

Piled Raft 기초 Piled Raft Foundation

김명모¹⁾

¹⁾ 서울대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Seoul Nat'l University

1. 서 언

기초의 설계는 충분한 지지력과 더불어 상부구조물의 사용성을 만족하는 침하 규준에 근거하여야 한다. 그러나 지금까지 국내의 깊은 기초 설계는 지지력을 만족시키는 규준에만 머무르고 있으며, 또한 지지력에 기초한 설계마저도 모든 하중이 단지 말뚝만을 통하여 지지된다는 개념에 의존하여 raft 혹은 말뚝캡에 의한 하중분담효과는 무시되어 왔다. 반면에 최근 전세계적으로 raft의 하중분담 효과와 말뚝의 경제적 배치를 통한 지지력과 침하규준을 만족시키기 위한 경제적 기초인 piled raft에 관한 연구가 광범위하게 진행되고 있으며, 전면기초만으로도 지지력이 충분하지만 부등침하가 예상 특정부위의 침하 감소를 위해 소수의 말뚝을 설치하는 새로운 설계 개념이 대두되고 있다. Piled raft의 경우는 기존의 무리말뚝 해석 방법과 달리 raft와 지반의 접촉을 전제로 하고 있으므로, raft와 말뚝 사이의 상호작용을 합리적으로 고려한 해석 및 설계가 요구된다.

본 원고에서는 piled raft 기초의 기본 개념을 먼저 설명한 다음 최근까지의 연구 결과를 크게 1) 해석적 방법 2) 실험적 방법으로 두 가지로 구분하여 소개하고, 말미에 현재 국내에서 진행중인 연구에 대하여 정리하였다.

2. Piled Raft 기초의 개념 및 연구 현황

Piled raft 기초란 상부구조물로부터의 하중을 raft(말뚝캡)와 말뚝이 동시에 지반에 전달하는 기초 형태로 기존의 무리말뚝과 달리 raft가 지반과 접촉하여 하중을 분담한다는 것을 전제로 하고 있다.

Piled raft 기초는 설계의 기본적인 접근 방식에 따라 두 종류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 전통적인 방식으로, 기초는 본질적으로 무리말뚝으로 설계되며 정상적인 안전율이 적용된다. 이때 말뚝은 raft 하부 전체에 등간격으로 배치되며, raft는 실질적으로 전체하중의 10~20% 정도를 분담하게 된다.

두 번째는, raft만으로도 지지력은 충분하나 과도한 침하가 예상되는 경우, 말뚝을 침하를 감소시키기 위해 이용하는 것이다. 이 경우 말뚝은 침하량 조절을 위해 국부적으로 배치되며, 때로는 위치에 따라 말뚝 길이를 변화시키는 경우도 있다. 말뚝은 사용하중 하에서 지지력이 충분히 발휘되도록(극한하중의 70~80%) 설계된다. 현재 이러한 방식의 piled raft 기초의 이용에 많은 관심이 집중되어 있다.

기존의 무리말뚝과 달리 piled raft 기초에서는 각 기초요소의 지지력을 동시에 고려해야 할뿐만 아니라 지반을 통한 기초 요소들 간의 간섭 영향 때문에 그 거동을 해석하는 일이 매우 어렵다. Piled raft 기초의 지지 기구(mechanism)는 그림 1과 같다(Cooke, 1981).

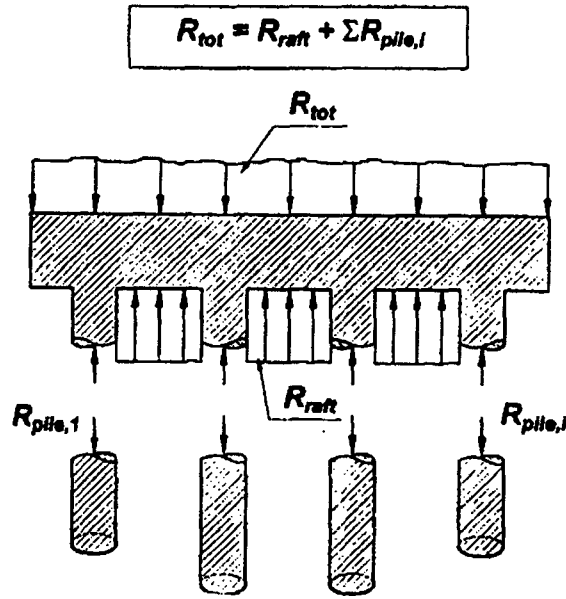


그림 1 Piled raft 기초의 지지 기구 개념도 (Cooke, 1981)

Piled raft 기초의 지지 거동은 raft-지반-말뚝 사이의 상호작용에 영향을 받으며, 전체 지지력은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{tot} = R_{raft} + \sum R_{pile, j} \quad (2.1)$$

여기서,

R_{tot} : Piled raft 기초의 전체 지지력

R_{raft} : 지반과의 접지압을 통한 raft의 지지력

$\sum R_{pile, j}$: 말뚝 지지력의 총합

Piled raft 기초에서 전체하중에 대한 말뚝 분담 하중의 비를 복합 piled raft 상수, α_{CPRF} (Combined Piled Raft Foundation Coefficient)로 표시하고 이를 이용하여 piled raft 기초의 침하량을 추정하기도 한다. Piled raft의 침하량을 같은 크기의 얇은 기초의 침하량에 대한 비와 α_{CPRF} 의 함수로 그림 2와 같이 표시할 수 있다. 이 그림에서 α_{CPRF} 가 0인 경우 완전한 얇은 기초, 그리고 α_{CPRF} 가 1인 경우는 완전한 무리말뚝 기초이며, 그 중간 값을 갖는 경우가 piled raft 기초이다. 이 그림으로부터 대략적으로 piled raft 기초의 침하량을 예측할 수 있다.

그러나 이러한 방법은 raft 및 지반의 강성, raft-지반-말뚝 사이의 상호작용, 말뚝의 개수 및 배치 등을 고려하지 않은 단순한 추정에 불과하며, 정형화된 설계 표준은 아직 정립되어 있지 못한 상태이다 (Katzenbach, 1996). 이러한 이유로 인하여 piled raft 기초에 관한 다양한 해석 및 실험적 연구들이 아직까지 계속 수행되고 있다. 특히, 실제측이나 현장시험에서 얻을 수 있는 부등침하와 전체침하, raft의 휨모멘트, raft와 지반의 접촉압, 그리고 말뚝 분담하중 등에 관한 실제적이고 적절한 연구 자료가 매우 부족한 상황이며, 주로 수치해석 등을 통한 이론적인 연구가 이루어지고 있다.

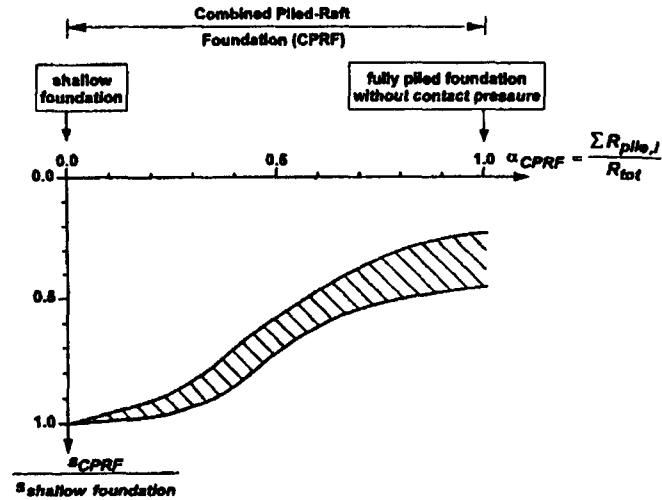


그림 2. α_{CPRF} 를 활용한 piled raft 기초의 침하 추정 (Katzenbach, 1996)

Kulhawy와 Prakos(1998)는 1998년 독일 Hamburg에서 열린 국제 토질 및 지반공학 학회(ICSMGE)에서 piled raft 기초에 관한 연구 현황에 관하여 발표하였으며, 다음에 그 내용을 기술하였다. 표 1은 이를 정리하여 나타낸 것이다.

표 1. Piled raft 기초에 관한 연구 현황 (Kulhawy와 Prakos, 1998)

연구 내용	연구 현황
<ul style="list-style-type: none"> ● 기초의 형상 <ul style="list-style-type: none"> - Raft의 두께 (강성) - 말뚝이 차지하는 면적 - 말뚝 깊이 - 말뚝 간격 - 말뚝 지름 ● 비선형성 	개념적으로는 이해가 되었으나 좀더 정확하고 세밀한 연구가 필요
<ul style="list-style-type: none"> ● 부등분포 하중 ● 불규칙한 기초 형상 ● 비균질성 ● 시공 효과 <ul style="list-style-type: none"> - 말뚝 설치 - 깊은 굴착 - 래프트 타설 	부분적인 이해
<ul style="list-style-type: none"> ● 지반의 압밀 ● 응력과 특성의 비등방성 ● 경사하중 및 모멘트 	연구되지 않음

1) 개념적으로 이해된 부분

기초의 형상이 piled raft 거동에 미치는 영향은 어느 정도 연구되었다. 적어도 탄성 영역에 대해서는 각 기초 요소의 형상이 piled raft의 거동에 미치는 영향이 규명되었다. 그러나, 앞에서 설명했듯이 침하량 감소를 목적으로 한 piled raft 기초에서는 소수의 말뚝만이 이용되어 말뚝의 지지력이 크게 발휘되기 때문에, 비선형성에 대한 부분도 더 심도있게 연구되어야 한다.

2) 부분적으로 이해된 부분

현재까지 대부분의 해석적인 연구는 등분포하중에 대하여 수행되었다. 그러나, 일반적으로 구조물은 기둥이나 외벽 등을 통해 하중이 전달되는 부등분포하중을 유발한다. 따라서, 보다 실질적인 하중 조건에 대한 연구가 필요하며, 이를 위해서는 정확하고 합리적인 수치해석 기법의 개발이 시급하다. 불규칙한 형상을 가진 기초의 거동에 관한 연구는 몇 개의 대형 구조물에 대하여 수행되었으며, 마찬가지로 지반의 비균질성에 관한 연구도 몇 개의 현장 사례에 대하여 수행된 바 있다. 두 부분 모두 좀 더 체계적인 Parametric study가 요구되고 있다. 시공 효과에 대해서는 좀 더 세밀한 연구가 필요하다. 각 시공 단계별 효과는 어느 정도 이해가 가능하나, 조합되어 나타나는 효과는 매우 복잡하다. 말뚝 설치, 굴착 그리고 raft 및 구조물의 설치에 의해 발생하는 응력은 piled raft 기초의 거동에 영향을 미치는 중요한 요소이다.

3) 연구되지 않은 부분

지반의 압밀에 대해서는 포아송비를 변화시키는 방법으로 대략적으로 모델링하는 방법이 이용되어 왔다. 그러나, 이러한 모델링 방법은 현장의 실제 상황을 모사하는 경우 매우 부적합하다. 특히 대형 구조물의 경우와 같이 시공 중에 재하와 제하가 반복되는 경우 이러한 방법은 큰 문제점이 있으며, 적절한 모델의 개발이 필요하다. 응력과 지반의 비등방성도 아직까지 연구되지 않은 중요한 부분이다. 현재까지의 연구에서는 등방적인 조건만이 가정되었다. 경사하중 및 모멘트에 관한 연구는 가장 시급한 부분이며, 특히 상대적으로 작은 수의 말뚝이 이용되는 경우, 아주 큰 전도 모멘트가 작용하면 raft와 지반 사이의 분리가 발생할 수도 있다.

3. Piled raft 기초의 해석적 연구

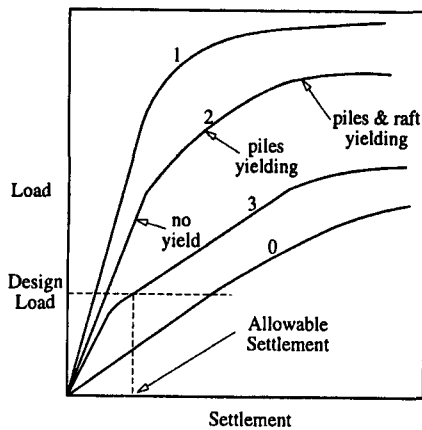
Piled raft 기초에서 말뚝은 침하량을 감소시키는 것을 주목적으로 이용된다. 즉 전형적인 piled raft의 하중-침하량 곡선을 보여주는 그림 3에 나타난 바와 같이 raft만(곡선 0)으로 설계되었을 때 허용침하량 기준을 만족시키지 못할 경우 추가로 말뚝을 설치하게 된다. 이 때 piled raft의 거동은 다음의 3가지 영역으로 구분되어 나타난다.

1) 재하 초기의 말뚝과 raft에 의한 지지력이 충분하여 선형적으로 거동하는 영역

2) 말뚝의 지지력이 모두 발휘되었으나 raft가 계속 증가하는 하중을 지지하는 다소 강성 이 작아지는 영역

3) 기초 시스템 전체의 파괴를 나타내는 최종 영역

Piled raft 기초를 지지력 관점으로 설계하는 통상적인 경우에는 과도한 말뚝의 사용으로 하중-침하 거동이 그림 3의 곡선 1과 같이 나타나며 비경제적인 설계가 되는 것이 일반적이다. 가장 바람직한 설계는 그 거동이 곡선 3과 같이 나타나는 것으로서 전체 침하량과 부등침하량을 허용침하량 이하로 제한 하면서 말뚝 수와 raft의 두께를 최소화하는 것이다. 이를 위해서는 말뚝과 raft의 지지 능력이 최대한 발휘되도록 설계가 이루어져야 한다.



- 곡선 0 : raft만 있는 경우
- 곡선 1 : 통상적인 안전율로 설계된 경우
- 곡선 2 : 낮은 안전율로 설계된 경우
- 곡선 3 : 말뚝의 지지력이 모두 발휘되게 설계된 경우

그림 3. Piled raft 기초의 설계 방법별 하중-침하량 예상 곡선

Piled raft 기초의 설계 목적은 전체침하량과 부등침하량을 규정된 값 이하로 제한하기 위해 필요한 말뚝의 개수, raft의 두께, 그리고 말뚝의 크기 및 간격을 결정하는데 있다. 이를 위해서는 다음에 열거하는 사항들을 모두 수용하면서, 결과를 얻을 수 있는 해석 방법이 필요하다.

- 1) 말뚝-지반-raft 사이의 상호작용에 대한 적절한 고려
- 2) 말뚝의 개수, 배치, 특성의 변화
- 3) 다양한 지반조건
- 4) raft의 두께 및 강성 변화
- 5) raft 상부의 재하 조건의 변화
- 6) raft의 침하량 및 부등침하량
- 7) raft의 구조적 설계를 위한 raft의 휨모멘트와 전단력
- 8) 실무자가 이용할 수 있는 용이성

현재까지 개발된 piled raft의 해석 방법은 크게 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 1) 약식 해석 방법
- 2) 말뚝 및 지반 스프링을 이용한 근사적 해석 방법
- 3) 엄밀한 수치 해석 방법

각 방법의 특성은 아래 절에 소개하였다.

3.1 약식 해석 방법

3.1.1 등가 raft법과 등가 pier법

Piled raft 기초를 해석하는 가장 간단한 방법에는 등가 pier법(equivalent pier method)과 등가 raft법(equivalent raft method)이 있다. 이 방법들은 기초 요소들 사이의 상호작용을 간단히 하여 블록형태의 파괴를 가정하고, 하나의 raft 또는 pier로써 전체 piled Raft 기초의 지지거동을 예측하는 방법이다.

등가 raft법은 마찰말뚝의 경우 말뚝 길이의 2/3 지점에, 그리고 선단말뚝의 경우 말뚝 선단부에 위치한 등가 raft의 침하량으로부터 piled raft의 침하량을 추정하는 방법이다(그림 4). 기초 상부에서의 평균 침하량(w_{avg})은 다음의 식으로 산정된다.

$$w_{avg} = w_{raft} + \Delta w \quad (3.1)$$

여기서 Δw 는 등가 raft 위에 있는 말뚝 부분의 탄성변위이고, w_{raft} 는 등가 raft의 침하량이다. 이 방법의 장점은 raft의 침하량이 지반의 수직변형률을 적분하는 방법으로 산정되기 때문에 raft 하부 지반의 깊이에 따른 강성 변화를 적절히 고려할 수 있다는 데 있다.

등가 pier법은 말뚝이 설치된 부분의 지반을 하나의 등가 연속체로 간주하여 해석하는 방법이다(그림 5). 등가 pier의 직경(d_{eq})는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_g} = 1.13\sqrt{A_g} \quad (3.2)$$

여기서, A_g 는 말뚝의 무리가 차지하는 면적이다. 등가 pier의 탄성계수는 다음과 같이 구한다.

$$E_{eq} = E_s + (E_p - E_s) \left(\frac{A_p}{A_g} \right) \quad (3.3)$$

여기서 E_p 는 말뚝의 탄성계수, E_s 는 지반의 평균 탄성계수, A_p 는 말뚝 무리의 전체 단면적이다 Piled raft 기초 전체를 이와 같이 계산한 등가 pier 하나로 간주하여 지지력 및 침하량을 산정한다.

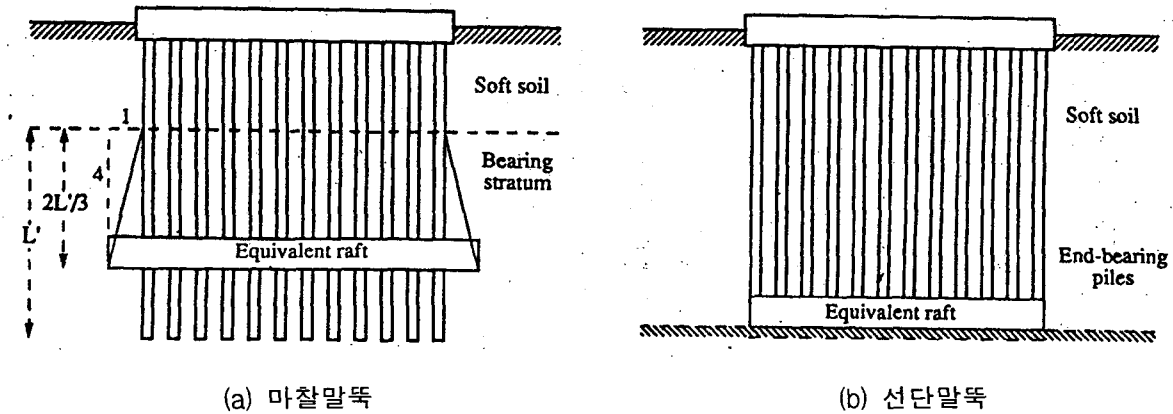


그림 4. 등가 raft법

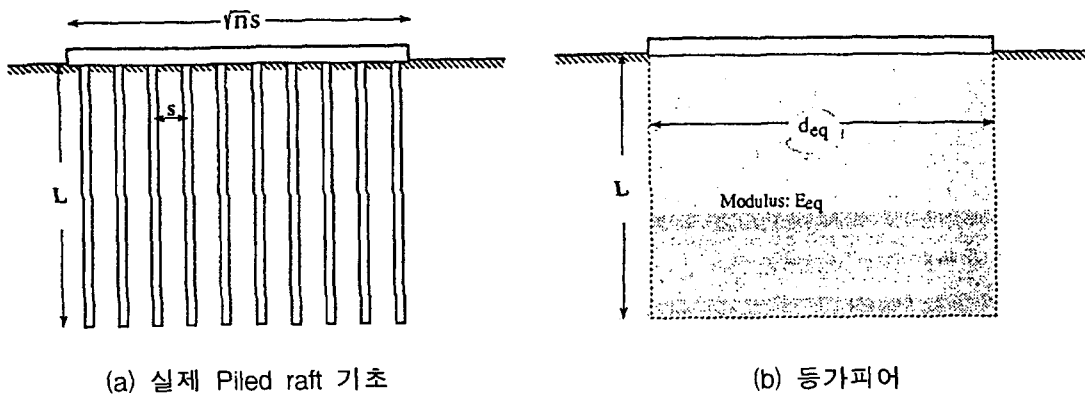


그림 5. 등가 pier법

두 방법 중의 선택 기준은 전체 기초의 형상비(aspect ratio)가 된다. Piled raft 기초의 전체 넓이에 대한 깊이의 정도를 나타내는 형상비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \sqrt{\frac{ns}{l}} \quad (3.4)$$

여기서, n 은 말뚝의 개수, s 는 말뚝 간격, l 은 말뚝의 길이를 나타낸다. 말뚝의 형상비가 4보다 큰 경우는 전체 기초가 raft에 가깝게 거동하므로 등가 raft법이, 4보다 작은 경우에는 pier에 가깝게 거동하므로 등가 pier법이 적당하다.

이 두 방법은 모두 raft-지반-말뚝 사이의 상호작용을 극단적으로 단순화한 것으로, 말뚝 사이의 간격이 큰 경우나 부분적으로 소수의 말뚝이 사용된 경우의 piled raft 기초 해석에는 부적절한 방법이다.

3.1.2 하중-침하 곡선의 근사적 산정 방법

Poulos and Davis (1980)가 고안한 파괴 이전까지의 전체 하중-침하량 곡선을 구성하기 위한 간단한 계산 방법이다. 이 방법에서는 piled raft의 초기 강성, raft만의 강성 그리고 말뚝 및 raft의 극한 지지력에 관한 탄성해를 이용한다. Raft가 없는 경우의 무리말뚝이 파괴되는 하중까지는 piled raft가 탄성적인 거동을 보인다고 가정하고, 그 이후에 작용되는 하중은 raft에 의하여 지지되며 추가되는 침하량은 raft만 존재하는 경우의 침하량과 같다고 가정하여 그림 6과 같은 근사화된 하중-침하곡선을 구한다. 이러한 가정은 piled raft가 하중을 받을 때, 먼저 말뚝이 하중을 지지한 후에 raft가 하중을 지지한다는 것을 의미한다.

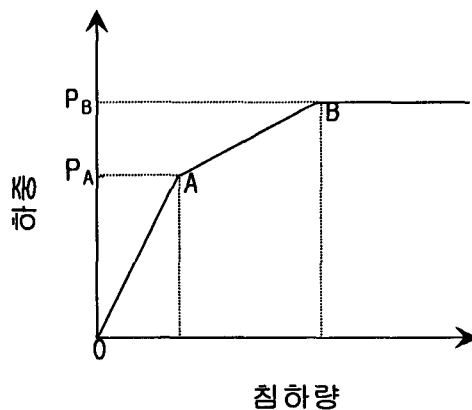


그림 6. Piled raft 기초의 근사적인 하중-침하곡선 (Poulos and Davis, 1980)

그림 6에서 P_A 는 무리말뚝의 극한지지력을 나타내고 P_B 는 무리말뚝과 raft의 극한지지력의 합을 나타낸다. 따라서, piled raft의 하중-침하곡선은 P_A 까지는 무리말뚝의 하중-침하 곡선을 따르고, P_A 이후에서부터 P_B 까지는 raft의 하중-침하 곡선을 따르도록 하여, 직선 \overline{OA} 와 직선 \overline{AB} 가 혼합된 형태로 근사화 될 수 있다. 이 방법에서는 piled raft의 극한지지력을 무리말뚝의 극한지지력과 raft의 극한지지력의 합으로 가정하기 때문에 말뚝의 개수가 많고 이격거리가 너무 작아서 블록형태의 파괴가 일어날 수 있는 piled raft의 해석은 부적절하며, raft가 완전 강성이거나, 완전 연성인 경우에만 해석이 가능하다.

3.1.3 Raft 하중 분담율의 근사적 산정 방법

Randolph(1983, 1994)는 piled raft 기초의 강성과 말뚝과 raft의 하중분담을 구하기 위한 편리한 근사식을 개발하였다. Piled raft 기초에서의 지지요소를 크게 무리말뚝과 raft로 분리하면 탄성영역에서 전체 하중-침하량 관계를 다음과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} w_p \\ w_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/k_p & \alpha_{pr}/k_r \\ \alpha_{rp}/k_p & 1/k_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_p \\ P_r \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

여기서, 첨자 p 는 무리말뚝을 나타내며 첨자 r 은 raft를 나타낸다. 그리고 α_{rp} , α_{pr} 는 각각 무리말뚝이 raft에 미치는 상호작용계수와 raft가 무리말뚝에 미치는 상호작용계수, k_p 와 k_r 는 각각 무리말뚝과 raft의 강성(stiffness)을 나타낸다. 위의 두 개의 상호작용계수사이에는 다음과 같은 상반정리(reciprocal theorem)가 성립한다.

$$\alpha_{pr} = \alpha_{rp} \frac{k_r}{k_p} \quad (3.6)$$

무리말뚝과 raft는 강결되어 있으므로 그 평균침하량은 같다. 따라서, 위의 두 관계식으로부터 다음과 같은 Piled raft 기초의 강성과, raft의 하중 분담율을 얻을 수 있다.

$$k_{pr} = \frac{k_p + (1 - 2\alpha_{rp})k_r}{1 - \alpha_{rp}^2(k_r/k_p)} \quad (3.7)$$

$$\frac{P_r}{P_r + P_p} = \frac{(1 - \alpha_{rp})k_r}{k_p + (1 - 2\alpha_{rp})k_r} \quad (3.8)$$

여기서, k_{pr} 는 piled raft 기초의 강성이다.

위의 두 식에서 상호작용계수만 결정되면 piled raft 기초를 해석할 수 있다. 이에 Randolph(1986)는 그림 7과 같이 반경 r_c 인 원형의 캡을 가지는 단말뚝에 대하여 α_{rp} 가 다음과 같이 근사화될 수 있다는 것을 보였다.

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln(r_d/r_0)}{\xi} \quad (3.9)$$

이론적으로는 각 말뚝에 대한 raft의 넓이로부터 등가의 r_c 를 산정하여 무리말뚝의 해석에 적용할 수 있지만 Randolph와 Clancy(1993)는 수치해석을 통하여 말뚝의 간격, 강성비에 관계없이 무리말뚝의 크기가 커짐에 따라 α_{rp} 의 값이 0.8로 일정해지는 것을 보였다. Randolph의 방법은 piled raft 시스템의 선형 거동만을 해석할 수 있다는 제한이 있으므로, 그림 3의 곡선 1과 같은 충분한 안전율을 갖는 무리말뚝으로 설계된 경우에 적합하다.

Randolph와 유사한 해석 방식이 Franke 등(1994)에 의하여 제시된 바 있으며, 역시 raft와 말뚝의 강성을 결합하여 해석이 이루어지지만, 말뚝과 raft간의 상호작용을 중립평면(neutral plane) 개념을 이용하여 고려한다.

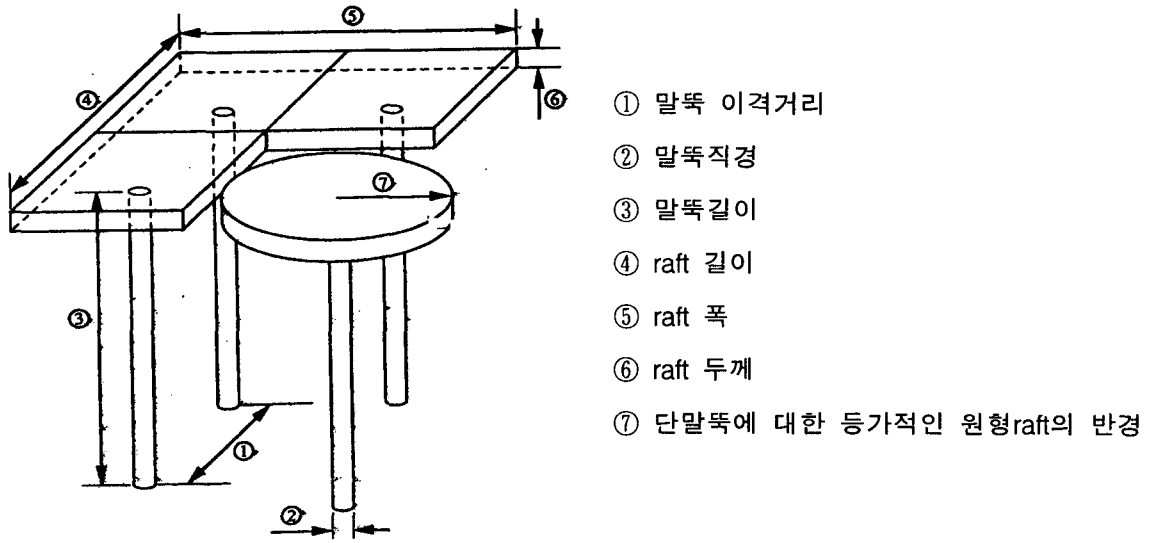


그림 7. 단말뚝에 대하여 등가적으로 나누어진 raft

3.2 말뚝 및 지반 스프링을 이용한 근사적 해석 방법

Piled raft는 말뚝과 raft가 동시에 지지하는 매우 복잡한 형식의 기초 형태이므로, 현재까지는 유한요소법이나 경계요소법을 이용한 완전한 해석은 불가능한 상태이다. 이 절에서 소개할 방법은 말뚝과 지반을 스프링으로 모델링하여 계산을 간단히 함으로써, 실제 문제에 적용할 수 있도록 개발된 근사적인 해석 방식이다. 이 방법에서는 지반과 말뚝을 몇 개의 스프링으로 모사하기 때문에 적절한 말뚝 및 지반 스프링의 강성을 결정하는 것이 매우 중요하며, 또한, 그림 8에서와 같은 Pile raft 기초의 지지요소들 사이에 발생할 수 있는 상호작용을 적절히 고려할 수 있는 스프링간의 상호작용계수를 산정하는 것이 필요하다.

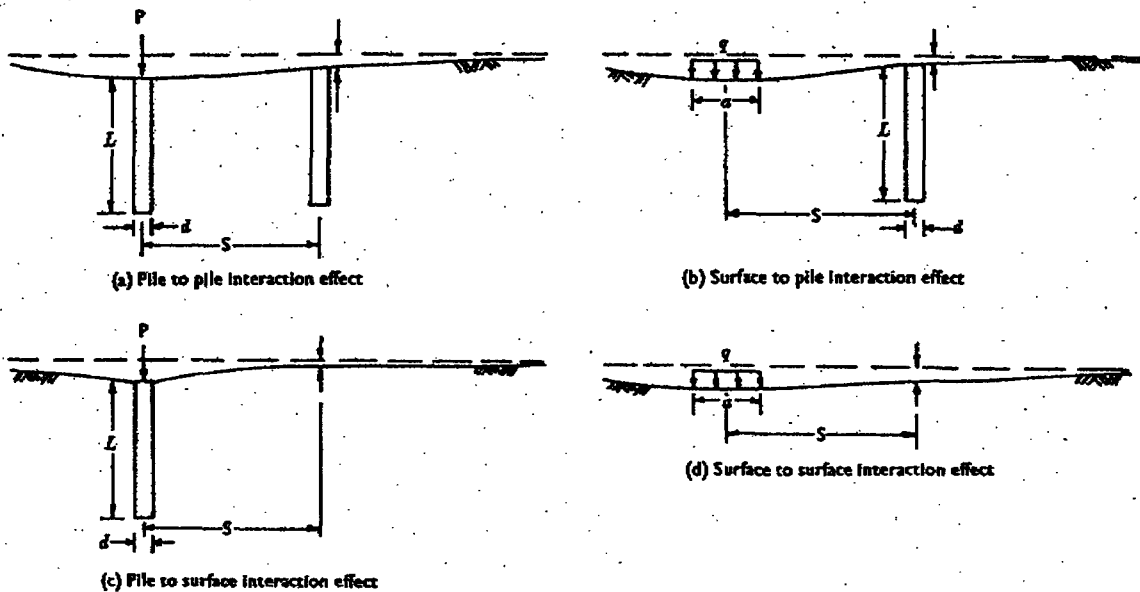


그림 8. Piled raft 기초에서의 상호작용 (Hain과 Lee, 1978)

3.2.1 띠(strip)해석 방법

이 범주에 해당하는 전형적인 방법은 raft의 각 부분을 띠(strip)로 말뚝을 스프링으로 나타내는 Poulos(1991)의 방법이다. 이 방법에서는 띠 바깥 부분에 의한 자유장 지반 이동을 계산하고 이를 띠의 각 부분과 관계지음으로써, piled raft를 구성하는 각 요소 사이의 상호작용을 근사적으로 고려할 수 있으며, raft의 띠 바깥 부분 효과에 대한 해석을 고려할 수 있다. 이 방법은 적용 범위가 넓고 좀 더 완전한 다른 해석 방법의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으나, raft 내의 비틀 모멘트를 고려할 수 없고, 특정 지점에서의 서로 다른 두 방향의 띠에 대한 침하량 해석 결과가 일치하지 않는다는 매우 심각한 제한점을 가지고 있다. Brown과 Weisner(1975)는 piled strip에 대한 경계 요소 해석법을 개발하였으며, 그 해석 결과가 어떻게 piled raft에 적용될 수 있는지 제안하였다.

이러한 방법들은 piled raft 기초의 지지거동을 개념적으로 확인하거나, 실제 문제에 적용하기 위한 해석 방법의 개발하기 위한 중간 단계로서 개발된 것이다.

3.2.2 판해석 방법

이 해석 방식에서는 그림 9와 같이 raft를 탄성판으로 말뚝을 판을 지지하는 스프링으로 나타내며, 현재까지 실제 piled raft 기초를 해석할 수 있는 가장 적절한 방법으로 평가되고 있다. 그러나, 다층지반, 지반의 비선형성 등을 적절히 고려할 수 없다는 제한이 있다. 대표적인 해석 기법은 Poulos(1994)가 개발한 방법과, Clancy와 Randolph(1993)가 개발한 방법을 들 수 있다.

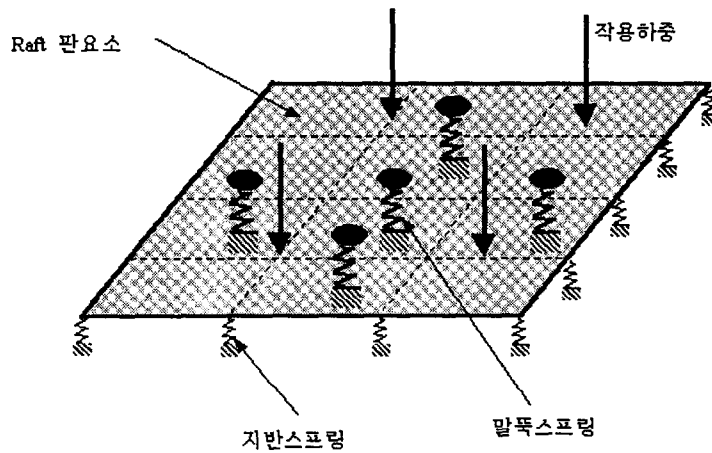


그림 9. 스프링위의 판해석 방식을 도입한 방법

Poulos(1994)는 raft를 박판으로 말뚝을 스프링으로 모델링한 기법을 개발하였다. 각각 raft에 대해서는 유한차분법, 말뚝에 대해서는 근사적 탄성해를 적용하여 해석을 수행하였으며, 이 때 기초의 각 요소들 간의 상호작용은 탄성해로부터 얻은 상호작용계수를 통해 고려하고 있다. 이 방법에서는 말뚝의 극한 지지력 도달이나, raft 하부에서의 지지력 파괴를 고려할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 해석 기법을 토대로 개발한 해석 프로그램이 GARP (Geotechnical Analysis of Raft with Piles)이다.

Clancy와 Randolph(1993)는 말뚝을 일련의 막대유한요소로, raft를 이차원 박판 유한요소로 해석하는 좀더 정밀한 접근방식을 적용하여, HyPR(Hybrid Piled Raft Analysis)이라는 해석 프로그램을 개발하였다. 이 방법에서도 스프링 사이의 상호작용은 변위장의 적분을 통해서 구한 상호작용계수를 통해 고려한다. 이 방법은 기초의 탄성 거동에 대한 해석만 가능하다는 제한이 있다.

유사한 종류의 해석으로 Franke 등(1994)이 제안한 주면과 선단의 포물선형 거동 특성을 통해 말뚝의 비선형 거동을 고려한 방법이 있다. Yamashita 등(1993)은 판에 대한 해석으로 유한요소를 이용하고, 지반과 말뚝을 적절한 스프링으로 나타내는 방법을 제안하였으나, 상호작용의 고려 방법은 명확하게 제시하지 않았다.

3.3 엄밀한 수치해석 방법

경계요소법과 유한요소법은 지반, 말뚝, raft를 모두 수치 모델링할 수 있는 비교적 정확한 해석 방법이라 할 수 있다. 그러나, 현재 이러한 방법들은 해석 가능한 말뚝 수가 제한되어 있고 단순한 지반조건에 대해서만 해석이 가능하므로 아직까지는 실제 현장 조건 적용에는 적합하지 않은 현황이다.

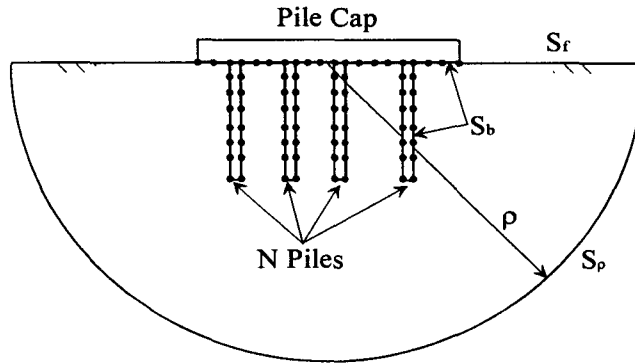


그림 10. 경계요소법을 이용한 Piled raft 기초 해석

3.3.1 경계요소법

경계요소법은 그림 10과 같이 기초 시스템 내의 raft와 각 말뚝의 경계면의 분할을 통해 해석이 이루어지며, 각 요소들 간의 상호작용은 탄성무한체에 대한 해를 경계에 대해 경계 적분을 수행함으로써 구하게 된다. 이 방법은 무한한 영역을 갖는 지반의 강성을 구현하는 방법으로 현재로서는 가장 타당한 방법이나 아직까지 계산 능력의 한계로 인하여 해석 가능한 말뚝수가 작고 raft가 완전 강성인 경우만 해석이 가능하다는 큰 제한이 있다.

이 방식의 초기 예는 탄성지반에 설치된 무리말뚝을 강성 raft와 함께 해석한 Butterfield와 Banerjee(1971)의 방법이 있다. Kuwabara(1989)는 균질한 탄성 지반에 대하여 piled raft를 해석하였으며, raft는 강성이라고 가정하였으나, 말뚝의 압축성은 고려하였다. 해석 결과 통상적인 말뚝 간격에서는 raft의 하중 분담이 매우 작다는 것이 발견되었다. Poulos(1993)는 말뚝에 발생하는 극한 압축 및 극한 인장하중뿐만 아니라, 자유장 지반 이동의 효과와 지반과 raft 간의 한계 접촉압을 고려할 수 있도록 Kuwabara의 해석을 보완하였으나, 이 범주의 대부분의 방법들과 마찬가지로 강성 raft로 해석이 제한되는 한계가 남아있다.

이 외에도 Russo(1997)가 개발한 NAPRA라는 해석프로그램은 경계요소법을 통해 구한 상호작용계수를 이용하는 방법으로 다층지반과 지반의 비선형성을 근사적으로 고려할 수 있는 방법이다.

3.3.2 단순화한 유한요소법

일반적으로 단순화한 유한요소해석에서는 무리 말뚝 또는 piled raft를 평면변형률 문제(Desai, 1974)나 축대칭 문제(Hooper, 1973; Naylor and Hooper, 1974)로 해석한다. 유한요소해석의 장점은 raft와 지반을 모두 유한 요소로 모델링할 수 있으므로, 지반 및 raft의 비선형 거동을 고려하는 것이 상대적으로 용이하며, 지반의 2상 거동을 고려할 수 있기 때문에, 지반의 압밀에 침하와 시간에 따른 말뚝 하중의 분포의 변화를 고려할 수 있다는 것이다. Hooper(1979)는 London의 건물에 대하여 관측된 결과와 대체로 유사한 거동을 축대칭 해석으로부터 예측할 수 있다는 것을 제시한 바 있다. 이러한 단순화한 유한요소해석에서의 주된 문제점은 단순한 재하 형태 및 지반 조건에 대해서만 해석이 가능하며, raft의 강성을 적절히 고려할 수 없다는 것이다.

3.3.3 3차원 유한요소해석

Piled raft를 해석에 있어서 3차원 유한요소해석은 실제 문제를 해석할 수 있는 궁극적인 해결책이다.

그러나, 해석에 필요한 요소의 개수가 매우 많기 때문에 아직까지는 그림 11과 같이 기초의 형상이나 말뚝 배치 그리고 하중 조건이 대칭이고, 지반 조건이 단순한 조건에 대하여 연구목적의 해석만이 주로 시도되었다.

Ottavini(1975)는 이 방법을 말뚝 기초의 해석에 최초로 도입하였다. Zhuang 등(1991)과 Lees(1993)는 piled raft 내의 침하와 하중 분포에 대한 변수해를 얻기 위하여 선형 3차원 해석을 수행하였으며, 변화시킨 변수는 raft의 강성, 상대 말뚝길이, 말뚝 개수이다. Ta와 Small(1996)은 raft에 대하여 박판 유한요소를 이용하고, 지반에 대하여 finite layer method를 이용한 방법을 개발하였다. 이 방법은 선형 지반 거동으로 해석이 제한되어 있으나, 다층 지반을 매우 효과적으로 다룰 수 있으며, 말뚝이 raft 하부 어느 곳에 위치하더라도 해석이 가능하다. 현재까지 가장 완전한 해석으로 여겨지는 것은 Wang(1995)이 수행한 해석이다. 이 해석은 비선형 3차원 해석을 통해 연직 재하된 piled raft의 비선형거동 해석을 포함하고 있다.

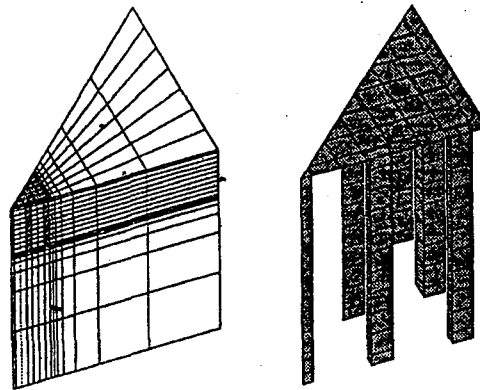


그림 11. Piled raft 기초의 3차원 유한 요소망

4. Piled Raft 기초의 실험적 연구

4.1 Piled Raft 기초의 모형시험

현재까지 말뚝을 이용하여 침하량을 감소시키는 목적의 piled raft에 관한 모형시험은 드물다. 반면에 지지력 관점에서, 단독말뚝 지지력의 합으로부터 무리말뚝 전체의 지지력을 구하기 위한 무리효율을 산정하기 위한 무리말뚝 모형시험이 주로 이루어져 왔다. 무리말뚝의 경우와 달리 piled raft 기초의 경우는 연성의 raft가 적용되므로, 하중 재하와 부등침하 계측이 매우 어려우며, raft와 지반의 접촉에 의한 raft-말뚝 사이의 상호작용이 매우 중요하기 때문에 이를 파악하기 위해서 정밀하고 광범위한 계측이 이루어질 수 있는 모형시험이 요구된다.

Weisner와 Brown(1980)은 과압밀 점성토에 설치한 모형 piled raft 기초에 대하여 집중하중을 재하하고 침하량과 raft에 작용하는 전단력 및 모멘트를 측정하여 이를 수치해석 결과와 비교하였다. Horikoshi와 Randolph (1996)는 piled raft 기초에 대한 원심모형시험을 통해 등분포하중이 작용하는 경우 raft의 중앙부분에 소수의 말뚝을 설치함으로써 부등침하를 효과적으로 감소시킬 수 있다는 연구 결과를 발표하였다.

4.2 실규모 현장계측

실규모 piled raft 기초의 거동을 이해하기 위한 계측 프로그램은 1970년대 초반부터 영국에서 시작되었다. 점성토 지반에 시공된 대형 구조물이 주요 계측 대상이었으며, 시공 이전 치밀한 계측 계획을 설정하여 구조물 완성기간까지 장기간 계측을 수행하였다.

계측 자료를 통하여 (1) 말뚝과 raft의 정량적 하중 분담 비율 (2) 말뚝의 위치별 하중 분담량 (3) raft

의 접지압 및 침하량 분포 등의 내용이 분석되었다. 말뚝의 하중 분담율 및 위치별 하중분담량은 말뚝 두부에 설치된 변형율계 및 load cell을 이용하고, raft의 접지압 분포는 압력계(pressure cell)을 통하여 계측하였다. 또한 raft 및 말뚝의 침하량은 공내 extensometer 혹은 수준 측량을 이용하여 분석하였다.

Piled raft 기초의 계측은 전 시공 과정을 포함하여 하는 장기간 계측일 뿐 아니라 계측비용, 연구인원에 대한 수년 간 지원이 있어야 하므로 주로 학술 재단의 지원을 통하여 이루어진 경우가 많다. 주요하게 수행된 계측 프로젝트는 다음과 같다.

1) CIRIA(Construction Industry Research and Information Association)는 영국 London clay 지반에 설치될 건물 기초로서의 piled raft에 대한 장기현장 계측을 지원하였다. London clay에 위치한 건물기초에 대한 계측 프로젝트의 내용을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. CIRIA지원 등을 통해 수행된 London clay에 위치한 piled raft 현장 계측 연구

① Hyde park cavalry barracks tower, London (Hooper, 1973)

계측 기간	7년
연구 수행자	Hooper, Naylor, Hain, Lee
대상 지반	London Clay
기초 형식	Raft : 두께 1.5m 말뚝 : 선단확장형 현장타설말뚝
계측 결과	- 하중 분담율 (구조물 완성시) 말뚝 : 60%, Raft : 40% - 하중 분담의 변화 상재하중이 증가함에 따라 말뚝의 하중분담율이 증가하였다.
비고	- Raft의 상대강성에 대한 평가가 없기 없이 하중분담율에 대한 결론을 내리고 있으며, 계측이 원활히 수행되지 못함.

② Dashwood House, London (Green & Hight, 1976)

계측 기간	1972.9 ~ 1975.3
연구 수행자(지원)	Green, Hight (CIRIA)
대상 지반	모래자갈층 + London Clay
기초 형식	Raft : 두께 1.5m 말뚝 : 현장타설 RC (지름 0.484m, 길이 15m, C.T.C 1.5m) 마찰말뚝 462개
계측 결과	-하중분담율 말뚝 : 65%, Raft : 35% -중심말뚝과 바깥쪽 말뚝의 하중분담비율 1.0 : 3.2 - 접지압의 분포 : 중심부보다 외곽지역의 접지압의 크기가 2.0배 크게 관측됨
비고	- Raft의 상대강성에 대한 평가가 없기 없이 하중분담율에 대한 결론을 내리고 있으며, 계측이 원활히 수행되지 못함.

표 2. CIRIA지원 등을 통해 수행된 London clay에 위치한 piled raft 현장 계측 연구 (계속)

③ London Clay위에 올려진 다층 건물기초로써의 piled raft 기초 계측 연구 (Cooke, 1981)

계측 기간	4년
연구 수행자 (지원)	Cooke et al
대상 지반	London Clay
기초 형식	Raft : 두께 0.9m . Relative Stiffness (K_R) 0.1 (Between Fairly Flexible and Effectively Rigid) Pile : CIP Concrete 351개
계측 결과	- 초기 건물하중의 40%의 하중분담, 빌딩완성 후 접지압 25%로 감소 - 중앙부 Pile 부담 하중/ 외곽부 Pile 부담하중 = 50%
비고	상재하중과 말뚝 및 Raft기초의 하중분담량을 일치시키기 위해 무리한 가정이 있었음

2) ISSMGE 산하 말뚝분과 위원회인 ITC 18에서도 유럽지역의 다양한 건물 기초로 사용된 piled raft기초에 대한 장기 계측 프로젝트를 지원하였다. 또한 기초의 제원과 하중조건을 제공하여 해석적 방법을 이용하여 추정된 침하량 결과를 공모하여 그 내용을 계측결과와 비교하고 토론하였다. 장기 계측수행된 건물기초는 아래와 같다.

- ▶ Liquid Gas Terminal in Gdansk North Port
- ▶ Malt Factory, Grain Silos
- ▶ Waste-Water Treatment Plant
- ▶ Thermal-Electric Power Station

3) 독일에서는 전체 및 부등침하량 감소를 목적으로 말뚝의 길이 및 배치를 달리하여 Frankfurt지역의 MesseTurm 빌딩에 대하여 1988부터 1990까지 장기 계측 프로젝트를 수행하였다. 이 계측 프로젝트의 개요는 아래 표 3과 같다.

표 3. 침하량 조절을 위해 말뚝의 길이 및 배치를 달리한 Messeturm 대형 건축물 계측 연구 (Sommer, 1991)

계측 기간	1988~1990 (2년)
연구 수행자 (지원)	Sommer(1989), Sommer, Katzenbach, De Beneditts(1990), Thaier and Jassberger, 1991
대상 지반	Frankfurt Clay
기초 형식	Raft : 중앙 6.0m, 외곽 3.0m Pile : 중심부16개, 중간부 20개, 외곽 28개 침하량 조절을 위해 말뚝의 길이를 중심부로 갈수록 길게 배치
계측 결과	- Raft의 하중분담비율 45% - 중앙부 접지압의 크기가 외곽부도다 작음 (일반적 강성 기초의 접지압 분포와 일치) - 중앙부의 침하가 크게 발생
비고	- 침하조절을 위한 체계적인 조사, 이에 따른 합리적 말뚝 배치 - 지지력 및 침하규준을 만족시킨 경제적 기초로의 Piled raft 적용

앞서 제시한 계측 프로젝트에서 알 수 있듯이 현장 계측은 대부분 점성토 지반에 위치한 piled raft 기초에 대하여 수행되었다. 점성토 지반에 위치한 piled raft 기초에 관한 계측 연구를 정리하면 다음과 같다.

(1) 초기 계측자료는 raft와 지반과의 상대 강성비를 고려하지 않고 말뚝과 raft의 하중분담율을 제시하였다. 그러나 말뚝과 Raft의 하중 분담 비율은 말뚝/지반/Raft의 강성에 따라 크게 달라지기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 한정된 현장 계측 자료는 아래 연구 자료와 같이 BEM, FEM을 이용한 piled raft의 형상 및 지반 및 구조물의 강성에 대한 parametric study 연구 결과에 대한 검증 자료로 활용되고 있다.

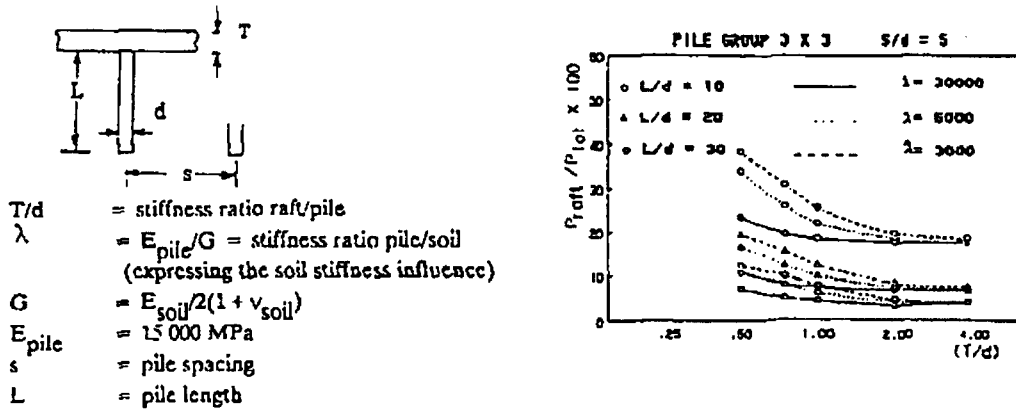


그림 12. Piled raft의 형상 및 강성비에 따른 Raft의 하중분담비율 (El-Mossallamy, 1989)

(2) 점성토 지반에서의 말뚝의 위치별 하중분담비율은 계측 프로젝트별로 차이를 보이고 있으나 경향적으로 구석, 구석과 중앙부 중간 위치, 중앙부 쪽으로 갈수록 하중분담이 적어지는 것으로 확인되었다. London Clay 지반에 설치된 piled raft기초의 말뚝 별 하중 분담비율은 구석: 구석과 중앙부 중간 위치: 중앙부의 비율이 2.0: 1.4: 1.0으로 계측되었다. (Cooke et al, 1981)

(3) 점성토 지반에서 계측된 piled raft의 접지압의 분포는 중심부가 외곽지역에 비하여 상대적으로 작은 접지압 분포를 보인다. (Green & Height, 1976) 침하량의 분포는 raft의 강성과 하중 재하 위치나 형태에 따라 달라진다.

5. 국내 연구현황

5.1 해석 기법 개발 연구

현대건설기술연구소와 서울대학교(1999)는 1997년~1999년 3년간에 걸쳐 piled raft 해석 프로그램을 개발하였다. 이 해석 방법에서는 raft에 대하여 Mindlin 판이론, 말뚝에 대하여 Randolph와 Wroth(1979)의 근사적 탄성해법을 적용하고, 지반을 Winkler 스프링으로 모델링하였으며 말뚝-지반-raft 사이의 상호작용을 상호작용계수를 도입하여 고려하였다.

개발 해석기법은 상부기초의 임의의 위치에 작용하는 연직집중하중 및 모멘트와 상부 기초 전체에 균등하게 작용하는 연직등분포하중에 대한 해석이 가능하며, 또한 상부기초의 각 요소에 작용하는 연직등분포하중에 대한 고려가 가능하므로 적절한 유한 요소망의 구성을 통해 해당 요소에 적절한 등분포하중을 작용시킴으로서 기둥 하중에 대한 해석도 가능하다. 또한 이러한 하중이 동시에 복합적으로 작용하는 경우에도 해석이 가능하며, 결과로 raft 각 위치에서의 침하량 및 회전각, 즉 침하량 분포와, raft 각 위치에 발생하는 전단응력 및 휨응력의 산정할 수 있다. 이 프로그램은 기존의 해석프로그램이 raft 유한요소망의 절점에만 말뚝을 배치할 수 있는 것과 달리 형상함수를 이용하여 말뚝을 임의의 위치에 배치할 수 있도록 하여, 설계 시 말뚝 배치의 변경이 용이하다는 장점이 있다.

5.2 부등침하 최소화를 위한 최적화 기법 연구

기존의 일반적인 piled raft 설계에서는 대체로 말뚝을 등간격으로 배치하거나 또는 하중이 전달되는 기둥의 하부에 배치하여 왔으나 최근 적절한 말뚝 배치를 통해 부등침하를 감소시키고자 하는 연구가 수행되고 있다. Randolph(1994)는 raft의 중앙부에만 말뚝을 설치하는 것이 부등침하의 감소에 더 효율적이라고 제안하였으며, Horikoshi와 Randolph(1996)가 원심 모형 실험을 통해 이러한 개념을 확인한 바 있다. 반면에, Sommer 등(1991)은 Frankfurt의 MesseTurm 건설에서 raft의 모서리 부분에 말뚝을 주로 배치하는 말뚝 배치 기법을 적용함으로써 효과적으로 부등침하를 감소시킬 수 있었다는 상반된 결과를 제시하고 있다. 이러한 제안들은 대부분 정확한 해석기법의 개발을 통해서가 아니라 경험적 판단을 통해 이루어지고 있다. 그러나, 침하는 말뚝 배치 상태와 상부 하중의 재하 조건에 모두 영향을 받으므로 부등침하를 최소화시키기 위한 최적말뚝배치는 하중조건이 정확히 고려되어야 한다. 현재 국내에서는 수치해석을 통하여 합리적으로 부등침하를 최소화하고자 하는 두 종류의 연구가 진행 중에 있으며, 개략적인 내용은 다음과 같다.

5.2.1 처짐 곡면의 면적을 이용한 최적화 기법

김경남 등(1999)은 5.1절에서 소개한 piled raft 해석 프로그램에 최적화 기법을 적용하여 침하를 발생시키는 다양한 조건에서 수치 해석을 통하여 부등침하를 최소화시키는 최적말뚝배치를 찾을 수 있는 기법을 제안하였다. 이 연구에서는 부등침하를 직접적으로 최적화를 위한 목적함수로 정의하는 대신에, raft와 같은 이차원 구조물에서 부등침하가 작을수록 기초의 처짐 곡면 형상이 평면을 이루어 면적이 작아지는 것을 이용하여 곡면의 면적을 부등침하의 최소화를 위한 목적함수로 정의하였다. 설계변수는 말뚝의 위치로 정하고 말뚝이 raft에서 벗어나지 않도록 구속조건을 주었다. 최적화기법으로 Recursive Quadratic Programming (RQP)을 이용하고, 최적화를 위한 목적함수가 비선형이므로 선형화하여 선형 구속조건을 가지는 비선형 최적화문제를 반복적으로 푸는 방법으로 최적화 과정을 수행하였다. 개발된 기법을 하중 조건과 기초의 형상을 변화시킨 다양한 예제에 적용한 결과 제안된 최적말뚝배치기법으로 결정된 최적말뚝위치가 부등침하량 및 raft에 발생하는 휨모멘트의 감소에 효율적인 것으로 나타났다.

5.2.2 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 기법

김홍택 등(1999)은 Clancy와 Randolph(1994)가 개발한 프로그램인 HyPR에 이용된 piled raft 기초 해석 기법에 유전자 알고리즘을 적용하여 piled raft 기초의 최적설계 기법을 개발하였다. 자연진화법칙을 최적화문제에 적용한 유전자알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 기초의 부등침하량과 시공비용을 목적함수로 하고 말뚝의 반경, raft의 두께, 말뚝의 위치 등을 설계변수로 하였으며, 설계예제를 통해 등분포하중이 작용하는 경우 raft 중앙부에 말뚝을 집중적으로 배치하는 것이 부등침하 감소에 효과적이라는 Horikoshi와 Randolph (1998)의 연구 결과를 확인하였다.

5.3 모형시험을 이용한 raft-지반-말뚝 사이의 상호작용 분석 연구

정충기 등은 1998년부터 현재 학술진흥재단 후원으로 모형시험을 통해 사질토 지반에서 raft-지반-말뚝 사이의 상호작용을 파악하기 위한 연구를 수행 중이다. 이 연구에서는 실내 토조에 조성된 균질한 사질토 지반 및 단단한 풍화토층 위에 사질토 층이 존재하는 다층 지반에 대하여 4개 및 9개의 모형말뚝으로 이루어진 기초에 대한 재하 시험이 수행되고 있다. raft와 말뚝 사이의 상호작용을 파악하기 위하여 동일한 조건에서 raft와 지반의 접촉 여부를 변화시켜 raft의 지반접촉에 의한 지지 효과를 규명하며, 변형률 게이지를 부착한 모형말뚝을 이용하여 piled raft 기초의 각 요소(raft, 말뚝)가 분담하는 하중과 말뚝의 선단 및 주면 저항력을 분리, 파악함으로써, 각 요소간의 상호 작용을 파악하고, 말뚝간의 이격거리를 변화시켜 실험함으로써, 이격거리에 따른 상호작용 효과의 변화와 piled raft의 파괴 양상과 지

지거동의 변화에 대한 연구가 수행중이다.

균질한 사질토 지반에 대한 연구 결과를 토대로 이수형 등(1999)은 raft가 piled raft 기초의 거동에 미치는 영향은 말뚝 간격에 따라 다르며, 말뚝 간격이 작은 경우에는 raft의 하중 분담이 작은 반면에 말뚝의 주변마찰력이 증가하나, 말뚝 간격이 넓어지면서 raft의 하중 분담이 커지고 raft에 의한 지반 침하로 말뚝 상부에서 말뚝과 주위 지반 사이의 상대변위가 감소하여 주변마찰력이 감소하였다고 발표하였다.

최종 연구 결과로 사질토 지반에서 raft의 지지효과, raft-지반-말뚝 사이의 상호작용, 말뚝간의 이격거리, 하부의 단단한층의 존재 여부 등이 piled raft 기초의 거동에 미치는 영향을 전반적으로 고찰하고, 이를 이용하여 사질토 지반에서 piled raft의 거동을 해석적으로 예측하는 방법을 제안할 예정이다.

5.4 현장 계측 연구

현재 국내에서 발표된 piled raft 거동에 관한 현장계측 관련 연구는 거의 전무한 실정이다. 최진오 등은 (Choi, 1999) 중앙고속도로 신단양대교 현장에서 국내 최초로 piled raft기초의 현장 계측 및 분석을 수행하였다. 계측이 실시된 pier 기초는 암사면에 거치되었으며, 기초는 소구경 현장 타설 말뚝과 raft로 구성되어 있다. 비등방적인 지중응력, 사면의 지형학적 영향에 따른 raft 접지압의 분포 및 말뚝의 위치별 하중분담 분포를 시공 단계별로 계측하였다. 계측 수행기간은 pier 칼럼 완성시 까지 총 1년 6개월이며, 총 연직 작용하중은 6081 ton이었다. Raft의 접지압 측정을 위하여 토압계를 설치하고(사진 1) 말뚝의 하중분담 및 하중전이를 계측하기 위하여 변형율계를 말뚝의 깊이 방향으로 설치하였다.

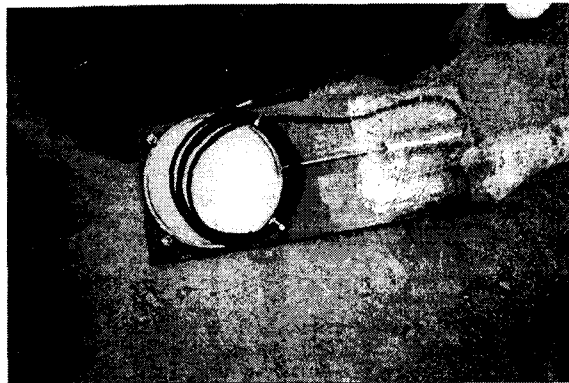


사진 1. 접지압 측정을 위한 토압계의 설치

계측 자료는 기존 연구 문헌에서 제시한 결과와 유사한 경향을 보였으며, 비등방적 지중응력과 암사면 지형에 따른 비대칭적 접지압 및 말뚝 분담하중의 분포를 확인하였다. 향후 다양한 지형 및 기초의 형상에 따른 piled raft기초의 거동을 분석하고자 3차원으로 수치모델링을 통한 parametric study가 진행중에 있다.

6. 결 언

현재까지 무리말뚝 설계에는 말뚝캡 혹은 raft의 지지력을 무시하는 보수적인 방법이 적용되어 왔다. 그러나, 최근에 보고된 연구 결과들로부터 말뚝의 하중분담을 고려한 piled raft 기초가 매우 경제적이고 합리적인 기초임을 확인할 수 있었다. 따라서, piled raft 기초를 잘 활용하면 raft의 지지력을 고려할 수 있는 경제적인 설계가 가능할 뿐만 아니라 과도한 침하가 예상되는 경우 침하량을 효율적으로 감소시킬 수도 있다. 다만, piled raft 기초는 말뚝과 raft의 지지 기능을 동시에 고려해야 하기 때문에 해석

이 복잡하므로, 적극적인 활용을 위해서는 아직도 연구되어야 할 부분이 많이 있다. 앞으로, 보다 정확한 해석적 기법의 개발과 다양한 조건에서의 모형 및 현장 계측을 통해 piled raft 기초의 거동을 보다 잘 이해할 수 있을 것으로 기대하며, 머지 않은 장래에 이를 이용하여 실용성 있는 설계 기준도 마련될 수 있을 것으로 생각한다.

참고 문헌

1. 김홍택, 강인규, 황정순, 전용진, 고용일 (1999). "유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초의 최적설계", 한국지반공학회 '99 가을학술발표회, 415-422
2. 김경남, 이수형, 정충기, 이해성 (1999). "Piled Raft 기초의 부등침하 최소화를 위한 최적말뚝배치", 대한토목학회논문집, 19(III-4), pp. 831-839
3. 이수형, 최영석, 정충기, 김명모 (1999). "사질토 지반에서 말뚝캡이 연직하중을 받는 무리말뚝의 거동에 미치는 영향", 대한토목학회논문집, 20(1-C), pp 91-97
4. 현대건설주식회사 기술연구소 (1999), 무리말뚝 및 상부기초 통합 해석 시스템 개발, 연구보고서
5. Banerjee, P.K. (1994). *The Boundary Element Methods in Engineering*, McGraw-Hill
6. Brown, P.T. & Weisner, T.J. (1975), The behaviours of uniformly loaded piled strip footings. *Soils and Foundations*, 15, pp. 13-21
7. Butterfield, R. & Banerjee, P.K. (1971a). The Elastic Analysis of Compressible Piles and Pile Groups. *Geotechnique* 21, No. 1, 43-60.
8. Butterfield, R. & Banerjee, P.K. (1971b). The Problem of pile group-pile cap interaction. *Geotechnique* 21, No. 2, 135-142.
9. Choi, J. O., Kwon, O. S., Kim, M. M. (1999), "The Behavior of Micro-Piled Raft Foundation on Crest of Rock Slope", *Proc. 1st International Summer Symposium*, J.S.C.E., August 6, 1999, Tokyo
10. Clancy, P. & Randolph, M.F. (1993). "Analysis and design of piled raft foundation". *International Journal of Numerical Methods in Geomechanics.*, 17, pp. 846-849
11. Clancy, P. & Randolph, M.F. (1996). "Simple design tools for piled raft foundations". *Geotechnique* 46, No.2, pp. 313-328
12. Cooke, R.W. et al. (1981) Some Observations of the foundation Loading and Settlement of Multi-Storey Building on a Piled Raft Foundation in London Clay, *Proc. International Civil Engg*, Part 1, 70, pp 433-460
13. Franke, E., Lutz, B. & El-Mossallamy, Y. (1994). "Measurements and numerical modelling of high-rise building foundations on Frankfurt clay. Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments.", *ASCE Geotechnical Special Publication*. No.40, 2, 1325-1336
14. El-Mossallamy (1989) Analysis of Piled raft soil Interaction. M.sc. Thesis, Faculty of Engg., Ain Shams University, Cairo, published in extracts in *Proc. First Int. Conf. on Structural Engg.* of Ain Shams University under the same title and the names of EL-KADI, EL-NAHHAS, EL-MOSSALLAMY
15. Green P. A and Hight D.W the instrumentation of Dashwood House, London. Construction Industry Research and Information Association, London, 1976, *technical note 78*.
16. Hain, S.J. & Lee, I.K. (1978). "The analysis of flexible pile-raft systems", *Geotechnique* 28, No.1, pp 65-83
17. Hooper, J.A. (1973). "Observations on the behaviour of a piled-raft foundation on London clay". *Proceeding Instrumented Civil Engineers*, 55(2), pp 77-90
18. Horikoshi K, Randolph MF. Centrifuge modeling of piled raft foundation on clay. *Geotechnique* 1996; 46(4); 741-752.

19. Kulhawy, F.H. & Prakso, W.A. (1998). "Some observation on piled raft(mat) foundaion analyses", Panel discussion, *14th ICSMFE*, Vol. 4, pp. 2261-2264
- Mattes, N.S. & Poulos, H.G. (1969), "Settlemnt of single compressible pile." *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, Vol. 95, SM1, pp. 189-207
20. Ottavianni, M. (1975). "Three-dimensional finite analysis of vertically loaded pile groups". *Geotechnique*, 25(2), pp. 159-174
21. Poulos, H.G & Davis, E.H. (1964), "The settlement behaviors of single Axially-Loaded incompressible piles and piers." *Geotechnique* 18, pp 351-371
22. Poulos, H.G. & Davis, E. H. (1980), *Pile foundation analysis and design*, John Wiley and Sons
23. Poulos, H.G. (1993), "Piled rafts in swelling or consolidating soils". *ASCE J. of Geotech. Eng. Div*, 119, GT2, pp. 374-380
24. Poulos, H.G. (1994), "An approximated numerical analysis of piled raft interaction", *International Journal of Numerical Analysis and Methmatics in Geomechanics.*, 18, pp. 73-92
25. Poulos, H.G. et. al (1997), "Comparison of some methods for analysis of piled rafts", *Proc. 14th ICSMFE*, Vol. 2, pp. 1119-1124
26. Randolph, M.F. & Wroth, C.P. (1979), "An Analysis of the vertical deformation of pile Groups", *Geotechnique* 29, No. 4, pp. 423-439
27. Randolph, M.F. (1983), "Design of piled raft foundations", *Recent Developments in Labaratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems*, Bangkok, pp. 525-537
28. Russo, G., Viggiani, C.(1997), "Some aspects of numerical analysis of piled rafts", *Proceeding 14th International conference on soil mechanics and foundation engineering*, Hamburg, Vol. 2, pp 1125-1128
29. Sommer H, Tamaro G, De Benedicctis C. Messes Turm, foundations for the tallest building in Europe. *Proceeding 4th International Deep Foundation Institute Conference*, Stressa, 1991, p. 139-145
30. Yamashita, K., Kakurai, M., Yamada, T. & Kuwabara, F. (1993). "Settlement behaviour of a five-storey 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