력 및 선단지지력

P_c : 래프트의 단독 지지력

δ_s, δ_b : 말뚝주면지지력과 선단지지력에 영향을 미치는 말뚝-흙-말뚝 사이의 상호작용에 의한 영향계수 (단말뚝 대 순수 무리말뚝)

$\beta_s, \beta_b, \beta_c$: 말뚝 주면지지력과 선단지지력 그리고 래프트의 지지력에 영향을 미치는 래프트-말뚝 사이의 상호작용에 의한 영향계수 (래프트 대 순수 무리말뚝)

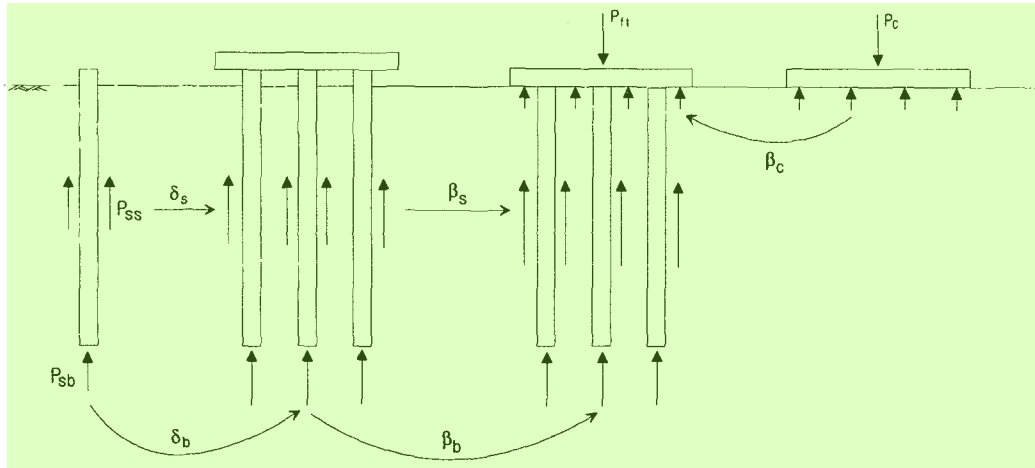


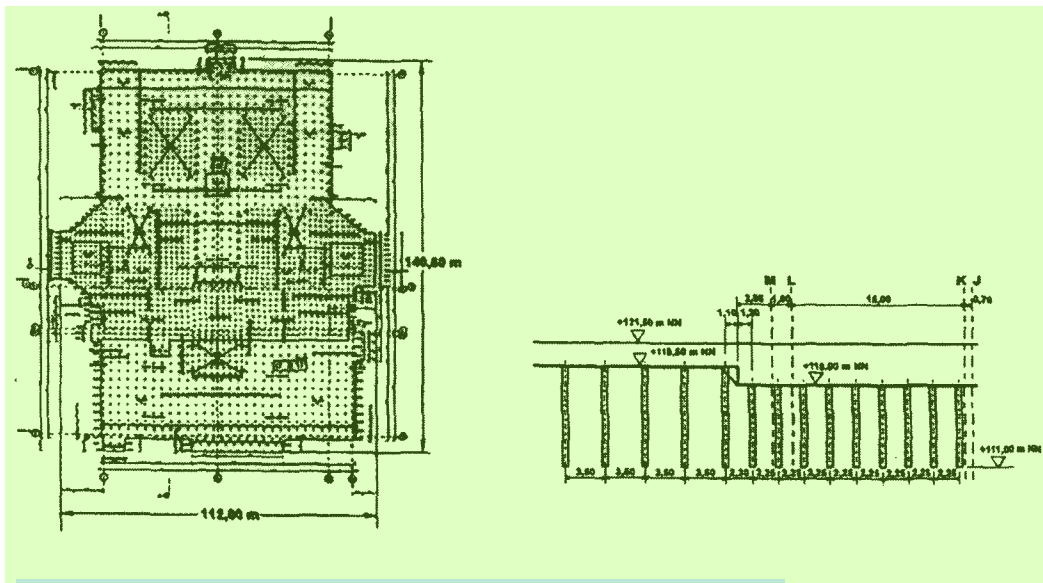
그림 3.4 영향계수를 이용한 말뚝지지 전면기초 지지력 계산

4 현장계측사례

4.1 화력발전소 건설공사 (독일 남동부 지역) (D. Placzek, E. Jentzsch, 1997)

① 개요

독일 남동부 지역에 800MW 용량의 화력발전소를 신설하였는데 좁은 발전소의 특성상 좁은 면적위에 무거운 중량의 건물들이 위치하게 되었다. 주요 발전소 건물의 면적은 대략 $100\text{m} \times 80\text{m}$ 정도이며, 총 재하중량은 약 6,160MN 정도로 계산되었다. 해당지역의 지반특성은 지표면 아래 1m 깊이부터 다량의 실트가 함유된 느슨한 모래층이 발달해 있으며, 얇은 실트층과 유기질토가 모래층 사이에 수평방향으로 비연속적으로 발달해 있는 상황이었다. 최초 설계에서는 발전소 기초를 얇은 기초 형식으로 설계하였으나, 설계된 기초에 대하여 재검토하여 본 결과, 얇은 기초의 측면부분에서 10~15cm 정도의 침하량을 나타내며, 발전실 기초부분에서도 허용부등침하량인 1 : 3,300 이상의 부등침하량 등을 나타내어 얇은 기초형식은 발전소 기초로서 부적합한 것으로 판단되었다.



(a) 말뚝배치 평면도

(b) 기초 단면도

그림 4.1 말뚝지지 전면기초 단면도

② 적용방법 1

발전소 건물에 대한 매우 제한적인 침하량 기준 등으로 인하여 침하량을 최소한으로 감소시킬 수 있는 기초형식이 요구되었으며, 이러한 요구조건을 충족시키기 위하여 말뚝지지 전면기초(piled raft footing) 형식이 선정되었다. 말뚝형식은 말뚝품질의 향상을 위하여 콘크리트 말뚝(Concrete vibration piles)을 적용하였으며, 말뚝지름은 50cm, 길이는 7m로 제작하였으며, 말뚝간격은 래프트(raft) 무게가 15MN/m^3 인 곳은 2.25m 간격, 30MN/m^3 인 곳은 3.5m 간격으로 배치하였다.

③ 결과 3

본 발전소 기초에 대한 말뚝지지 전면기초 형식을 적용하여 공사를 진행하는 과정에서 2개의 stair tower를 건설기간 동안에 15~25mm의 침하가 발생하였으며, 이러한 침하로 인하여 말뚝지지 전면기초에서 발생한 비틀림 현상 등은 극히 미약하게 나타났다.

4.2 Stonebridge Park (Cooke, R. W., Bryden-Smith, D. W., Gooch, M. N. and Sillett, D. F.,1981) 5

① 개요 6

London 북쪽에서 6년여에 걸쳐서 Stonebridge Park에 위치한 16층 건물에 대하여 계측을 실시하였으며, 대상건물은 길이 43.2m, 폭은 19.2m이며 London clay 지반 위에 건설되었다. 말뚝지지 전면기초에 사용된 말뚝은 0.9m 두께의 래프트(raft)와 직경이 0.45m, 길이 13m로 제작되었으며 말뚝수량은 351개로 구성되었다. 깊이 3m에서의 London Clay의 비배수 전단강도는 100kN/m^2 이며, 25m 깊이에서는 260kN/m^2 이었다. 또한, 말뚝 선단 부근에서의 비배수 전단강도는 190kN/m^2 정도로 나타났다. 말뚝의 지지력은 전응력방법으로 계산되었으며 안전율에 있어서는 주변마찰력과 선단지지력에 대하여 부분안전율을 적용하여 말뚝 1본당 565kN을 지지하는 것으로 설계되었다.

② 결과 8

해당 건물에 대하여 수년간에 걸쳐 계측한 결과에서 말뚝의 위치에 따른 하중의 분포는 그림 4.2에 나타난 바와 같이 래프트(raft)의 내부에 위치한 말뚝과 모서리 부분에 위치한 말뚝의 하중분포에 차이가 있는 것으로 나타났다. 말뚝간격이 말뚝직경의 4배($4D$)인 경우에는 모서리 : 면 : 중심부의 말뚝 하중의 비율이 2 : 1.4 : 1로 나타났으며, 말뚝간격이 $3.5D$ 인 경우에는 2.2 : 1.7 : 1로 발생하였다. 이 결과로부터 말뚝간격이 감소함에 따라 위치별 말뚝의 하중차이는 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 말뚝을 지지하는 하중의 구성비율도 모서리 부분의 말뚝에서는 주변마찰력이 우세하고, 래프트 내부에 위치할수록 선단지지력이 증가하는 경향을 나타내었다. 해당건물의 침하는 총 4년에 걸쳐 발생한 침하량의 60%가 공사기간 중에 발생하였으며, 공사종료후에는 압밀현상으로 인해 1mm/year 의 크기로 침하가 발생하였다. 또한, 공사초기기간 중에는 55% 정도이던 말뚝의 하중분담율이 압밀현상이 진행됨에 따라 건물완성 이후에는 75%로 증가하였다.

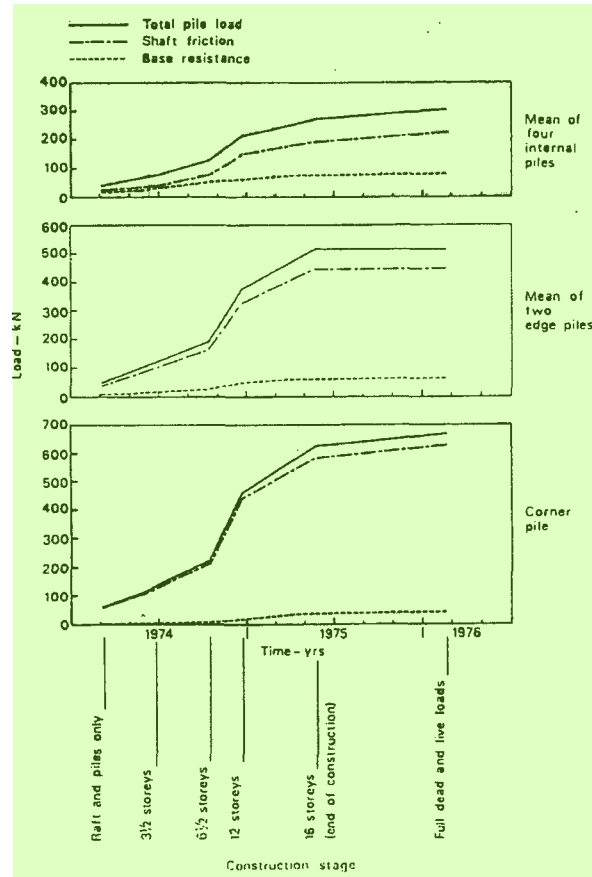


그림 4.2 말뚝위치별 주변마찰력과 선단지지력 변화

4.3 Urawa City (Yamashita, K., Kakurai, M., Yamada, T. & Kuwabara, F., 1993)

① 개요

본 건물은 일본 Tokyo현 Urawa 시(市)에 위치한 5층의 콘크리트 건물로 24×23m의 크기이며 인접건물과 15m 정도 떨어져 위치하고 있다. 대상지반은 지표면으로부터 6m 깊이까지 150~200 kPa의 일축압축강도의 Kanto Loam으로 구성되어 있으며, 16~19m 깊이까지는 보통~조밀한 사질토 지반으로 구성되어 있다.

② 적용방법

초기의 설계에서 해당 건물의 기초에 대해서는 순수한 얇은 기초 형식으로 설계되었으며, 설계하중은 47.5 MN, 평균접지압은 84 kPa로 계산되었다. 본 기초에서는 최대 접지압이 기초의 허용지지력보다 작게 나타나는 것으로 설계되었으나, 기초의 부등침하가 1/300을 초과하는 것으로 나타나 부등침하에 대한 대책방법이 요구되었다. 이에 대한 대책방안으로 말뚝지지 전면기초 형식이 선정되었으며, 말뚝형식은 현장타설말뚝형식으로 공사를 진행하였다. 말뚝의 직경은 0.7~0.8m, 길이는 16m로 제작되었고 말뚝간격은 6.3~8.6 D로 배치되었다.

③ 결과

건물의 완성단계에서 발생한 침하량은 1~2cm로써 얇은 기초 형식에서 예측된 침하량보다 작게 발생한 것으로 평가되었으며, 기초의 부등침하량도 매우 미약하게 발생하여 말뚝지지 전면기초가 전체 침하

나 부등침하 감소에 매우 과적인 것으로 나타났다. 또한, 위치에 따른 말뚝의 하중분포는 래프트(raft)의 모서리부분에 있는 말뚝의 하중이 래프트 중심부분에 있는 말뚝보다 큰 하중을 나타내는 것으로 관측되었다. 공사초기에 말뚝의 분담하중은 매우 작은 것으로 나타났으나, 시간이 경과함에 따라 말뚝의 분담하중이 증가하는 것으로 나타났으며 공사가 완료될 시점에서는 전체하중의 49%를 말뚝이 부담하는 것으로 계측되었다.

4.4 Frankfurt 지역에서의 말뚝지지 전면기초의 적용²

① 개요³

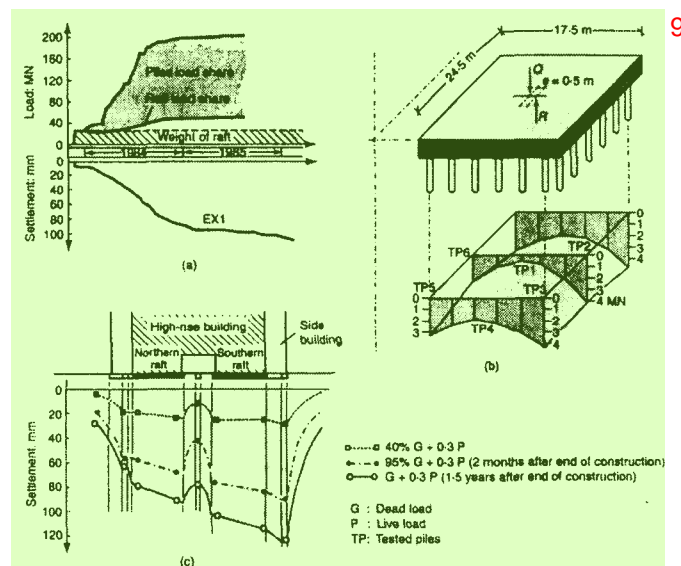
독일의 Frankfurt 지역의 지반상태는 충적형 사질토와 자갈성 빙적토가 약 10m 깊이까지 위치하고 있으며 Frankfurt Clay라고 불리는 점성토가 10m 이상의 깊이부터 깊게 형성되어 있다. 과거에는 이런 지역에서 고층건물의 신축은 어려운 일로 간주되어 왔으나, 최근들어 말뚝지지 전면기초의 적용으로 고층건물들의 건설도 가능하게 되었다. 이러한 지반조건에서의 고층건물들에 대한 말뚝지지 전면기초의 용도는 크게 구조물의 침하와 기울기 감소와 말뚝기초로의 응력전달로 인한 래프트 내부의 응력증가 현상 억제 등을 들 수 있다.

② 적용 예⁵

㉠ Torhaus Building (Franke, E. El-Mossallamy, & Wittmann, P., 2000)⁶

㉡ 적용⁷

Torhaus Building은 1982~1984년 사이에 독일에서 최초로 건설된 말뚝지지 전면기초 형식의 구조물이다. 건물전체는 문(door) 형태를 이루고 있으며 전체 무게는 400MN이며 130m 높이의 30층 건물이다. 건물사이를 통로로 사용함으로써 래프트 기초는 좌, 우의 2개로 나뉘어져 있는 형태이고, 래프트 두께는 2.5m, 말뚝은 42개의 천공말뚝(bored pile)으로 구성되어 있다. 말뚝의 직경은 0.9m이고 길이는 20m으로 제작되었으며 래프트의 크기는 좌우 각각 24.5×17.5m의 크기로 이루어져 있다.



(a) 시간경과에 따른 침하 및 래프트-말뚝의 하중분담 (b) 말뚝두부 하중 (c) 지반침하¹⁰

그림 4.3 Torhaus Building 말뚝지지 전면기초의 계측결과¹¹

㉞ 결과 1

Torhaus Building의 최초설계인 얇은 기초만의 조건에서는 기초의 침하가 약 250mm로 나타나 이를 보완하기 위하여 말뚝지지 전면기초로 변경하였다. 말뚝지지 전면기초상태에서 나타난 침하량은 약 120mm 이내로 제한되어 기초의 침하감소에 큰 효과를 나타내었다. 그림 4.3에 나타난 바와 같이 본 구조물에서는 말뚝이 구조물 하중의 많은 부분을 지지하는 것으로 나타났으며, 말뚝의 하중분포는 그림 4.3(b)에 나타난 바와 같이 래프트 내부에서는 작게 나타나며 외부로 갈수록 크게 나타났다. 이러한 결과는 말뚝지지 전면기초에 적용하는 말뚝의 지지력을 단말뚝의 지지력 특성으로 고려한다는 것은 무리가 있을 수 있다는 것을 보여주고 있다.

㉟ Messeturm/Fairtower Building (Franke, 1991) 3

㉠ 적용 4

Messeturm/Fairtower 건물은 60층 건물로 높이가 256m에 이르는 고층건물이다. 건물기초는 60×60m의 크기이며, 64개의 말뚝이 3겹의 층으로서 배열을 하였으며 주요 구조물의 하중이 집중되는 기초 하단부에 말뚝간격을 좁게 배치하였다. 래프트의 두께는 중앙부분은 6m이며 바깥부분은 3m로 구성되어 있으며, 말뚝의 경우는 지름이 1.3m이며 길이는 래프트 중앙부분에 있는 말뚝은 34.9m, 중간부분에 있는 말뚝은 30.9m, 래프트 모서리부분에 있는 말뚝은 26.9m로 말뚝의 위치에 따라 말뚝의 길이를 다르게 배치하였다. 이러한 말뚝배치는 말뚝지지 전면기초는 말뚝의 위치에 따라 말뚝의 하중이 다르게 나타나므로 말뚝의 길이를 변화시킴으로써 말뚝의 지지하중이 고르게 분포할 수 있게 고려한 것이다.

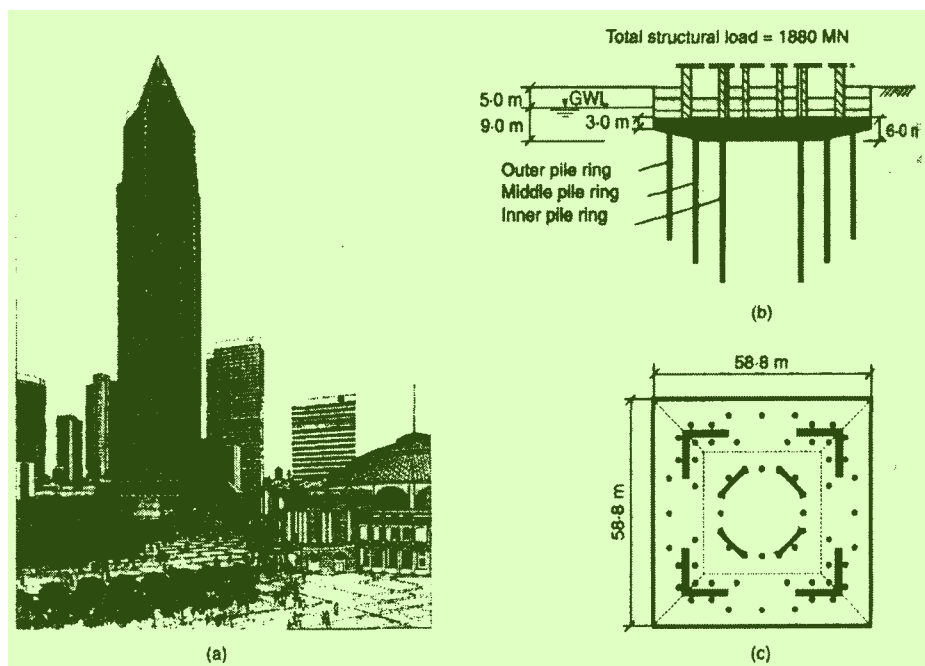


그림 4.4 Messeturm/Fairtower 건물의 말뚝지지 전면기초 배치 7

㉡ 결과 8

Messeturm/Fairtower 건물기초는 최초 설계에서는 얇은 기초로 설계가 되었으나 침하량이 400mm 정도 발생하는 것으로 계산되었다. 따라서, 이러한 침하량을 감소시킬 목적과 지지력 향상을 도모할 목적으로 말뚝지지 전면기초를 사용하여 침하량을 50%이상 감소시킬 수 있었다. 또한, 말뚝과 래프트 사이

의 하중분포비율은 말뚝이 전체하중의 55%, 래프트가 45%를 분담하는 것으로 나타났으며, 래프트에서의 접지압 분포형태는 Boussinesq의 제안토압과 유사하게 래프트 두께가 두꺼운 부분에서는 크게 나타났으며, 래프트의 두께가 얇아질수록 접지압은 감소하는 형태로 나타났다. 반면에 말뚝의 하중분포는 중앙부분에 위치한 말뚝이 약간 크게 나타났지만 전체적으로 비슷한 유형의 하중분포를 나타내어 말뚝길이에 따른 영향이 나타났다.

5 모형실험²

5.1 개요³

권오균 등(2002)은 3종류의 모래지반조건에 대하여 순수무리말뚝과 말뚝지지 전면기초와 래프트 기초에 대하여 모형실험을 실시하였다. 모래지반조건은 상대밀도가 20.1%, 43.6%, 83.0%로 조성되었으며 말뚝지지 전면기초의 말뚝간격은 3~6 D 조건으로 실험을 실시하였다. 모형말뚝은 직경 40mm, 길이는 1200mm로 제작되었다.

5.2 모형실험결과⁵

그림 5.1은 느슨한 지반조건에서 말뚝이 3×3 배열로 배치된 경우에서 말뚝간격증가에 따른 순수한 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초와 얇은기초인 래프트만의 하중-침하곡선을 나타낸 것이다. 이 그림에 나타난 바와 같이 말뚝간격에 관계없이 순수 무리말뚝보다 말뚝지지 전면기초에서의 하중이 더 크게 발생하며, 동일한 침하량에서는 말뚝지지 전면기초의 하중이 얇은 기초인 래프트 조건이나 순수무리말뚝조건에 비해 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 순수 무리말뚝에 비해 말뚝지지 전면기초에서 하중이 더 크게 나타나는 것은 래프트로 인한 추가적인 하중지지와 래프트의 영향에 기인한 말뚝의 지지력 증가 현상이 복합적으로 발생하여 나타난 것으로 판단된다. 또한, 말뚝간격이 증가함에 따라 말뚝지지 전면기초와 래프트 조건은 하중이 증가하고 있으나, 순수 무리말뚝 조건은 하중증가경향이 크지 않은 것을 알 수 있다.

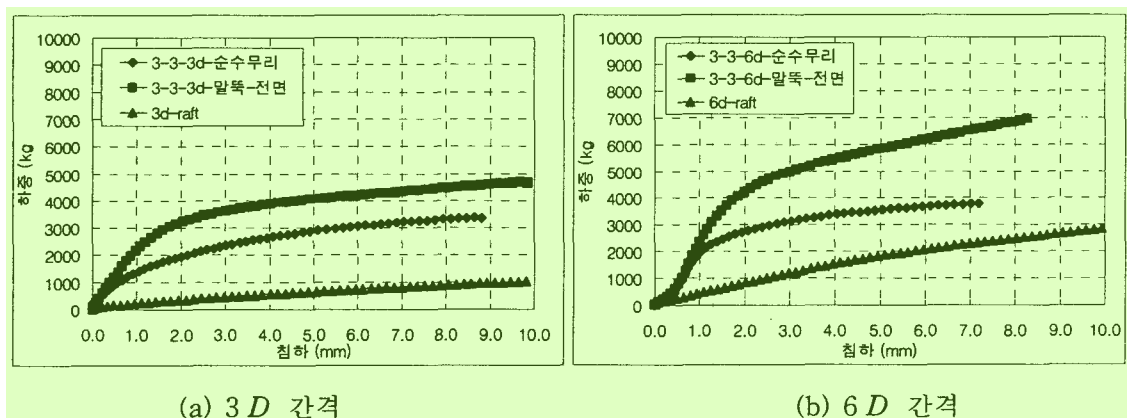
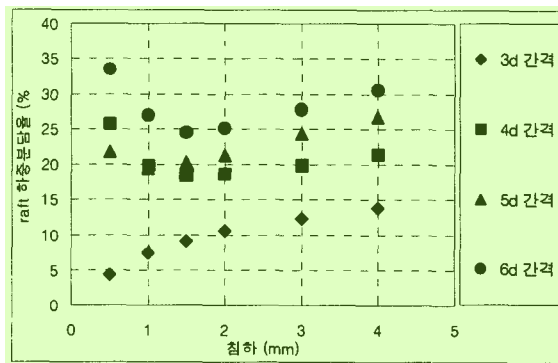
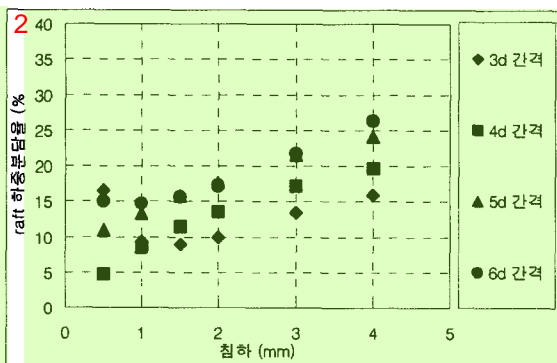


그림 5.1 3×3 말뚝배열 조건 (D_r : 20.1%)⁸

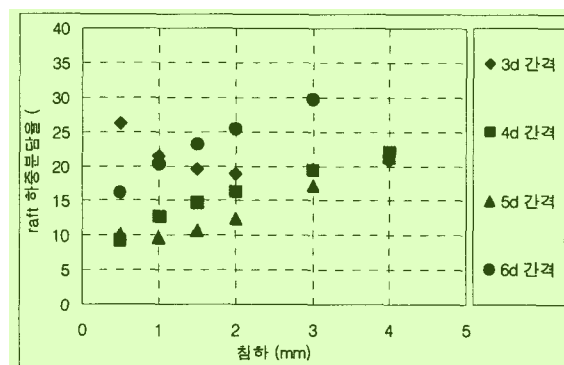
그림 5.2는 지반조건에 따른 래프트 하중분담율을 나타낸 것이다. 일부분의 조건에서 침하초기에 상대적으로 큰 래프트 하중분담비율을 나타내는 구간도 있으나 대부분의 경우에서 침하가 진행되고, 말뚝간격이 증가함에 따라 래프트 하중분담비율이 증가하는 모습을 나타내고 있다. 대부분의 조건에서 항복하중은 1.0~1.5mm 침하에서 발생하였고, 이 침하구간에서의 래프트 하중분담비율은 $D_r=20.1\%$ 에서 말뚝간격이 3D에서 6D 조건으로 변화함에 따라 10%에서 27%로 증가하고, $D_r=83.0\%$ 인 경우는 20%에서 22%로 나타났다. 따라서, 지반조건이 느슨한 경우($D_r=20.1\%$)는 말뚝간격 증가에 따른 래프트 하중분담율이 크게 증가하며, 조밀한 지반조건($D_r=83.0\%$)에서는 말뚝간격 증가에 따른 래프트 하중분담율의 증가현상이 미약하게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 모든 지반조건과 말뚝간격조건의 말뚝지지 전면기초에서 래프트의 하중분담율이 일정한 수준 이상으로 나타나고 있으며, 침하가 말뚝직경의 10%(4mm)에 이르기까지도 지속적으로 증가하고 있어 말뚝지지 전면기초에서 래프트의 하중분담율을 고려해주는 것이 타당하다고 판단된다.



(a) 느슨한 지반 ($D_r : 20.1\%$) 3



(b) 보통 지반 ($D_r : 43.6\%$) 5



(c) 조밀한 지반 ($D_r : 83.0\%$) 8

그림 5.2 지반조건과 말뚝간격에 따른 래프트 하중분담율(3×3 배열) 7

6 결론¹

본 연구에서는 말뚝전면기초에 대한 이해를 돕기 위해 말뚝전면기초의 정의와 거동특성 등에 대한 기존의 연구결과와 실제 현장계측결과에 대한 비교 및 분석을 실시하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.²

- 1) 말뚝지지 전면기초는 얇은 기초와 순수 무리말뚝기초에 비하여 침하감소와 지지력증가에 있어 매우 효율적인 기초이다.³
- 2) 말뚝지지 전면기초에 사용되는 말뚝들에 대한 지지력 평가시에는 래프트의 영향으로 말뚝들의 지지력이 증가하므로 단일말뚝에 지지력 평가결과의 합산만으로 계산하기에는 무리가 있을 수 있다.
- 3) 말뚝지지 전면기초에서 말뚝의 위치에 따라 말뚝하중이 다르게 나타나므로 말뚝길이를 래프트 내부의 말뚝위치에 따라 다르게 배치함으로써 전체적인 말뚝하중을 균등화시킬 수 있다.
- 4) 말뚝지지 전면기초에서 래프트 하중분담율은 지반조건이 느슨할수록, 말뚝간격이 증가할수록, 그리고 침하가 진행될수록 증가하는 것으로 나타났다.
- 5) 말뚝지지 전면기초에서 래프트 하중분담비율이 최대 50%에 이르는 경우도 있으며 말뚝중심의 말뚝 지지 전면기초이더라도 항복하중 발생시에 10~20% 정도의 래프트 하중분담율을 나타냄에 따라 말뚝지지 전면기초에 대한 설계시에 래프트의 지지력을 고려해주는 것이 타당하다고 판단된다.⁴

참 고 문 헌⁵

- 1) Akinmusuru, J. O. (1980), " Interaction Of Piles And Cap In Piled Footingss", ASCE, Vol. 106, No. GT 11, pp. 1263-1268⁶
- 2) Cooke, R. W. (1986), "Piled raft foundations on stiff clays - A contribution to design philosophy", Geotechnique 36, No 2, pp. 169-203
- 3) Cooke, R. W., Bryden-Smith, D. W., Gooch, M. N. and Sillett, D. F. (1981), "Some observations of the foundation loading and settlement of a multi-storey building on a piled raft foundation in London Clay", Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1, 70, pp. 433-460
- 4) D. Placzek, E. Jentzsch, (1997), "Pile-raft-foundation under exceptional vertical loads-Bearing behaviour and settlements", 14th ICSMFE, Vol 2, HAMBURG, pp. 1115-1118
- 5) Franke, E. El-Mossallamy, and Wittmann, P.(2000), "Calculation methods for raft foundation in Germany", Design applications of raft foundations, Thomas Telford, pp. 283-322
- 6) Franke, E. (1991), "Measurements beneath piled rafts", ENPC Conf. On De Found. Paris. pp. 599-625
- 7) Garg, K. G. (1979), "Bored pile groups under vertical load in sand", ASCE, Vol. 105, No. GT8. AUG, pp. 939-955
- 8) Hain, S. J. and LEE, I. K. (1978), "The analysis of flexible raft-piles systems" Geotechnique 28, No. 1, pp. 65-83

- 9) Horikoshi. K. and Randolph. M, F. (1996), "Centrifuge Modeling Of Piled Raft Foundations On Clay", *Geotechnique*, 46, No 4, pp. 741-752
- 10) Kishida. H, and Meyerhof, G, G. (1965), "Bearing Capacity Of Pile Groups Under Eccentric Loads In Sand", 6th ICSMFE, Vol 2, Montreal, pp. 270-274
- 11) Liu Jin-Li., Huang Qiang, Li Hua., Li Xiong., and Hu Wen-Long. (1994), "Experimental Research on Bearing Behaviour of Pile Groups in Soft Soil", XIII ICSMFE, New Delhi, India, pp. 535-538
- 12) Liu, J. L., Yuan. Z. L and Zhang. K. P. (1985), "Cap-pile-soil interaction of bored pile groups", 13th ICSMFE, Vol 3, San Francisco, pp. 1433-1436
- 13) Phung Duc Long (1993), "Footings With Settlement-Reducing Piles In Non-Cohesive Soil", Department of Geotechnical Engineering Chalmers University Of Technology S-412-96, Goteborg, Sweden.
- 14) Poulos, H. G. (1968), "Analysis of the settlement of pile groups", *Geotechnique*, 18, pp. 449-471
- 15) Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1980), *Pile foundation analysis and design*, New York, JOHN WILEY & SONS
- 16) Vesic, A, S. (1969), "Experiments With Instrumented Pile Groups In Sand", *Performance of Deep Foundations*, ASTM STP 444, pp. 177-222
- 17) Yamashita, K., Kakurai, M., Yamada, T. and Kuwabara, F. (1993), "Settlement behavior of a five-story building on a piled raft foundation", *Proceeding 2nd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Ghent, A.A Balkema, Rotterdam, pp. 351-356
- 18) 강인규, (2001), 하이브리드 유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초시스템의 최적설계, 홍익대학교 박사학위논문
- 19) 권오균, 이승현, 오세봉, 임종석, 이활 (2002) "Piled Raft 거동특성에 관한 실험적 연구", 2002년 기초 기술 학술발표회, (사) 한국지반공학회 기초 기술위원회, pp. 79-89
- 20) 권오균, 이활, 김진복, 이승현, 오세봉 (2002), "모형실험을 이용한 사질토 지반에서의 Piled raft 거동 특성에 대한 연구", 2002년 가을학술발표회 논문집, (사) 한국지반공학회, pp. 358-365
- 21) 이수형 (2000), 사질토 지반에서 연직하중을 받는 무리말뚝의 지지 거동 모형, 서울대학교 박사학위 논문
- 22) 이수형, 정충기 (2002), "연직하중을 받는 무리말뚝의 새로운 설계 방법", 2002년 기초 기술 학술발표회, (사) 한국지반공학회 기초 기술위원회, pp. 13-29