

Numerical Analysis of Piled-Raft Foundation Considering Sand Cushion Effects

by

Nam Ick, Kim

Department of Ocean Development Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

The piled-raft foundation is a new design concept as one of the effective methods of foundation to reduce settlements of structures. On the other hand, an alternative piled-raft system with disconnection cap, sand cushion, between the pile and raft was also investigated to compare the influence of ultimate bearing capacity and settlement. Load-settlement relation curves are used to evaluate the ultimate bearing capacity. In the numerical analyses, a plane strain elasto-plastic finite element model (Mohr-Coulomb model) is used to present the response of the piled-raft foundation.

목 차

Abstract	I
목 차	II
그림목차	IV
표 목 차	X
1. 서 론	1
1.1 연구의 필요성 및 목적	1
1.2 이론적 배경 및 연구의 동향	2
2. 본론	6
2.1 말뚝지지 전면기초 (Piled Raft Foundation)	6
2.2 낙동강 하구 특성	10
2.2.1 지반조건	10
2.3 플라시스 (Plaxis)	13
2.4 용어정리	15
2.5 분석방법	17
3. 분석	19
3.1 Raft 기초에 대한 지지력(Bearing Capacity)	19
3.1.1 지지력(Bearing Capacity)과 Raft 폭(B_r)과의 관계	19
3.2 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초	20
3.2.1 pile개수(N)에 대한 평균 침하량(R)의 변화	20
3.2.2 pile개수(N)에 대한 부등 침하량(dR)의 변화	22
3.2.3 pile개수(N)에 대한 평균 침하량(R) 및 부등 침하량(dR)의 결과	23

3.3 Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초	24
3.3.1 평균 침하량(R)과 pile개수(N)와의 관계	24
3.3.2 부등 침하량(dR)과 pile개수(N)와의 관계	28
3.3.3 평균 침하량(R)과 Sand Cushion 깊이(D)와의 관계	31
3.3.4 부등 침하량(dR)과 Sand Cushion 깊이(D)와의 관계	33
3.3.5 평균 침하량(R)과 파일분포도(B_g/B_r)과의 관계	35
3.3.6 부등 침하량(dR)과 파일분포도(B_g/B_r)과의 관계	38
4. Sand Cushion층의 탄성계수(E) 강화	41
4.1 $B_g/B_r = 0.976$	41
4.1.1 평균 침하량(R)과 pile개수(N)와의 관계	41
4.1.2 부등 침하량(dR)과 pile개수(N)와의 관계	45
4.2 $B_g/B_r = 0.786$	49
4.2.1 평균 침하량(R)과 pile개수(N)와의 관계	49
4.2.2 부등 침하량(dR)과 pile개수(N)와의 관계	53
4.3 $B_g/B_r = 0.595$	57
4.3.1 평균 침하량(R)과 pile개수(N)와의 관계	57
4.3.2 부등 침하량(dR)과 pile개수(N)와의 관계	61
5. 결 론	66
참 고 문 헌	68

그림 목차

Fig. 2.1	말뚝지지 전면기초의 개념	6
Fig. 2.2	복합구조체로서의 말뚝지지 전면기초(Katzenbach & Reul,1997)	7
Fig. 2.3	말뚝지지 전면기초계수 α_{pr} 와 침하량의 관계(Katzenbach et al ,1998)	8
Fig. 2.4	연구대상지역	10
Fig. 2.5	연구대상지역 지반분석	12
Fig. 2.6	플라시스로 모델링한 연구대상 지층구조	14
Fig. 2.7	Sand Cushion Layer을 고려하지 않은 Piled Raft 기초	14
Fig. 2.8	Sand Cushion Layer을 고려한 Piled Raft 기초	14
Fig. 2.9	Sand Cushion Layer을 고려한 Piled Raft기초(탄성계수 E강화)	15
Fig. 2.11	Raft의 각 지점 명칭	16
Fig. 3.1	Pile의 지지력과 Raft 폭(B_r)과의 관계	19
Fig. 3.2	평균 침하량(R)과 Pile 개수(N)	21
Fig. 3.3	Poulos & Davis (1980)의 기초개념 그래프	21
Fig. 3.4	부등침하량(dR)과 파일개수(N)	22
Fig. 3.5	평균 침하율(R)과 B_g/B_r	24
Fig. 3.6	부등 침하율(dR)과 B_g/B_r	24
Fig. 3.7	R 과 N in $D = 0m$	25
Fig. 3.8	R 과 N in $D = 1m$	25
Fig. 3.9	R 과 N in $D = 2m$	25
Fig. 3.10	R 과 N in $D = 3m$	25
Fig. 3.11	R 과 N in $D = 4m$	25
Fig. 3.12	R 과 N in $D = 5m$	25
Fig. 3.13	R 과 N in $D = 6m$	26
Fig. 3.14	R 과 N in $D = 7m$	26
Fig. 3.15	R 과 N in $D = 8m$	26

Fig. 3.16 R 과 N in $D = 9\text{m}$	26
Fig. 3.17 R 과 N in $D = 10\text{m}$	26
Fig. 3.18 dR 과 N in $D = 0\text{m}$	28
Fig. 3.19 dR 과 N in $D = 1\text{m}$	28
Fig. 3.20 dR 과 N in $D = 2\text{m}$	29
Fig. 3.21 dR 과 N in $D = 3\text{m}$	29
Fig. 3.22 dR 과 N in $D = 4\text{m}$	29
Fig. 3.23 dR 과 N in $D = 5\text{m}$	29
Fig. 3.24 dR 과 N in $D = 6\text{m}$	29
Fig. 3.25 dR 과 N in $D = 7\text{m}$	29
Fig. 3.26 dR 과 N in $D = 8\text{m}$	30
Fig. 3.27 dR 과 N in $D = 9\text{m}$	30
Fig. 3.28 dR 과 N in $D = 10\text{m}$	30
Fig. 3.29 R 과 D in $N = 5$	32
Fig. 3.30 R 과 D in $N = 7$	32
Fig. 3.31 R 과 D in $N = 9$	32
Fig. 3.32 R 과 D in $N = 11$	32
Fig. 3.33 R 과 D in $N = 13$	32
Fig. 3.34 dR 과 D in $N = 5$	33
Fig. 3.35 dR 과 D in $N = 7$	33
Fig. 3.36 dR 과 D in $N = 9$	34
Fig. 3.37 dR 과 D in $N = 11$	34
Fig. 3.38 dR 과 D in $N = 13$	34
Fig. 3.39 R 과 B_g/B_r in $D = 0\text{m}$	35
Fig. 3.40 R 과 B_g/B_r in $D = 1\text{m}$	35
Fig. 3.41 R 과 B_g/B_r in $D = 2\text{m}$	36
Fig. 3.42 R 과 B_g/B_r in $D = 3\text{m}$	36

Fig. 3.43 R 과 B_g/B_r in $D = 4\text{m}$	36
Fig. 3.44 R 과 B_g/B_r in $D = 5\text{m}$	36
Fig. 3.45 R 과 B_g/B_r in $D = 6\text{m}$	36
Fig. 3.45 R 과 B_g/B_r in $D = 7\text{m}$	36
Fig. 3.47 R 과 B_g/B_r in $D = 8\text{m}$	37
Fig. 3.48 R 과 B_g/B_r in $D = 9\text{m}$	37
Fig. 3.49 R 과 B_g/B_r in $D = 10\text{m}$	37
Fig. 3.50 dR 과 B_g/B_r in $D = 0\text{m}$	38
Fig. 3.51 dR 과 B_g/B_r in $D = 1\text{m}$	38
Fig. 3.52 dR 과 B_g/B_r in $D = 2\text{m}$	38
Fig. 3.53 dR 과 B_g/B_r in $D = 3\text{m}$	38
Fig. 3.54 dR 과 B_g/B_r in $D = 4\text{m}$	39
Fig. 3.55 dR 과 B_g/B_r in $D = 5\text{m}$	39
Fig. 3.56 dR 과 B_g/B_r in $D = 6\text{m}$	39
Fig. 3.57 dR 과 B_g/B_r in $D = 7\text{m}$	39
Fig. 3.58 dR 과 B_g/B_r in $D = 8\text{m}$	39
Fig. 3.59 dR 과 B_g/B_r in $D = 9\text{m}$	39
Fig. 3.60 dR 과 B_g/B_r in $D = 10\text{m}$	40
Fig. 4.1 R 과 N in 1m (with $E = 1.2\text{e}+5$)	42
Fig. 4.2 R 과 N in 2m (with $E = 1.2\text{e}+5$)	42
Fig. 4.3 R 과 N in 3m (with $E = 1.2\text{e}+5$)	42
Fig. 4.4 R 과 N in 4m (with $E = 1.2\text{e}+5$)	42
Fig. 4.5 R 과 N in 5m (with $E = 1.2\text{e}+5$)	42
Fig. 4.6 R 과 N in 6m (with $E = 1.2\text{e}+5$)	42
Fig. 4.7 R 과 N in 7m (with $E = 1.2\text{e}+5$)	43
Fig. 4.8 R 과 N in 8m (with $E = 1.2\text{e}+5$)	43

Fig. 4.9 R 과 N in 9m (with $E = 1.2e+5$)	43
Fig. 4.10 R 과 N in 10m (with $E = 1.2e+5$)	43
Fig. 4.11 R 과 N (with $E = 12000$)	44
Fig. 4.12 R 과 N (with $E = 120000$)	44
Fig. 4.13 R 과 D (with $E = 12000$)	45
Fig. 4.14 R 과 D (with $E = 120000$)	45
Fig. 4.15 dR 과 N in 1m (with $E = 1.2e+5$)	46
Fig. 4.16 dR 과 N in 2m (with $E = 1.2e+5$)	46
Fig. 4.17 dR 과 N in 3m (with $E = 1.2e+4$)	46
Fig. 4.18 dR 과 N in 4m (with $E = 1.2e+5$)	46
Fig. 4.19 dR 과 N in 5m (with $E = 1.2e+5$)	46
Fig. 4.20 dR 과 N in 6m (with $E = 1.2e+5$)	46
Fig. 4.21 dR 과 N in 7m (with $E = 1.2e+5$)	47
Fig. 4.22 dR 과 N in 8m (with $E = 1.2e+5$)	47
Fig. 4.23 dR 과 N in 9m (with $E = 1.2e+5$)	47
Fig. 4.24 dR 과 N in 10m (with $E = 1.2e+5$)	47
Fig. 4.25 dR 과 N (with $E = 12000$)	48
Fig. 4.26 dR 과 N (with $E = 120000$)	48
Fig. 4.27 dR 과 D (with $E = 12000$)	49
Fig. 4.28 dR 과 D (with $E = 12000$)	49
Fig. 4.29 R 과 N in 1m (with $E = 1.2e+5$)	50
Fig. 4.30 R 과 N in 2m (with $E = 1.2e+5$)	50
Fig. 4.31 R 과 N in 3m (with $E = 1.2e+5$)	50
Fig. 4.32 R 과 N in 4m (with $E = 1.2e+5$)	50
Fig. 4.33 R 과 N in 5m (with $E = 1.2e+5$)	51
Fig. 4.34 R 과 N in 6m (with $E = 1.2e+5$)	51
Fig. 4.35 R 과 N in 7m (with $E = 1.2e+5$)	51
Fig. 4.36 R 과 N in 8m (with $E = 1.2e+5$)	51

Fig. 4.37 R 과 N in 9m (with $E = 1.2e+5$)	51
Fig. 4.38 R 과 N in 10m (with $E = 1.2e+5$)	51
Fig. 4.39 R 과 N (with $E = 12000$)	52
Fig. 4.40 R 과 N (with $E = 120000$)	52
Fig. 4.41 R 과 D (with $E = 12000$)	53
Fig. 4.42 R 과 D (with $E = 120000$)	53
Fig. 4.43 dR 과 N in 1m (with $E = 1.2e+5$)	54
Fig. 4.44 dR 과 N in 2m (with $E = 1.2e+5$)	54
Fig. 4.45 dR 과 N in 3m (with $E = 1.2e+5$)	54
Fig. 4.46 dR 과 N in 4m (with $E = 1.2e+5$)	54
Fig. 4.47 dR 과 N in 5m (with $E = 1.2e+5$)	54
Fig. 4.48 dR 과 N in 6m (with $E = 1.2e+5$)	54
Fig. 4.49 dR 과 N in 7m (with $E = 1.2e+5$)	55
Fig. 4.50 dR 과 N in 8m (with $E = 1.2e+5$)	55
Fig. 4.51 dR 과 N in 9m (with $E = 1.2e+5$)	55
Fig. 4.52 dR 과 N in 10m (with $E = 1.2e+5$)	55
Fig. 4.53 dR 과 N (with $E = 12000$)	56
Fig. 4.54 dR 과 N (with $E = 120000$)	56
Fig. 4.55 dR 과 D (with $E = 12000$)	57
Fig. 4.56 dR 과 D (with $E = 120000$)	57
Fig. 4.57 R 과 N in 1m (with $E = 1.2e+5$)	58
Fig. 4.58 R 과 N in 2m (with $E = 1.2e+5$)	58
Fig. 4.59 R 과 N in 3m (with $E = 1.2e+5$)	58
Fig. 4.60 R 과 N in 4m (with $E = 1.2e+5$)	58
Fig. 4.61 R 과 N in 5m (with $E = 1.2e+5$)	58
Fig. 4.62 R 과 N in 6m (with $E = 1.2e+5$)	58
Fig. 4.63 R 과 N in 7m (with $E = 1.2e+5$)	59
Fig. 4.64 R 과 N in 8m (with $E = 1.2e+5$)	59

Fig. 4.65 R 과 N in 9m (with $E = 1.2e+5$)	59
Fig. 4.66 R 과 N in 10m (with $E = 1.2e+5$)	59
Fig. 4.67 R 과 N (with $E = 12000$)	60
Fig. 4.68 R 과 N (with $E = 120000$)	60
Fig. 4.69 R 과 D (with $E = 12000$)	61
Fig. 4.70 R 과 D (with $E = 120000$)	61
Fig. 4.71 dR 과 N in 1m (with $E = 1.2e+5$)	62
Fig. 4.72 dR 과 N in 2m (with $E = 1.2e+5$)	62
Fig. 4.73 dR 과 N in 3m (with $E = 1.2e+5$)	62
Fig. 4.74 dR 과 N in 4m (with $E = 1.2e+5$)	62
Fig. 4.75 dR 과 N in 5m (with $E = 1.2e+5$)	62
Fig. 4.76 dR 과 N in 6m (with $E = 1.2e+5$)	62
Fig. 4.77 dR 과 N in 7m (with $E = 1.2e+5$)	63
Fig. 4.78 dR 과 N in 8m (with $E = 1.2e+5$)	63
Fig. 4.79 dR 과 N in 9m (with $E = 1.2e+5$)	63
Fig. 4.80 dR 과 N in 10m (with $E = 1.2e+5$)	63
Fig. 4.81 dR 과 N (with $E = 12000$)	64
Fig. 4.82 dR 과 N (with $E = 120000$)	64
Fig. 4.83 dR 과 D (with $E = 12000$)	65
Fig. 4.84 dR 과 D (with $E = 120000$)	65

표 목차

표 2.1 연구대상지역의 토질 정수	14
표 3.1 Raft 폭(B_r)에 따른 최대지지력	21

1. 서 론

1.1. 연구의 필요성 및 목적

말뚝지지 전면기초(Piled Raft Foundation)에서 raft는 상부 구조물의 하중을 분산시키고 충분한 지지력을 확보하는 역할을 하며, pile은 raft의 과도한 침하를 억제시켜 상부 구조물을 지지하는 상호 보완적인 역할을 하는 기초의 효과적인 방법 중 하나로 새로운 설계공법중의 하나이다. 이러한 말뚝지지 전면기초(Piled Raft Foundation)는 무리 말뚝기초와 비교할 때, 소요되는 pile의 길이 및 개수를 현저하게 줄일 수 있는 경제적인 기초형식으로서 국외에서는 연구가 활발하게 진행되고 실질적으로 적용된 사례도 많으나 국내에서는 적용된 사례가 전무하여 이에 대한 연구 성과도 상대적으로 적은 편이다. 그래서 국내에서 사용하는 대부분의 기초 사례들을 보면 pile을 이용하여 지반아래의 연암층까지 시공하는 비경제적인 시공예가 많다.

본 논문은 기본적인 Piled Raft Foundation의 거동특성 파악과 더불어 Sand Cushion층을 접목한 Piled Raft 기초의 거동특성, 그리고 Piled Raft 기초에 접목된 Sand cushion층의 효과를 고찰하는데 있다. 국내지반과 같이 층적층으로 구성된 지반위에 구조물을 설계할시 일어나는 평균 침하 및 부등 침하, 그리고 지지력(支持力, bearing capacity)에 미치는 Sand Cushion층의 영향력을 살펴봄으로써 좀 더 효과적이고, 경제적인 기초형태를 파악하고자 한다.

본 논문에서 고려된 대상 지반인 낙동강하구는 1990년대 초에 우리나라에서 두 번째로 큰 도시인 부산과 근접한 곳이며, 주변도시들을 산업적이고 공업적인 계획도시로 만들기 위해 새로운 택지조성이 계획되어진 곳이다. 이 지역은 모래층 아래 20 ~ 30m 정도의 점토층이 존재하고 그 아래 또 다시 모래

층이나 암반이 나오는 지층구조를 가지고 있다. 이러한 구조를 가진 낙동강하구 주변의 녹산이나 신호에 세워지고 있는 많은 주택지나 공업단지들은 이러한 점토층으로 인해 그 건물들이 5층 이상만 되어도 자체하중으로 인해서 매우 큰 폭의 침하를 일으킨다. 이렇게 생겨나는 침하를 두려워하여 pile을 지하 아래의 암반까지 박는 선단 지지말뚝으로 건물들을 지지한다. 그뿐 아니라 국내에서 사용하는 대부분의 기초 사례들을 보아도 pile을 이용하여 지반아래의 암반층까지 시공하는 비경제적인 시공예가 대부분이다. 이러한 시공사례들로 인해 막대한 기초비용도 문제가 되지만, 앞으로 선단지지말뚝으로 지지가 되지 못하는 도로나 구조물의 침하를 생각하면 이러한 시공사례들은 앞으로 심각한 문제로 대두될 수밖에 없다. 이러한 문제점에 대한 대체적인 방법으로 Sand Cushion층을 기존의 raft와 pile 사이에 두어 암반까지 pile을 내려 지지할 수 없는 도로나 그 밖의 구조물에 적용가능성을 검토하고자 하는 것이 본 논문의 연구 목적이다.

1.2. 이론적 배경 및 연구 동향

말뚝지지 전면기초(Piled Raft Foundation)는 구조물의 침하를 획기적으로 줄일 수 있는 아주 효과적인 방법 중의 하나이다. 말뚝지지 전면기초(Piled Raft Foundation)의 침하량은 지반조건, 하중조건, 시공방법, pile의 조건(형상, 크기, 재질), pile의 근입 길이, pile의 배열상태, pile 중심 간의 간격, raft의 두께, raft의 폭, raft의 강성 등 여러 가지 인자의 영향을 받는다. 그러나 이들 인자의 상호 복합적인 작용 때문에 정확한 침하량 예측이 어렵다고 할 수 있다. 이러한 상호 복합적인 관계들을 해석하고 예측하기 위해 오래전부터 실험적인 테스트나 수치해석과 같은 여러 가지 방법으로 여러 학자들의 의해 연구되어왔다.

Seed and Reese(1957)는 지반을 탄성체로 가정하고 응력-변위 특성이 지반과 pile의 부착력에 기인한다는 가정 하에 지반반력을 Winkler 기초와 유사한 연속적으로 연계되지 않은 soil spring으로 근사화한 해석방법을 제안하였다.

Vesic(1969)은 4개 또는 9개의 말뚝과 raft를 콘크리트 블록에 연결시키고 말뚝 중심간 거리를 직경의 2 ~ 6배로 변화시켜가며 실험을 하고 raft가 말뚝에 미치는 상호작용에 관한 효과에 대해 연구한 바 있다.

Burland 등(1977) 및 Burland(1995)는 Piled Raft 기초는 pile, raft 그리고 하부지반의 세 가지 지지요소로 구성된 구조물로서 거동한다고 정의하고, 상부구조물의 하중은 raft와 pile을 통하여 지반으로 분배된다고 발표하였다. 또한, Piled Raft 기초를 사용함으로써 전체 침하량과 부등 침하량을 감소시켜 얇은 기초의 실용성을 증대시키며, 이때 pile은 침하량을 감소시키는 역할을 한다고 하였다.

Horikoshi와 Randolph(1977)는 단순 모델을 대상으로 Piled Raft기초의 설계변수들에 대한 매개변수 연구를 수행하고 말뚝의 최적위치는 Raft의 중앙에서 Raft 전체 면적의 16 ~ 25%범위임을 제시한 바 있으며, 이를 원심모형실험(Centrifuge Test)을 통해 검증하였다.

그 외에도 Davis and Poulos (1972), Sommer et al. (1985), Clancy and Randolph (1993), Poulos (1994), Ta and Small (1996), Poulos et al. (1997), Parakosa and Kulhawy (2001)와 같은 여러 학자들에 의해 끊임없이 연구와 실험이 이어져 왔다.

다음으로 국내의 연구동향을 살펴보면 현대건설기술연구소와 서울대학교(1999)는 1997년 ~1999년 3년간에 걸쳐 Piled Raft 해석 프로그램을 개발하였다. 해석 방법으로는 Raft에 대해서는 Mindlin의 판이론, 말뚝에 대해서는 Randolph와 Wroth(1979)의 근사적 탄성해법을 적용하고, 지반을 Winkler 스

프링으로 모델링 하였으며, Pile과 지반 그리고 Raft사이의 상호작용을 상호작용계수를 도입하여 해석하였다.

김경남 등(1999)은 위에서 소개한 Piled Raft 해석 프로그램에 최적화 기법을 적용하여 침하를 발생시키는 다양한 조건에서, 수치 해석을 통하여 부등침하를 최소화시키는 최적말뚝배치를 찾을 수 있는 기법을 제안하였다.

김홍택 등(1999)은 Clancy와 Randolph(1994)가 연구 개발한 프로그램인 HyPR(Hybrid Piled Raft Analysis)에 이용된 Piled Raft 기초 해석 기법에 유전자 알고리즘을 적용하여 Piled Raft 기초의 최적설계 기법을 개발 하였다.

이수형 등(2002)은 모형시험을 통해 사질토 지반에서 Pile과 Raft 그리고 지반 사이의 상호작용을 해석하기 위한 연구를 수행하여 사질토 지반에서 Piled Raft의 거동을 해석적으로 예측하는 방법을 제안하였다.

최진오 등(2002)은 중앙고속도로 신단양대교 현장에서 국내 최초로 Piled Raft 기초의 현장 계측 및 분석을 통해 암사면 위에 있는 Piled Raft의 지지거동에 대하여 연구하였다.

권오균 등(2002)은 모형실험을 이용한 사질토 지반에서의 Piled Raft 거동 특성에 대한 연구를 수행하여 Raft의 영향, 하중-침하의 특성, Raft의 하중분담 비율, 항복하중, 균 효율 등을 분석하였다.

말뚝지지 전면기초에서 말뚝과 Raft의 연결은 Raft에 가해지는 상부구조물의 하중이 파일을 통해 모래로 전달시키기 위해 꼭 필요한 부분이다. 하지만 이러한 기존의 말뚝지지 전면기초가 아닌 Pile과 Raft 사이의 Sand Cushion Layer를 접목하는 새로운 말뚝지지 전면기초 또한 여러 학자들에 의해 꾸준히 연구되어져 오고 있는 것도 사실이다(Shahu et al. 2001; Liang et al. 2003; Cao et al. 2004; Abdrabbo et al. 2004).

기존의 Piled Raft 기초에 모래층(Sand Cushion Layer)이 들어간 이러한 새로운 기초형식은 지반의 강도를 증가시키기 위한 보강재 역할을 하며, 따라

서 말뚝과 Raft 사이의 모래층(Sand Cushion Layer)의 탄성계수(E)값의 증대는 지반의 보강재 역할을 더욱 강화하게 된다.

이러한 새로운 연구 목표의 전환은 기존의 기초형식이 암반층까지 말뚝을 내려 상부구조물을 지지하려는 비경제적인 시공사례들과 더 이상 말뚝을 암반까지 내려서 상부구조물을 지지할 수 없는 도로나 구조물에 대한 적용성검토를 위해 매우 필요한 연구과제이다

2. 본론

2.1. 말뚝지지 전면기초(Piled Raft Foundation)

말뚝지지 전면기초(Piled Raft Foundation)는 주로 단단한 점토층과 같은 지반조건에서 전면기초(Raft Foundation)만으로도 충분한 지지력을 확보할 수도 있지만 침하가 발생하여 구조물의 사용성에 문제가 발생할 경우에 사용되는 기초형식이다.

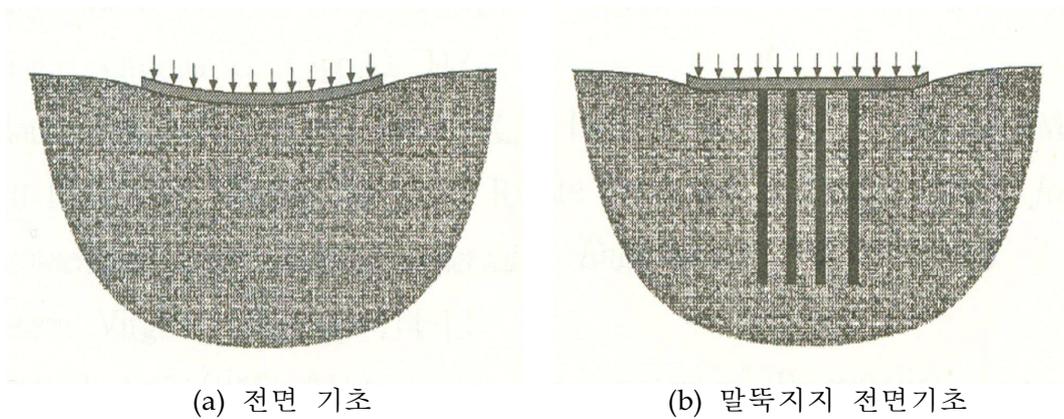


Fig. 2.1 말뚝지지 전면기초의 개념

말뚝지지 전면기초(Piled Raft Foundation)에서 Raft는 상부 구조물의 하중을 분산시키고 충분한 지지력을 확보하는 역할을 하며, 말뚝은 Raft의 과도한 침하를 억제시켜 상부 구조물을 지지하는 상호 보완적인 역할을 한다.

말뚝지지 전면기초는 Fig. 2.2와 같이 말뚝, Raft 및 기초지반 등 3개의 지지요소로 구성된 복합구조체이며, 말뚝지지 전면기초의 상부 구조물에 작용하는 하중은 아래식과 같이 Raft와 말뚝이 동시에 지반에 전달하는 기초형태로 되어있다(Katzenbach & Reul,1997).

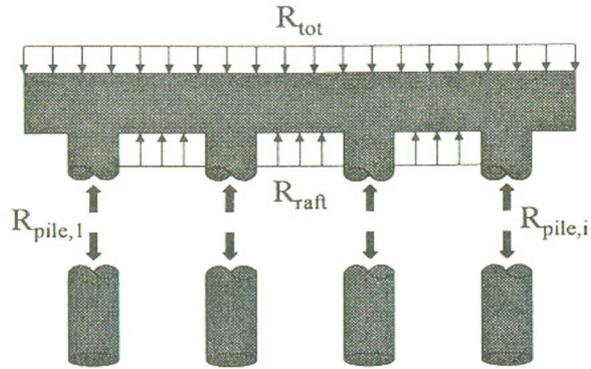


Fig. 2.2 복합구조체로서의 말뚝지지 전면기초(Katzenbach & Reul,1997)

$$R_{tot} = R_{raft} + \Sigma R \quad (2-1)$$

여기서

R_{tot} : 상부 구조물에 작용하는 전체하중

R_{raft} : raft가 부담하는 지지력

ΣR : 말뚝이 부담하는 지지력의 총합

말뚝지지 전면기초에서의 지지거동은 식 (2-1)과 같이 상부구조물의 전체 하중에 대한 말뚝이 부담하는 지지력의 총합의 비로 정의되는 말뚝지지 전면기초계수(α_{pr})를 이용하여 설명할 수 있다.

$$\alpha_{pr} = \frac{\Sigma R_{pile}}{R_{tot}} \quad (2-2)$$

말뚝지지 전면기초계수 α_{pr} 가 0 일 경우에는 상부구조물의 하중을 raft가 전부 부담하는 얕은 기초의 지지거동을 나타내며, 말뚝지지 전면기초계수 α_{pr} 가 1일 경우에는 상부구조물의 하중을 Raft의 접지압이 작용하지 않은 상태에

서 말뚝이 전부 부담하는 깊은 기초의 지지거동을 나타낸다. 또한 기초시스템을 전면기초로 했을 경우의 침하량 $S_{shallow}$ 와 말뚝지지 전면기초로 했을 경우의 침하량 S_{pr} 의 비를 현장계측사례를 이용하여 말뚝지지 전면기초계수 α_{pr} 의 변화에 따라 도시하면 Fig. 2.3과 같다.

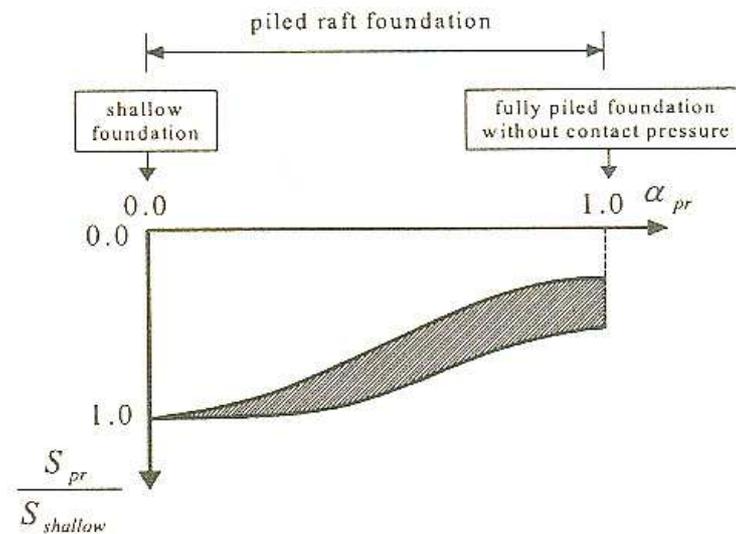


Fig. 2.3 말뚝지지 전면기초계수(α_{pr})와 침하량의 관계(Katzenbach et al ,1998)

말뚝지지 전면기초에서 pile은 상부 구조물의 하중을 기초지반 하부의 견고한 지층으로 전달시킴으로써 침하를 감소시키는 역할을 하며, 동일한 응력 수준에서 단일말뚝으로 지지력을 환산하면 raft의 구속압으로 인해 raft가 없는 단일말뚝의 경우와 비교해 볼 때 지지력이 증가하는 경향이 있다.

말뚝지지 전면기초의 장점을 몇 가지 열거하면 다음과 같다.

- (1) 말뚝지지 전면기초는 무리 말뚝기초와 비교할 때, 소요되는 말뚝의 길이 및 개수를 현저하게 줄일 수 있다.

- (2) 말뚝지지 전면기초는 전면기초와 비교할 때, 최대 침하량 및 부등 침하량을 줄임으로써 구조물의 사용성을 향상시킬 수 있다.
- (3) 말뚝지지 전면기초는 말뚝의 성치위치를 조절하여 raft에 발생하는 응력 및 휨모멘트를 최소화 할 수 있는 경제적인 기초시스템이다.
- (4) 말뚝지지 전면기초는 말뚝과 raft가 하중을 분담함으로써 기초의 지지력을 향상시킬 수 있다.
- (5) 굴착 전에 말뚝을 미리 시공함으로써 굴착과정 중에 발생하는 주변지반의 이완을 최소화하여 기초굴착으로 인한 히빙(heaving) 현상을 감소시킬 수 있다.
- (6) 말뚝지지 전면기초는 편심하중이 작용하는 경우에 있어서 편심하중을 받는 부분에 말뚝의 배치를 집중시킴으로써 전체적으로 편심의 영향을 줄여 저항력의 합력을 기초의 중심에 작용할 수 있도록 유도할 수 있다.

이러한 말뚝지지 전면기초(Piled Raft Foundation)는 무리 말뚝기초와 비교할 때, 소요되는 말뚝의 길이 및 개수를 현저하게 줄일 수 있는 경제적인 기초형식으로서 해외에서는 연구가 활발하게 진행되고 실질적으로 적용된 사례도 많으나 국내에서는 적용된 사례가 전무하여 이에 대한 연구도 성과도 상대적으로 적은 편이다. 따라서 앞으로 본 연구와 같은 다양한 기초 공학에 관한 연구가 활발하게 진행되어야 할 필요성이 있다.

2.2. 낙동강 하구 특성

본 논문의 연구대상인 낙동강하구는 한국에서 두 번째로 가장 큰 도시인 부산에 인접한 곳이며, 1990년대 이래로 아직까지도 공업적이고 산업적인 면모를 위해 개발되어지고 있는 곳이다. 연구대상의 지층은 낙동강하구의 삼각주에 위치하고 있으며, 이 삼각주는 낙동강의 상류로부터 운반되어온 막대한 양의 하상쇄설물이 퇴적된 곳으로 약 100m정도의 충적층으로 구성되어 있다.

2.2.1. 지반 조건

가. 지질학적 특성

- 낙동강 하구일대의 지질조건은 약 1억 3 천만 년 전부터 7천 5 백만 년 전까지의 약 5천 5 백만 년 동안(중생대)을 살펴보면 비교적 평탄한 육지 상태로 존재했다고 추측하고 있다.

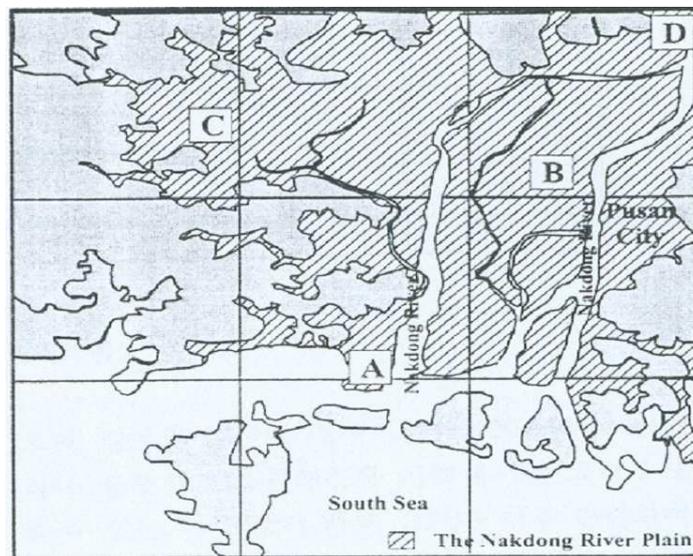


Fig. 24 연구대상지역

나. 지층구조

지층구조는 전체적으로 상부에 모래층이 있으며, 하부에 점토층이 존재하며 점토층 내부에 부분적으로 모래층이 존재하는 것을 알 수 있다. 그리고 점토층 하부에 전 지역에 걸쳐 모래, 자갈층이 분포하고 있으며, 추가 조사 결과 모래와 자갈층 다음에 다시 느슨한 중립질의 모래층이 반복되어 나타났다. 지층별로 특성을 요약하면 다음과 같다.

1) 모래층

본 층은 부리 전역에 걸쳐 18.0m ~ 21.0m의 층으로 대부분 황갈색을 띠는 느슨한 상태의 실트질 모래로 구성되어 있으며, 부분적으로 연약한 실트질 점토층이 협재하기도 한다. 대부분 N치 8이하로 느슨한 상태이며, 다짐상태 역시 불량하다.

2) 점토층

본 층은 부지 전역에 걸쳐 지표아래 18.0 ~ 21.0m에서 심도 41.5 ~ 44.0m의 층부로 발달, 분포하고 있다. 본 층은 대부분 연약내지 보통 견고한 정도의 실트질 점토로 이루어져 있으며 층중상부분에 약 3 ~ 4m 정도의 보통 조밀한 상태의 세립질 모래가 협재되어 있지만, 전 지역에 걸쳐 연속적으로 분포하고 있지는 않다.

3) 모래, 자갈층

본 층은 암회색의 세립내지 중립질 모래와 다량의 자갈로 구성되어 있다. 표준관입 저항치가 50회 이상의 매우 조밀한 상태로 구성되어 있으나, 자갈이 혼재되어 있는 지층의 표준관입시험은 일반적으로 그 신뢰도가 낮은 편이다.

다. 물리적 특성

실내 시험 결과의 물리적 특성인 자연함수비(w_n), 액성한계(LL) 및 소성한

계(PL)와 단위중량(γ_t), 초기 간극비(e_0) 및 비중(G_s)이 아래와 같이 나타난다. 자연함수비는 대략 35%~58%사이에 존재하며, 대부분 액성한계보다 높은 값을 보이고 있어 대상지반이 대단히 연약한 상태임을 알 수 있다. 소성지수는 대략 8.81% ~ 26.30%사이에 존재하고 있어 저소성 점토임을 알 수 있다. 평균적으로 단위중량(γ_t)은 $1.7t/m^2$ 이고, 초기 간극비(e_0)는 1.3 및 비중(G_s)은 2.67로 나타났다.

라. 물리적 특성

대상지역이 비압밀 지반인 것처럼 보여 지고 있으나 정등(1999)의 연구결과에 따르면 점토지반내에 과잉간극수압이 존재하지 않아 본 연구대상 지역의 점토지반은 정규압밀점토로 판단할 수 있다.

이러한 낙동강 하구의 토질학적 특성들을 지반조사를 통해서 Fig. 2.5와 Table. 2.1로 나타내었다.

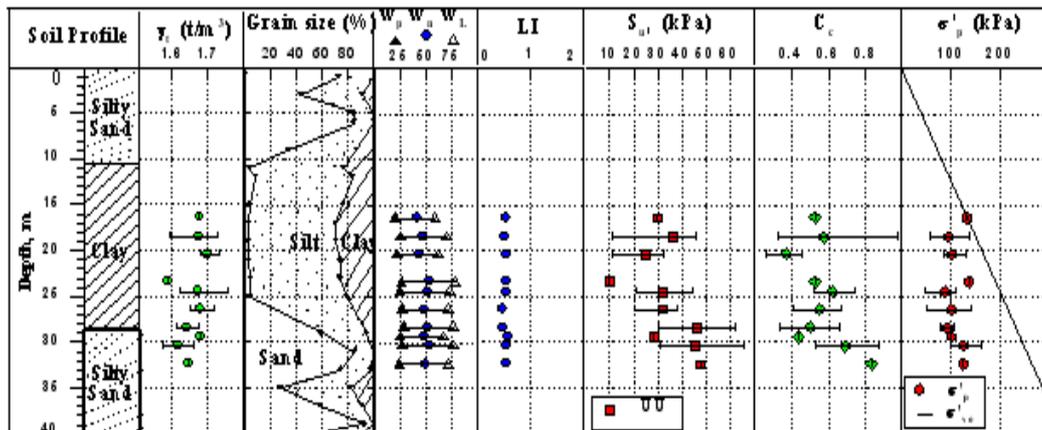


Fig. 2.5 연구대상지역 지반분석

Table 21 연구대상지역의 토질 정수

	상층모래	상층모래2	점토	하층모래	Raft	Pile
E (kN/m^2)	$1.2e+4$	$1.2e+5$	$5.0e+3$	$1.7e+4$	$2.5e+7$	$2.0e+8$
ν	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.25
γ_d (kN/m^2)	17.0	17.0	11.1	17.0	23.0	
γ_{sat} (kN/m^2)	20.68	20.68	16.92	20.68	23.0	
k_x (m/day)	$8.64e-3$	$8.64e-3$	$8.64e-5$	$8.64e-3$		
k_y (m/day)	$8.64e-4$	$8.64e-4$	$8.64e-6$	$8.64e-4$		
c_u (kN/m^2)	2.0	2.0	30.0	2.0		
Φ_u ($^\circ$)	34.7	34.7	0	34.7		

2.3. 플라시스(Plaxis)

Plaxis는 네덜란드 Plaxis에서 개발한 2차원 지반공학 전용 유한요소 해석 프로그램이다. Plaxis는 연약지반의 압밀거동 뿐만 아니라 과압밀 점토 그리고 사질토 및 암반지반에도 적용이 가능한 다양한 재료 모형을 갖고 있다. 연약 지반에 강하다는 점은 매우 작은 강도의 지반에 굴착 또는 성토하는 경우에 지반의 붕괴를 포함한 변형해석이 가능할 뿐만 아니라 압밀침하 및 점성침하 등의 복잡한 지반변형을 계산할 수 있음을 의미한다.

복잡한 비선형 거동을 구하기 위하여 Plaxis에서는 다양한 구성모형과 탄소성 상태에서 평형상태에 도달하기 위한 즉, 수렴을 돕는 강력한 알고리즘을 보유하고 있으며 요소망 자동생성 등 매우 쉬워 보이는 사용자 인터페이스와 복잡한 연약지반 거동분석 문제를 간단하게 해결하는 해석기능, 그리고 강도 감소법등 실무에 꼭 필요한 기능을 포함하고 있는 것이 이번에 사용하게 된 Plaxis의 대표적인 특징이라 하겠다.

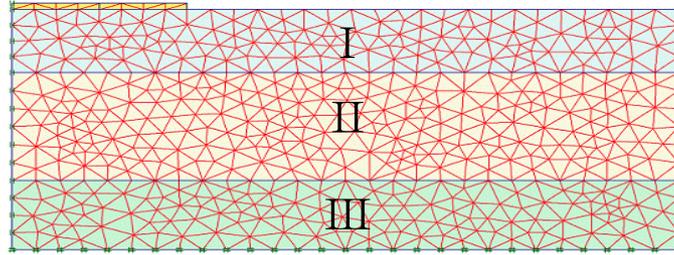


Fig. 2.6 플락시스로 모델링한 연구대상 지층구조

위 Fig. 2.6이 바로 Plaxis로 연구대상지역을 2차원으로 표현한 모습이다. 이 Fig. 2.6을 살펴보면 상층의 I 부분이 실트질의 모래층, 그리고 II부분이 점토층, 그리고 아래 부분의 III 부분이 실트질의 모래층을 표현한 것이다.

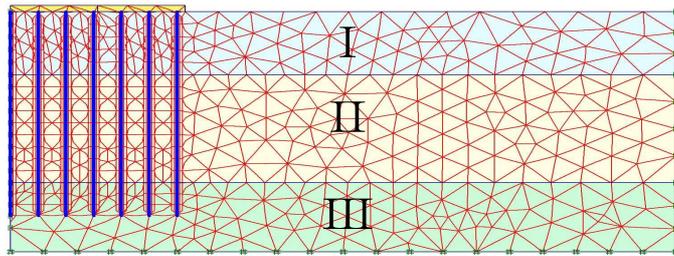


Fig. 2.7 Sand Cushion Layer를 고려하지 않은 Piled Raft 기초

Fig. 2.7은 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초의 나타낸 것으로 앞으로 할 연구수행 중 비교자료로 사용된다.

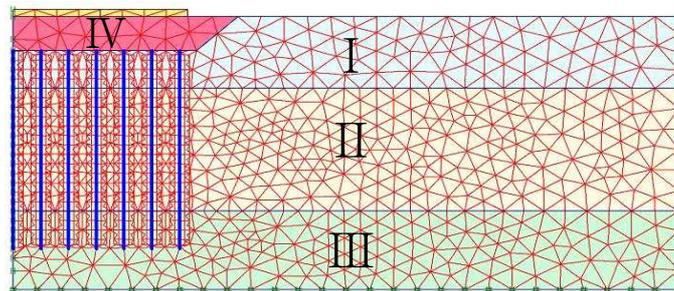


Fig. 2.8 Sand Cushion Layer를 고려한 Piled Raft 기초

Fig. 2.8은 Piled Raft 기초에서 raft와 pile 사이에 Sand Cushion Layer를 접목시킨 지층구조를 나타내는 것으로서 Sand Cushion층의 영역은 IV부분이다. 이러한 Sand Cushion층을 1m ~ 10m까지 변화시키면서 raft의 평균 침하량과 부등 침하량을 해석한다.

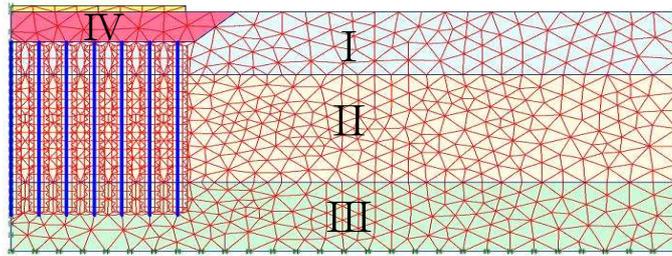


Fig. 2.9 Sand Cushion Layer를 고려한 Piled Raft 기초 (탄성계수 E 강화)

Fig. 2.9는 앞의 그림 과 같은 Sand Cushion Layer를 접목시킨 Piled Raft 기초이며 raft와 pile사이의 IV부분인 Sand Cushion층의 탄성계수(E)값을 10 배로 증대하고 역시 Sand Cushion의 깊이(D)를 1m ~ 10m까지 변화시키면서 해석한 후 raft의 침하율 변화를 살펴보게 된다.

2.4. 용어 정리

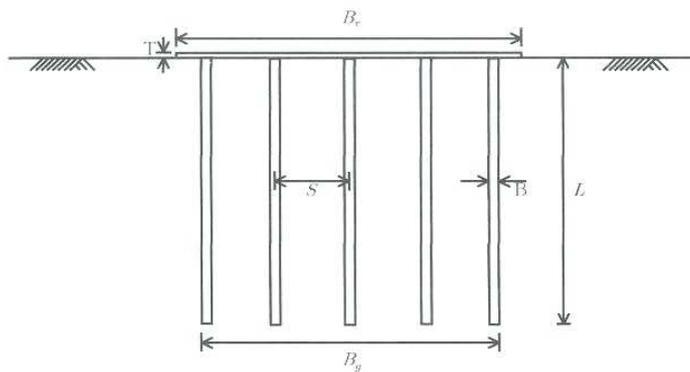


Fig. 2.10 Piled Raft 기초의 각 명칭

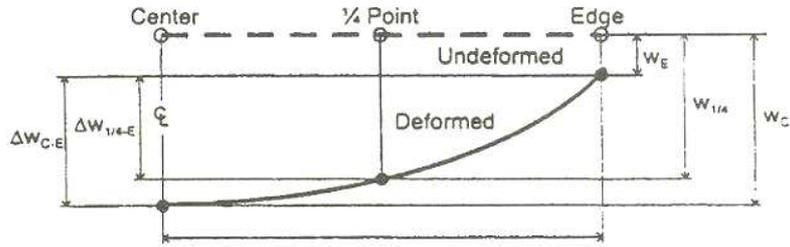


Fig. 2.11 Raft의 각 지점 명칭

이 논문에서 기본적으로 사용하는 매개변수들을 다음과 같이 정의한다. Fig. 2.10에서 보는 바와 같이 B_y 이란 말뚝지지 전면기초의 Pile Group의 폭 길이를 나타내는 것으로 위의 표시된 그림과 같이 Pile Group의 한쪽 끝에서 반대편 다른 끝까지의 거리를 의미한다. B_r 이란 말뚝지지 전면기초의 상판, 즉 raft의 폭을 말하고, N 은 raft를 지지하고 있는 말뚝의 개수, L 은 말뚝의 길이, D 는 Sand Cushion의 두께로 각각 정의한다.

그리고 침하량을 표현하는 변수인 W_{ref} 은 평균 침하량을 표현해주고 Fig. 2.11과 같이 ΔW_{C-E} 은 부등 침하량을 표현한다. R 은 말뚝지지 전면기초의 평균 침하량과 단순히 raft만 있을 때의 평균 침하량과의 비를 나타내고 ΔR 은 말뚝지지 전면기초의 부등침하량과 raft만 있을 때의 부등침하량과의 비를 나타낸다.

즉 W_{ref} , ΔW_{C-E} , R , ΔR 은 식(2-2), (2-3), (2-4), (2-5)와 같이 각각 정의한다.

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

$$\Delta W_{C-E} = W_C - W_E \quad (2-3)$$

$$R = \frac{W_{ref-Piled Raft Foundation}}{W_{ref-Raft Only}} \quad (2-4)$$

$$\Delta R = \frac{W_{C-E(Piled Raft Foundation)}}{W_{C-E(Raft Only)}} \quad (2-5)$$

2.5 분석방법

본 논문에서는 기본적인 Piled Raft 시스템과 pile과 raft사이에 Sand Cushion층이 존재하는 경우와 pile과 raft사이에 존재하는 Sand Cushion의 탄성계수(E)값을 10배로 증대시킨 경우, 이렇게 3가지 경우의 각기 다른 말뚝지지 전면기초(Piled Raft Foundation)를 플라시스(Plaxis ver.8.0)라는 2차원 지반해석 프로그램을 이용해 수치해석을 함으로서 pile과 raft사이의 모래층(Sand Cushion Layer)의 유무에 따른 각각의 지지력과 침하량들을 비교하였다. 그리고 0m ~ 10m까지 변화를 두는 Sand Cushion깊이, 파일의 개수(M), 그리고 raft의 폭(B_r)과 말뚝무리의 폭(B_g)의 비인 파일분포도(B_g/B_r)에 따른 각각의 침하량들도 살펴보았다. 이러한 말뚝지지 전면기초의 침하량들로 평균 침하율(R) 및 부등 침하율(dR)을 계산하기 위한 몇 가지 연구 수행과정과 비교분석하기 위한 분석과정은 다음과 같다.

첫째, Sand Cushion을 고려하지 않은 Piled Raft 기초에서 길이 42M의 Raft 하부에 파일의 개수를 5~13개까지 달리하며 각각의 평균 침하율(R)과 부등 침하율(dR)을 살펴보았다. 이때 raft의 하부에 놓는 파일의 분포도(B_g/B_r)를 0.976, 0.786, 0.595의 세 가지 경우로 비교해석하였다.

둘째, 첫 번째와 마찬가지로 파일분포도(B_g/B_r)를 0.976, 0.786, 0.595 세 가지 경우로 놓았다. 길이 42M의 raft 하부에 Sand Cushion Layer를 0m ~ 10m 까지 달리하고, 이번에도 역시 파일의 개수(N)를 5~13개 까지 달리하면서 각각의 평균 침하율(R)과 부등 침하율(dR)을 살펴 보았다.

셋째, 첫 번째와 두 번째처럼 파일분포도(B_g/B_r)를 0.976, 0.786, 0.595 세 가지 경우로 놓았다. 길이 42M의 raft 하부에 Sand Cushion층을 1 ~ 10m 까지 달리하고, 이때의 Sand Cushion층은 상부 층의 모래보다 탄성계수(E)값을 10배로 증가시키고 파일의 개수(N)를 5~13개까지 달리하면서 각각의 평균 침하율(R)과 부등 침하율(dR)을 살펴 보았다.

3. 분석과정

3.1. Raft 기초에 대한 지지력

3.1.1. 지지력(Bearing Capacity)과 Raft 폭(B_r)과의 관계

Raft의 최대지지력(Ultimate Bearing Capacity)을 고찰하기 위해 Fig. 2.6과 같이 수치 모델링에 적용된 연구대상 지반위에 단지 raft만 모래층 상부에 올려놓고 지반이 파괴될 때까지의 지지력을 구해보았다. 이때 모델링에 사용한 raft는 탄성계수(E)가 $2.5e+07(kN/m^2)$, 포와송비(ν)가 0.2, γ_d 와 γ_{sat} 는 모두 $23(kN/m^2)$ 를 갖는 두께 1m의 raft가 사용되었다.

모래층 상부에 얹어져 있는 raft가 그 폭(B_r)이 달라짐에 따라 raft가 견딜 수 있는 지지력(Bearing Capacity)이 달라지는 양상을 알아보기 위해 raft의 폭을 2m, 3m, 4m, 5m, 10.5m, 21m, 30m, 42m의 총 8개로 달리하고, 지반이 파괴될 때까지 각각의 최대지지력을 2차원 지반해석 프로그램인 Plaxis로 해석한 뒤, Fig. 3.1과 Table 3.1로 도시하였다.

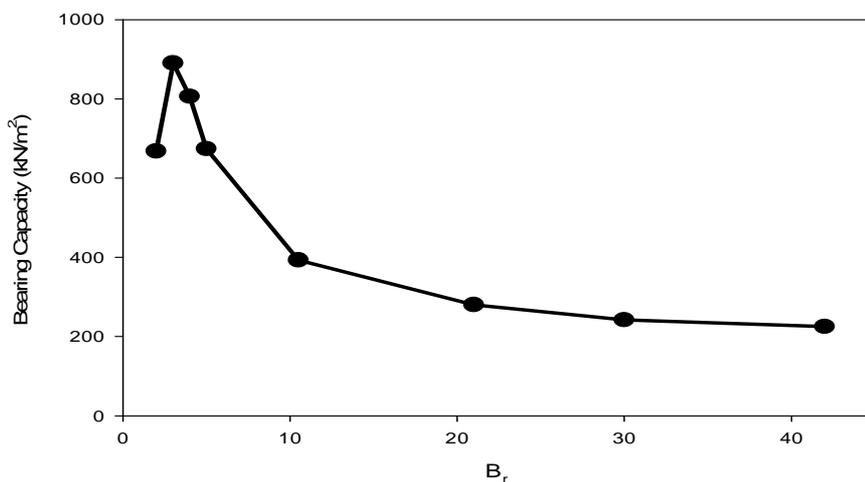


Fig. 3.1 Pile의 최대지지력과 Raft 폭(B_r)과의 관계

Table. 3.1 Raft 폭(B_r)에 따른 최대지지력

Raft의 폭 (B_r ,m)	2m	3m	4m	5m	10.5m	21m	30m	42m
Bearing Capacity (kN/m^2)	668	890	806	674	393	280	242	225

해석에 사용하고자 하는 raft의 폭(B_r) 변화에 따른 raft의 최대지지력 값의 변화를 살펴보면, raft의 폭이 3m일 때 가장 큰 값인 890 (kN/m^2)이 나타났으며 raft의 폭이 3m를 넘어서자 그 값이 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 raft의 폭이 42m일 때의 최대지지력 값인 225(kN/m^2)를 Piled Raft 기초에서 Sand Cushion층을 고려할 때의 평균 침하율(R)과 부등 침하율(dR)을 변화를 살펴보기 위한 Plaxis의 수치해석시 기본적인 하중조건으로 사용한다.

3.2 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초

본 논문의 핵심과제인 raft와 pile의 사이에 존재하는 Sand Cushion층을 접목한 Piled Raft 기초의 해석에 있어서, Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초를 연구대상 지반의 특성을 고려한 수치해석 모델링에 적용했을 때의 기본적인 침하 특성과 지지력 특성을 먼저 알아볼 필요가 있다. Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초의 평균 침하량과 부등 침하량이 파일의 개수에 따른 영향 및 지지력이 raft의 폭에 대해 어떠한 상관관계를 보이는가는 진행될 연구의 가장 기초적인 비교자료로 사용된다.

3.2.1 파일 개수(N)에 따른 평균 침하율(R)의 변화

Piled Raft 기초의 평균 침하량(R)이 파일의 개수(N)에 따라 어떠한 특성적 거동을 지니고 있는지 살펴보기 위해서 파일분포도(B_g/B_r)의 값을 달리하였다. 즉 raft의 폭(B_r)에 대한 pile 무리의 폭(B_g)의 비인 파일분포도(B_g/B_r)를

0.976, 0.786, 0.595 세 가지로 나누어서 해석하였을 때, 각각의 파일의 개수(N)에 대한 평균 침하율(R)의 거동적 특성은 아래 그림 Fig 3.2와 같다. 이때 파일의 개수(N)는 5, 7, 9, 11, 13으로 증가시켰다. 파일분포도(B_g/B_r)를 이와 같이 나누어 고려한 이유는 raft에 대한 pile의 분포도가 차이가 있을 때 Piled Raft 기초의 침하율의 변화를 살펴보기 위한 것이다.

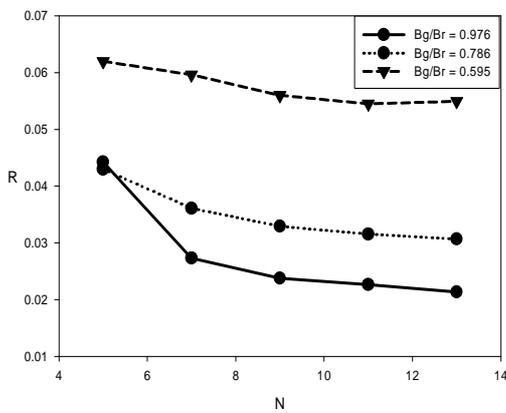


Fig. 3.2 평균 침하율(R)과 Pile개수(N)

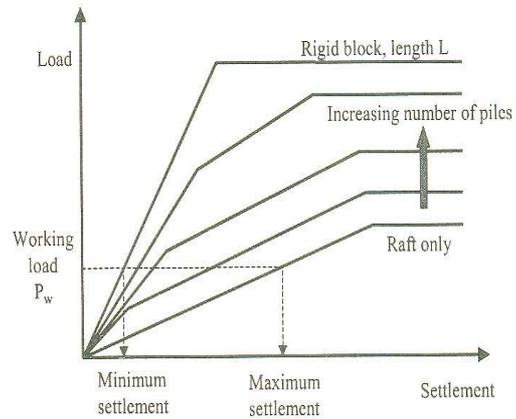


Fig. 3.3 Poulos & Davis (1980)

위의 Fig. 3.2는 파일분포도(B_g/B_r)에 상관없이 pile 개수(N)가 증가할수록 평균 침하율(R)이 작아지고 있는 것을 보여준다. Pile개수(N)가 증가할수록 Piled Raft 기초의 평균 침하율(R)이 낮아지는 것을 확인할 수 있었고, 파일분포도(B_g/B_r)가 커질수록 평균 침하율(R)이 크게 줄어든다는 것을 그래프에서 확인할 수 있다.

이러한 현상은 pile개수(N)의 증가에 따라 말뚝지지 전면기초의 하중-침하 특성이 양호해 진다는 Poulos & Davis (1980)의 말뚝지지 전면기초의 기본 개념 그래프인 Fig. 3.3을 보면 쉽게 알 수 있다. 단지 raft만 지반에 놓여져 있는 경우보다는 pile개수(N)를 증가시키자 pile이 견딜 수 있는 Load값이 커지게 되고 같은 Load값이라 하더라도 pile개수(N)에 따라 그 침하량이 달라진다는 것이다. 즉 raft의 상부에 작용하는 하중에 대한 구조물의 정적침하를 줄여

주는 요인으로 파일개수(N)와 파일분포도(B_g/B_r)를 적절히 활용하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 파일 개수(N)에 따른 부등 침하율(dR)의 변화

역시 Piled Raft 기초의 부등 침하율(dR)이 파일개수(N)에 따라 어떠한 특성적 거동을 지니고 있는지 살펴보기 위해서 파일분포도(B_g/B_r)의 값이 0.976, 0.786, 0.595와 같은 세 가지 경우로 각각 나누고 파일개수(N)와 부등 침하율(dR)의 거동적 특성에 대한 Plaxis의 해석결과를 아래의 Fig. 3.4로 도시했다.

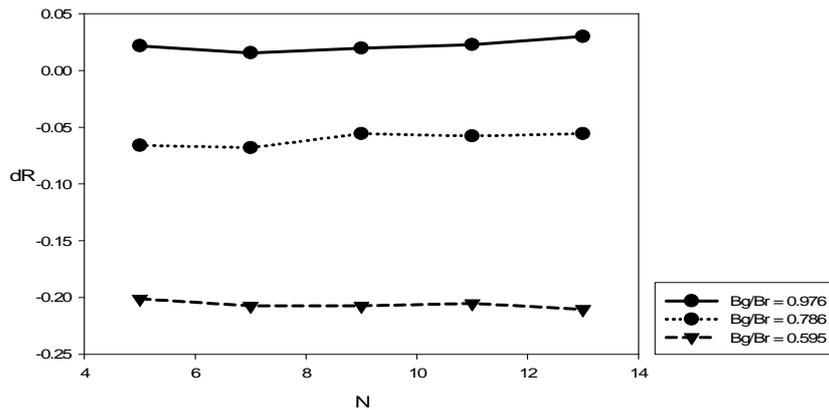


Fig. 3.4 부등침하량(dR)과 파일개수(N)

Fig. 3.4는 앞서서도 언급한바와 같이 파일개수(N)와 부등 침하율(dR)의 관계를 표현한 것이다. 우선 위 Fig. 3.4에서 파일분포도(B_g/B_r)가 0.595와 0.786일 때를 보자. 두 선 모두 (-)값을 가지고 있다. (-)값을 가졌다는 것은 2.4절의 용어정리에서 정의 했듯이 식(2-3)의 값이 (-)값을 가졌다는 것을 의미한다. 따라서 부등침하를 표현하는 식(2-5)도 (-)을 가지게 된다. 이렇게 부등 침하율(dR)이 (-)값을 가졌다는 것은 raft의 형상이 위로 볼록해진다는 것을 의미하게 된다. 그리고 부등 침하율(dR)의 절대 값이 크면 클

수록 전면기초(Raft Foundation)의 특징인 raft 중심의 집중적인 침하현상을 pile이 raft의 중심부의 집중 배치로 인해 그 만큼 불필요하게 보장되어 졌다는 것을 의미한다. 반대로 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때를 살펴보자. 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때에는 (+) 값이 나타났는데, 이것은 아래로 볼록해지는 것을 나타낸다. 이것은 raft의 중심보다 외측에 pile의 보강이 더 효과적으로 이루어진 경우이다.

즉 부등 침하율(dR)이 0 에 가깝다는 것은 raft 침하량의 크기와 raft 끝부분의 침하량 차이가 거의 없음을 보여 준다. 따라서 Piled Raft 기초뿐만 아니라 다른 어떠한 기초형식도 모두 부등 침하량이 0 에 가까워지도록 하는 궁극적인 설계 목표를 갖는다.

3.2.3 파일개수(N)에 대한 평균 침하율(R)과 부등 침하율(dR)의 결과

Sand Cushion 층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초에서 raft에 대한 pile의 분포비, 즉 B_g/B_r 의 값과 pile개수(N)에 대한 평균 침하율(R)과 부등 침하율(dR)의 변화는 서로 비슷한 양상을 보였다. 파일분포도(B_g/B_r)가 클수록, 즉 raft 하부에 전체적으로 pile이 분포되어져 있을 때에는 평균 침하율(R) 및 부등 침하율(dR)이 매우 작게 나오는 좋은 결과 값을 보여주었다.

평균 침하율(R)을 표현한 Fig. 3.2에서는 파일개수(N)가 증가할수록 평균 침하량이 소폭 감소하는 경향을 보여주었으나, 부등 침하율(dR)을 표현한 Fig. 3.4에서는 파일개수(N)가 증가하여도 부등 침하율(dR)값의 변화가 크게 나타나지 않았다.

파일개수(N)의 증가는 평균 침하율(R)에는 적지 않은 영향력을 미치나 부등 침하율(dR)에는 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 보인다. 이는 Fig. 3.5와 Fig. 3.6을 보면 더 쉽게 이해할 수 있다.

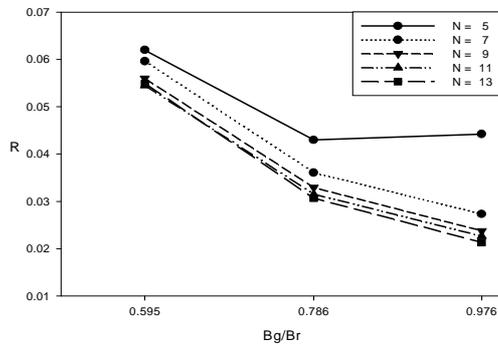


Fig. 3.5 평균 침하량(R)과 B_g/B_r

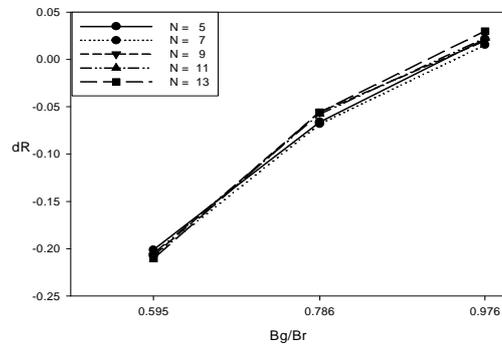


Fig. 3.6 부등 침하량(dR)과 B_g/B_r

Fig. 3.5를 보면 파일개수(N)와 파일분포도(B_g/B_r) 모두에 민감하게 반응하는 변화를 보이지만 Fig. 3.6에서는 파일개수(N)보다는 파일분포도(B_g/B_r)에 더 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 평균 침하율(R)과 파일분포도(B_g/B_r)의 관계 그리고 부등 침하율(dR)과 파일분포도(B_g/B_r)의 관계를 보면 국내 지반에 적용한 Piled Raft 기초에서 가장 민감하게 작용했던 요인은 파일분포도(B_g/B_r)라는 것을 확인할 수가 있다.

3.3. Sand Cushion을 고려한 Piled Raft 기초

3.3.1. 평균 침하율(R) 과 파일개수(N)와의 관계

2차원 유한요소해석 프로그램인 플라시스(Plaxis)를 이용한 수치해석을 통해 파일분포도(B_g/B_r)값이 각각 0.976, 0.786, 0.595일 때의 평균 침하율(R)과 파일개수(N)와의 관계 곡선을 0m ~ 10m까지 각각 나타내면 Fig 3.7 ~ 3.17과 같다. 이때 사용한 파일의 개수는 5, 7, 9, 11, 13개이다.

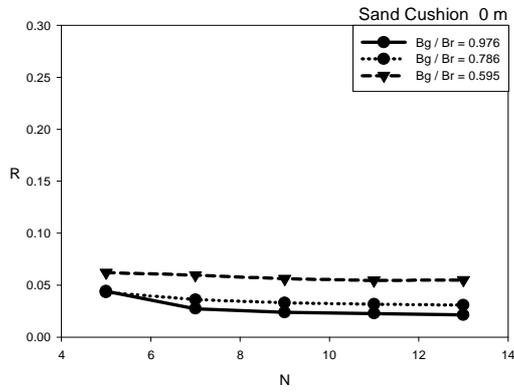


Fig. 3.7 R 과 N in $D = 0m$

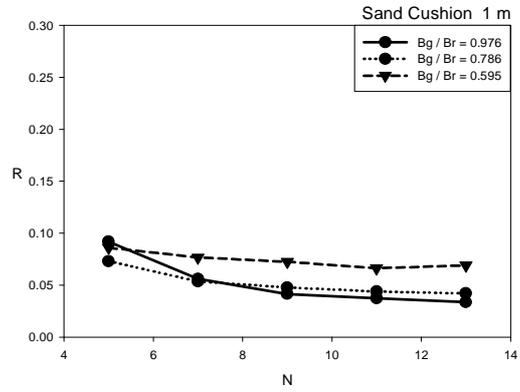


Fig. 3.8 R 과 N in $D = 1m$

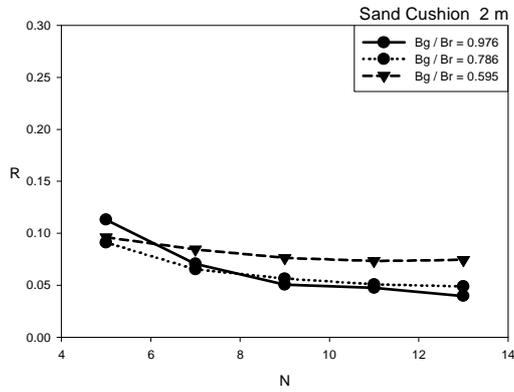


Fig. 3.9 R 과 N in $D = 2m$

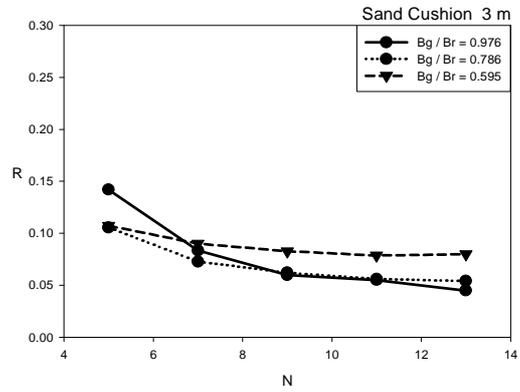


Fig. 3.10 R 과 N in $D = 3m$

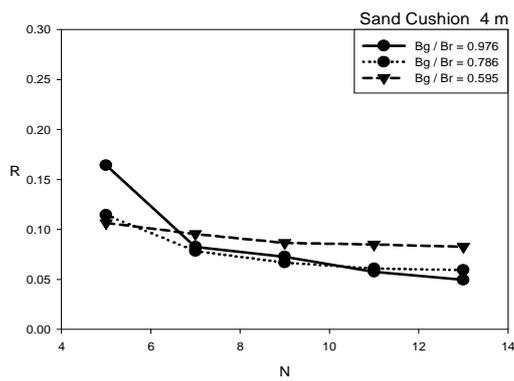


Fig. 3.11 R 과 N in $D = 4m$

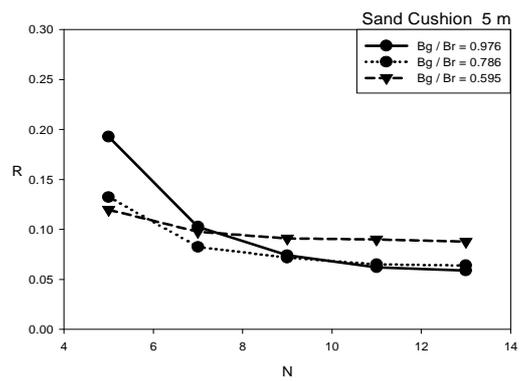


Fig. 3.12 R 과 N in $D = 5m$

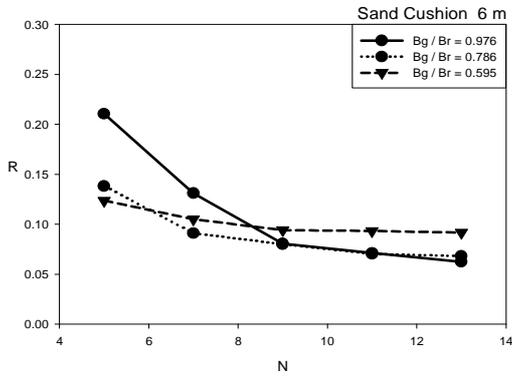


Fig. 3.13 R 과 N in $D = 6m$

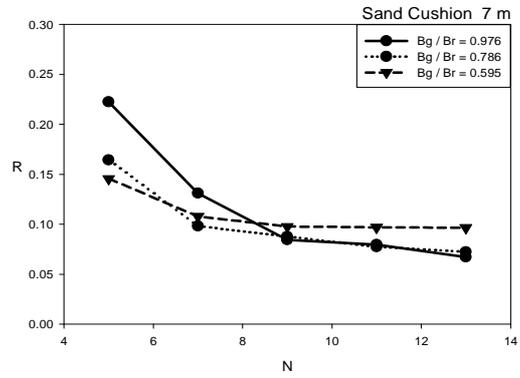


Fig. 3.14 R 과 N in $D = 7m$

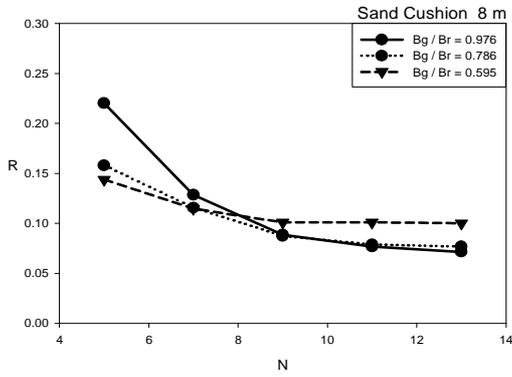


Fig. 3.15 R 과 N in $D = 8m$

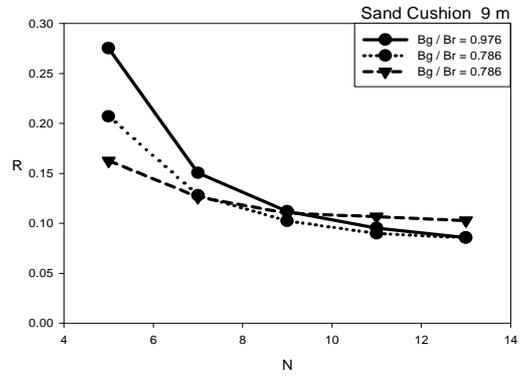


Fig. 3.16 R 과 N in $D = 9m$

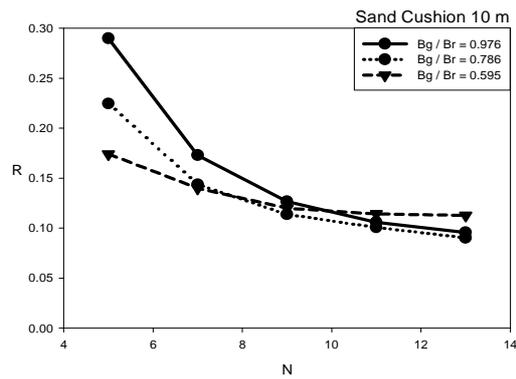


Fig. 3.17 R 과 N in $D = 10m$

Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초를 Sand Cushion의 깊이(D)를

달리하면서 Plaxis 프로그램으로 해석한 결과는 Fig 3.7 ~ 3.17과 같다.

Sand Cushion층이 0m일 때인 Fig 3.7의 평균 침하율(R) 곡선이 Sand Cushion층의 깊이(D)가 1m 간격으로 깊어짐에 따라 그 값이 대체적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때에는 Sand Cushion층의 깊이(D)가 깊어질수록 파일개수(N)가 적은 부분의 평균 침하율(R) 변화가 매우 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이와 반대로 파일분포도(B_g/B_r)가 0.595인 경우에는 Sand Cushion층의 깊이(D)가 깊어지더라도 평균 침하율(R)의 변화가 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 말뚝지지 전면기초에서 pile과 raft간의 상호보완적인 측면을 살펴보면 쉽게 이해 할 수 있다.

전면기초의 하중에 대한 침하분포를 보면 raft의 양 외측보다 중심축의 침하가 매우 크게 나타난다. 그래서 이러한 심각한 부등침하를 막기 위해 raft 아래에 pile을 보강함으로써 raft 상부의 하중과 raft의 침하를 조절하는 것이다. 그런데 파일분포도(B_g/B_r)가 1에 가깝다는 것은 raft의 전반에 걸쳐 pile이 분포되어 있다는 것을 의미한다. 따라서 침하가 작은 외측부분에도 pile이 분포하게 되어 raft하부가 필요이상으로 보강되어 raft의 전반적인 침하가 pile이 없을 때와 비슷한 양상으로 침하를 하게 된다. 그래서 파일분포도(B_g/B_r)가 0.595일 때보다 큰 폭의 침하율 변화를 보이는 것이다.

그리고 두 번째로 살펴볼 것이 바로 일정한 pile개수가 지나고 나면 파일분포도(B_g/B_r)의 값에 거의 영향을 받지 않게 되는 것이다.

앞의 Fig 3.7 ~ 3.17을 Sand Cushion층의 깊이별로 살펴보면 pile의 개수가 9일 때를 중심으로 좌우가 크게 다르게 변화는 모습을 볼 수 있다. 이런 현상은 권오균 등(2002)의 “Piled Raft 거동특성에 관한 실험적 연구”에서 보여줬던 Piled Raft 기초에서의 Raft의 하중분석과 균효율 분석에의 실험결과와 비슷하다고 볼 수 있다. pile개수(N)가 증가하고, raft의 크기가 증가할수록 항복하중이 증가해 침하량이 줄어드는 것으로 나타난다. 그리고 이러한 현상은 파일개수(N)의 증가에 따라 말뚝지지 전면기초의 하중-침하 특성이 양호해 진

다는 Fig. 3.3(Poulos & Davis의 말뚝지지 전면기초의 기본 개념 그래프)에서도 확인할 수 있다. Raft상부에 작용하는 하중에 대해 구조물의 침하기준을 만족하는 최적의 pile개수(N)를 결정하는 것이 불필요한 pile의 보강을 막을 수 있다는 것이다.

Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초에 비해 Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초의 전체 평균 침하율(R)은 Sand Cushion층의 깊이(D)가 커짐에 따라 점층적으로 증가하게 되지만 어느 일정한 파일개수를 넘으면 raft의 중심에서 일어나는 과도한 침하가 pile의 영향을 많이 받게 되어 평균 침하율(R)의 증가도 대체로 낮아진다. 하지만 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초의 평균 침하율(R)보다는 큰 침하가 일어나게 된다.

3.3.2. 부등 침하율(dR) 과 파일개수(N)와의 관계

부등 침하율(dR)과 파일개수(N)에 대한 그래프도 역시 앞에서 평균 침하율(R)과 파일개수(N)와의 관계에서 했듯이 raft에 대한 pile의 분포도(B_g/B_r)를 각각 0.976, 0.786, 0.595로 나눈 뒤 Sand Cushion층을 0m ~ 10m까지 그 깊이를 1m씩 증가시키면서 그래프로 도시했다.

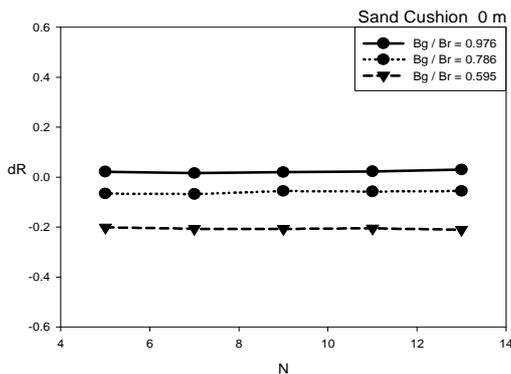


Fig. 3.18 dR 과 N in $D = 0m$

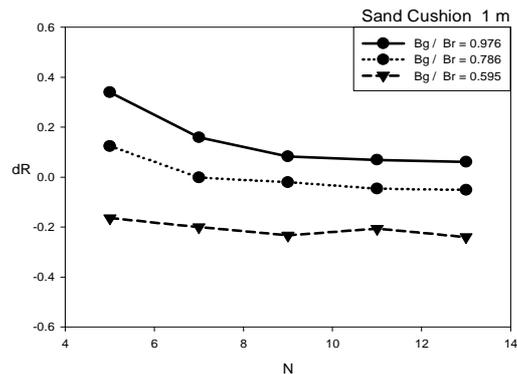


Fig. 3.19 dR 과 N in $D = 1m$

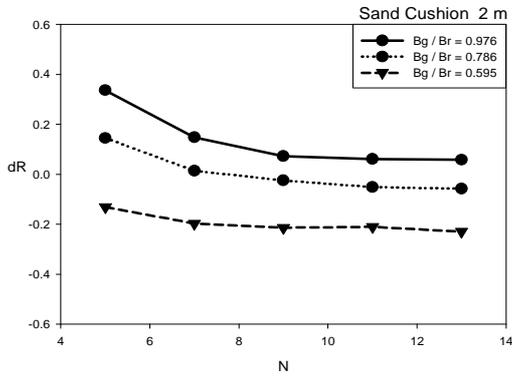


Fig. 3.20 dR 과 N in $D = 2m$

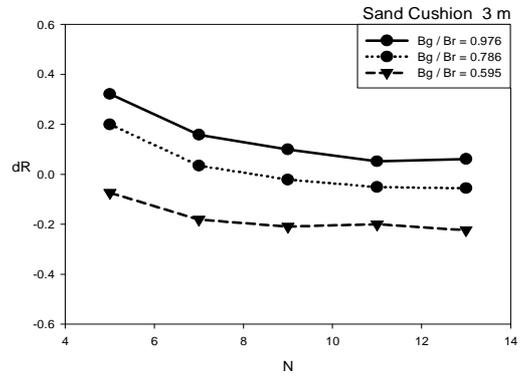


Fig. 3.21 dR 과 N in $D = 3m$

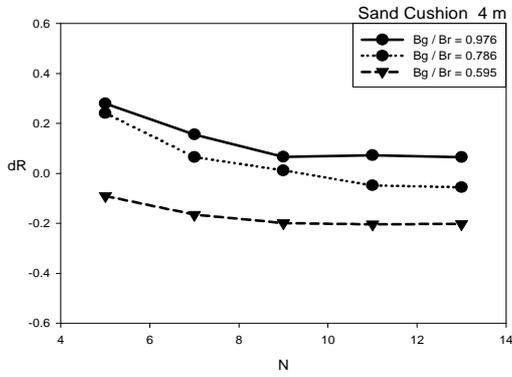


Fig. 3.22 dR 과 N in $D = 4m$

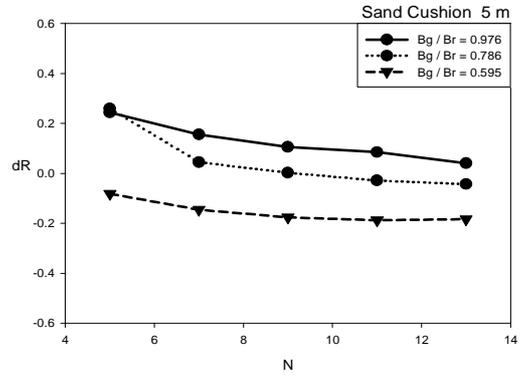


Fig. 3.23 dR 과 N in $D = 5m$

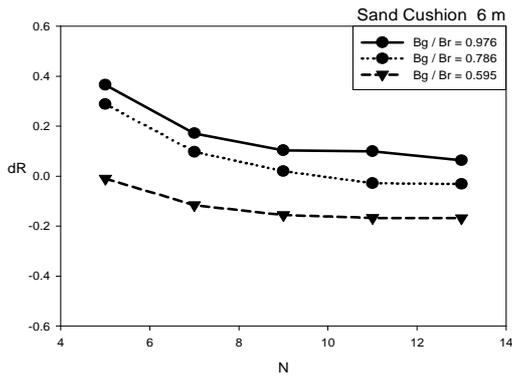


Fig. 3.24 dR 과 N in $D = 6m$

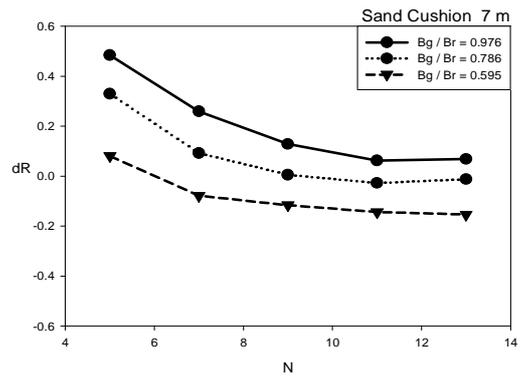


Fig. 3.25 dR 과 N in $D = 7m$

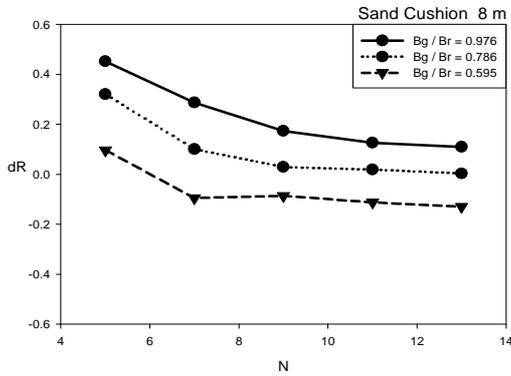


Fig. 3.26 dR 과 N in $D = 8m$

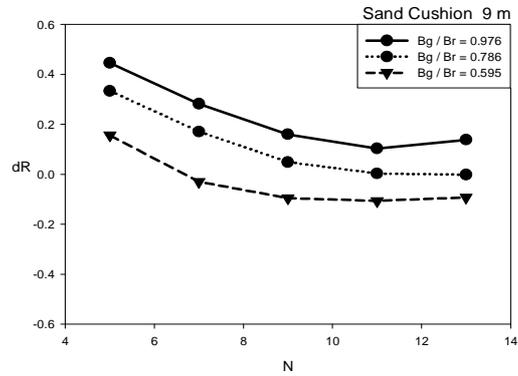


Fig. 3.27 dR 과 N in $D = 9m$

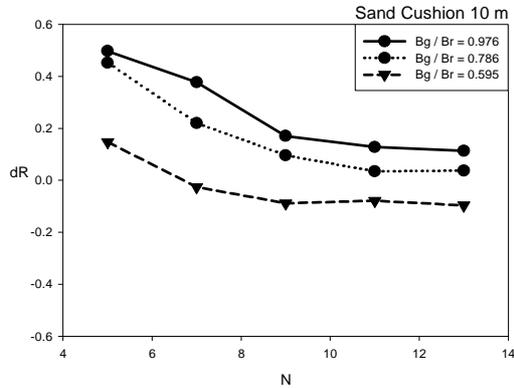


Fig. 3.28 dR 과 N in $D = 10m$

Fig 3.18은 우선 Sand Cushion의 깊이(D)가 0m일 때, 즉 No Sand Cushion층의 Piled Raft 기초의 부등 침하율(dR)이 pile개수(N)에 대해 어떠한 변화를 나타낸다. Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled raft기초에서는 파일 분포도(B_g/B_r)가 0.976, 0.786, 0.595일 때 모두 pile개수(N)에 상관없이 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 단지 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때는 +0에 가깝게 있지만 파일분포도(B_g/B_r)가 0.786이나 0.595일 때에는 0을 지나 (-) 값을 가지되어 침하분포형상이 아래로 볼록한 형상이 아닌 위로 볼록한 형상을 보였다.

하지만 Sand Cushion층이 고려된 Piled Raft 기초에서 Sand Cushion층이

깊어짐에 따라 변해가는 부등 침하율(dR)의 Plaxis해석결과 값을 살펴보자. Fig. 3.18 ~ Fig. 3.28을 보면 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초에서 파일분포도(B_g/B_r)가 0.786일 때 나타나던 위로 볼록하던 raft의 형상이 아래로 볼록한 형태를 가지게 되었다. 그러나 파일분포도(B_g/B_r)가 0.595일 때에도 0선에 가까워지기는 하지만 역시 (-)값을 가지게 되어 위로 볼록한 형상을 띄게 된다. 이러한 형상도 역시 앞에서 언급한 No Sand Cushion층일 때와 마찬가지로 raft의 중앙에 대한 pile의 과도한 집중 분포로 인해 나타나는 현상이다.

하지만 raft가 침하된 형상이 위로 볼록하거나 또는 아래로 볼록하거나 그러한 형상의 차이보다는 0선에 가까워지는 것이 부등침하에서는 매우 중요한 사항이다. 부등 침하율(dR)이 거의 0에 가깝게 나왔다는 것은 raft의 중심 측과 raft의 외측의 변화량이 거의 동일하다는 것이기 때문에 Sand Cushion층의 접목으로 나타날 수 있는 효과로서 부등 침하율(dR)의 조절이 가능하다는 결과를 찾아볼 수 있다.

이렇게 Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초에서 Sand Cushion층으로 인한 부등 침하율(dR)의 조절가능성도 파일분포도(B_g/B_r)가 0.595일 때의 경우와 같이 raft에 대한 pile의 분포도가 낮은 곳에서는 유리하게 작용할 수 있으나, 파일분포도(B_g/B_r)의 값이 1에 가까운 0.976과 같을 때에는 오히려 Sand Cushion층을 고려하지 않았을 때의 Piled Raft 기초에서의 부등 침하율(dR)보다 더 좋지 않은 결과를 보였다.

3.3.3. 평균 침하율(R) 과 Sand Cushion Depth(D) 와의 관계

Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft기초의 평균 침하율(R)에 대한 변화가 Sand Cushion층의 깊이(D)가 깊어짐에 따라 어떻게 변하는지 알아보기 위해 Pile개수(N)를 일정하게 고정시킨 상태를 고려하였다.

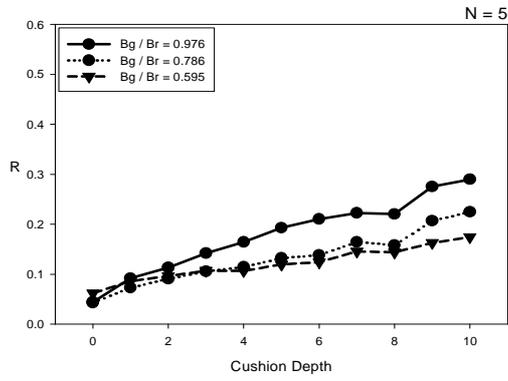


Fig. 3.29 R 과 D in $N = 5$

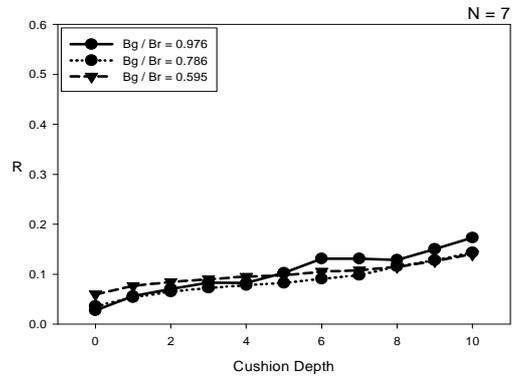


Fig. 3.30 R 과 D in $N = 7$

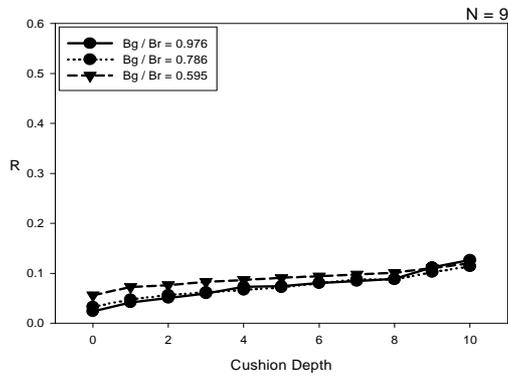


Fig. 3.31 R 과 D in $N = 9$

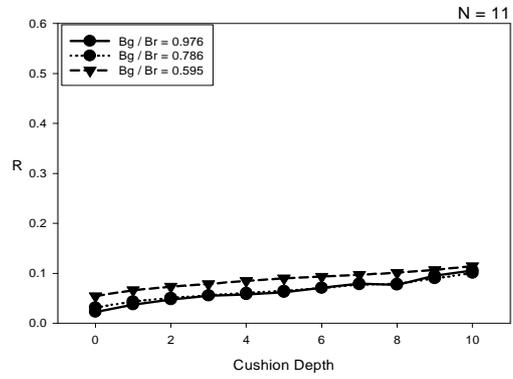


Fig. 3.32 R 과 D in $N = 11$

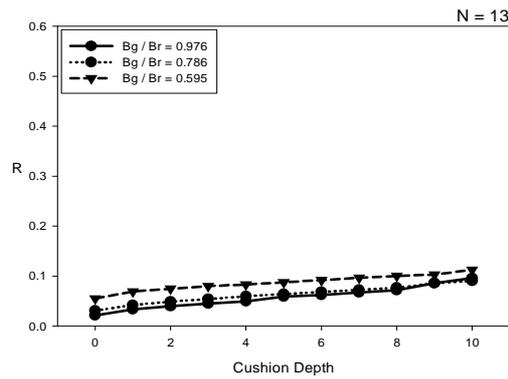


Fig. 3.33 R 과 D in $N = 13$

위의 그림들을 살펴보면 pile개수(N)가 5일 때인 Fig. 3.29에서 Sand Cushion층이 깊어짐에 따라 평균 침하율(R)의 변화가 큰 폭으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 pile개수가 Fig. 3.30 ~ Fig. 3.33으로 점점 증가하게 되자 Sand Cushion층이 깊어져도 평균 침하율(R)의 변화가 크게 생기지 않았다. 그리고 Sand Cushion층이 낮을 때에는 파일의 개수(N)에 상관없이 raft의 평균 침하율(R)에는 큰 영향을 미치지 못했다. 이러한 결과는 말뚝이 박힌 점토층과 하부의 모래층의 기존 강성보다 pile의 보강으로 인해 좀 더 커진 강성의 영향으로 파일개수(N)가 많아질수록 평균 침하율(R)의 변화가 큰 폭으로 변화는 것이지만 상층의 모래의 압축효과가 극히 제한적이기 때문에 파일개수(N)가 적을 때에는 평균 침하율(R)의 변화가 적게 나오는 것으로 보인다.

파일개수(N)가 적을 때에는 Sand Cushion층의 깊이(D)에 따른 영향이 크므로 깊이에 따라 불규칙한 침하율의 변화를 보인다. 하지만 파일개수(N)가 증가할수록 파일에 대한 흙의 구속력이 커지기 때문에 침하의 변화폭이 깊이에 따라 큰 차이가 없어지는 것을 확인할 수 있다.

3.3.4. 부등 침하율(dR) 과 Cushion Depth(D) 와의 관계

파일개수(N)가 일정할 때 Sand Cushion층의 깊이에 따라 나타나는 부등 침하율(dR)의 변화는 Fig. 3.34 ~ Fig. 3.38과 같다.

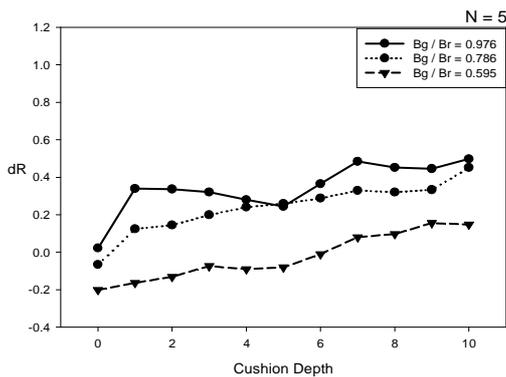


Fig. 3.34 dR 과 D in $N = 5$

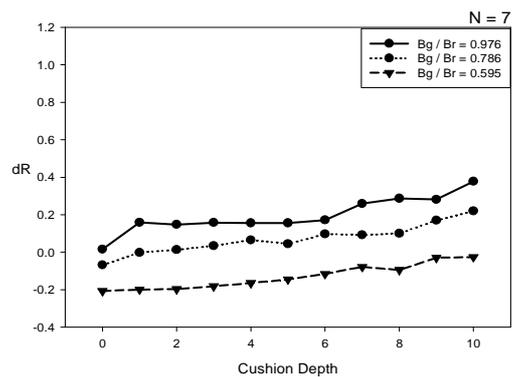


Fig. 3.35 dR 과 D in $N = 7$

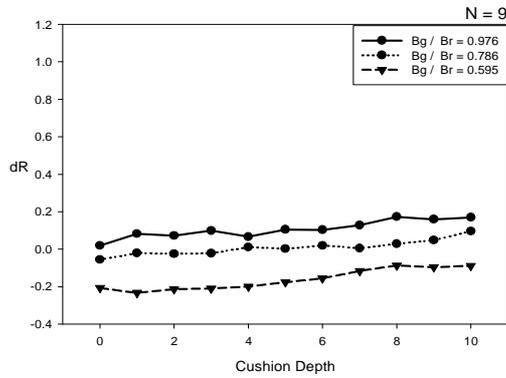


Fig. 3.36 dR 과 D in $N = 9$

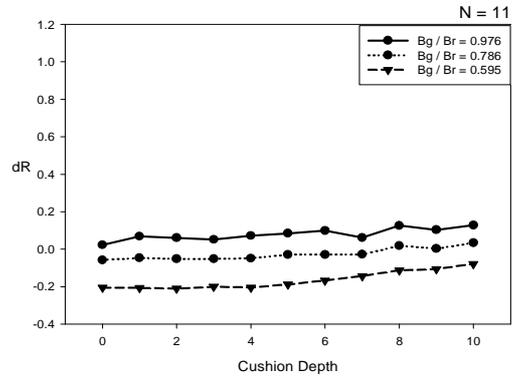


Fig. 3.37 dR 과 D in $N = 11$

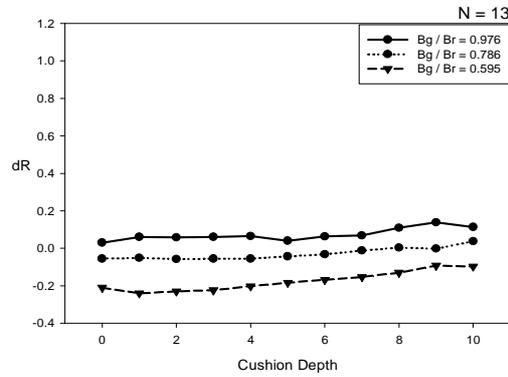


Fig. 3.38 dR 과 D in $N = 13$

부등 침하율(dR)도 역시 평균 침하율(R)과 마찬가지로 pile의 개수가 적을 때에는 Sand Cushion의 깊이(D)가 변함에 따라 그 값이 크게 변하게 되지만, pile개수(N)가 많아질수록 Sand Cushion층의 영향을 작게 받는 것으로 해석되어졌다. 그리고 pile개수(N)가 가장 많은 13개일 때에는 Sand Cushion 층을 고려하지 않았을 때의 Piled Raft 기초의 부등 침하율(dR)과 그리 큰 값 차이를 보이지 않았다. 오히려 파일분포도(B_g/B_r)의 값이 0.786일 때에는 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초에서의 파일분포도(B_g/B_r)의 값이 0.976일 때와 비슷한 부등 침하율(dR)을 보였다. 이것으로 보아 일정량의 pile

개수(N)가 되면 Sand Cushion층의 존재유무와 관계없이 침하는 극히 제한적으로 나타나고 파일분포도(B_g/B_r)가 좀 더 큰 영향력을 보인다고 생각할 수 있다.

그 이유는 Sand Cushion층이 존재하고 그 깊이가 깊어진다 하더라도 그러한 Sand Cushion층이 가져오는 부등 침하에 대한 영향력은 pile개수(N)가 증가하는 것으로 인한 영향력보다 극히 작고, 오히려 raft에 대한 pile의 분포인 파일분포도(B_g/B_r)가 더 큰 영향력을 보인다고 할 수 있기 때문이다.

3.3.5. 평균 침하율(R) 과 B_g/B_r 의 비율변화에 따른 그래프

다음으로 평균 침하율(R)이 파일분포도(B_g/B_r)에 따라 어떠한 변화를 보이는지 살펴보기 위해 평균 침하율(R)과 파일분포도(B_g/B_r)의 형태로 Sand Cushion층의 깊이(D)에 따른 그래프들을 아래와 같이 Fig. 3.39 ~ Fig. 3.49로 분류했다.

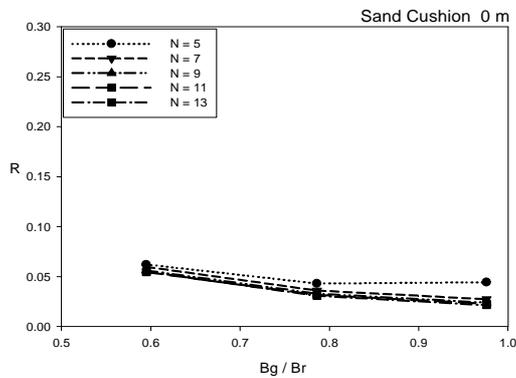


Fig. 3.39 R 과 B_g/B_r in $D = 0m$

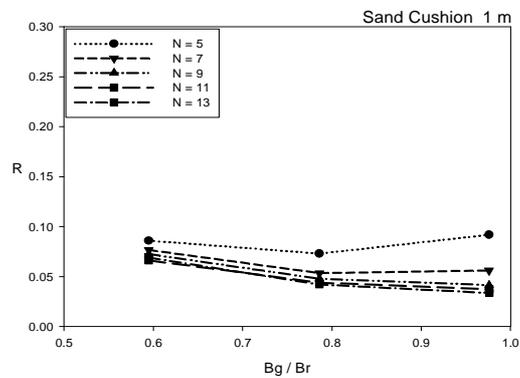


Fig. 3.40 R 과 B_g/B_r in $D = 1m$

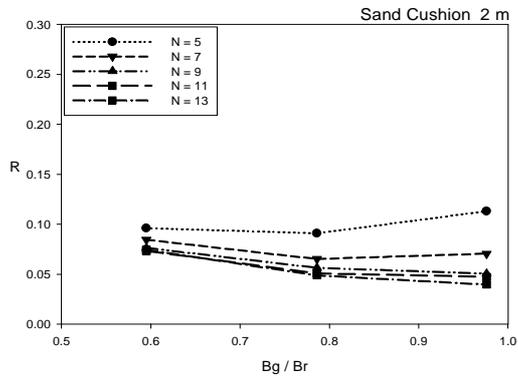


Fig. 3.41 R 과 B_g/B_r in $D = 2m$

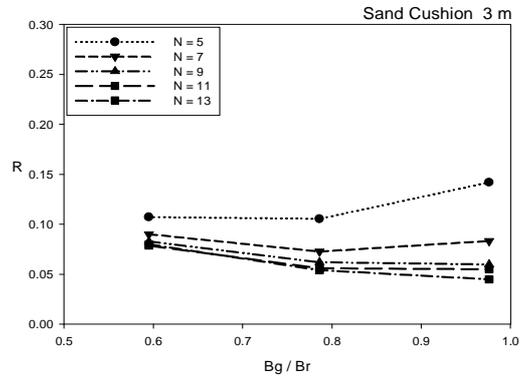


Fig. 3.42 R 과 B_g/B_r in $D = 3m$

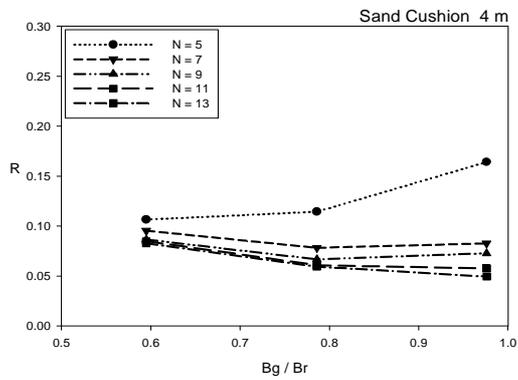


Fig. 3.43 R 과 B_g/B_r in $D = 4m$

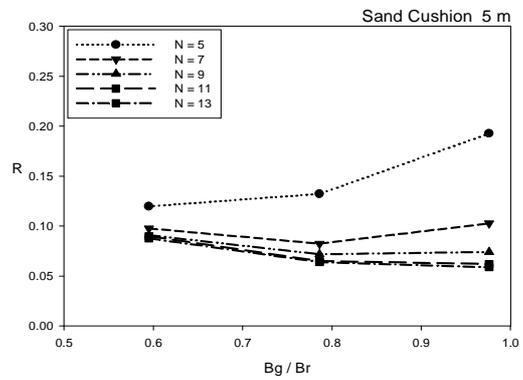


Fig. 3.44 R 과 B_g/B_r in $D = 5m$

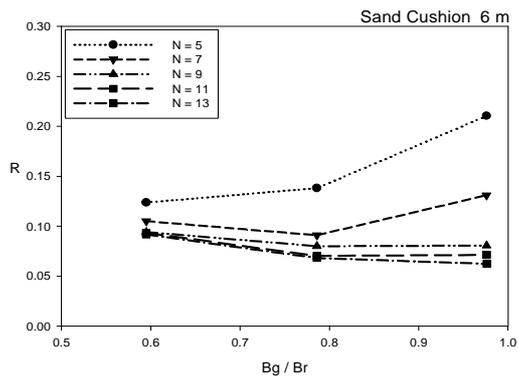


Fig. 3.45 R 과 B_g/B_r in $D = 6m$

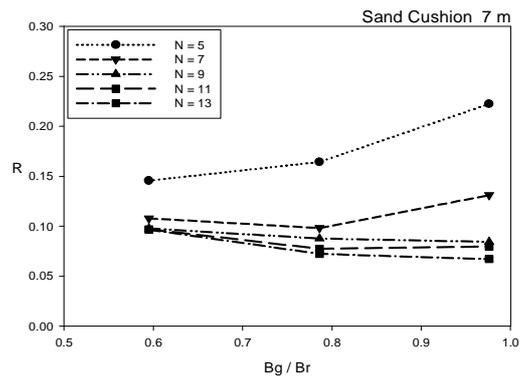


Fig. 3.46 R 과 B_g/B_r in $D = 7m$

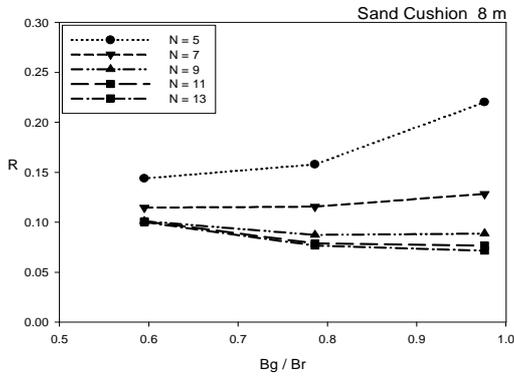


Fig. 3.47 R 과 B_g/B_r in $D = 8m$

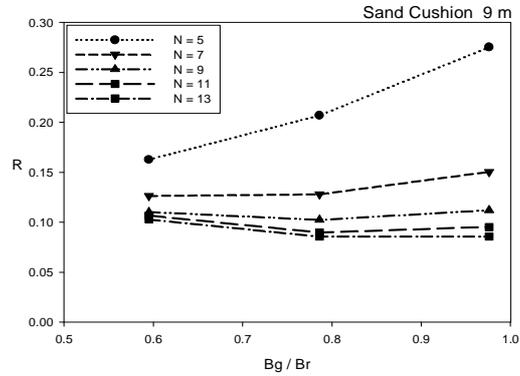


Fig. 3.48 R 과 B_g/B_r in $D = 9m$

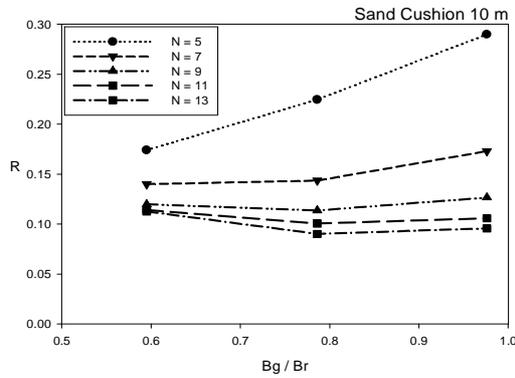


Fig. 3.49 R 과 B_g/B_r in $D = 10m$

위의 Fig. 3.39 ~ Fig. 3.49를 살펴보면 파일분포도(B_g/B_r)가 0.595일 때보다 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때의 평균 침하율(R)의 변화가 매우 큰 폭으로 변하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 Piled Raft 기초의 특성인 raft 중심부의 침하량이 raft의 외측의 침하량보다 크게 일어나며 이러한 raft 중심부의 침하량은 평균 침하율(R)에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다. 즉 raft에 대한 전체적인 pile의 분포도인 파일분포도(B_g/B_r)도 중요하지만 침하가 일어나는 주요 부분에 대한 pile의 배치와 Pile 개수(N)가 평균 침하율(R)를 조절하는데 더 큰 역할을 한다는 것이다.

3.3.6. 부등 침하율(dR) 과 파일분포도(B_g/B_r)의 값에 따른 그래프

파일개수(N)의 증감이 Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초에서 어떠한 변화를 보이는가를 살펴보기 위해서 부등침하율(dR)과 파일분포도(B_g/B_r)로 파악하고자 한다.

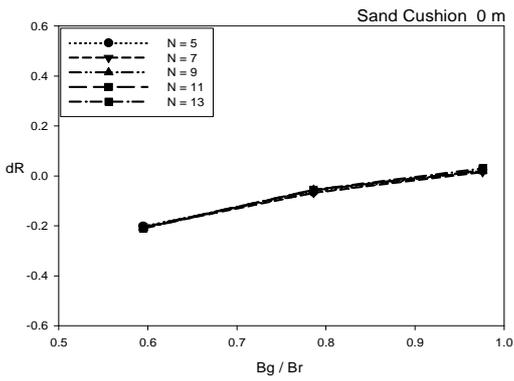


Fig. 3.50 dR 과 B_g/B_r in $D = 0m$

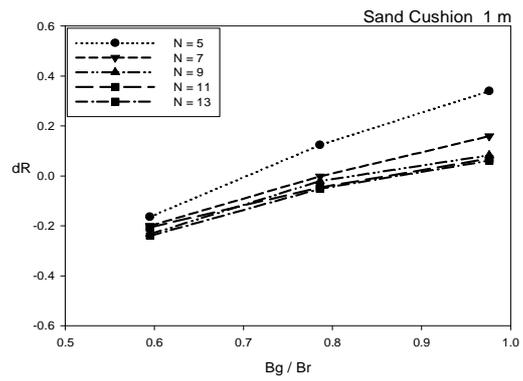


Fig. 3.51 dR 과 B_g/B_r in $D = 1m$

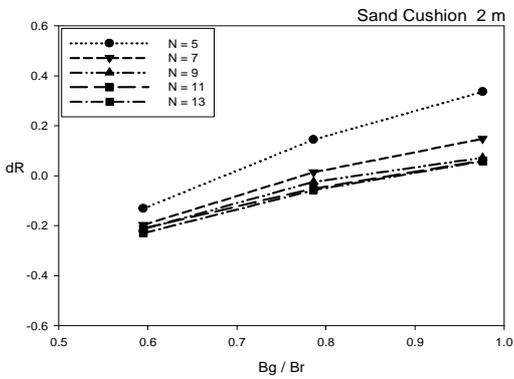


Fig. 3.52 dR 과 B_g/B_r in $D = 2m$

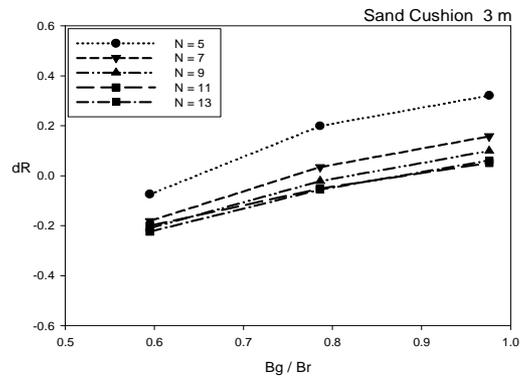


Fig. 3.53 dR 과 B_g/B_r in $D = 3m$

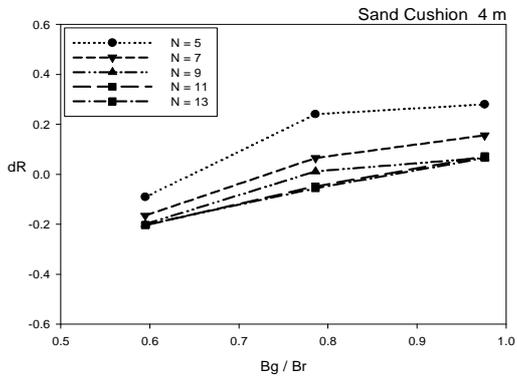


Fig. 3.54 dR vs B_g/B_r in $D = 4m$

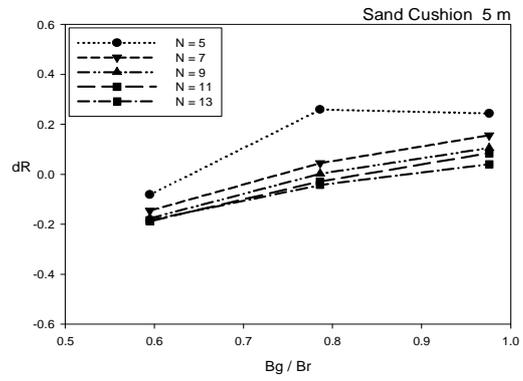


Fig. 3.55 dR vs B_g/B_r in $D = 5m$

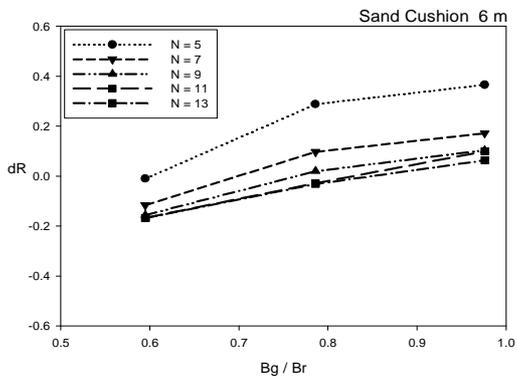


Fig. 3.56 dR vs B_g/B_r in $D = 6m$

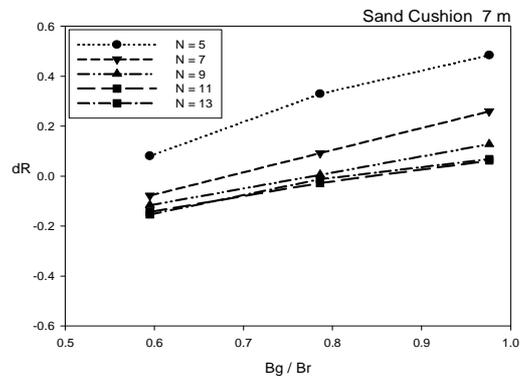


Fig. 3.57 dR vs B_g/B_r in $D = 7m$

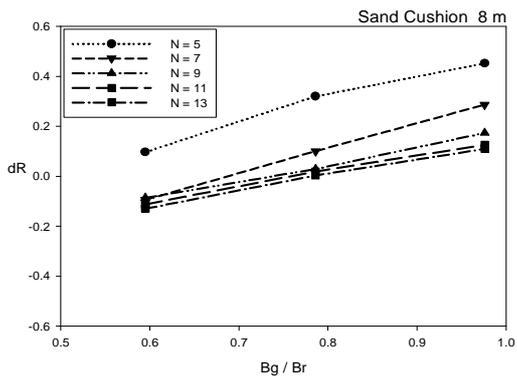


Fig. 3.58 dR vs B_g/B_r in $D = 8m$

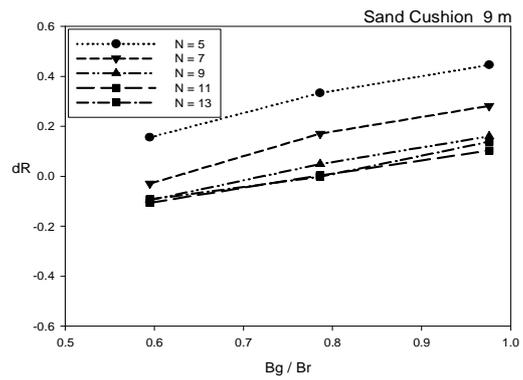


Fig. 3.59 dR vs B_g/B_r in $D = 9m$

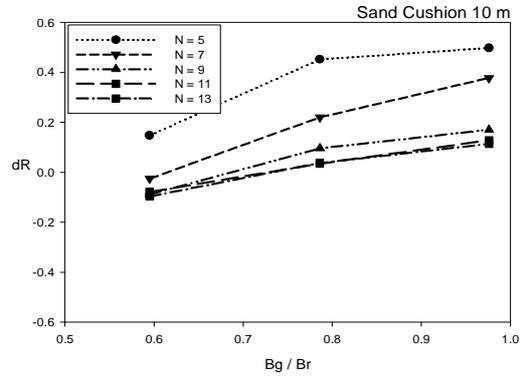


Fig. 3.60 dR 과 B_g/B_r in $D = 10m$

부등 침하율(dR)과 파일분포도(B_g/B_r)의 관계를 보자. Sand Cushion층의 깊이(D)별로 그 관계를 보면 Sand Cushion층이 0m 인 경우에는 파일분포도(B_g/B_r)의 값에 상관없이 거의 비슷한 값을 가지고 있다. 하지만 Sand Cushion층이 1m가 되자마자 파일분포도(B_g/B_r)가 1에 가까운 0.976의 값의 지점부터 부등 침하율(dR)의 변화가 크게 일어났다. 그리고 Sand Cushion층의 깊이가 깊어질수록 Sand Cushion층의 깊이(D)가 나타내는 영향력은 파일분포도(B_g/B_r)가 작은 값 쪽으로 옮겨 갔다. 하지만 파일개수(N)가 많은 선은 Sand Cushion층 두께의 영향을 매우 작게 받는 것으로 나타났다.

4. Sand Cushion층의 탄성계수(E)의 강화

앞의 3.1.2절, 3.1.3절에서도 이야기 한 바와 같이 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초는 일정량의 pile개수(N) 이상이 되면 Piled Raft 기초의 특성상 평균 침하량(R)을 크게 낮출 수 있었고, 반면 부등 침하량(dR)은 pile개수에 거의 상관없이 거의 일정한 값을 유지한다는 것을 확인할 수 있었다.

본 장에서는 이러한 대표적인 Piled Raft 기초의 특성과 3.2장에서 해석하였던 Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초의 특성과 Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)의 증대가 보여주는 또 다른 침하율들의 결과를 비교하고자 한다. 파일분포도(B_g/B_r)를 중심으로 각각에 대한 평균 침하량들의 변화를 살펴본다. 이 장에서도 해석하는 방법은 앞장에서와 같은 R 과 N , dR 과 N , R 과 D , dR 과 D 의 경우로 나누어서 각각의 침하율들의 변화 양상을 해석한다.

4.1. $B_g/B_r = 0.976$

4.1.1. 평균 침하율(R)과 파일개수(N)와의 관계

우선 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때, 즉 pile이 raft에 전체적으로 분포되어 있을 때의 경우를 살펴본다. No Cushion층인 경우의 Piled Raft 기초와 Sand Cushion층을 접목시킨 Piled Raft 기초 그리고 Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)를 10배로 증대시킨 경우로 각각 나누어서 Sand Cushion층의 깊이(D)가 변함에 따라 평균 침하율(R)이 변화되는 값을 살펴보았다.

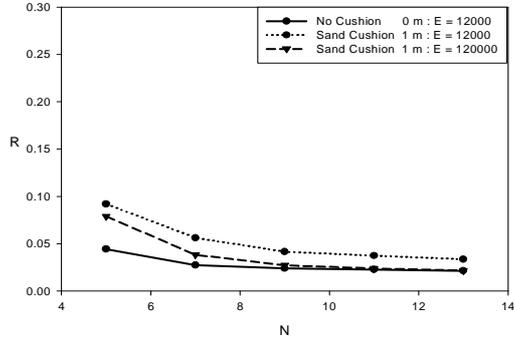


Fig. 4.1 R 과 N in 1m(with $E=1.2e+5$)

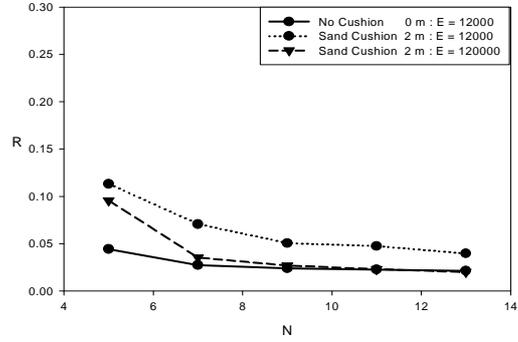


Fig. 4.2 R 과 N in 2m(with $E=1.2e+5$)

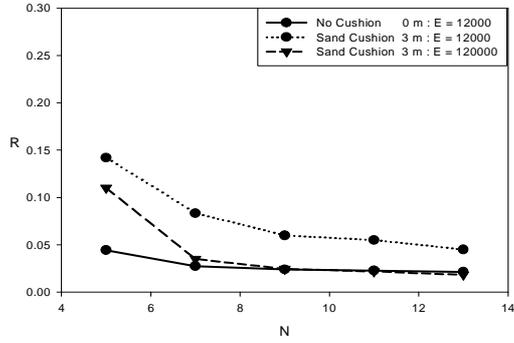


Fig. 4.3 R 과 N in 3m(with $E=1.2e+5$)

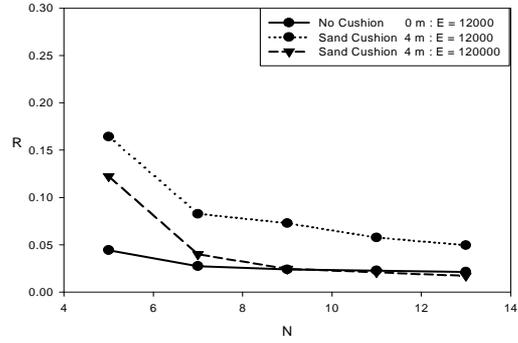


Fig. 4.4 R 과 N in 4m(with $E=1.2e+5$)

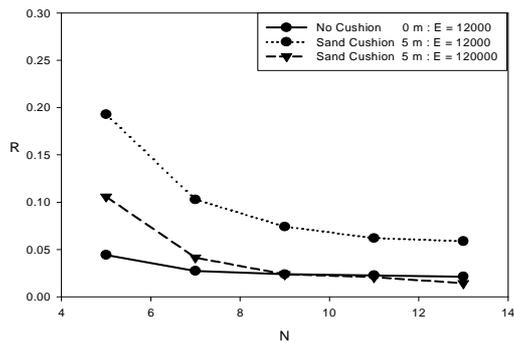


Fig. 4.5 R 과 N in 5m(with $E=1.2e+5$)

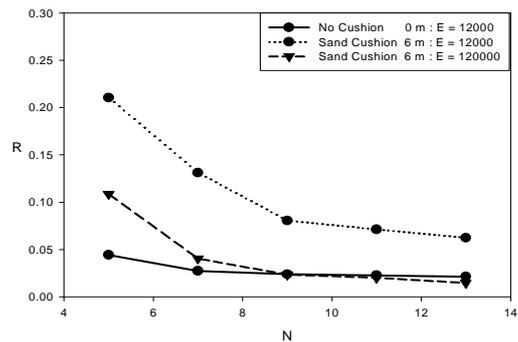


Fig. 4.6 R 과 N in 6m(with $E=1.2e+5$)

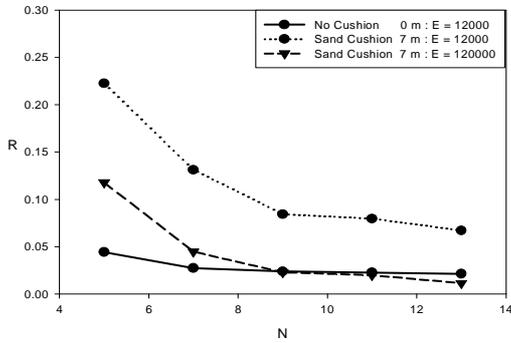


Fig. 4.7 R 과 N in 7m(with $E=1.2e+5$)

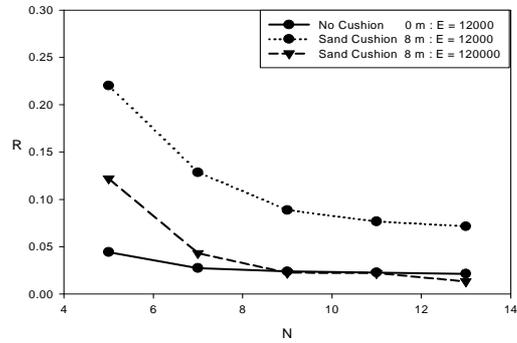


Fig. 4.8 R 과 N in 8m(with $E=1.2e+5$)

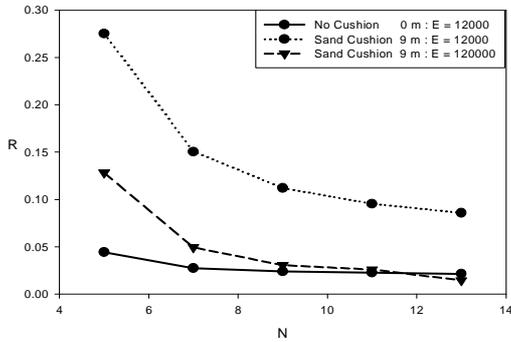


Fig. 4.9 R 과 N in 9m(with $E=1.2e+5$)

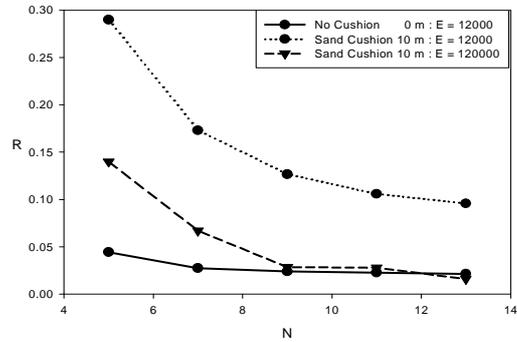


Fig. 4.10 R 과 N in 10m(with $E=1.2e+5$)

Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초에서 raft와 pile사이의 모래의 탄성계수(E)의 값을 10배로 증대시키고 Plaxis로 해석한 결과와 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초와 Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초의 평균 침하율(R)과 같이 Sand Cushion층의 깊이별로 위의 Fig. 4.1 ~ Fig. 4.10과 같다.

모래의 탄성계수(E)의 크기를 기존 Sand Cushion층 모래의 탄성계수보다 10배나 큰 $120000(kN/m^2)$ 으로 증대시키자 탄성계수(E)를 증대시키지 않았을 때의 Piled Raft 기초의 침하율과는 다른 경향을 보여주었다. 오히려 파일개수(N)가 11, 13개인 경우에는 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft기초

보다 더 좋은 침하율을 보여주었다. 하지만 파일개수(N)가 적은 5, 7, 9개일 때의 경우는 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초보다 좋지 않은 결과를 보여주었지만 Sand Cushion층을 고려하고 모래의 탄성계수(E)를 강화하지 않은 Piled Raft 기초 보다는 좀 더 나은 침하율을 보여주었다. 이것은 아래의 Fig. 4.11과 Fig. 4.12를 보면 쉽게 이해 할 수 있다.

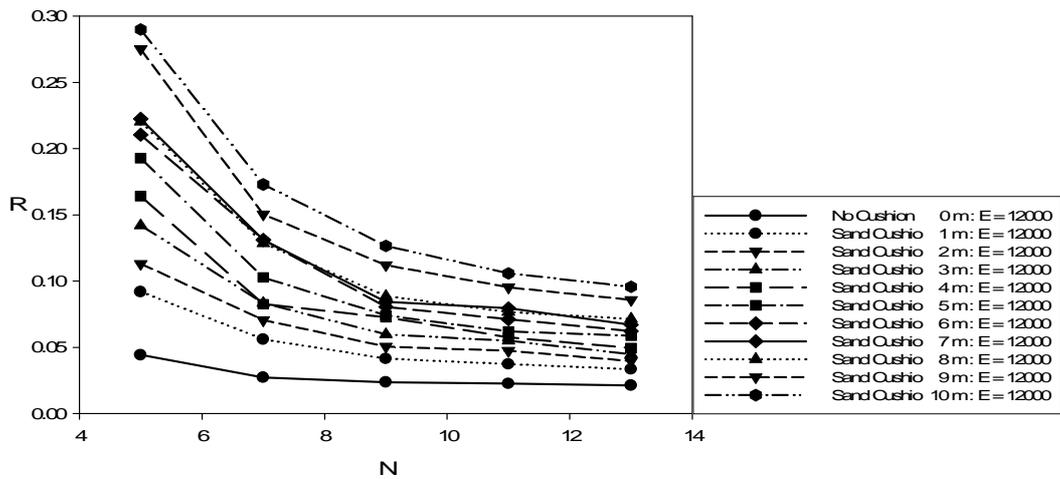


Fig. 4.11 R 과 N (with $E = 12000$)

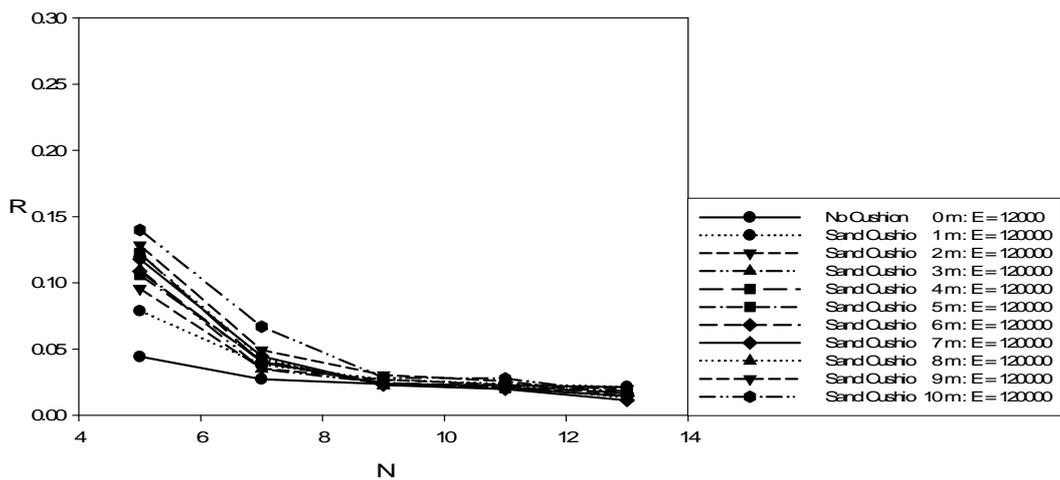


Fig. 4.12 R 과 N (with $E = 120000$)

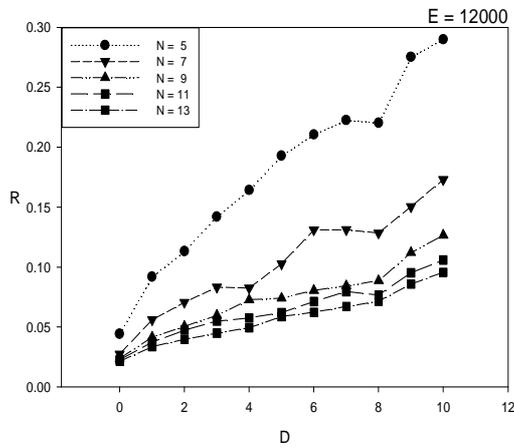


Fig. 4.13 R 과 D (with $E=1.2e+4$)

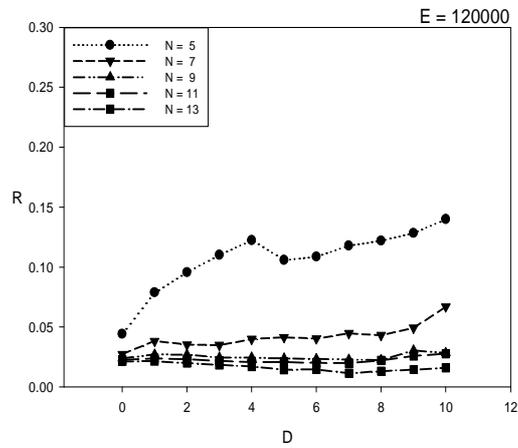


Fig. 4.14 R 과 D (with $E=1.2e+5$)

Fig. 4.13과 Fig. 4.14를 살펴보면 모래의 탄성계수(E)를 강화하지 않은 Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초일 때 Sand Cushion층의 깊이가 깊어질수록 pile개수(N)가 적은 순서부터 큰 폭의 침하율 변화를 가지다가 pile개수(N)가 증가함에 따라 그 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

하지만 이러한 변화들은 pile과 raft 사이의 Sand Cushion층의 탄성계수(E)값을 10배로 증가 시켰을 때 매우 뚜렷하게 나타나며 pile개수(N)가 9를 넘었을 때에는 No Sand Cushion층 일 때보다 훨씬 나은 평균 침하율 값을 보여주기도 한다. 그렇지만 역시 pile개수(N)가 적은 경우에는 쿠션 깊이에 대해 큰 영향을 받아 침하율의 변화가 크게 나타나는 것도 사실이다.

여기에서도 pile개수(N)의 적당한 선택적인 설계가 Pile Raft 기초에서 얼마나 중요한 것인지를 재확인 시켜주는 부분이다.

4.1.2. 부등 침하율(dR)과 파일개수(N)와의 관계

이제는 파일분포도(B_g/B_r)의 값이 0.976일 때의 부등 침하율(dR)과 파일개수(N)와의 관계를 평균 침하율(R)과 마찬가지로 비교 분석한다.

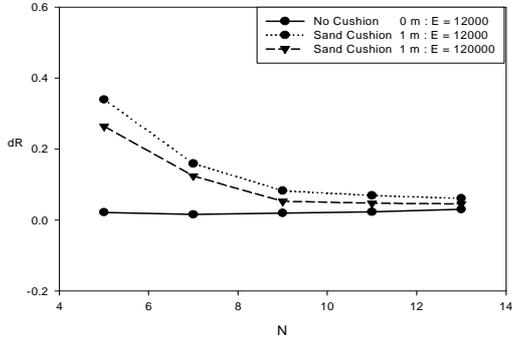


Fig. 4.15 dR vs N in 1m(with $E=1.2e+5$)

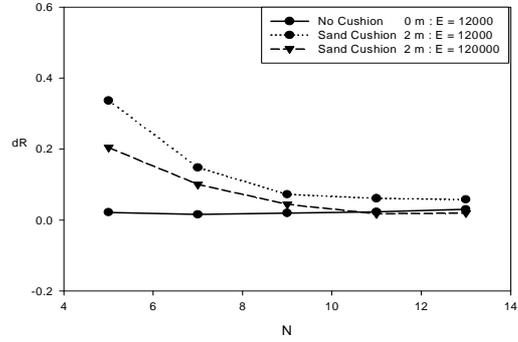


Fig. 4.16 dR vs N in 2m(with $E=1.2e+5$)

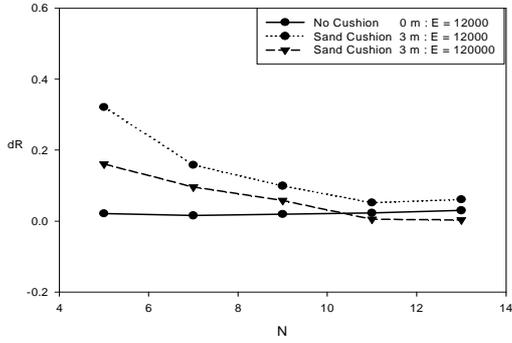


Fig. 4.17 dR vs N in 3m(with $E=1.2e+5$)

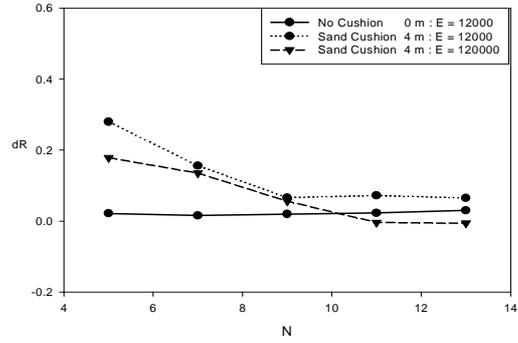


Fig. 4.18 dR vs N in 4m(with $E=1.2e+5$)

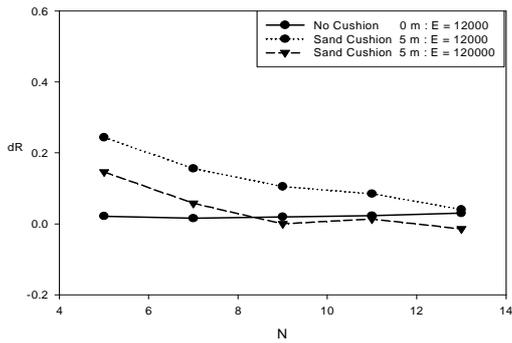


Fig. 4.19 dR vs N in 5m(with $E=1.2e+5$)

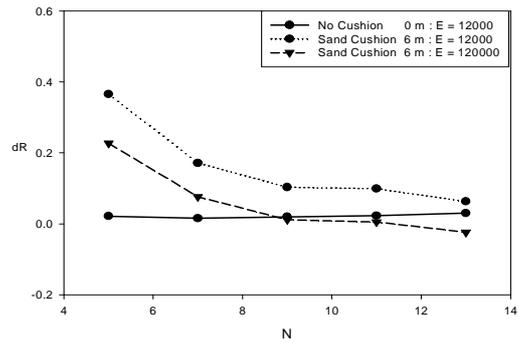


Fig. 4.20 dR vs N in 6m(with $E=1.2e+5$)

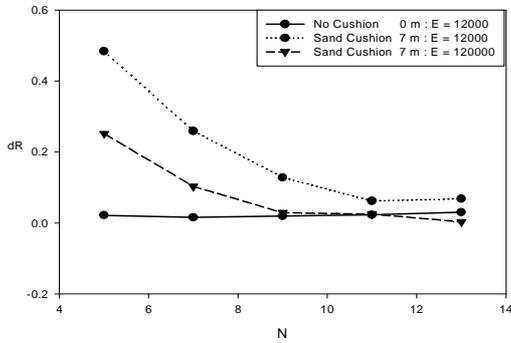


Fig. 4.21 dR 과 N in 7m(with $E=1.2e+5$)

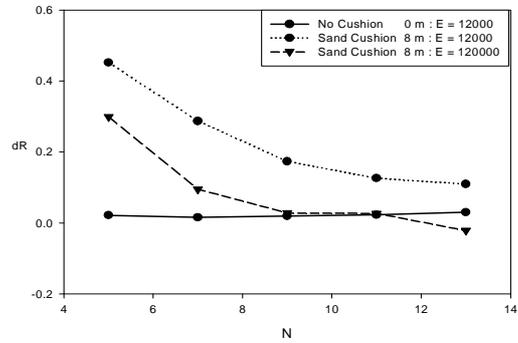


Fig. 4.22 dR 과 N in 8m(with $E=1.2e+5$)

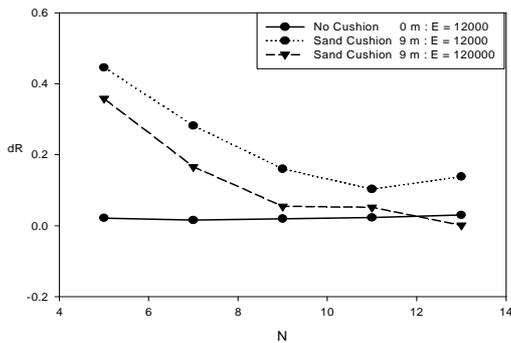


Fig. 4.23 dR 과 N in 9m(with $E=1.2e+5$)

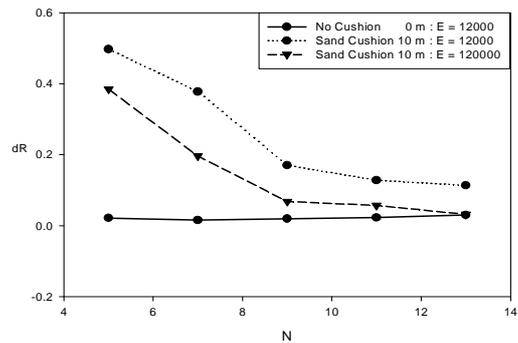


Fig. 4.24 dR 과 N in 10m(with $E=1.2e+5$)

Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)를 10배 강화한 Piled Raft 기초의 부등 침하율(dR)은 Sand Cushion층이 0m 일 때와 거의 비슷한 값을 유지하려는 경향이 보이는 반면 Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)를 증대시키지 않은 Piled Raft 기초는 부등 침하율(dR)이 증가하는 경향을 보여준다.

아래의 Fig. 4.25와 Fig. 4.26을 보면 좀 더 쉽게 그 경향을 파악할 수 있다.

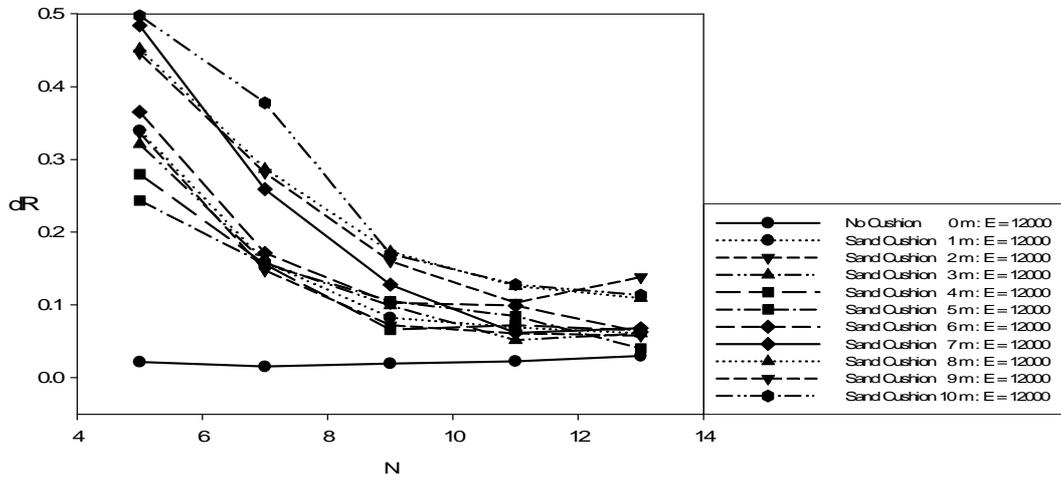


Fig. 4.25 dR 과 N (with $E = 12000$)

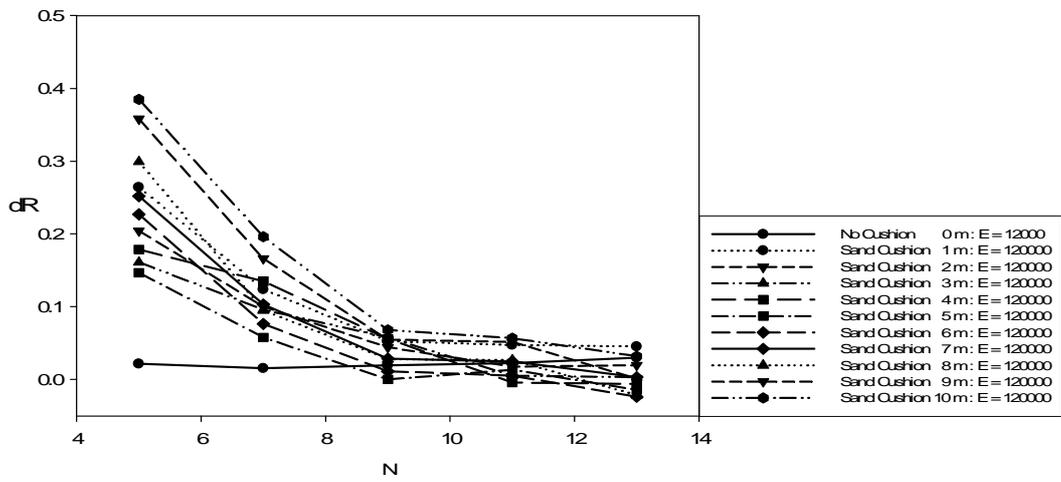


Fig. 4.26 dR 과 N (with $E = 120000$)

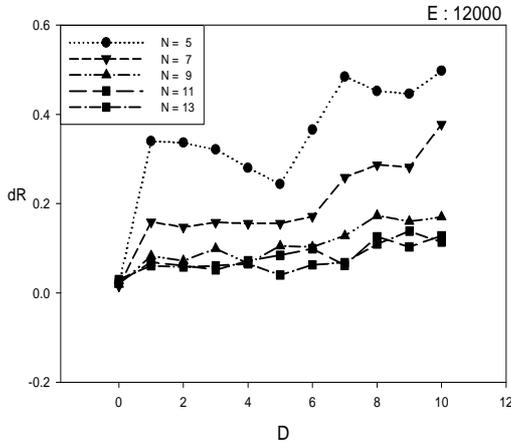


Fig. 4.27 dR 과 D (with $E=1.2e+4$)

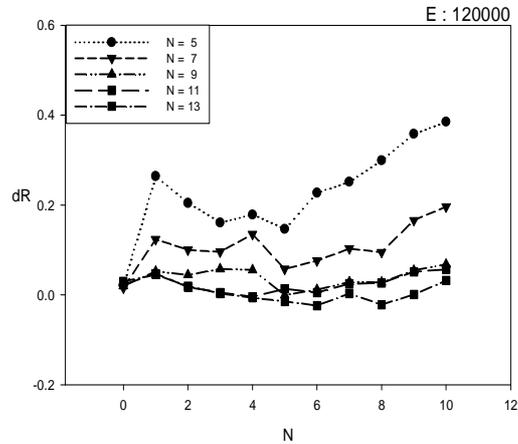


Fig. 4.28 dR 과 D (with $E=1.2e+5$)

부등 침하율(dR)도 역시 평균 침하율(R)에서와 마찬가지로 Sand Cushion 층의 깊이(D)에 따른 침하율의 변화가 훨씬 작게 나오며, pile개수(N)가 증가할수록 부등 침하율(dR)도 작게 나오는 것을 알 수 있다. Sand Cushion층의 탄성계수(E)를 10배로 증대시킨 경우는 탄성계수(E) 증대시키지 않은 경우보다 훨씬 양호한 상태의 그래프를 이루었다. 특히 평균 침하율(R)때와 마찬가지로 파일개수(N)가 9개를 넘어가자 기존의 Sand Cushion을 고려하지 않은 Piled Raft 기초보다 더 낮은 침하율을 보여줬다. 그리고 깊이에 따른 침하율의 변화에서도 Sand Cushion층의 모래의 탄성계수(E)를 높이자 부등 침하율(dR)의 변화가 전반적으로 많이 양호해 진다는 것을 알 수 있다.

4.2. $B_g/B_r = 0.786$

4.2.1. 평균 침하율(R)과 파일개수(N)와의 관계

다음은 raft에 대한 pile의 폭의 비인 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때 보

다 낮은 파일분포도(B_g/B_r)인 0.786일 때를 살펴보자. 앞장의 Sand Cushion층의 탄성계수(E)값을 변화시키지 않은 상태에서의 침하량은 Sand Cushion층의 깊이(D)에 따라서 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때와 0.786일 때 약간 특이한 현상을 보여주었다. Sand Cushion층이 깊지 않을 때에는 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때가 더 적은 침하율을 보여주었지만 Sand Cushion층이 깊어지자 파일분포도(B_g/B_r)가 0.786일 때가 더 적은 침하율을 보여주었기 때문이다.

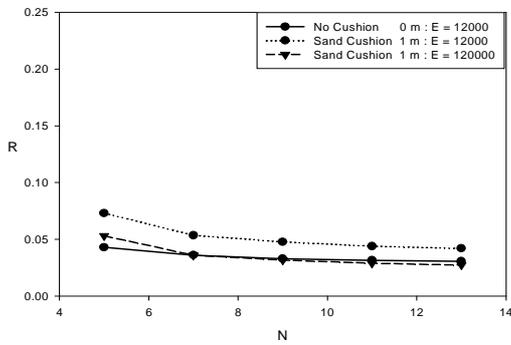


Fig. 4.29 R 과 N in 1m(with $E=1.2e+5$)

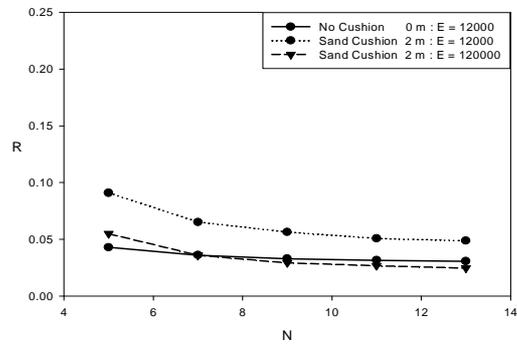


Fig. 4.30 R 과 N in 2m(with $E=1.2e+5$)

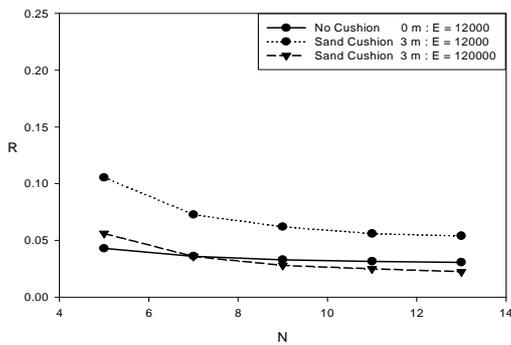


Fig. 4.31 R 과 N in 3m(with $E=1.2e+5$)

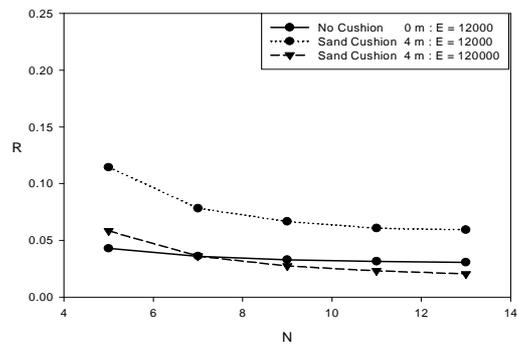


Fig. 4.32 R 과 N in 4m(with $E=1.2e+5$)

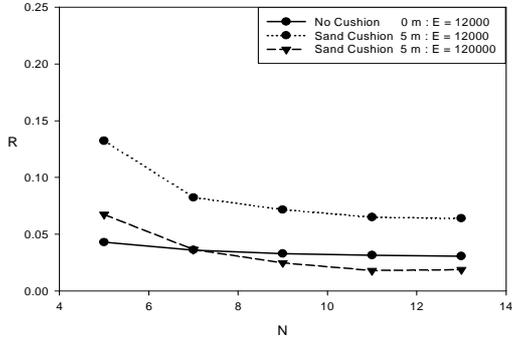


Fig. 4.33 $R \propto N$ in 5m (with $E=1.2e+5$)

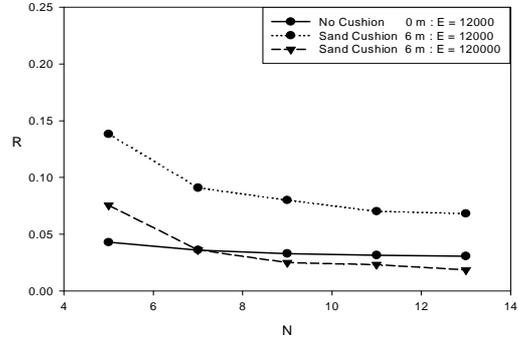


Fig. 4.34 $R \propto N$ in 6m (with $E=1.2e+5$)

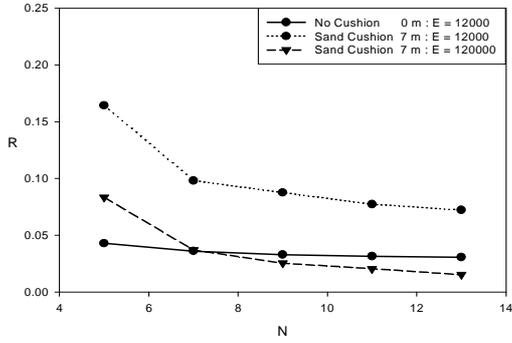


Fig. 4.35 $R \propto N$ in 7m (with $E=1.2e+5$)

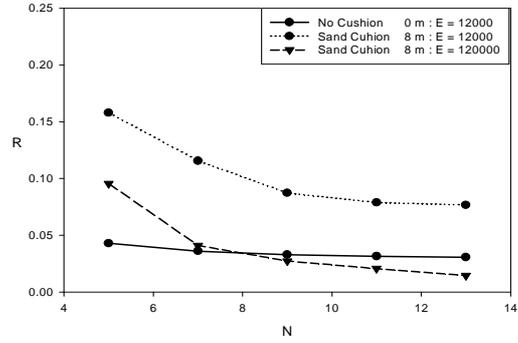


Fig. 4.36 $R \propto N$ in 8m (with $E=1.2e+5$)

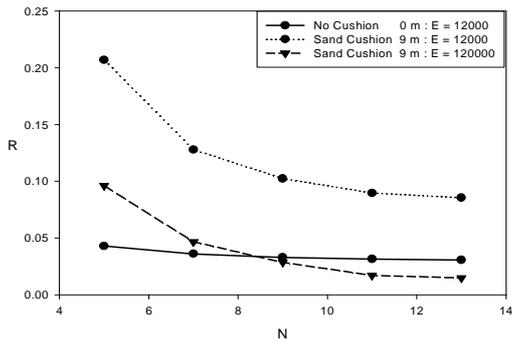


Fig. 4.37 $R \propto N$ in 9m (with $E=1.2e+5$)

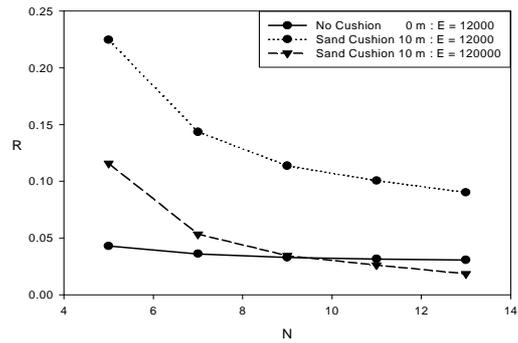


Fig. 4.38 $R \propto N$ in 10m (with $E=1.2e+5$)

위의 그래프들을 평균 침하율(R)과 pile개수(N)로 Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)가 $E = 12000$ 일 때와 $E = 120000$ 일 때 두 부분으로 나누어서 묶어 보았다.

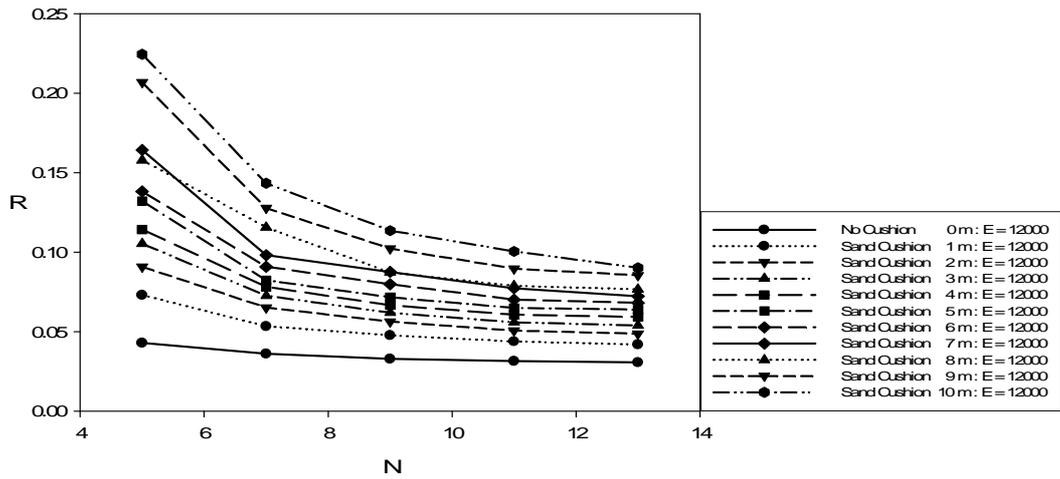


Fig. 4.39 R 과 N (with $E = 12000$)

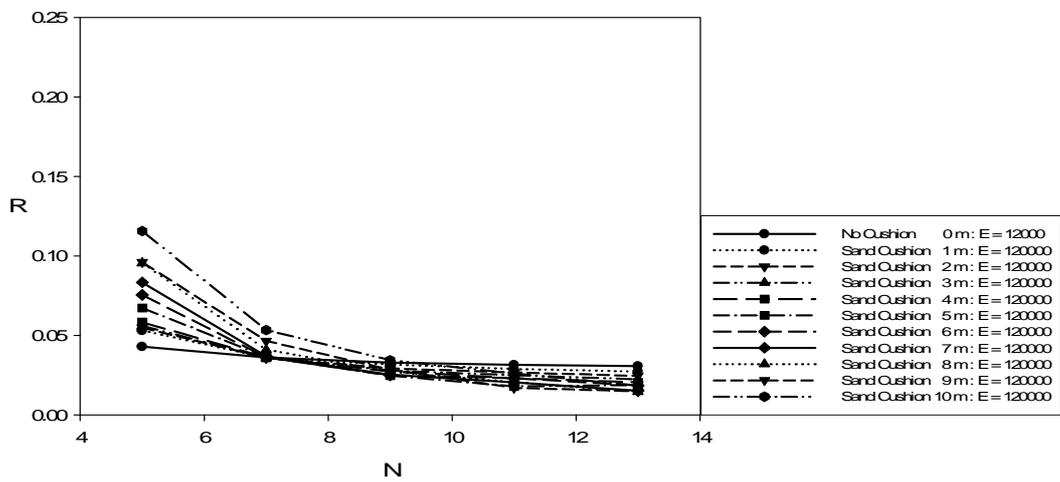


Fig. 4.40 R 과 N (with $E = 120000$)

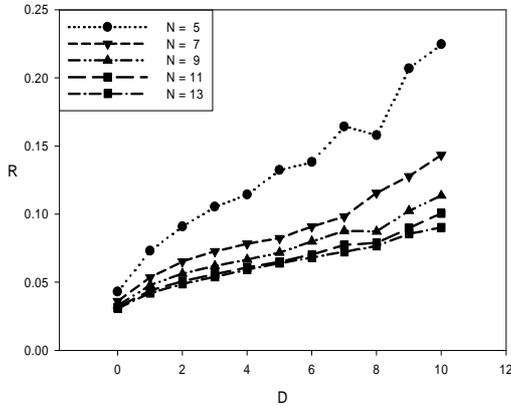


Fig. 4.41 R 과 D (with $E=1.2e+4$)

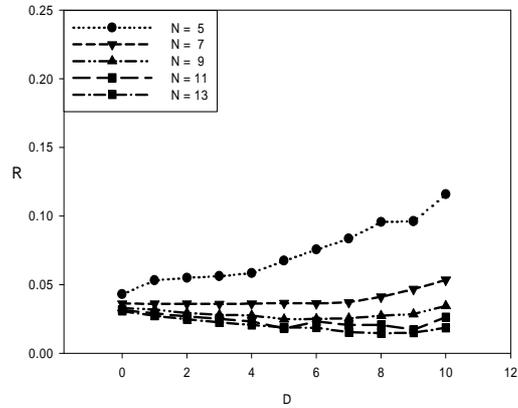


Fig. 4.42 R 과 D (with $E=1.2e+5$)

Sand Cushion층의 모래의 탄성계수(E)값을 증대시키지 않았을 때의 실험 결과와 마찬가지로 모래의 탄성계수(E)를 10배 증대시켰을 때에도 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때보다 파일분포도(B_g/B_r)가 0.786일 때가 훨씬 좋은 평균 침하율(R) 값을 보여주었다. 평균 침하율(R)에 대한 R 과 E 의 관계를 보아도 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976일 때보다 0.786일 때도 Sand Cushion층의 깊이에 따라서 완만하게 변하는 그래프를 볼 수 있었다.

4.2.2. 부등 침하율(dR)과 파일개수(N)와의 관계

부등 침하율(dR)과 파일개수(N)와의 관계도 평균 침하율(R)과 같은 방법으로 해석 하였을 때, 다음과 같은 결과를 나타낸다.

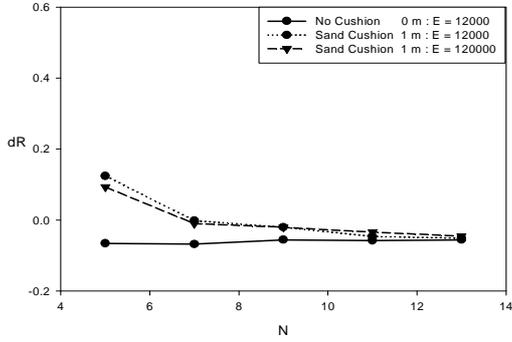


Fig. 4.43 dR 과 N in 1m(with $E=1.2e+5$)

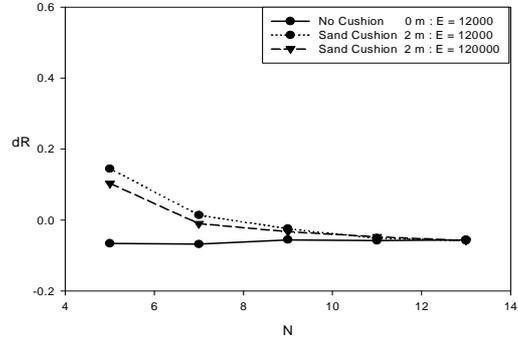


Fig. 4.44 dR 과 N in 2m(with $E=1.2e+5$)

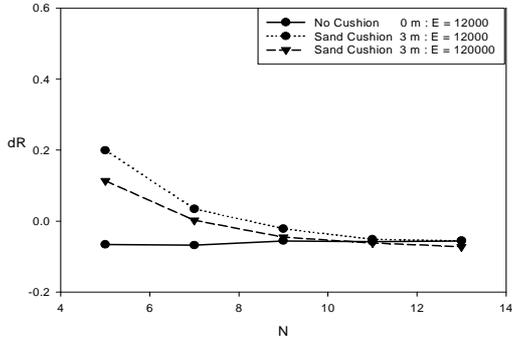


Fig. 4.45 dR 과 N in 3m(with $E=1.2e+5$)

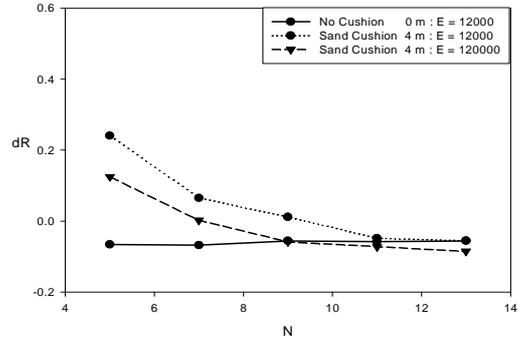


Fig. 4.46 dR 과 N in 4m(with $E=1.2e+5$)

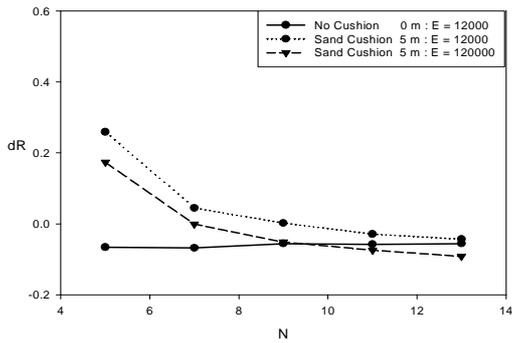


Fig. 4.47 dR 과 N in 5m(with $E=1.2e+5$)

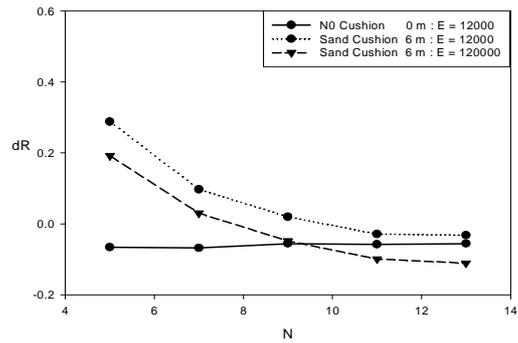


Fig. 4.48 dR 과 N in 6m(with $E=1.2e+5$)

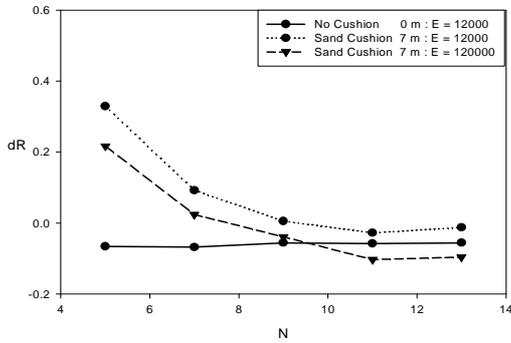


Fig. 4.49 dR 과 N in 7m(with $E=1.2e+5$)

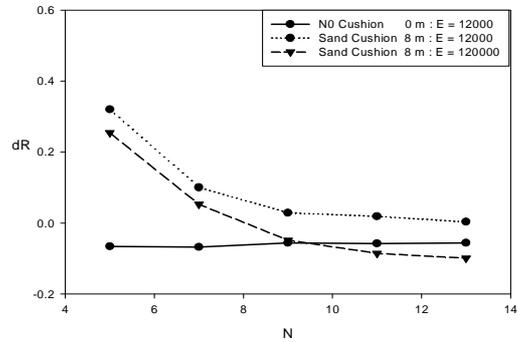


Fig. 4.50 dR 과 N in 8m(with $E=1.2e+5$)

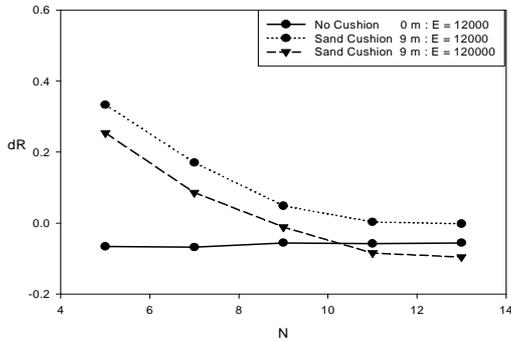


Fig. 4.51 dR 과 N in 9m(with $E=1.2e+5$)

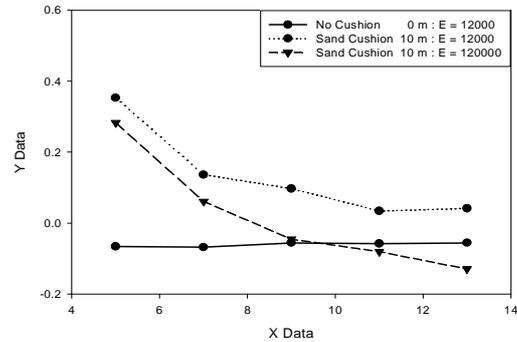


Fig. 4.52 dR 과 N in 10m(with $E=1.2e+5$)

Fig. 4.43 ~ Fig. 4.52만을 살펴봐도 파일분포도(B_g/B_r)의 값이 0.976일 때와 마찬가지로 부등침하율(dR)이 일정한 파일개수(N)를 넘어서는 오히려 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초보다 더 좋은 부등 침하율(dR)을 보여준다.

조금 더 자세히 살펴보기 위해서 Fig. 4.53과 Fig. 4.54처럼 표현했다.

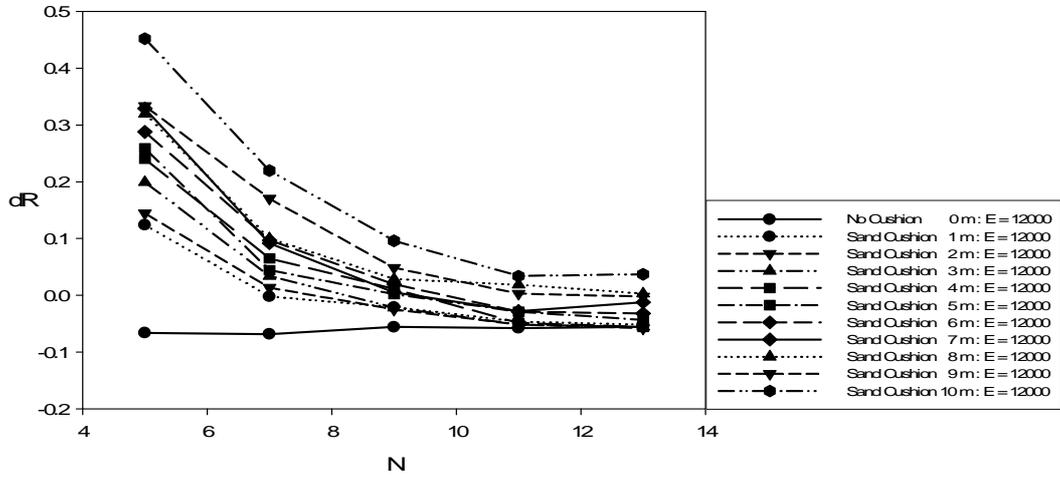


Fig. 4.53 dR 과 N (with $E = 12000$)

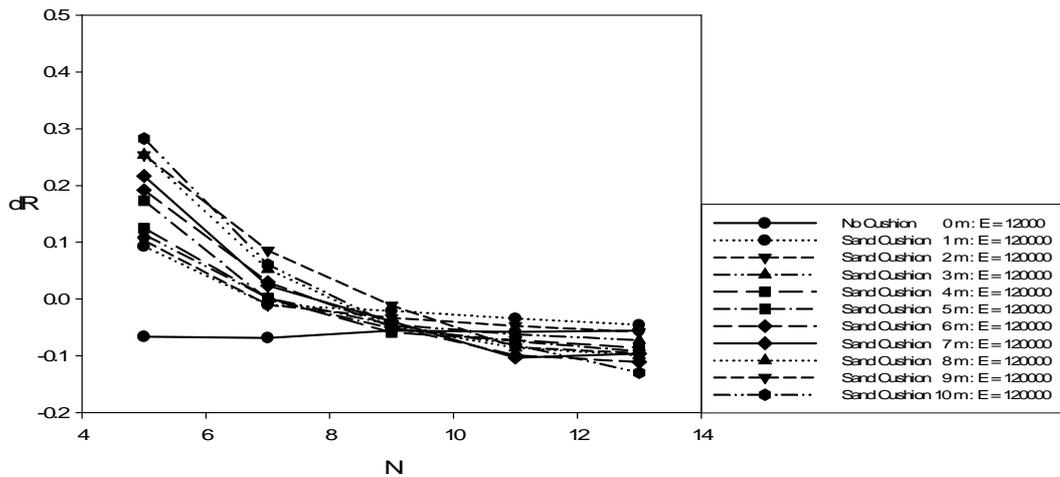


Fig. 4.54 dR 과 N (with $E = 120000$)

역시 파일분포도(B_y/B_r)이 0.976일 때와 마찬가지로 Sand Cushion층을 고려하면서 모래의 탄성계수(E)를 10배 강화한 쪽이 훨씬 좋은 부등 침하율(dR)을 보여주었다. 그리고 파일분포도(B_y/B_r)가 0.976일 때의 Fig. 4.25와 Fig.

4.26을 Fig. 4.53과 Fig. 4.54와 비교해 보면 파일분포도(B_g/B_r)가 작은 경우에 좀 더 촘촘하고 특성을 가지는 곡선을 만들어 간다.

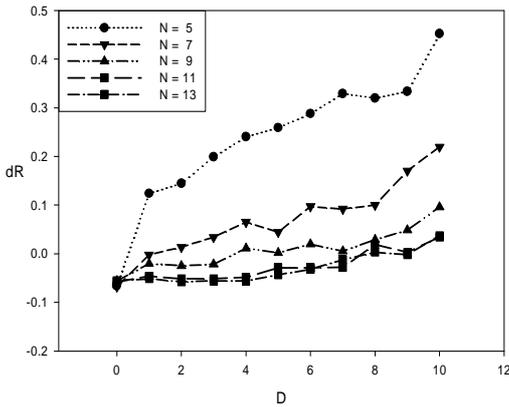


Fig. 4.55 dR 과 D (with $E=1.2e+4$)

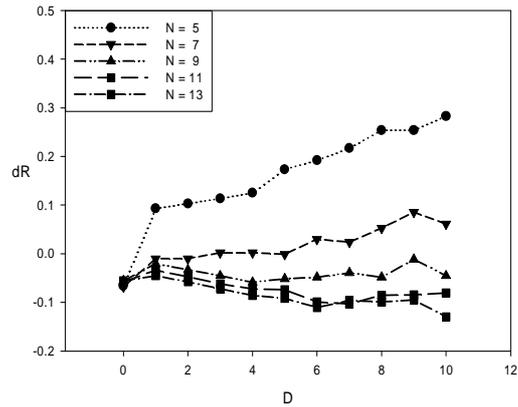


Fig. 4.56 dR 과 D (with $E=1.2e+5$)

Fig. 4.55와 Fig. 4.56에서도 마찬가지로 Sand Cushion의 모래 탄성계수(E)를 10배 증대시킨 쪽이 Sand Cushion층이 낮을 때가 깊을 때보다 확실히 좋은 부등 침하율(dR)을 보여준다.

4.3. $B_g/B_r = 0.595$

4.3.1. 평균 침하율(R)과 파일개수(N)와의 관계

마지막으로 파일분포도(B_g/B_r)가 0.595일 때, Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초와 Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초 그리고 Sand Cushion층 모래의 탄성계수를 10배 강화한 Piled Raft 기초들의 평균 침하율(R)과 파일개수(N)의 관계로 살펴보자.

4.1절과 4.2절에서는 모두 Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)를 증대시

키자 평균 침하율(R)과 부등 침하율(dR)을 조절할 수 있었다.

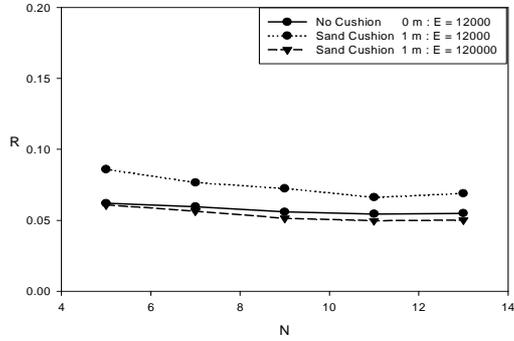


Fig. 4.57 R 과 N in 1m(with $E=1.2e+5$)

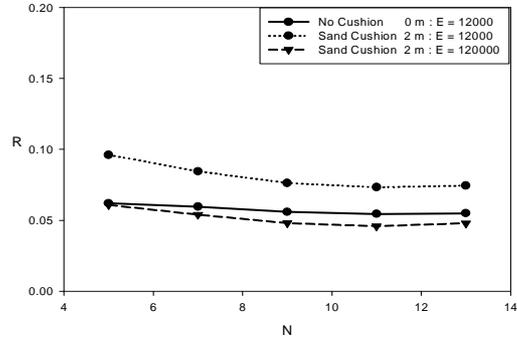


Fig. 4.58 R 과 N in 2m(with $E=1.2e+5$)

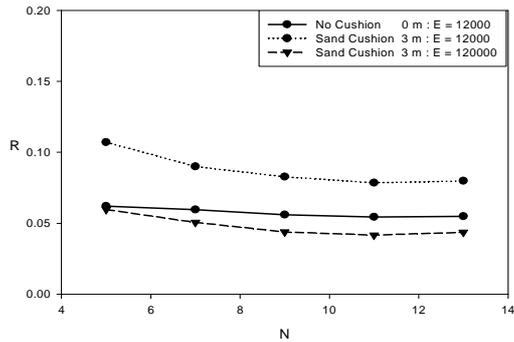


Fig. 4.59 R 과 N in 3m(with $E=1.2e+5$)

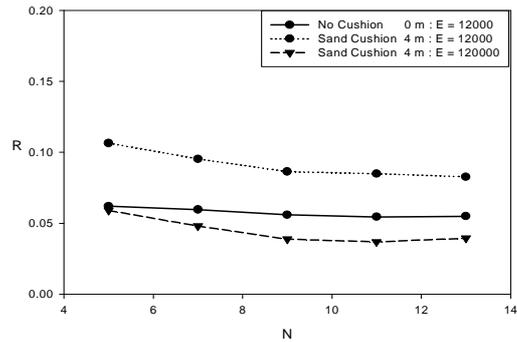


Fig. 4.60 R 과 N in 4m(with $E=1.2e+5$)

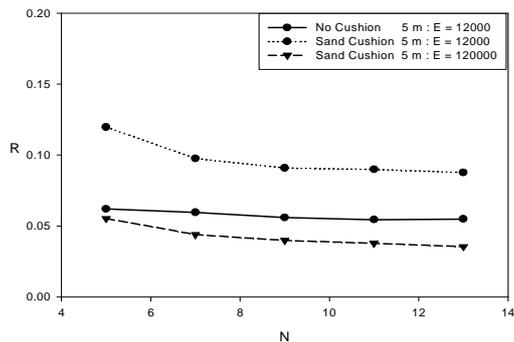


Fig. 4.61 R 과 N in 5m(with $E=1.2e+5$)

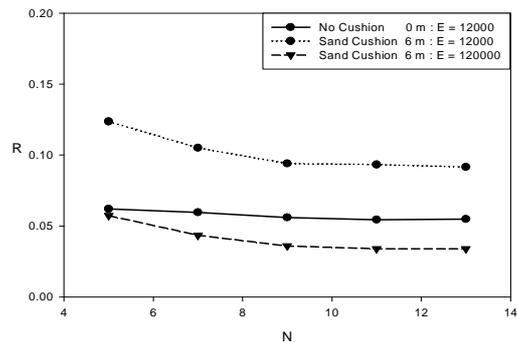


Fig. 4.62 R 과 N in 6m(with $E=1.2e+5$)

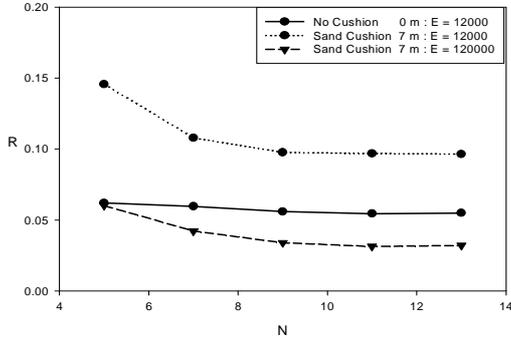


Fig. 4.63 R 과 N in 7m (with $E=1.2e+5$)

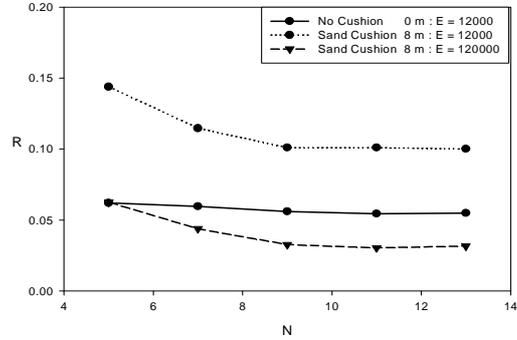


Fig. 4.64 R 과 N in 8m (with $E=1.2e+5$)

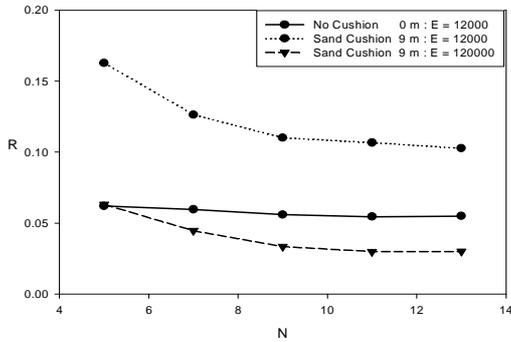


Fig. 4.65 R 과 N in 9m (with $E=1.2e+5$)

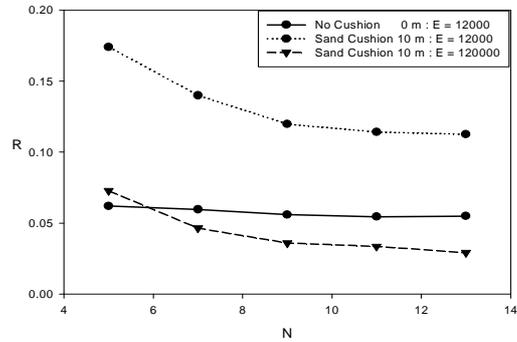


Fig. 4.66 R 과 N in 10m (with $E=1.2e+5$)

파일분포도(B_g/B_r)가 0.595일 때의 Fig. 4.57를 보면 Sand Cushion층이 1m 일 때부터 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초의 평균 침하율(dR) 보다 Sand Cushion층을 고려하면서 Sand Cushion층의 모래 탄성계수(E)를 10배로 증대한 Piled Raft 기초의 부등 침하율(dR)이 더 좋은 값을 보여준다. 그리고 Sand Cushion층의 깊이(D)가 깊어질수록 그 효과는 더욱 커지게 되는 것을 볼 수 있다. 반면에 Sand Cushion층을 고려했지만 Sand Cushion층의 모래 탄성계수(E)를 증대하지 않은 Piled Raft 기초의 부등 침하율(dR)은 이와 반대로 점점 커지는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 아래의 Fig. 4.67 ~ Fig. 4.70과 같이 하나로 묶어서 관찰하면 더 쉽게 파악할 수 있다.

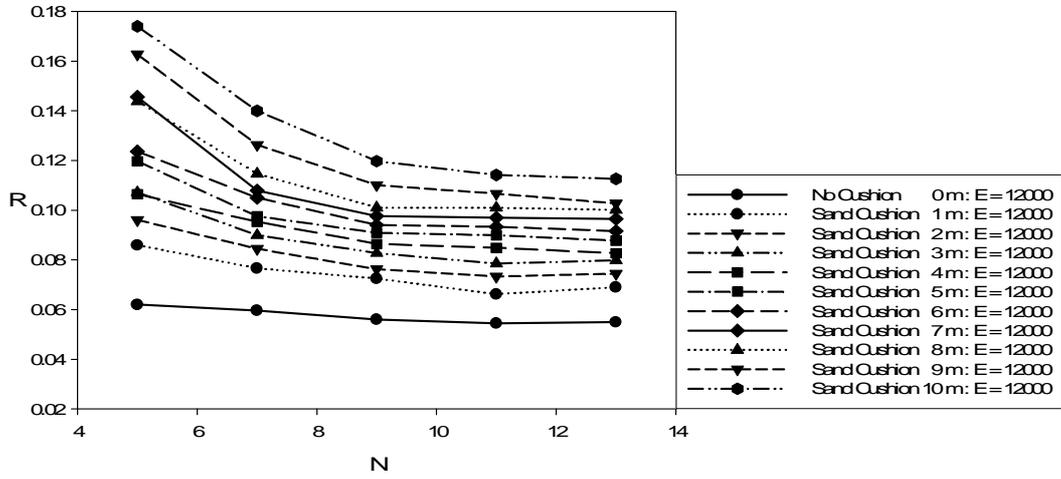


Fig. 4.67 R 과 N (with $E = 12000$)

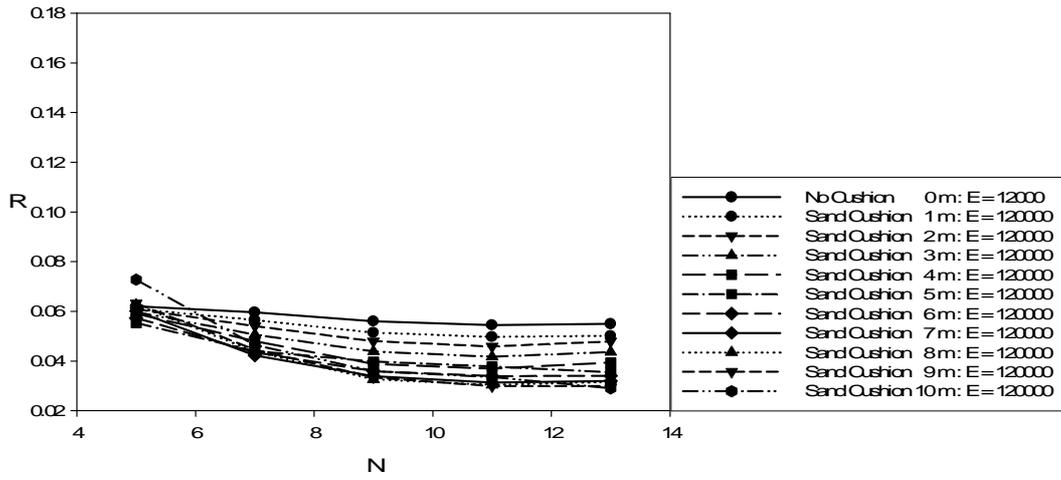


Fig. 4.68 R 과 N (with $E = 120000$)

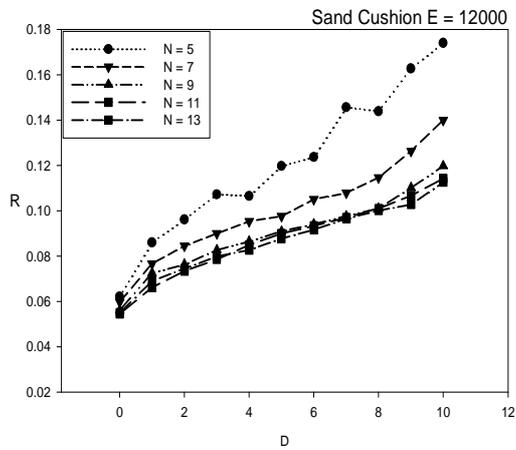


Fig. 4.69 R 과 D (with $E=1.2e+4$)

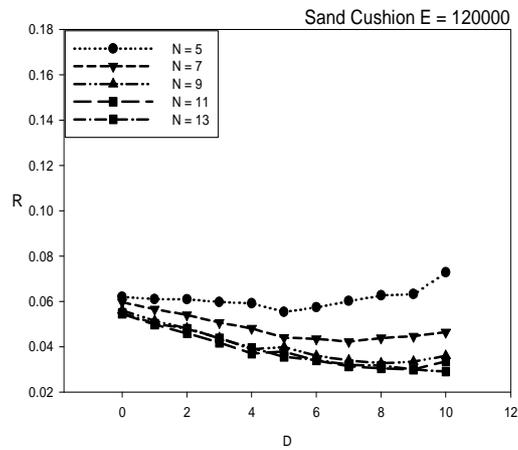


Fig. 4.70 R 과 D (with $E=1.2e+5$)

Fig. 4.67을 살펴보면 Sand Cushion층이 깊어질수록 평균 침하율(R)의 값이 위로 올라가게 되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 4.68을 보면 Sand Cushion층이 깊어질수록 평균 침하율의 값이 낮아지는 것을 보게 된다.

즉 Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)의 증대로 인해 Sand Cushion층 자체가 raft와 같은 역할을 해줌으로서 전반적인 구조물의 침하량을 줄이는데 기여하기 때문이다.

4.3.2. 부등 침하율(dR)과 파일개수(N)와의 관계

평균 침하율(dR)과 파일개수(N)와의 관계에서는 매우 특이한 현상을 발견할 수 있었다. 그럼 부등 침하율(R)과 파일개수(N)와의 관계에서는 어떤 결과가 나왔는지 살펴보자.

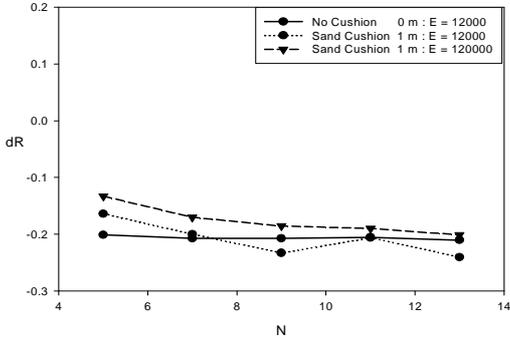


Fig. 4.71 dR 과 N in 1m(with $E=1.2e+5$)

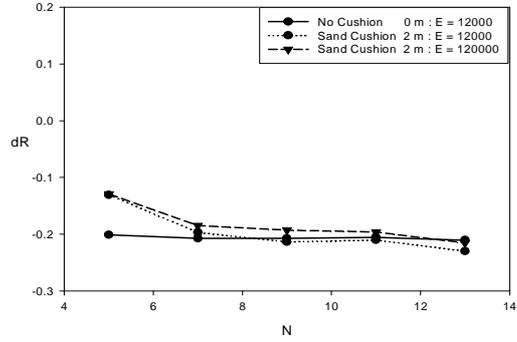


Fig. 4.72 dR 과 N in 2m(with $E=1.2e+5$)

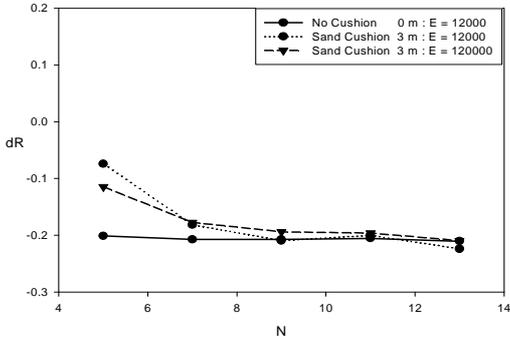


Fig. 4.73 dR 과 N in 3m(with $E=1.2e+5$)

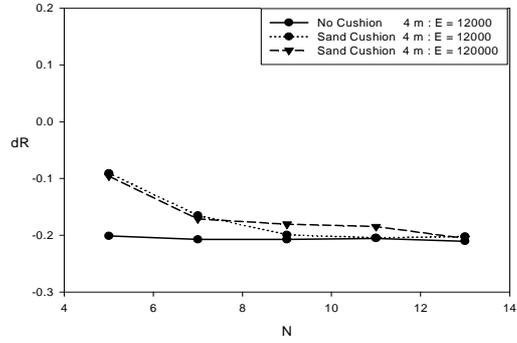


Fig. 4.74 dR 과 N in 4m(with $E=1.2e+5$)

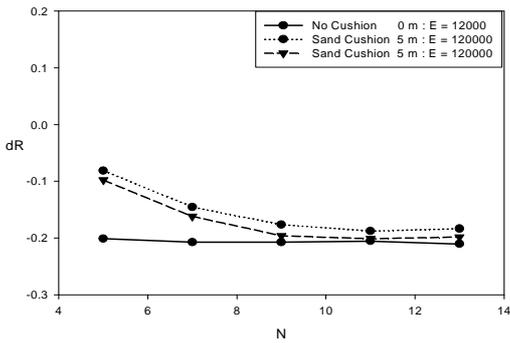


Fig. 4.75 dR 과 N in 5m(with $E=1.2e+5$)

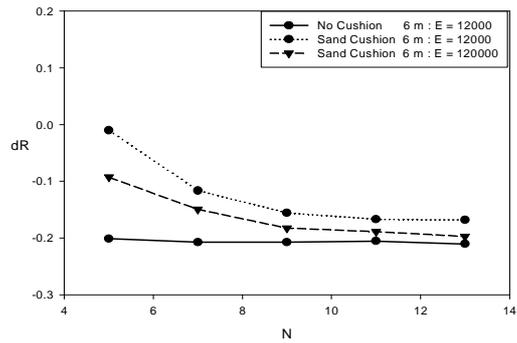


Fig. 4.76 dR 과 N in 6m(with $E=1.2e+5$)

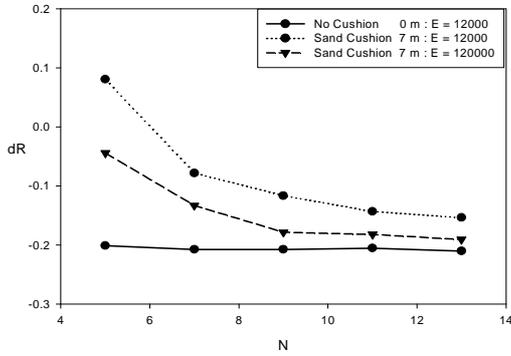


Fig. 4.77 dR 과 N in 7m(with $E=1.2e+5$)

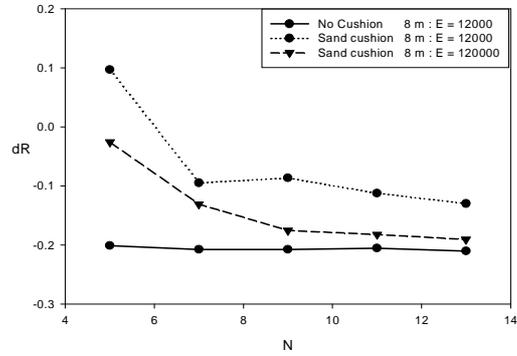


Fig. 4.78 dR 과 N in 8m(with $E=1.2e+5$)

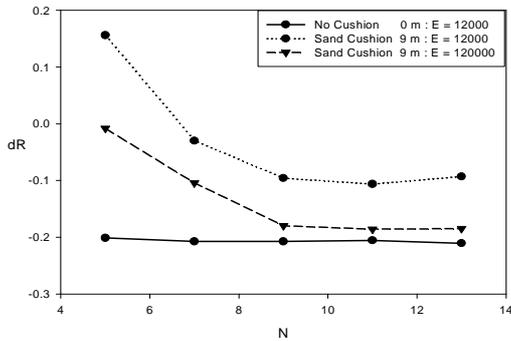


Fig. 4.79 dR 과 N in 9m(with $E=1.2e+5$)

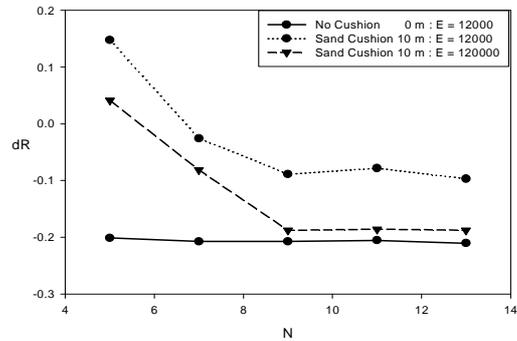


Fig. 4.80 dR 과 N in 10m(with $E=1.2e+5$)

Fig. 4.71 ~Fig. 4.80을 보고 부등 침하율(dR)에 대한 파일개수(N)의 관계를 깊이(D)별로 살펴보자. Sand Cushion층의 깊이(D)가 깊어짐에 따라 Sand Cushion층의 모래의 탄성계수(E)를 증대시키지 않은 Piled Raft 기초와 모래의 탄성계수(E)를 증대 시킨 Piled Raft 기초의 부등 침하율(dR) 모두 Sand Cushion을 고려하지 않은 Piled Raft 기초보다 좋은 값을 얻었다.

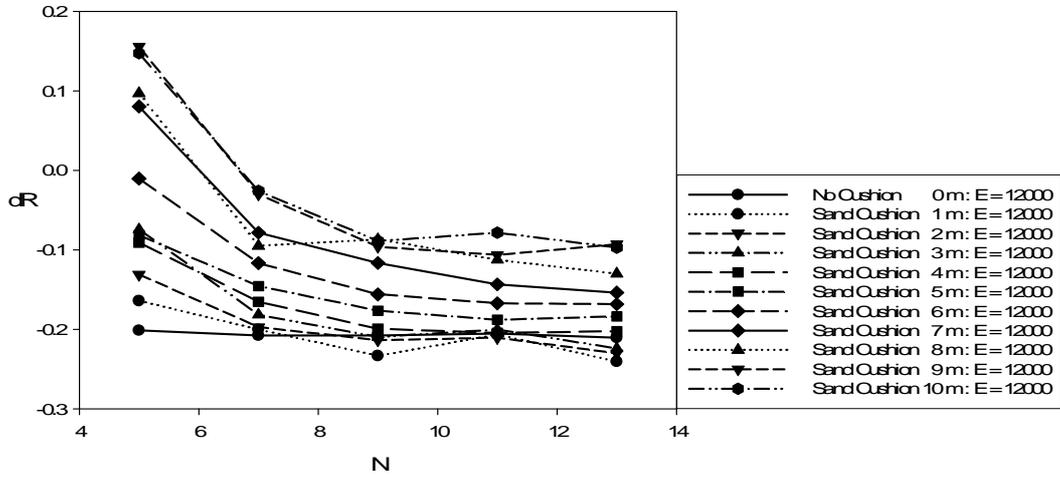


Fig. 4.81 dR 과 N (with $E = 12000$)

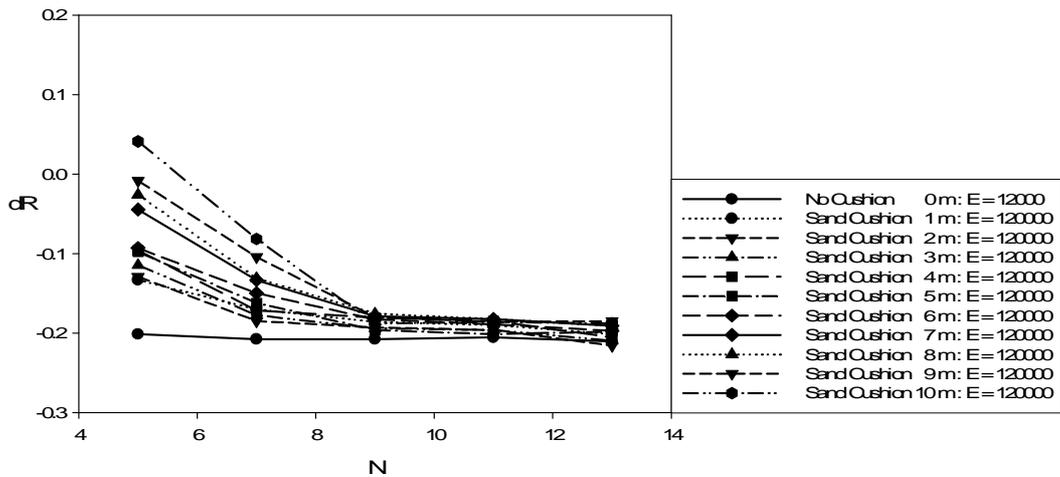


Fig. 4.82 dR 과 N (with $E = 120000$)

하지만 Fig. 4.81과 Fig. 4.82를 보면 앞에서 분석하였던 파일분포도 (B_g/B_r)이 0.976, 0.786일 때와 다르게 Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)를 10배 증대시킨 Piled Raft 기초의 부등 침하율(dR)이 더 좋지 않게 나왔다. 이것은 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초에서도 부등 침하율

(dR)이 (-)값을 가진 경우였고, 또 그 절대값이 파일분포도(B_g/B_r)가 0.976, 0.786일 때보다 큰 값을 가지고 있기 때문이다. 즉 raft 중심부가 위로 볼록한 형태로써 raft 중심부의 과도한 파일보강으로 인한 현상인데 Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)를 10배 증대함으로써 모래의 강성을 높이게 되면 이 Sand Cushion층이 raft와 같은 역할을 하게 된다는 것이다. 따라서 그 Sand Cushion층의 깊이가 낮은 경우에는 Sand Cushion층이 유연성을 가지는 raft 역할을 하게 되어 위로 볼록한 형상을 띄게 되고 깊이가 깊어짐에 따라 Sand Cushion층이 두꺼워지면 Sand Cushion층 전체가 raft의 역할을 하게 되어 raft 중심부와 외측의 침하량차이가 현저히 줄어들게 되어 부등 침하율(dR)이 좋아지는 것이다.

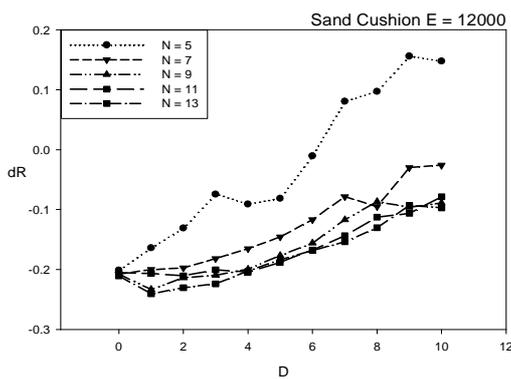


Fig. 4.83 dR 과 D (with $E=1.2e+4$)

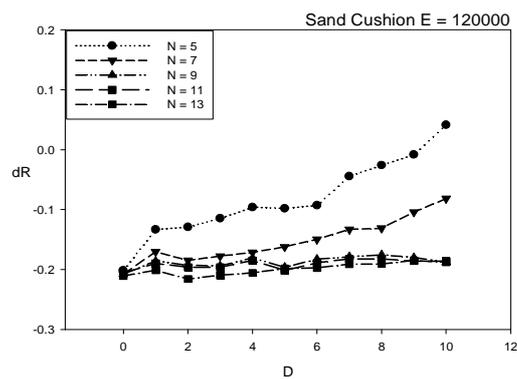


Fig. 4.84 dR 과 D (with $E=1.2e+5$)

따라서 파일분포도(B_g/B_r)의 값이 0.595와 같은 경우에는 Sand Cushion층 모래의 탄성계수(E)의 증대로 인한 강성의 증가는 오히려 부등 침하율(dR)을 떨어뜨리는 요인으로 작용하게 된다. 이와 같은 경우에는 raft에 대한 pile의 분포도(B_g/B_r)를 높이고 pile개수(N)를 증가시키는 것이 부등 침하율(dR)을 낮추는 방법이다.

5. 결 론

본 논문에서는 국내에 아직 익숙하지 않은 Sand Cushion 층을 piled raft 기초에 접목함으로써 국내 지반조건하에서 어떠한 침하율 변화가 보이는지 Plaxis라는 2차원 지반해석 프로그램을 이용하여 그 경향을 살펴보았다. 그리고 아래와 같은 몇 가지 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

- Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft기초에서는 파일개수(N)가 증가하면 평균 침하율(R)은 줄어들지만 부등 침하율(dR)은 거의 변화를 보이지 않았다. 그리고 raft에 대한 pile의 비율인 파일분포도(B_g/B_r)가 클수록 raft는 아래로 볼록한 형상을 가지며 파일분포도(B_g/B_r)가 작을수록 위로 볼록한 형상을 가졌다. 즉 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft 기초의 평균 침하율(R)은 파일개수(N)의 증감과 파일분포도(B_g/B_r)에 모두 영향을 받지만, 부등침하율(dR)은 파일개수(N)의 증감보다는 파일분포도(B_g/B_r)에 더 큰 영향을 받게 된다. 그리고 부등 침하율(dR)의 값으로 raft 침하형상을 판단할 수 있다.
- Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초에서는 Sand Cushion층의 깊이(D)가 깊어짐에 따라 평균 침하율(R)은 증가하지만 부등 침하율(dR)은 감소하는 경향을 보였다. 그리고 Sand Cushion층의 깊이(D)가 깊어지고 파일분포도(B_g/B_r)가 커질수록 파일개수(N)가 적은 부분은 평균 침하율(R)값 변화가 크게 일어나고, 그로 인해 부등침하율(dR)은 증가하는 경향을 보여주었다. 전체적으로 평균 침하율(R)은 파일개수(N), Sand Cushion층의 깊이(D) 그리고 파일분포도(B_g/B_r)의 증감에 따라 큰 변화폭을 보이지만, 부등 침하율(dR)은 Sand Cushion층의 깊이(D)와 파일분포도(B_g/B_r)의 증감보다는 파일개수(N)의 증감에 큰 변화폭을 보여주었

다.

- Sand Cushion층을 고려한 Piled Raft 기초의 Sand Cushion층의 모래의 탄성계수(E)를 10배 증대시킨 경우에는 파일개수(N)가 많은 경우, 특히 파일개수가 9, 11, 13일 때에는 Sand Cushion층을 고려하지 않은 Piled Raft기초보다 평균 침하율(R)과 부등 침하율(dR)이 좋게 나타나는 것을 확인하였다. 단 파일분포도(B_g/B_r)가 0.595일 때에는 깊이가 깊어짐에 따라 평균 침하율(R)이 감소하는 경향을 보였지만 부등 침하율(dR)은 그렇지 못했다. 전반적인 경향을 살펴보면 파일분포도(B_g/B_r)의 값이 작을수록 평균 침하율(R)이 좋은 값을 보여준 반면 부등 침하율(dR)은 파일분포도(B_g/B_r)의 값이 클 때 좋은 결과 값을 보여주었다.
- 종합적으로 살펴볼 때 Sand Cushion층을 접목한 Piled Raft 기초는 기존의 Piled Raft 기초에서 파일개수(N)로 조절할 수 없었던 부등 침하율(dR)을 조절 가능한 요소로 사용할 수 있게 해주었다. 그리고 기초위에 올라갈 구조물의 특성이나 기초가 놓이게 될 지반의 형태를 고려할 때 Sand Cushion층의 탄성계수(E)의 증대와 파일분포도(B_g/B_r) 그리고 파일분포도(B_g/B_r)에서의 파일개수(N)로 Raft의 침하형태와 기초의 침하량의 조절이 가능하다는 기대를 갖게 해주었다.

본 논문은 단순히 raft에 대한 pile의 분포도(B_g/B_r)와 Sand Cushion의 깊이(D), 그리고 파일개수(N)로 침하량(R 과 dR)에 대한 접근을 시도한 경우이다. 하지만 그 외의 파일의 길이, 파일의 두께, 파일의 재질, 파일의 형상, Raft의 두께, Raft의 재질, raft의 형상, raft에 대한 pile의 위치, 그리고 여러 지반 조건과 하중조건 등 많은 인자들을 이용한 수치해석과 더불어 실내모형 Test를 통해 Pile Raft 기초와 Sand Cushion층에 대한 상호 복합적인 관계들을 규명하는 연구가 추후 계속 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 권오균, 이승현, 오세봉, 임종석, 이활 (2002), "Piled Raft 거동특성에 관한 실험적 연구" 한국지반공학회, 기초 기술 학술 발표회, pp 79~89.
- [2] 권오균, 이활, 김진복, 이승현, 오세봉 (2002), "모형실험을 이용한 사질토지반에서의 Piled Raft 거동특성에 대한 연구" 한국지반공학회, 논문집, pp 358~365.
- [3] 김경남, 이수형, 정충기, 이해성 (1999), "Piled Raft 기초의 부등침하 최소화를 위한 최적말뚝배치" 대한토목학회 논문집, 제19권 제4호, pp 831~839.
- [4] 김홍택, 박시삼, 강인규, 최효범 (2002), "Piled Raft 기초 적용사례 분석", 한국지반공학회, 봄 학술발표회 논문집, pp 597~604.
- [5] 김홍택, 강인규, 박정주, 박순규 (2002), "사질토 지반에서 연직하중을 받는 Piled Raft 기초시스템의 하중분담특성에 관한 실내모형실험 연구", 대한토목학회 논문집, 제22권 제2호, pp 111~120.
- [6] Abdrabbo, F. M., Abouseeda, H. M. and Gaaver, K. E. (2004). "Performance of raft with pile-settlement reducers." Int. Conf. Future Vision and Challenges for Urban Development., Cairo, Egypt, pp 1-18
- [7] Burland, J. B. (1995). "Piles as settlement reducers." Pro. 19th Nat., Italian Geotech. Conf., Pavia Italy, pp 21-34.
- [8] Cao, X. D., Wong, I. H. and Chang, M. F. (2004). "Behavior of model

- rafts resting on pile-reinforced sand." *J. Geotech. and Geoenv. Engng.*, ASCE, Vol. 130(2), pp 129-138.
- [9] Clancy, P. and Randolph, M. F. (1993). "An approximate analysis procedure for piled raft foundations." *Int. J. Numer. and Analy. Methods in Geomech.*, London, 17(12), pp 849-869.
- [10] Davis, E. H and Poulos, G. H. (1992). "The analysis of piled raft systems." *Aust. Geomech. J.*, 2, pp 21-27.
- [11] Parakosa, W. A. and Kulhawy, F. H. (2001a). "Piled raft foundation design." *J. Geotech. and Geoenv. Engng.*, ASCE, Vol. 127(1), pp 17-24.
- [12] Poulos, H. G. (1994). "An approximate numerical analysis of piled raft interaction." *Int. J. Numer. and Analy. Methods in Geomech.*, London, 18(2), pp 73-92.
- [13] Poulos, H. G., Small, J. C., Ta, L. D., Sinha, J., and Chen, L. (1997). "Comparison of some methods for analysis of piled raft." *Proc., 14th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng.*, Germany, pp 1119-1124.
- [14] Shahu, J. T., Madhav, M. R. and Hayash, S. (2001). "Analysis of soft ground granular pile-granular mat system." *Computers and Geotechnics.* 27(1), pp 45-62.
- [15] Sommer, H., Wittman, P., and Ripper, P. (1985). "Piled raft foundation of a tail building in Frankfurt Clay." *Proc. 11th Conf. Soil Mech. Found. Engng.* San Francisco, 4, pp 2253-2257.

- [16] Ta, L. D. and Small, J. D. (1996). "Analysis of piled raft system in layered soil." *Int. J. Numer. and Analy. Methods in Geomech.*, London, 20(1), pp 57-72.
- [17] Vermeer, P. A. and Brinkgreve, R. B. J. (1995). "PLAXIS user's manual." Balkema, Rotterdam, The Netherlands.