

# 샌드쿠션을 고려한 말뚝지지 전면기초의 수치해석

김남익\* · 서영교\*

\*한국해양대학교 해양개발공학부

## Numerical Analysis of Piled-Raft Foundations Considering the Effects of Sand Cushion

NAM-ICK KIM\* AND YOUNG-KYO SEO\*

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

**KEY WORDS:** Numerical analysis 수치해석, Finite element 유한요소, Piled-raft foundation 말뚝지지 전면기초, Foundation 기초, Bearing capacity 지지력, Settlements 침하량

**ABSTRACT:** The piled-raft foundation, a new design concept, is one of the most effective kinds of foundation for reducing settlement of structures. An alternative piled-raft system with disconnection cap and a sand cushion between the pile and raft was also investigated to compare the influence of ultimate bearing capacity and settlement. Load-settlement relation curves were used to evaluate the ultimate bearing capacity. In the numerical analyses, a plane strain elasto-plastic finite element model (Mohr-Coulomb model) was used to present the response of the piled-raft foundation.

### 1. 서 론

말뚝지지 전면기초(Piled-raft foundation)에서 Raft는 상부 구조물의 하중을 분산시키고 충분한 지지력을 확보하는 역할을 하며, 파일은 Raft의 과도한 침하를 억제시켜 상부 구조물을 지지하는 상호 보완적인 역할을 하는 기초의 효과적인 방법 중 하나로 새로운 설계공법중의 하나(김경남 등, 1999)이다. 이러한 Piled-raft기초는 무리 말뚝기초와 비교할 때, 소요되는 파일의 길이 및 개수를 현저하게 줄일 수 있는 경제적인 기초 형식으로서 국외에서는 연구가 활발하게 진행되고 실질적으로 적용된 사례연구도 많으나 국내에서는 적용된 사례가 전무하여 이에 대한 연구 성과도 상대적으로 적은 편이다. 그래서 국내에서 사용하는 대부분의 기초 사례들을 보면 파일을 이용하여 지반아래의 연암층까지 시공하는 것이 보편화되어 있다. 본 연구는 기본적인 말뚝지지 전면기초의 거동특성 파악과 더불어 Sand cushion층을 접목한 말뚝지지 전면기초의 거동특성, 그리고 말뚝지지 전면기초에 접목된 Sand cushion층의 효과를 고찰하는데 있다. 말뚝지지 전면기초의 침하량은 지반조건, 하중조건, 시공방법, 파일의 조건(형상, 크기, 재질), 파일의 근입 길이, 파일의 배열상태, 파일 간격, Raft의 두께, Raft의 폭, Raft의 강성 등 여러 가지 인자의 영향을 받는다.

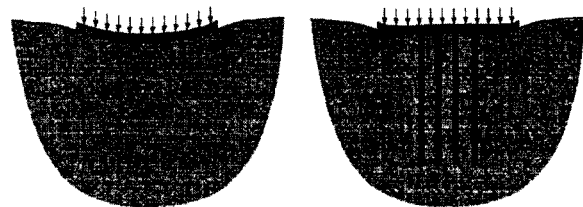
그러나 이들 인자의 상호 복합적인 작용 때문에 합리적인 침하량 예측이 어렵다(권오균 등, 2002; 권오균 등, 2002). 본

연구는 국내지반과 같이 층적층으로 구성된 지반위에 Sand cushion층을 고려한 말뚝지지 전면기초 설계시 평균침하율(Total displacement ratio), 부등침하율(Differential displacement ratio) 그리고 지지력(Bearing capacity)에 미치는 Sand cushion층을 살펴봄으로써 좀 더 효과적이고, 경제적인 기초형태를 파악하는데 있다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 말뚝지지 전면기초(Piled raft foundation)

말뚝지지 전면기초는 주로 단단한 점토층과 같은 지반조건에서 전면기초(Raft foundation)만으로도 충분한 지지력을 확보할 수도 있지만 침하가 발생하여 구조물의 사용성에 문제가 발생할 경우에 대응되는 기초형식이다(Parakosa and Kulhawy, 2001; 김홍택 등, 2002).



(a) Raft foundation (b) Piled-raft foundation

Fig. 1 Raft-foundation and piled-raft foundation

교신저자 김남익: 부산광역시 영도구 동삼1동

051-410-4846 namick77@naver.com

말뚝지지 전면기초에서 Raft는 상부 구조물의 하중을 분산시키고 충분한 지지력을 확보하고, 파일은 Raft의 과도한 침하를 억제시켜 상부 구조물을 지지하는 상호 보완적인 역할을 한다.

2.2 낙동강 하구 특성

연구대상 지층은 낙동강 하구의 삼각주에 위치하고 있으며, 이 삼각주는 낙동강의 상류로부터 운반되어온 막대한 양의 하상 쇄설물이 퇴적된 곳으로 약 100m 정도의 충적층으로 구성되어 있다. 이러한 낙동강 하구의 토질공학적 특성들은 지반조사를 통해서 Table 1과 Fig. 2와 같다.

2.3 플락시스(Plaxis)

Plaxis는 네덜란드 Plaxis사에서 개발한 2차원 지반공학 전용 유한요소 해석 프로그램이다. Plaxis는 연약지반의 압밀거동, 과압밀 점토, 사질토 및 암반지반에도 적용이 가능한 다양한 재료 구성 모델을 갖고 있다(Vermeer and Brinkgreve, 1995).

Fig. 3은 Sand Cushion층을 고려하지 않은 말뚝지지 전면기초이다. 상층의 I부분은 모래층, II부분은 점토층, III부분은 모래층을 나타낸다.

Table 1 The Parameters of numerical model in the analysis

Layer	$E$	$\nu$	$\gamma_d$	$\gamma_{sat}$
	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>
Upper sand 1	12000	0.3	17	20.68
Upper sand 2	120000	0.3	17	20.68
Clay	5000	0.2	11.1	16.92
Lower Sand	17000	0.3	17	20.68
Raft	25000000	0.2	23	23.0
Pile	200000000	0.25		

Layer	$k_x$	$k_y$	$c_u$	$\Phi_u$
	m/day	m/day	kN/m	°
Upper sand 1	0.00864	0.000864	2.0	34.7
Upper sand 2	0.00864	0.000864	2.0	34.7
Clay	0.0000864	0.00000864	30.1	0
Lower Sand	0.00864	0.000864	2.0	34.7

그리고 Fig. 4는 말뚝지지 전면기초에서 Raft와 파일 사이에 Sand cushion층을 접목시킨 지층구조를 모델링한 것이다. Sand cushion층의 영역은 IV부분이다.

2.4 용어정리

Fig. 5에서 보는 것처럼  $B_g$ 란 말뚝지지 전면기초의 파일무리의 폭,  $B_r$ 이란 말뚝지지 전면기초의 Raft의 폭,  $N$ 은 Raft를 지지하고 있는 파일 개수,  $L$ 은 파일의 길이,  $D$ 는 Sand cushion의 두께로 각각 정의한다.

Fig. 6에서 보이는 것처럼 변수인  $W_{ref}$ 은 평균침하량,  $W_{C-E}$ 은 부등침하량을 표현한다.  $R$ 은 말뚝지지 전면기초의 평균침하량과 Raft만 존재할 때의 평균침하량과의 비를 나타내고,  $\Delta R$ 은 말뚝지지 전면기초의 부등침하량과 Raft만 존재할 때의 부등침하량과의 비를 나타낸다.  $W_{ref}, W_{C-E}, R, \Delta R$ 에 대한

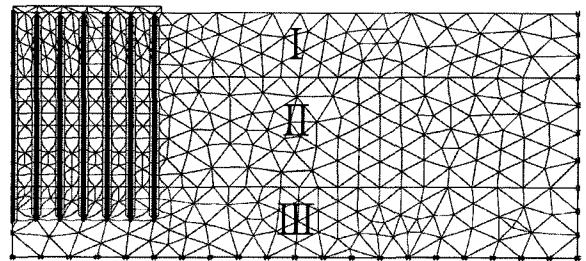


Fig. 3 Piled-raft foundation without sand cushion

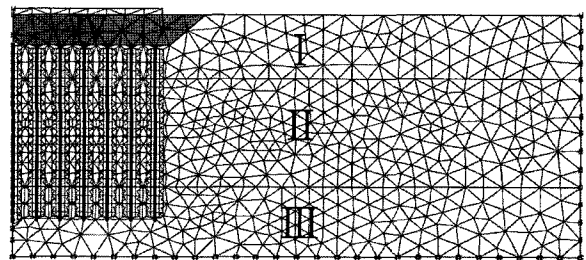


Fig. 4 Piled-raft foundation with sand cushion

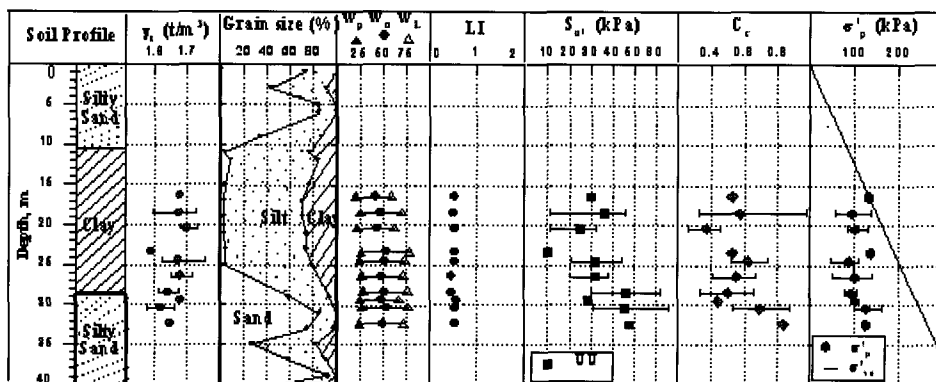


Fig. 2 Ground condition and soil properties

정의는 식 (1), (2), (3), (4)와 같다.

$$W_{ref} = \frac{(W_C + 2W_{1/4} + 2W_E)}{5} \quad (1)$$

$$W_{C-E} = W_C - W_E \quad (2)$$

$$R = \frac{W_{ref}(Piled\ Raft\ Foundation)}{W_{ref}(Raft\ Only)} \quad (2)$$

$$dR = \frac{W_{C-E}(Piled\ Raft\ Foundation)}{W_{C-E}(Raft\ Only)} \quad (4)$$

### 3. 분석

#### 3.1 Raft 기초에 대한 지지력

모래층 상부의 Raft가 폭이 달라짐에 따라 Raft가 견딜 수 있는 지지력의 변화를 고찰하였다. 이때 모델링에 사용한 Raft는 탄성계수가  $2.5e+07(kN/m^2)$ , 포와송비( $\nu$ )는 0.2,  $\gamma_d$ 와  $\gamma_{sat}$ 는  $23(kN/m^3)$ 인 두께 1m의 Raft가 사용되었다. 그 해석 결과는 Fig. 7과 Table 2와 같다.

각각의 해석에서 Raft의 폭은 2m, 3m, 4m, 5m, 10.5m, 21m, 30m, 42m의 총 8개로 달리하고, 지반이 파괴될 때까지 각각의 최대지지력은 하중-변위량 곡선으로부터 도출된 결과를 사용하였다. 본 연구에서는 Raft의 폭이 42m일 때의 최대지지력값  $225(kN/m^2)$ 를 Plaxis의 수치해석시 하중조건으로 사용하였다.

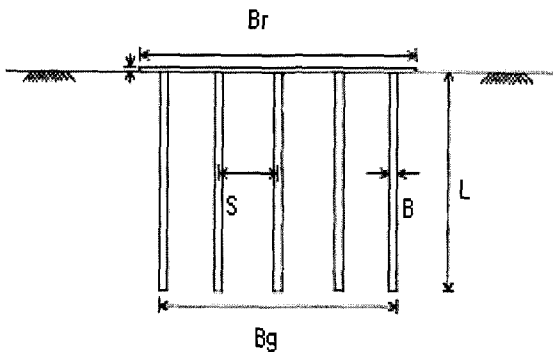


Fig. 5 Definition for the piled-raft

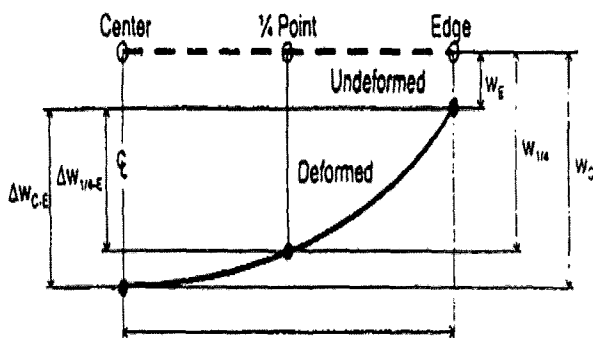


Fig. 6 Definition for the raft

#### 3.2 Sand cushion층을 고려하지 않은 Piled raft기초

##### 3.2.1 파일 갯수에 따른 평균침하율의 변화

본 연구의 핵심인 Raft와 파일의 사이의 Sand cushion층을 말뚝지지 전면기초에 접목하기 전에 말뚝지지 전면기초의 기본적인 침하특성과 지지력특성을 알아보았다. Sand cushion층을 접목하지 않은 말뚝지지 전면기초의 평균침하량의 특성을 살펴보기 위해서 Raft의 전체 폭에 대한 파일무리의 폭의 비인 파일분포도( $B_f/B_r$ )를 0.976, 0.786, 0.595로 나누어서 해석하였다.

Fig. 8을 보면 파일 갯수가 증가할수록 평균침하율은 낮아지고, 파일분포도 역시 커질수록 평균 침하율이 줄어든다는 것을 알 수 있다. 이것은 파일 갯수의 증가에 따라 말뚝지지 전면기초의 하중-침하특성이 양호해 진다는 Poulos and Davis(1980)의 말뚝지지 전면기초의 기본 개념그래프인 Fig. 9를 보면 쉽게 이해 할 수 있다.

##### 3.2.2 파일 갯수에 따른 부등침하율의 변화

부등침하율의 변화도 말뚝지지 전면기초의 파일 갯수와 파일분포도의 값에 따른 형태를 살펴보기 위해 3.2.1절과 같이 해석하여 그 해석결과를 Fig. 10으로 나타내었다.

파일분포도가 0.595와 0.786일 때의 부등 침하율( $dR$ )값을 살펴보자. 두 경우 모두 ' - '값을 가지고 있으며, 이 ' - '값은 2.4절의 용어정리에서 정의 했듯이 말뚝지지 전면기초의 식 (2)의 값이 ' - '값을 가졌다는 것을 의미한다. 따라서 부등침하율을 표현하는 식 (4)도 ' - '을 가지게 되며, ' - '값을 가졌다는 것은 Raft의 중심침하량이 Raft끝단의 침하량보다 작은 값을 의미한다. 즉 Raft의 형상이 위로 볼록함을 알 수 있다.

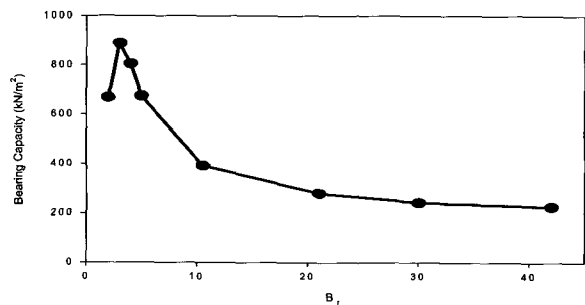


Fig. 7 The relation of the bearing capacity of pile and the wide of raft ( $B_r$ )

Table 2 The maximum bearing capacity according to wide of raft ( $B_r$ )

Bearing capacity kN/m <sup>2</sup>	The width of raft ( $B_r$ )							
	2m	3m	4m	5m	10m	21m	30m	42m
	668	890	806	674	393	280	242	225

파일분포도가 0.976일 때에는 '+'값이 나타났는데, 이때는 Raft의 형상이 아래로 볼록해짐을 의미한다. 이것은 Raft의 중심보다 Raft의 끝단의 파일보강이 더 효과적으로 이루어진 경우이다. 즉 부등침하율이 '0'선에 가깝다는 것은 Raft의 침하형상이 위 또는 아래로 볼록하던 그 형상과 상관없이 Raft중심과 Raft끝 부분의 침하량 차이가 크게 나지 않는다는 것을 보여 준다.

3.2.3 파일 갯수에 대한 침하율의 결과

파일 갯수 증가에 따른 평균침하율(R)을 표현한 Fig. 11에서

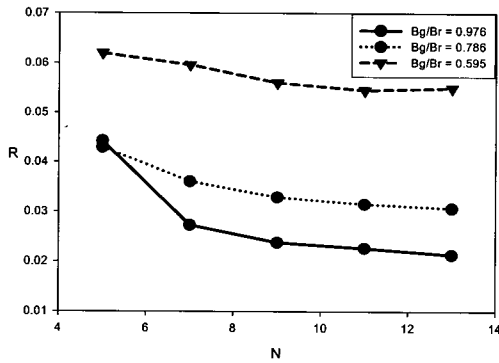


Fig. 8 Total displacement ratio (R) and the number of pile (N)

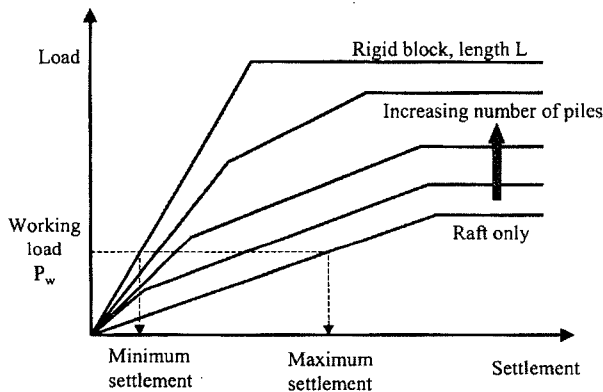


Fig. 9 The graph of Poulos and Davis (1980)

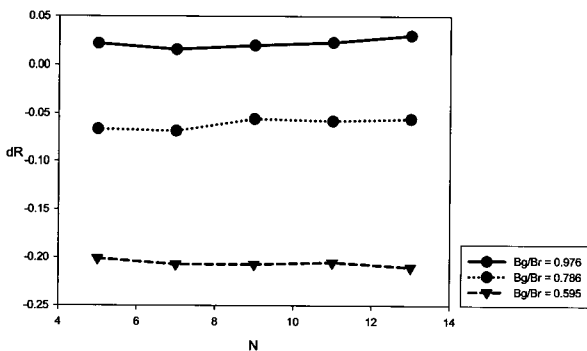


Fig. 10 The differential displacement ratio (dR) and the number of pile (N)

(a)는 파일 갯수와 파일분포도 모두에 민감하게 반응하는 변화를 보이지만, (b)는 파일 갯수 보다는 파일분포도에 더 크게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 평균침하율과 파일 분포도의 관계 그리고 부등침하율과 파일분포도의 관계에서 연구대상 지반에 모델링한 말뚝지지 전면기초에서 가장 민감하게 작용한 요인은 파일분포도로 나타났다.

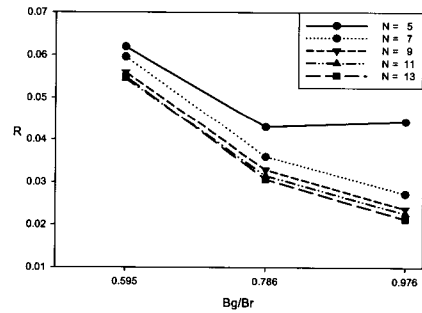
3.3 Sand cushion을 고려한 Piled raft 기초

3.3.1 평균침하율과 Pile개수와의 관계

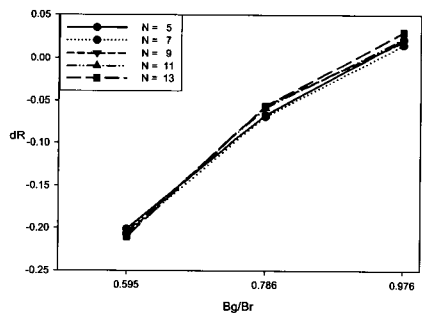
파일분포도가 각각 0.976, 0.786, 0.595일 때의 평균침하율과 파일 갯수와의 관계곡선을 깊이에 따른 변화로 나타내면 Fig. 12와 같다.

파일분포도가 0.976일 때에는 Sand cushion층의 깊이가 깊어 질수록 파일 갯수가 작은 부분의 평균침하율 변화가 매우 크게 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 파일분포도가 0.595인 경우에는 Sand cushion층의 깊이가 깊어지더라도 평균침하율의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 두 번째로 살펴볼 것이 일정한 파일 갯수가 지나고 나면 파일분포도의 값에 거의 영향을 받지 않았다는 것이다.

Fig. 12의 (a), (b), (c)를 Sand cushion층의 깊이별로 살펴보면 파일 갯수가 9일 때를 중심으로 좌우가 크게 다르게 변화하는 모습을 볼 수 있다. 파일 갯수가 증가하고, Raft의 크기가 증가할수록 항복하중은 증가하게 되어 침하율이 낮아진다. 그리고 이러한 현상은 파일 갯수(N)의 증가에 따라 말뚝지지 전면기초의 하중-침하 특성이 양호해진다는 Fig. 9 Poulos and Davis의 말뚝지지 전면기초 그래프'와도 일치한다.



(a) R and Bg/Br



(b) dR and Bg/Br

Fig. 11 Total displacement ratio and the differential displacement ratio

즉, Raft상부에 작용하는 하중과 관련하여 구조물의 침하기준을 만족하는 최적의 파일 갯수를 결정하는 것이 불필요한 파일의 보강을 막을 수 있음을 보여준다.

Sand cushion층을 고려하지 않은 말뚝지지 전면기초에 비해 Sand cushion층을 고려한 말뚝지지 전면기초의 전체 평균침하율은 Sand cushion층의 깊이가 커짐에 따라 점층적으로 증가하게 된다. 하지만 어느 일정 파일 갯수를 넘으면 Raft의 중심에서 일어나는 과도한 침하가 파일의 영향을 많이 받게 되어 평균침하율의 증가도 대체로 낮아졌다.

3.3.2 부등침하율과 Pile개수와의 관계

부등침하율과 파일 갯수에 대한 관계곡선 역시 앞의 3.3.1절과 같은 방법으로 Fig. 13의 그래프로 나타내었다.

Fig. 13은 Sand cushion층을 고려하지 않은 말뚝지지 전면기초에서는 파일분포도가 0.976, 0.786, 0.595일 때 모두 파일 갯수에 상관없이 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 단지 파일분포도가 0.976일 때는 ' + '에 가깝게 있지만 파일분포도가 0.786이나 0.595일 때에는 0을 지나 ' - '값을 가지게 되어 Raft의 침하형상이 아래로 볼록한 형상이 아니라 위로 볼록한 형상을 나타낸다. 그러나 파일분포도가 0.595일 때에도 '0'선에 가까워지지만 역시 ' - '값을 가지게 되어 위로 볼록한 형상을 띄게 된다. 이러한 현상 역시 앞에서 언급한 Sand cushion층

을 고려하지 않은 말뚝지지 전면기초와 마찬가지로 Raft의 중앙에 대한 파일의 과도한 집중 분포로 인해 나타나는 현상이다. 하지만 부등침하에서는 Raft의 침하형상이 위로 볼록하거나 또는 아래로 볼록하다는 형상의 차이보다는 '0'선에 가까워지는 것이 더 중요한 사항이다. 부등침하율이 거의 '0'에 가깝게 나왔다는 것은 Raft의 중심 측과 Raft의 외측의 변화량이 거의 동일하다는 것이기 때문에 Sand cushion층의 접목으로 나타날 수 있는 효과로서 부등 침하율의 조절이 가능하다는 결과를 찾아볼 수 있다. 이렇게 Sand cushion층을 고려한 말뚝지지 전면기초에서 Sand cushion층으로 인한 부등침하율의 조절가능성도 파일분포도가 0.595와 같이 Raft에 대한 파일의 분포도가 낮은 곳에서는 유리하게 작용할 수 있으나, 파일분포도의 값이 1에 가까운 0.976과 같을 때에는 오히려 Sand cushion층을 고려하지 않았을 때의 말뚝지지 전면기초의 부등침하율보다 더 좋지 않은 결과를 보였다.

3.3.3 평균침하율과 Sand cushion깊이의 관계

Sand cushion층을 고려한 P말뚝지지 전면기초의 평균침하율과 깊이에 따른 관계곡선을 살펴보기 위해 다음의 Fig. 14로 나타내었다. Fig. 14를 살펴보면 파일 갯수가 5일 때에는 Sand cushion층이 깊어짐에 따라 평균침하율의 변화가 큰 폭으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 파일 갯수가 5에서 13으로

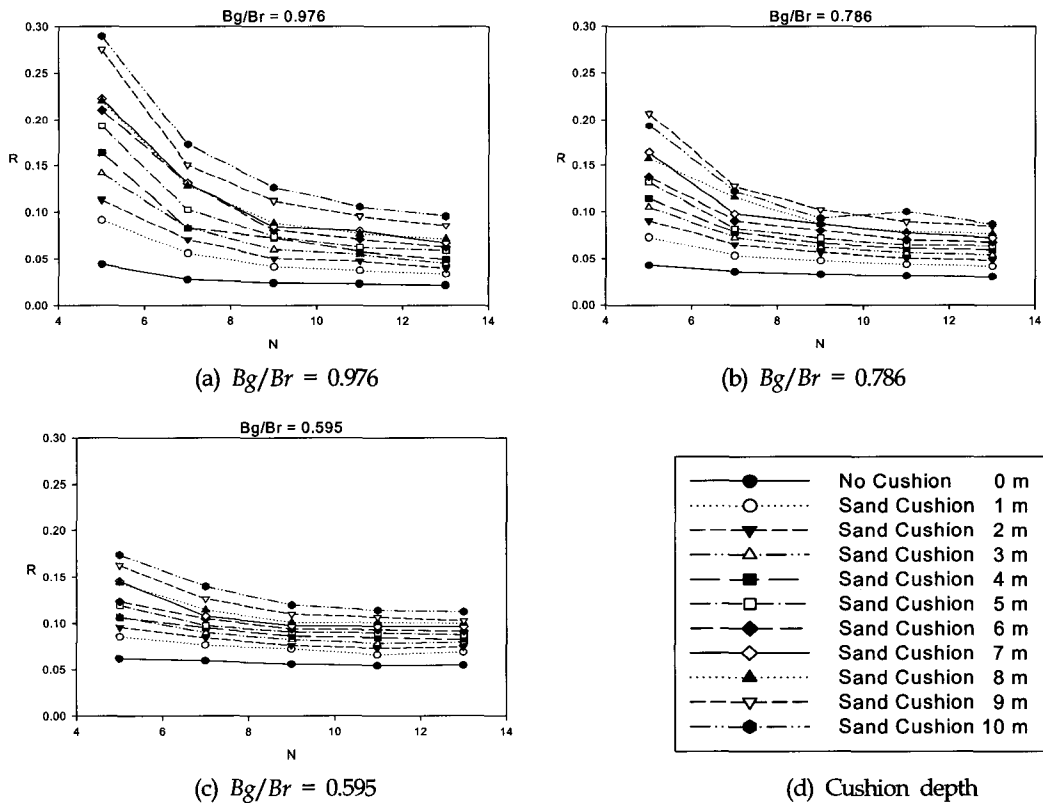


Fig. 12 Total displacement ratio (R) and the distribution of pile

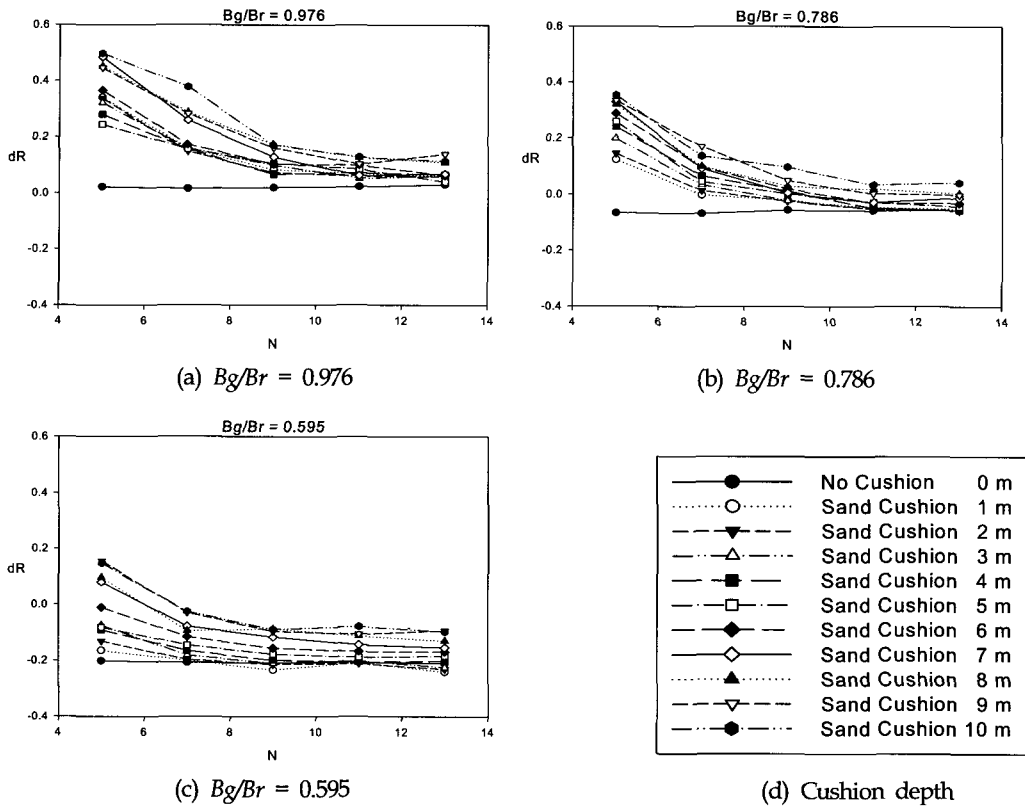


Fig. 13 The relation of the differential displacement of pile and sand cushion depth

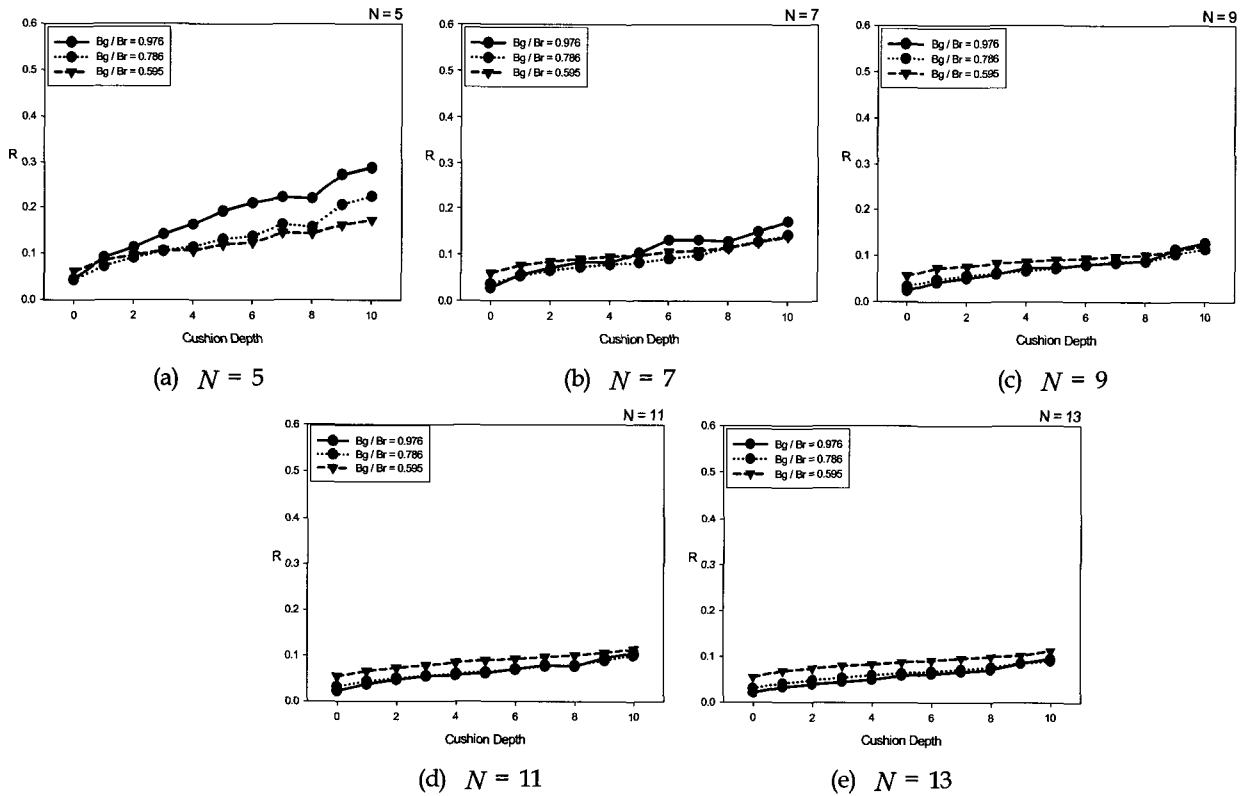


Fig. 14 The relation of total displacement of pile and sand cushion depth

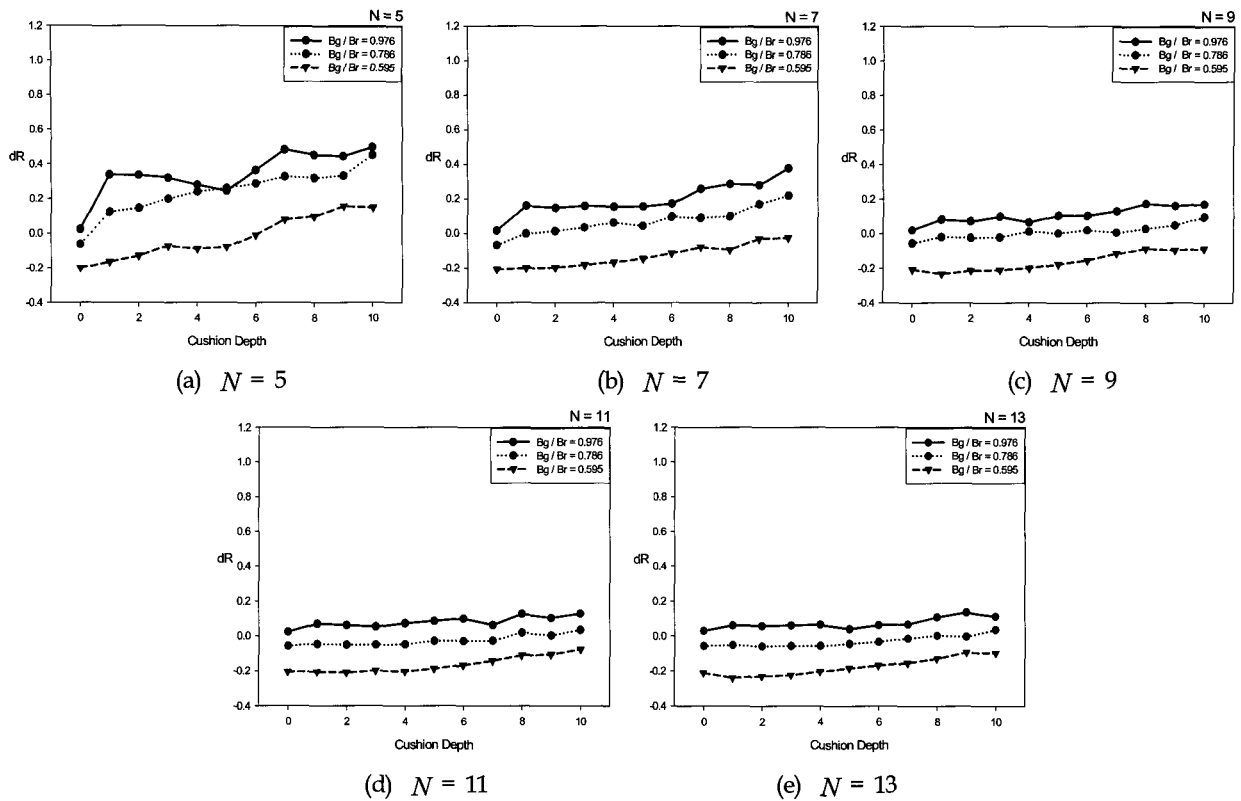


Fig. 15 The relation of the differential displacement of pile and sand cushion depth

증가하게 되자 Sand cushion층이 깊어져도 평균침하율의 변화가 크게 생기지 않았다.

파일 갯수가 적을 때에는 Sand cushion층의 깊이에 따른 영향이 크므로 깊이에 따라 불규칙한 침하율의 변화를 보이지만, 파일 갯수가 증가할수록 파일에 대한 흙의 구속력이 커지기 때문에 침하의 변화폭이 깊이에 따라 큰 차이가 없어지는 것을 확인할 수 있었다.

3.3.4 부등 침하율 과 Sand cushion깊이의 관계

파일 갯수가 일정할 때 Sand cushion층의 깊이에 따라 나타나는 부등침하율의 변화는 Fig. 15와 같다. 부등 침하율도 역시 평균 침하율과 마찬가지로 파일 갯수가 적을 때에는 Sand cushion의 깊이가 변함에 따라 그 값이 크게 변하게 되지만, 파일 갯수가 많아질수록 Sand cushion층의 영향을 작게 받는 것으로 해석되어졌다. 또 파일 갯수가 가장 많은 13일 때에는 Sand cushion 층을 고려하지 않았을 때의 말뚝지지 전면기초의 부등 침하율과 그리 큰 값 차이를 보이지 않았다. 오히려 파일분포도값이 0.786일 때에는 Sand cushion층을 고려하지 않은 말뚝지지 전면기초에서의 파일분포도값이 0.976일 때와 비슷한 부등 침하율을 보였다. 이것으로 보아 일정량의 파일 갯수가 되면 Sand cushion층의 존재유무와 관계없이 침하는 극히 제한적으로 나타나고 파일분포도가 좀 더 큰 영향력을 보인다고 생각할 수 있었다. 즉 Sand cushion층이 존재하고,

그 깊이가 깊어지더라도 Sand cushion층이 가져오는 부등 침하율에 대한 영향력은 파일 갯수가 증가하는 것으로 인한 영향력보다 극히 작고, 오히려 Raft에 대한 파일의 분포인 파일 분포도가 더 큰 영향력을 보였기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에 아직 익숙하지 않은 Sand cushion층을 말뚝지지 전면기초에 접목함으로써 국내 지반조건하에서 어떠한 침하율변화가 보이는지 Plaxis라는 2차원 지반해석 프로그램을 이용하여 그 경향을 살펴본 결과 아래와 같은 몇 가지 결론을 도출하였다.

- (1) Sand cushion층을 고려하지 않은 말뚝지지 전면기초에서의 평균침하율은 파일 갯수의 증감과 파일분포도값 모두 영향을 받지만, 부등침하율은 파일 갯수의 증감보다는 파일분포도에 더 큰 영향을 받았다. 그리고 부등침하율 값의 '+', '-' 기호만으로도 Raft 침하형상을 판단할 수 있었다.
- (2) Sand cushion층을 고려한 말뚝지지 전면기초에서 평균 침하율은 파일 갯수, Sand cushion층의 깊이 그리고 파일분포도값의 증감에 따라 큰 변화폭을 보이지만 부등침하율은 Sand cushion층의 깊이와 파일분포도값의 증감보다는 파일 갯수의 증감에 큰 변화폭을 보여주었다.
- (3) 종합적으로 살펴볼 때 Sand cushion층을 접목한 말뚝지지 전면기초는 기존의 말뚝지지 전면기초에서 파일 갯수로

조절할 수 없었던 부등침하율을 조절 가능한 요소로 사용할 수 있게 해주었다. 그리고 기초위에 올라갈 구조물의 특성이나 기초가 놓이게 될 지반의 형태를 고려할 때 파일분포도값 그리고 파일분포도값에 따른 각각의 파일 갯수로 Raft의 침하 형태와 기초의 침하량의 조절의 가능성을 보여 주었다.

본 연구는 Raft에 대한 파일의 분포도와 Sand cushion의 깊이, 그리고 파일 갯수로 침하량에 대한 상호작용을 고찰하고자 하였다. 하지만 그 외의 파일의 길이, 파일의 두께, 파일의 재질, 파일의 배치, 파일의 형상, Raft의 두께, Raft의 재질, Raft의 형상, Sand층의 탄성계수 증대 그리고 여러 지반조건과 하중조건 등 많은 인자들을 이용한 수치해석과 더불어 실내모형 Test를 통해 말뚝지지 전면기초와 Sand cushion층에 대한 상호 복합적인 관계들을 규명하는 연구가 추후 계속 연구되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- 권오균, 이승현, 오세봉, 임종석, 이활 (2002). "Piled Raft 거동특성에 관한 실험적 연구", 한국지반공학회, 기초 기술 학술 발표회, pp 79-89.
- 권오균, 이활, 김진복, 이승현, 오세봉 (2002). "모형실험을 이용한 사질토지반에서의 PiledRaft 거동특성에 대한 연구", 한국지반공학회, 논문집, pp 358-365.
- 김경남, 이수형, 정충기, 이해성 (1999). "PiledRaft 기초의 부등침하 최소화를 위한 최적말뚝배치", 대한토목학회 논문집, 제19권, 제4호, pp 831-839.
- 김홍택, 박시삼, 강인규, 최효범 (2002). "Piled Raft 기초 적용 사례 분석", 한국지반공학회, 봄 학술발표회 논문집, pp 597-604.
- 김홍택, 강인규, 박정주, 박순규 (2002). "사질토 지반에서 연직하중을 받는 Piled Raft 기초시스템의 하중분담특성에 관한 실내모형실험 연구", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제2호, pp 111-120.
- Parakosa, W.A. and Kulhawy, F.H. (2001). "Piled Raft Foundation Design", J. Geotech. and Geoenv. Engng., ASCE, Vol 127(1), pp 17-24.
- Poulos, H.G. and Davis, E.G. (1980). Piled Foundation Analysis and Design, John Wiley & Sons, Inc.
- Vermeer, P.A. and Brinkgreve, R.B.J. (1995). PLAXIS User's Manual, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

2007년 5월 8일 원고 접수

2007년 10월 9일 최종 수정본 채택