

# 연약점토지반 Piled-Raft 기초의 김해지역에서의 적용성

서영교\*

\*한국해양대학교 해양개발공학부

## Piled-Raft Foundation on Soft Clay in Gimhae Area

YOUNG-KYO SEO\*

\*Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Pile Foundation 말뚝기초, Raft Foundation 전면기초, Numerical Modelling 수치모형, Design Chart 설계도표

**ABSTRACT:** For the structural foundation above the soft clay layer conditions, the design charts are first presented for the evaluation of both bearing capacity and total settlement in the basic raft foundation system. Load settlement relationship curves are used to evaluate the ultimate soil bearing capacity. The total settlement is evaluated by applying various traditional factors into the ultimate bearing capacity. Then, the parametric studies are carried out for the piled-raft foundation system. In the numerical analysis, the elasto-pastic finite element model (Mohr-Coulomb model) is used to present the foundation response and design charts, which enable the determination of the raft size and pile length and spacing.

### 1. 서 론

우리나라에서 두 번째로 큰 도시인 부산은 면적은  $750\text{km}^2$ , 인구는 약 380만 명이 거주하고 있다. 정부는 포화된 부산시의 개발을 위해 낙동강 주변의 퇴적 평야를 새로운 종합적인 생활공간으로 개발하려는 계획을 세웠으며 1990년 초반 이후부터 개발사업을 진행하여 왔다. Fig. 1은 개발 대상지역을 보여 주고 있다. 일반적으로 낙동강 삼각주 퇴적평야의 토질 주상도를 보면 5~10m의 사질토층이 상부에 존재하고, 그 아래로 20~30m의 연약한 실트질 점토층 또는 연약 점토층으로 대부분 이루어져 있다. 점토층 아래로는 또 다시 5~10m의 사질토층이 분포하고 있다. 지하수위는 지표면 아래 0.5~0.8m에 위치하고 있다. Fig. 2는 대상지역의 전형적인 토질 주상도 및 토질특성 시험치를 보여주고 있다. 이러한 전형적인 지반조건으로 인하여, 현재까지 구조물의 기초는 주로 70m 이상의 말뚝기초로서 암반층에 관입하여 사용되어 온 관계로 공사비용이 엄청나게 소요되고 있어 경제성의 문제가 심각하게 대두되고 있다. 본 논문은 기존의 말뚝기초공법을 대체하기 위한 Piled-Raft 기초공법을 대상지역에 적용할 경우의 지반의 지지력과 침하의 관점에서 고찰하였다.

Piled-Raft 기초의 설계 대한 초기 연구는 Clancy and Randolph(1993)와 Prakoso and Kulhawy(2001)에 의하여 수행되었다. 제시된 구조물 기초의 설계 과정은 순수한 유한요소해석 결과를 근거로 하였으며, 지반조건 및 구조물 기초의 형

식은 각각 비배수상태의 균질한 토질조건에서의 부력형식의 기초 ("Floating" Piled-Raft Foundation)를 대상으로 하였다. 유한요소해석을 통한 구조물 기초의 설계과정의 선정시 기초의 형식과 관련된 여러 가지 설계변수가 고려되었다. 본 연구는 Prakoso and Kulhawy의 연구방법을 토대로 하여 특정지역인 부산 낙동강 지역의 지반조건에서의 Piled-Raft 기초의 지지력 및 침하에 직접적인 영향을 미치는 설계변수 연구를 고찰하고자 한다.

### 2. 유한요소해석 방법

수치해석은 Pile-raft 기초의 거동 및 지반조건 및 특성을 고려할 수 있는, 지반-구조물 상호해석 유한요소 프로그램인 PLAXIS (Vermeer and Brinkgrve, 1995)를 사용하였다.

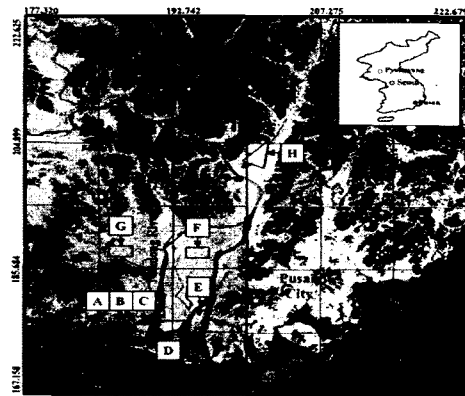


Fig. 1 The Nakdong Deltaic plane

제1저자 서영교 연락처: 부산광역시 영도구 동삼동 1 번지

051-410-4863 yseo@hhu.ac.kr

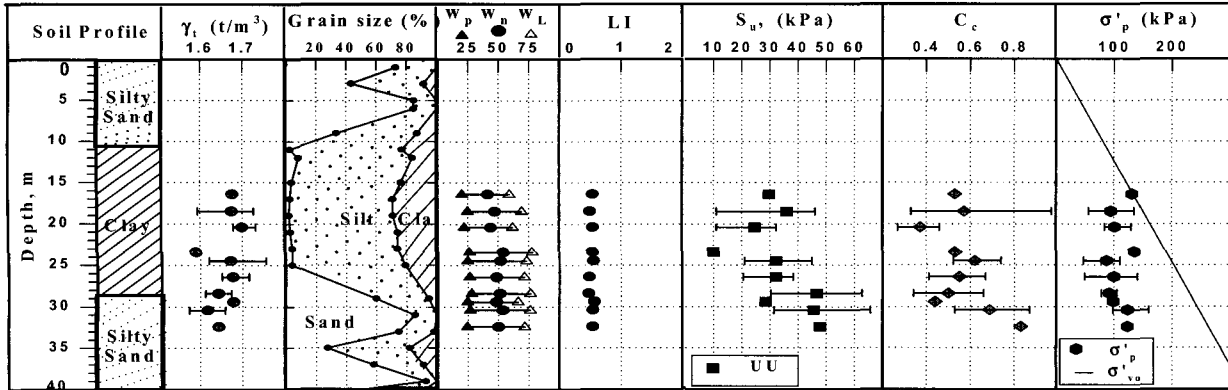


Fig. 2 Ground conditions and soil properties

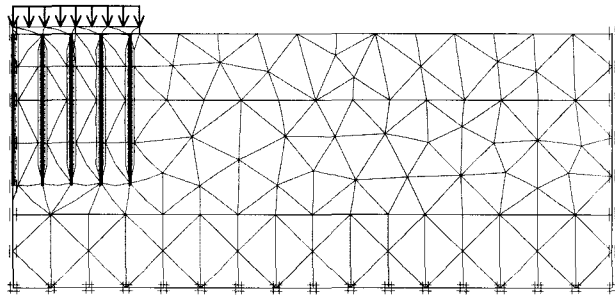


Fig. 3 Typical finite element mesh

PLAXIS 프로그램은 본 연구의 대상지역과 비슷한 다층 지반에서의 Raft와 Pile의 거동을 해석할 수 있다. 수치해석은 고려되는 구조물이 대칭임을 감안하여 우측 절반만을 고려하였으며, 요소형식은 육절점 삼각형 요소를 사용하였다. Pile과 토질의 마찰은 점접요소(Interface element)를 사용하였으며, Raft와 토질과의 마찰은 고려하지 않았다. Fig. 3은 전형적인 유한요소 해석에 사용된 3층의 토질로 구성된 40m의 지반에 설치된 Piled-Raft 기초의 유한요소 Mesh를 보여준다. 지반의 맨 위층은 10.5m의 사질토층으로 고려하였고, 그 아래는 각각 18.0m의 점토층 및 11.5m의 사질토층으로 고려하였다. 유한요소 해석시 지하수위는 지표면에 위치한 것으로 가정하였으며 지반조건은 배수조건으로 고려하였다. 고려된 기초 구조물의 중요 기본 설계변수는 pile 그룹의 폭과 Raft 폭의 비( $B_g/B_r$ ), pile 길이( $L$ ), pile 간격( $S$ ) 및 pile 지름( $B$ )으로 하였다.

Table 1에 제시된 토질 특성 상수들은 실내 실험으로부터 결정되었으며, Raft와 Pile의 물성치는 일반적인 재료상수로 적용하였다. 열거된 지반조건 및 토질 및 재료상수들을 사용하여 Raft 기초 및 Piled-Raft 기초의 지지력 및 침하량을 평가하기 위한 수치모형 실험이 각각 유한 요소 해석으로 차례로 수행되었다.

### 3. Raft 기초

Raft의 주목적은 지반의 침하를 최대한 감소시키기 위하여 상부 구조물에 의한 하중을 최대한 넓게 분포시키는 역할이다. 따라서 본 절에서는 첫 번째로 Piled-Raft 기초의 기본 형식인 철근콘크리트로 된 1m 두께를 가지는 Raft 기초에 대한 지지력 및 침하 먼저 고찰하였다. 두 번째로는 본 대상 지역은 두꺼운 연약한 점토층위에 주로 사질토층이 위치하기 때문에, 사질토층의 Stiffness 증대를 통한 침하량의 영향을 고찰하였다. 이하의 모든 결과는 무차원으로 표시되었다.

#### 3.1 지지력

지반의 지지력은 하중-침하곡선으로부터 구할 수 있다. 지지력은 각각의 상이한 크기의 Raft에 대하여 평가 되었으며, Fig. 4는 첫 번째 사질토층의 깊이( $D_1$ )에 대한 Raft 폭( $B_r$ )의 비로 무차원화 시켰을 때의 지지력을 보여준다. 대략적으로 본 대상 지역에서는 Raft 기초는 Raft의 폭이 사질토층의 깊이의 절반 정도가 될 때 최대지지력(Ultimate Bearing Capacity)을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

Table 1 Material properties in numerical analysis

	$E(kN/m^2)$	$\nu$	$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	$k_y(m/day)$	$k_y(m/day)$	$c_u(kN/m^2)$	$\phi_u(^\circ)$
Upper Silty Sand (Drained)	1.2e4	0.3	17.0	20.68	8.64e-3	8.64e-4	2	34.7
Clay (Undrained)	5.0e3	0.2	11.11	16.92	8.64e-5	8.64e-6	30	0
Lower Silty Sand (Drained)	1.7e4	0.3	17.0	20.68	8.64e-3	8.64e-4	2	34.7
Raft (Non-porous)	2.5e7	0.2	23	23				
Pile (Beam)	2.0e8	0.25						

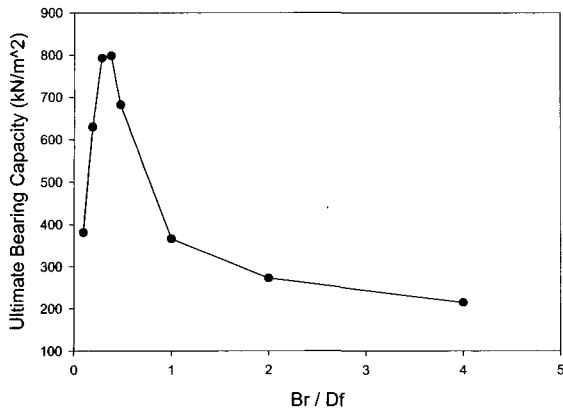


Fig. 4 Bearing capacity with respect to raft width

3.2 침하량

Raft 기초의 침하량은 위에서 평가된 최대지지력에 전통적인 안전율을 여러 가지로 적용한 하중을 재하 함으로서 평가 하였다. 계산된 침하량은 대상지역의 총 허용 침하량을 초과하는 지 여부를 판별하는데 사용될 수 있다. Fig. 5는 4개의 서로 다른 폭( $B_r = 4, 10.5, 21, 42m$ )을 가진 Raft 기초에서 하중재하

직후의 침하량과 최종 압밀 후의 침하량을 보여주고 있다. 압 밀후 의 최종 침하량은 점토 지반의 과잉간극수압이 거의 영 에 접근할 때를 기준으로 하였다. 본 결과는 높은 안전율을 적용함에 따라 침하량은 급격히 감소함을 보여주고 있다.

3.3 사질토 지반의 보강에 따른 하중 전달

기초를 통한 상부하중의 지반깊이 방향으로의 전달을 감소 시킬수록 지반의 침하 또한 감소시킬 수 있다. 이러한 방법은 서로 다른 물성치를 가진 지반에 적절히 적용할 수 있다. 본 대상지역은 두꺼운 연약점토층위에 사질토층이 위치하고 있음 으로서, 사질토층을 보강, 즉 사질토층의 Stiffness를 증대시킴 으로서 상부하중을 침하의 대부분을 차지하는 연약점토층으로 의 전달을 최소화 할 수 있다. Fig. 6은 보강 전·후의 Stiffness 비가  $E_c/E = 1, 10, 100, 100$  일 때의 지반깊이 방향으로의 수직방향 응력증가량( $\Delta\sigma$ )이 재하하중의 크기( $q_0$ )로 무차원화 된 값 나타내고 있다. 여기서  $E$  및  $E_c$ 는 의 보강 전·후의 탄 성계수를 나타낸다. 사질토층의 Stiffness를 대략 100배 정도로 개량 하였을 때 최적으로 수직응력증가량을 감소시킴을 보여 준다. Fig. 7은 지반개량전 및  $E_c/E = 100$ 으로 지반 개량시 의 총 침하량을 보여준다.

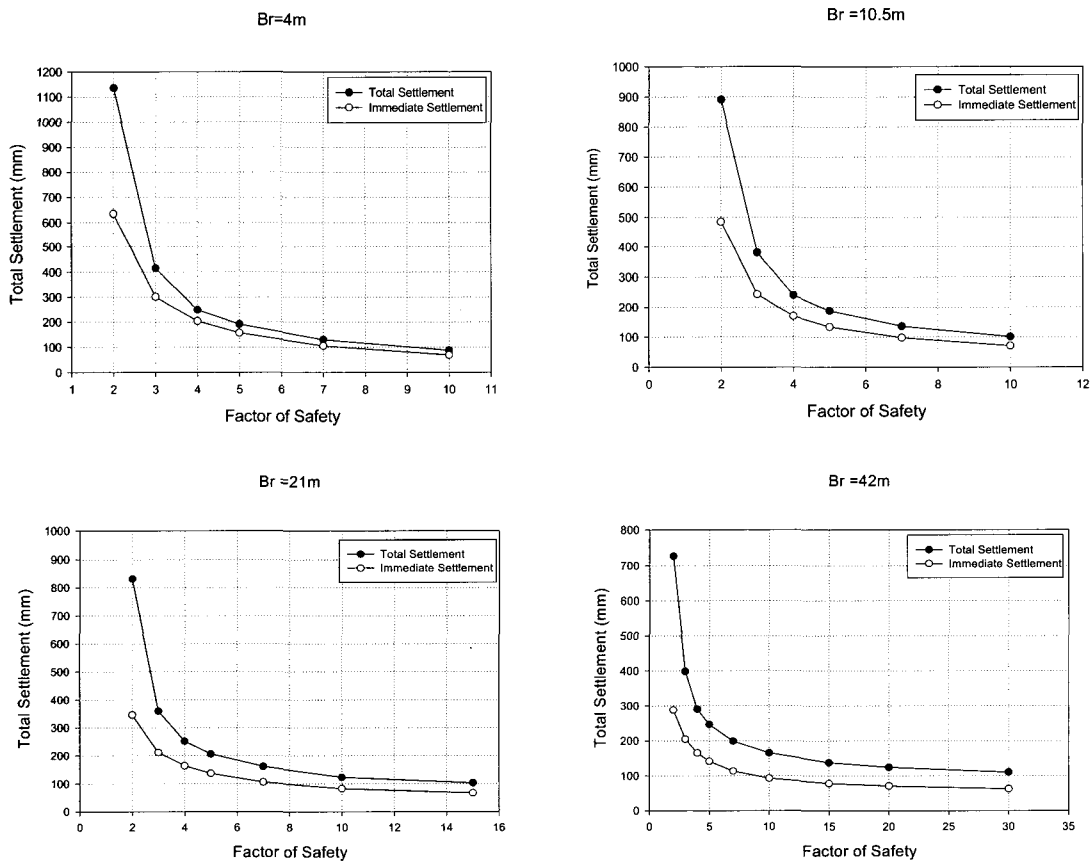


Fig. 5 Total settlements with respect to raft width

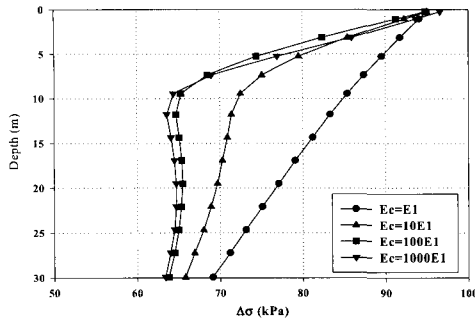


Fig. 6 Vertical stress increment with soil improvement

### 4. Piled-Raft 기초

앞 절에서는 Raft 기초 형식에서는 재하 하중에 대한 안전율을 증가시키든지 또는 기초 바로 아래의 사질토의 Stiffness를 증가시키므로써 침하를 감소시킬 수 있음을 살펴보았다. Piled-Raft 기초 형식은 Raft 기초 형식으로는 침하에 대한 설계기준을 만족하지 못하는 경우에 사용될 수 있다. 즉, Piled-Raft 기초에서의 Pile 사용의 주목적은 상부구조물에 의

한 하중을 pile을 통하여 하부지반에 분산시킴으로서 구조물의 총침하 또는 부등침하를 감소시키기 위하여 사용된다. 본 절에서는 Piled-Raft 기초설계의 주요 요소인 Raft의 폭에 대한 Pile 그룹의 폭의 비 ( $B_g/B_r$ )에서 Pile 간의 간격( $S$ ), Pile 길이( $L$ ) 및 Pile 지름( $B$ )이 침하에 각각 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다. 여기에서  $B_g/B_r$ 은 0.214, 0.670 및 0.917로 적용하였으며 사질토 지반의 Stiffness 증가를 통한 지반개량은 포함되지 않았다. 여기서 부등침하는 Raft의 중앙과 끝부분의 침하차이로 정의 하였다. Piled-Raft 기초의 총침하 및 부등침하는 Raft 기초의 총침하 및 부등침하 값으로 나눈 무차원 값인  $R$  및  $\Delta R$ 로서 표시 하였다.

#### 4.1 Pile 지름에 대한 영향

Pile 지름( $B$ )의 영향은 일정한 길이( $L=17m$ )와 간격( $S=4m$ )을 가지는 Piled-Raft 기초에 대하여 여러 가지 지름의 Pile을 적용하여 수치모형실험을 수행하였다. Fig. 8은 Pile 지름을 간격으로 무차원화 된 값( $B/S$ )에 대한  $R$  및  $\Delta R$ 값을 보여 주고 있으며, Pile 지름은 침하에 최소한의 영향만을 미침을 알 수 있다.

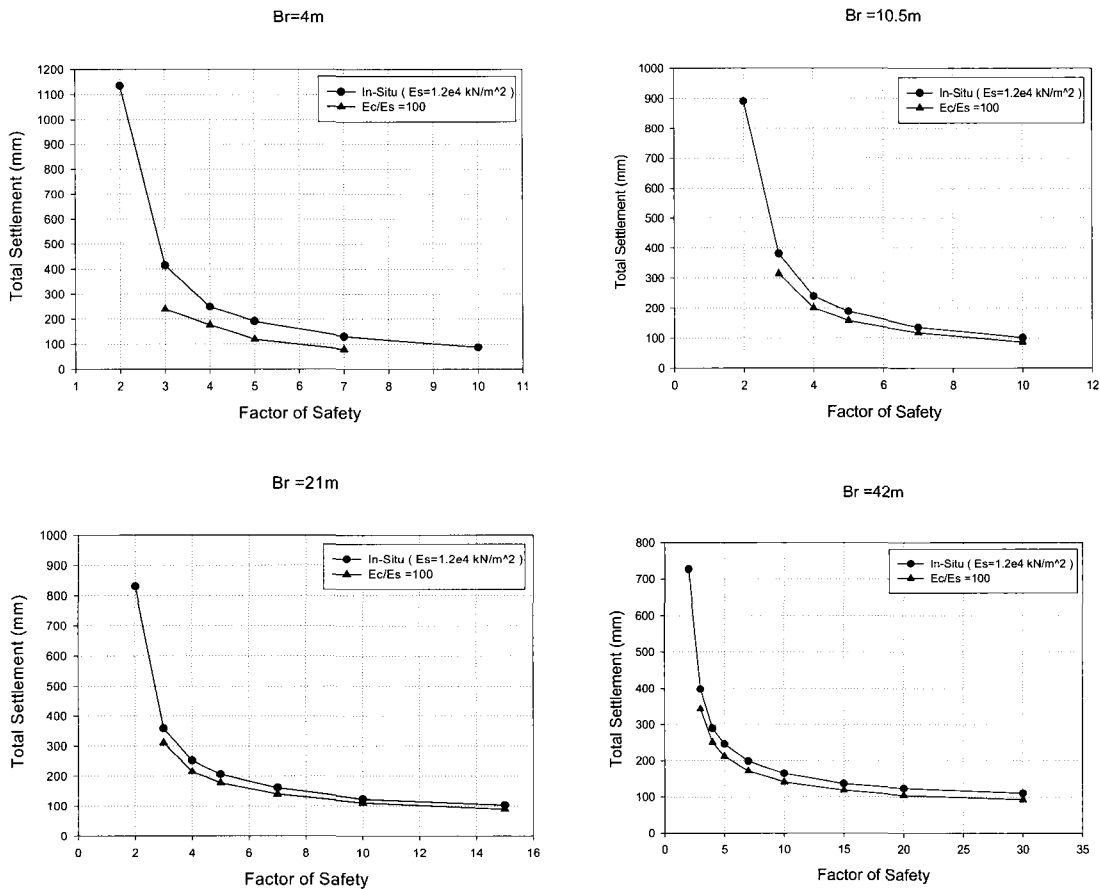


Fig. 7 Total settlements with the improvement soil stiffness

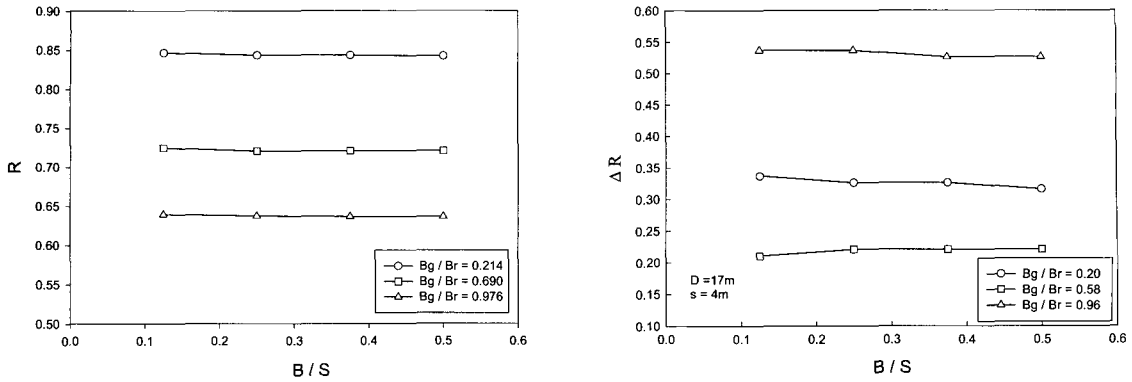


Fig. 8 Effects of pile diameter

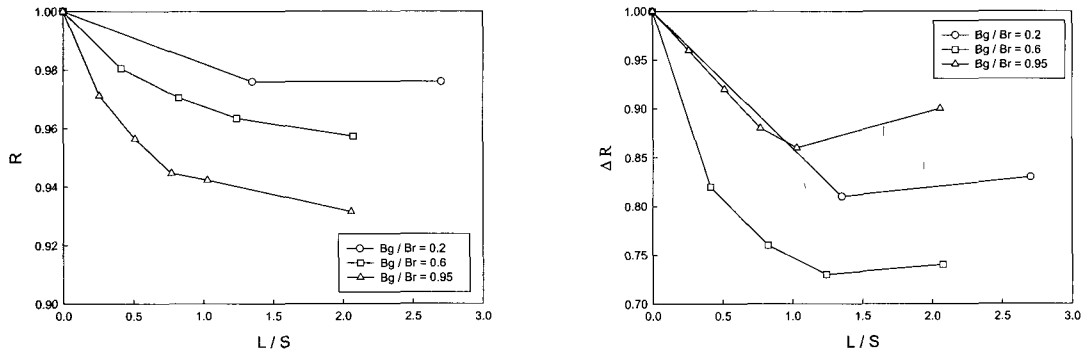


Fig. 9 Effects of pile spacing

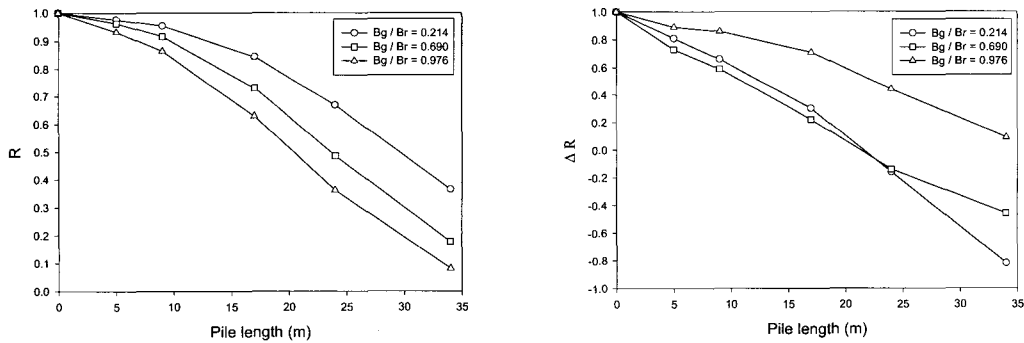


Fig. 10 Effects of pile length

4.2 Pile 간격에 대한 영향

Fig. 9는 일정한 Pile 길이에서의 Pile 간격비( $L/S$ )에 대한 침하의 영향을 보여준다. 여기에서, Pile 길이와 지름은 17m와 1m로 고정시켜 시험 되었다. Pile의 간격이 좁아질수록 (즉, 사용된 Pile 숫자가 많아질수록)  $R$ 은 어떤 특정 Pile 간격이 될 때 까지 감소함을 알 수 있으며  $B_g/B_r$ 비는 주요한 영향인자가 아님을 알 수 있다. 본 경우의  $\Delta R$ 은  $L/S$ 가 1.0 ~ 1.5 사이일 때에 최소가 됨을 알 수 있다. 이 비가 1.5를 넘어가면 모든  $B_g/B_r$ 비에서도 증가됨을 알 수 있다.

4.3 Pile 길이에 대한 영향

Pile 길이가 침하에 미치는 영향은 Fig. 10에 도시되어 있다. 여기서 Pile 간격 및 지름은 4m와 1m로 고정되어 사용되었다. 당연한 결과이지만은 Pile 길이가 길어지면 질수록 총 침하는 감소함을 알 수 있다. 부등침하 또한 감소되나  $\Delta R$ 값이 어떤 특정  $B_g/B_r$ 비에서는 부(-)의 값을 가진다, 즉 Raft의 변형이 접시를 엮어놓은 모양으로 변형됨을 의미한다.  $B_g/B_r$ 비의 값이 거의 1.0에 가까울 때  $\Delta R$ 의 값은 0.0에 근접함을 알 수 있으며 이러한 경우 부등침하를 최소화 시킬 수 있음을 제시한다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 특정지역 즉 얇은 사질토층이 두꺼운 점토층위에 분포한 지역인 부산근교의 낙동강 퇴적지역에 대한 대체 기초형식으로 사용될 수 있는 Piled-Raft 기초의 다양한 설계변수에 대한 침하에 대한 영향을 지반-구조물 상호해석 프로그램을 사용하여 수치모형시험으로 확인하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) Pile이 없는 Raft 기초에서의  $B_g/D_f$ 에 대하여 극한지지를 추정할 수 있는 비교적 간단한 설계도표를 작성하였으며, 본 대상지역의 경우는 Raft의 폭이 맨 상부 사질토 층의 절반 정도 일 때 최대의 지지력을 확보할 수 있다.
- (2) Raft 기초에서 침하를 감소시키기 위해서는 최대의 지지력에 전통적인 안전율을 적용 시키거나, 맨 상부에 있는 사질토층의 Stiffness를 증대시킴으로서 확보 할 수 있다. 본 대상지역의 경우는 Stiffness가 100배 정도에서 최대의 효과를 가질 수 있다.
- (3) Pile-Raft 기초에서 Pile의 지름은 침하에 별다른 영향을 미치지 않으며, 총침하를 감소시키기 위한 Pile 간격은  $B_g/B_r$ 비에 따라 다르다. 부등침하 감소는  $B_g/B_r$ 에 관계없이  $L/S$ 비가 1.0 ~ 1.5 일 때 최대의 효과를 가진다. Pile 길이는 길수록 총침하는 감소되며, 부등침하는  $B_g/B_r$ 가 1.0일 때 최소가 된다.

(4) 사용된 수치해석 프로그램은 해석의 편리성을 위해 줄 기초로 가정(Desai et al., 1974)한 평면변형을 해석으로 이루어졌으므로 3차원 모델을 사용한 해석이 요구된다.

(5) 다양화된 지반 물성치 및 토질 주상도를 이용한 여러 경우의 해석이 요구된다.

## 참 고 문 헌

- Clancy, P. and Randolph, M. F. (1993). "An Approximate Analysis Procedure for Piled Raft Foundations", Int. J. Numer. and Analytical Methods in Geomech, Vol 17, No 12, pp 849-869.
- Desai, C. S., Johnson, L. D., and Hargett, C. M. (1974). "Analysis of Pile-Supported Gravity Lock", J Getechnical Eng., ASCE, Vol 100, No 1, pp 1009-1029.
- Prakoso, W. A. and Kulhawy, F. H. (2001). "Contribution to Piled Raft Foundation Design", J Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol 127, No 1, pp 17-24.
- Vermeer, P. A. and Brinkgreve, R. B. J. (1995). PLAXIS User Manual Version 6.1, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

2004년 5월 3일 원고 접수

2004년 5월 17일 최종 수정본 채택