

## 느슨한 모래지반에서의 말뚝지지 전면기초에 대한 실험적 연구 An Experimental Study of Piled Raft Footing on Loose Sands

권 오균<sup>1)</sup>, Oh-Kyun Kwon, 이 활<sup>2)</sup>, Whoal Lee, 이 승현<sup>3)</sup>, Seung-Hyun Lee, 오 세봉<sup>4)</sup>, Se-boong Oh, 장 학성<sup>5)</sup>, Hak-Sung Jang

<sup>1)</sup>계명대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Keimyung Univ

<sup>2)</sup>계명대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Keimyung Univ

<sup>3)</sup>선문대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, SunMoon Univ.

<sup>4)</sup>영남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

<sup>5)</sup>(주)유신코퍼레이션, Ph. D., P.E., Yooshin Eng. Co.

**Abstract :** In this paper the model tests have been conducted and the results are compared with those by the theoretical methods to study the behaviors of the piled raft. The size of model box is  $2.2m \times 2m \times 2m$ . The raft is made of rigid steel plate and piles made of steel pipes. Generally the bearing capacity of group piles is designed with only the pile capacities, and the bearing capacity of raft is ignored. But the uncertainty of pile-raft-soil interaction leads to conservative design ignoring the bearing effects of raft. In the case of considering the bearing capacity of raft, the simple sum of bearing capacity of raft and that of each pile cannot be the bearing capacity of piled raft. Because the pile-raft-soil interaction affects the behavior of piled raft. Thus the effects of pile-raft-soil interaction are very important in the optimal design. In this paper, the behaviors of piled raft are studied through model tests of  $2 \times 2$ ,  $2 \times 3$ , and  $3 \times 3$  pile groups. The spacing between piles is changed in the model tests. And the behaviors of free standing and piled raft are also studied.

### 1. 서 론

일반적으로 무리말뚝을 설계함에 있어 말뚝만의 지지력을 고려하여 무리말뚝의 지지력을 계산하고 있으나, 실제 시공 상에 있어서는 무리말뚝만으로 시공되는 것이 아니라 말뚝기초 상부에 래프트가 얹은 기초형식으로 시공이 이루어지고 있다. 따라서, 무리말뚝의 지지력 설계시 이러한 얹은 기초 형식의 raft의 지지력을 무시할 경우에는 실제 지지력을 과소평가할 수 있다. 또한 상부기초에 의한 지지효과를 고려하는 경우에 있어서 상부기초를 얹은 기초로서의 지지력과 무리말뚝의 지지력의 산술적인 합으로만 전체적인 지지력을 평가하는 데 무리가 있을 수 있으며(Akinmusuru, 1980 ; Prakash & Sharma, 1989), 이는 상부기초인 래프트와 말뚝, 그리고 지반간에 상호 간섭적인 거동이 발생하기 때문이나 현재까지 상호간의 거동특성이나 통합적 지지력 등은 정확히 파악이 되지 않고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 무리말뚝에 미치는 래프트의 영향을 평가하기 위하여 래프트가 지반에 접촉하지 않은 비접촉 무리말뚝 상태와 래프트가 지반에 접촉한 말뚝지지 전면기초 상태로 나누어 실험을 실시하였다. 또한, 무리말뚝에서의 말뚝의 수량과 말뚝간격이 지지력에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2

×2, 2×3, 3×3 형태로 말뚝을 배열하여 실험을 실시하였다.

## 2. 말뚝지지 전면기초 거동에 영향을 미치는 요소

기본적으로 말뚝지지 전면기초를 구성하는 무리말뚝은 많은 수의 말뚝과 상부구조물인 cap으로 이루어져 있기 때문에 구조물의 거동에 영향을 미치는 요소들이 많아 구조물의 지지거동 예측에 어려움이 많다. 그림 1은 무리말뚝의 거동특성에 영향을 미치는 요소(Katzenbach, Arslan and Moorman, 2000)를 크게 4가지로 분류하여 나타낸 것으로 ① 지반과 말뚝간의 상호작용, ② 지반과 래프트의 상호작용, ③ 말뚝과 말뚝간의 상호작용, ④ 말뚝과 래프트의 상호작용 등으로 구분하고 있다. 이외에도 Phung(1993), 권 등(2002) Liu(1985)등이 무리말뚝의 거동에 영향을 미치는 여러 가지 변수들에 대하여 연구한 바 있다.

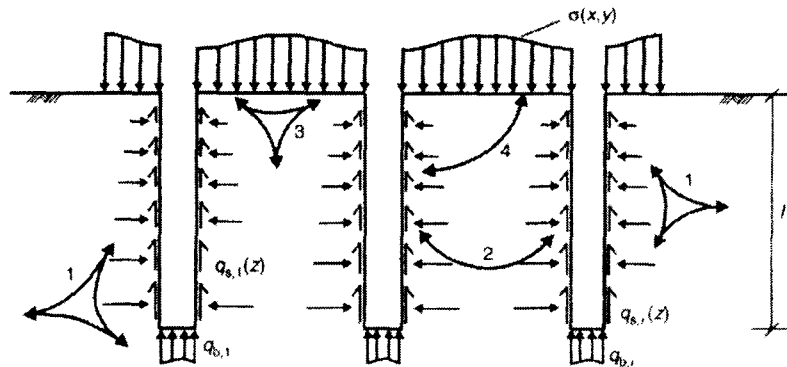


그림 1. 무리말뚝거동에 대한 영향요소(Katzenbach et al, 2000)

## 3. 모형 실험

### 3.1 모형 말뚝 및 raft

본 실험에 사용된 모형토조의 크기는 가로×세로×높이가  $2.2m \times 2m \times 2m$ 이며, 강재를 사용하여 제작하였다. 모형실험에 사용된 말뚝의 최대 갯수는 9개이고, 말뚝의 길이는  $1000mm$ 이다. 본 말뚝의 재질은 강재이며, 직경은  $40mm$ , 두께  $3mm$ 로 제작되었다. 또한 모형실험에 사용된 모든 래프트가 강성기초로서 거동할 수 있도록 Hain & Lee(1978)가 제안한 래프트 강성계산식을 근거로 최대크기의 래프트에서도 강성기초로서 거동할 수 있도록 두께  $16mm$ 로 제작하였다. 모형실험에 사용된 래프트의 크기는 다음의 표 1과 같다.

표 1. 말뚝간격과 배열에 따른 래프트(raft) 크기 (단위 : mm)

raft 조건 \ pile 간격	3 d	4 d	5 d	6 d
2×2	220×220	260×260	300×300	340×340
2×3	220×340	260×420	300×500	340×580
3×3	340×340	420×420	500×500	580×580

일반적으로 래프트와 지반과의 접지압, 말뚝 상호간의 침하 등은 래프트의 강성에 영향을 받는다. 본 실험에서는 강성기초를 사용하며 이에 적합한 래프트의 두께는 식 (1)을 이용한 연성지수 ( $K_r$ )를 고려

하여 결정하였으며, 본 실험에 사용된 각 래프트의 연성지수는 표 2 에 나타나 있다. 일반적으로 식 (1) 에 의한 강성지수가 0.01 보다 작으면 ‘매우 연성’으로 볼 수 있으며, 강성지수가 10 보다 크면 강성이 큰 재질로 분류할 수 있다. [표 3.2]에서 보는 바와 같이 본 실험에 사용된 모든 래프트는 강성기초로 간주할 수 있다.

$$K_r = \frac{4 \cdot E_r \cdot T_r \cdot B_r \cdot (1 - \nu^2)}{3 \cdot \pi \cdot E_s \cdot L_r^4} \quad (1)$$

여기서,  $E_r$  : raft 탄성계수       $T_r$  : raft 두께       $B_r$  : raft 폭  
 $L_r$  : raft 길이       $\nu$  : 지반의 포아송비       $E_s$  : 지반의 탄성계수

표 2. 래프트의 크기별 강성지수

래프트 조건 \ pile 간격	3 d	4 d	5 d	6 d
2×2	11200	6800	4400	3000
2×3	3000	1600	1000	600
3×3	2000	1000	600	400

### 3.2 모형지반

모형실험의 지반을 조성하기 위해 사용된 모래시료는 No. 10번 체를 통과한 시료만을 사용하였으며 세립분의 영향을 최소화하기 위해 물로 세척을 한 후 자연 건조시켰다. 시료의 물리적 성질은 통일분류법 상 SP로 분류되었으며 비중은 2.53, 균등계수( $C_u$ )는 7.28, 곡률계수( $C_c$ )는 3.05로 나타났다. 모형시료의 최대건조단위중량은  $1.64 \text{ tonf/m}^3$ , 최소건조단위중량은  $1.38 \text{ tonf/m}^3$  이었다. 모형지반은 최대한 지표면 가까이에서 서서히 포설하여 느슨한 지반을 조성하였으며 조성된 지반의 평균상대밀도는 약 28%이었다.

### 3.3 실험방법

본 실험에서는 모형지반을 조성한 후 모형말뚝을 그림 2 에 나타나 있는 것과 같이 말뚝을 말뚝유도

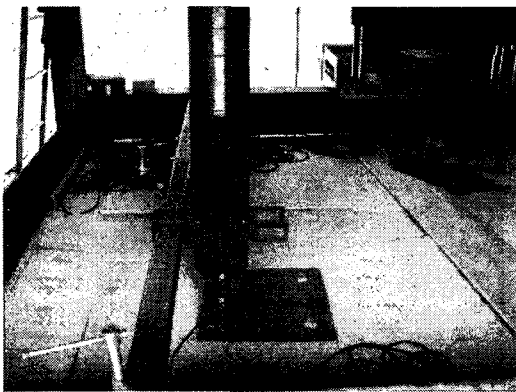


그림 2. 말뚝향타모습

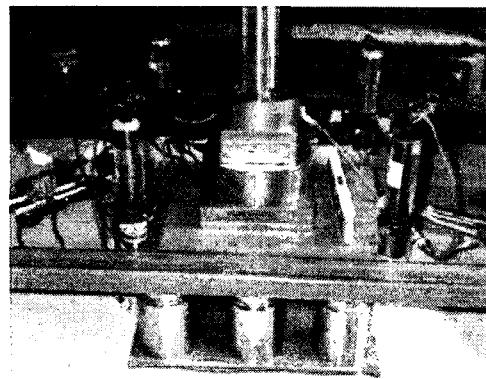


그림 3. 하중재하 모습

관에 삽입한 후 무게 25 kgf의 추를 말뚝두부에서 높이 50 cm를 유지하면서 모형말뚝을 향타하여 지반에 설치하였으며 말뚝과 래프트는 나사로서 체결하여 일체의 구조물로서 거동할 수 있도록 하였다. 말뚝 두부와 선단에는 2 tonf과 3 tonf 용량의 소형 로드셀을 부착하여 각 말뚝에 발생하는 주변마찰하중과 선단하중을 측정하였으며, 말뚝지지 전면기초에 작용하는 전체 하중은 20 tonf 용량의 로드셀을 사용하여 측정하였다. 변위는 그림 3 과 같이 raft의 4곳에 LVDT를 설치하여 측정하였으며, 하중재하는 0.5 mm/min의 일정한 속도로 재하하였다. 말뚝지지 전면기초에 작용하는 하중과 변위는 하중계와 변위계를 Data Logger (TDS602)에 연결하여 동시에 측정하였다.

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 말뚝배치

본 실험에서는 그림 4 와 그림 5 에 나타난 형태로 말뚝을 배열하였으며, 향타순서는 말뚝번호순서대로 향타를 실시하였다. 4.2장 이하의 실험결과분석에서는 말뚝의 위치에 따라 결과를 제시하였는데 말뚝위치에 따른 분류는 표 3 과 같다.

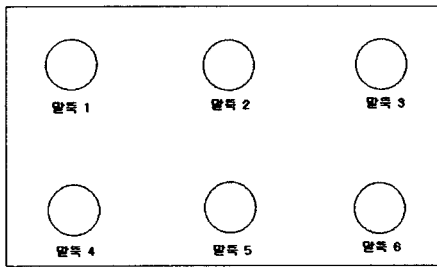


그림 4. 2×3 말뚝 배치도

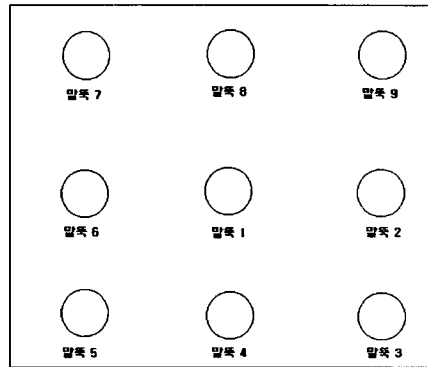


그림 5. 3×3 말뚝 배치도

표 3. 말뚝번호 분류

말뚝배치	결과	말뚝번호	말뚝배치	결과	말뚝번호
2-3	중앙	2, 5	3-3	중앙	1
	외곽 1	1, 4		면접촉부	2, 4, 6, 8
	외곽 2	3, 6		외곽부	3, 5, 7, 9

##### 4.2 항복하중 및 지지력

본 지반조건에 대한 실험결과에서 나타난 항복하중은 그림 6 과 같다. 모든 말뚝배열 조건에서 비접촉 무리말뚝보다는 말뚝지지 전면기초의 항복하중이 크게 나타났다. 이것은 단순한 무리말뚝만의 지지력으로 래프트가 존재하는 말뚝지지 전면기초의 지지력을 평가하는 경우에는 과소평가가 될 수 있다는 것을 나타내고 있는 것으로 판단되었다. 또한, 말뚝간격이 증가함에 따라 비접촉 무리말뚝은 항복하중이 감소하였으며, 말뚝지지 전면기초는 증가하는 경향을 나타내었는데 이것은 비접촉 무리말뚝은 균효율 감소 효과, 말뚝지지 전면기초는 래프트의 하중분담량 증가가 원인인 것으로 판단되었다. 반면에 지지력의 경우는 그림 7 에 나타난 바와 같이 말뚝간격 3d에서 가장 큰 지지력을 나타낸 후 말뚝간격 증가에

따라 감소하는 경향을 나타내고 있으며 말뚝지지 전면기초가 말뚝지지 전면기초보다는 항상 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

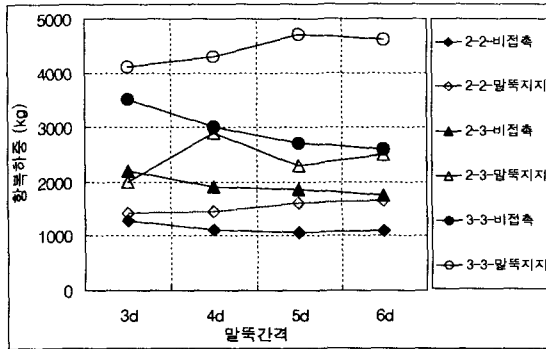


그림 6. 항복하중

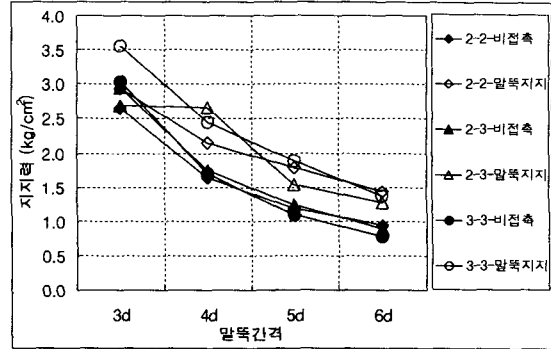


그림 7. 지지력

### 4.3 균효율

그림 8 에 제시된 균효율은 말뚝지지 전면기초 또는 비접촉 무리말뚝 조건에서 발생한 항복하중에서 말뚝만의 하중을 산정하여 단말뚝 조건에서의 항복하중을 기준으로 분석한 것이다. 비접촉 무리말뚝은 말뚝간격 3d와 4d 조건에서 100%를 약간 초과하는 균효율을 나타내지만 5d 이상의 말뚝간격에서는 100%이하의 균효율을 나타내고 있다. 반면에 말뚝지지 전면기초는 말뚝간격 증가에 따라 감소하고는 있지만 전체 말뚝간격에서 100%이상의 균효율을 나타내고 있어 말뚝지지 전면기초가 비접촉 무리말뚝보다 균효율이 우세한 것으로 나타났다. 말뚝간격이 증가함에 따라 균효율은 공통적으로 감소하는 모습을 나타내고 있으나 말뚝지지 전면기초가 비접촉 무리말뚝에 비해 감소경향이 더 작게 나타나고 있으며 이것은 raft의 영향 때문인 것으로 판단된다.

### 4.4 래프트 하중비율

그림 9 에 본 실험결과에 대한 래프트 하중비율을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 3d 말뚝간격에서는 12~14%정도의 하중분담율을 나타내지만, 말뚝간격이 증가함에 따라 래프트 하중분담비율이 증가하였으며, 말뚝간격 6d 에서는 최대 25%까지 래프트가 하중을 분담하는 것으로 나타났다. 또한, 말뚝수에 따른 래프트 하중분담율은 말뚝수가 많을수록 래프트 하중분담율은 증가하는 것으로 나타났다. 각 말뚝배열조건에 따른 래프트의 하중분담율을 말뚝간격에 대한 수식으로 나타내면 2×2 말뚝배열은 raft 하중분담율=1.12×말뚝간격+11.05, 2×3 말뚝배열은 raft 하중분담율=2.87×말뚝간격+8.6, 3×3 말뚝배열은 raft 하중분담율=3.75×말뚝간격+8.1로써 나타낼 수 있었다.

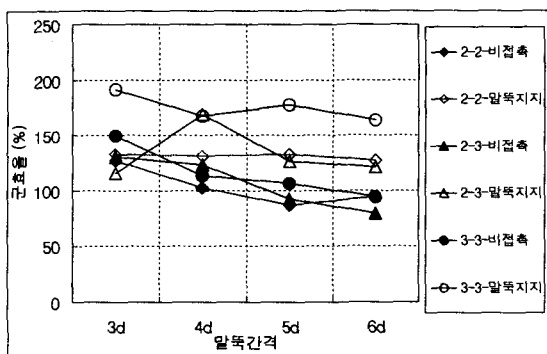


그림 8. 균효율

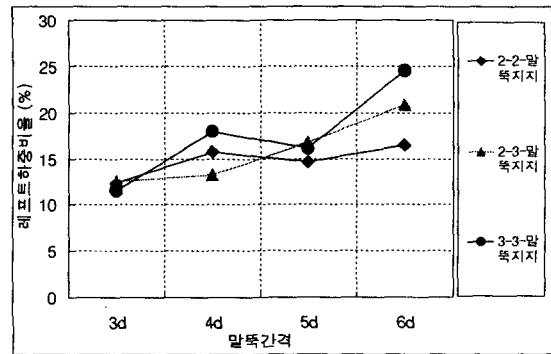


그림 9. 래프트 하중비율

### 4.5 주면마찰 효율

무리말뚝의 주면마찰효율은 그림 10 ~ 그림 12 에 나타내었다. 동일한 말뚝간격에서 말뚝의 수량이 증가할수록 주면마찰효율은 증가하였으나, 말뚝간격에 따른 경향은 말뚝간격이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 모든 말뚝배열조건에서 말뚝지지 전면기초의 말뚝의 주면마찰효율은 비접촉 무리말뚝보다 크게 나타났으며, 3×3 배열상태의 무리말뚝은 중앙부분에 위치한 말뚝이 모서리 부분에 위치한 말뚝에 비해 우세한 주면마찰 효율을 나타내었다. 또한, 말뚝간격 3d 에서는 말뚝의 위치에 따른 주면마찰 효율의 차이가 크게 발생하였으나, 말뚝간격이 증가할수록 말뚝의 위치에 따른 주면마찰 효율은 차이는 크게 감소하였다. 이것은 말뚝간격이 좁게 조성된 무리말뚝 기초에서는 말뚝의 관입에 따른 지반의 밀실화 현상(densification effect)으로 말뚝 상호간의 영향이 증대되며 이로인해 중앙부분에 위치한 말뚝들과 주변부분에 위치한 말뚝들의 주면마찰효율이 다르게 나타날 수 있음을 보여주고 있다고 판단된다.

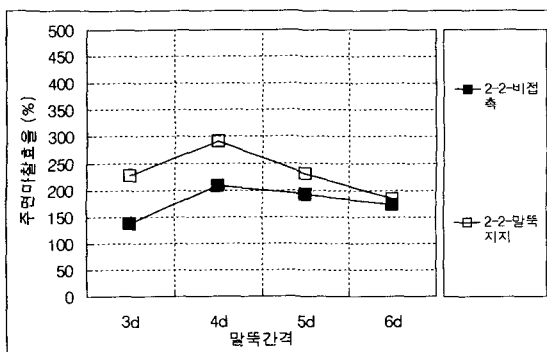


그림 10. 2×2 주면마찰효율

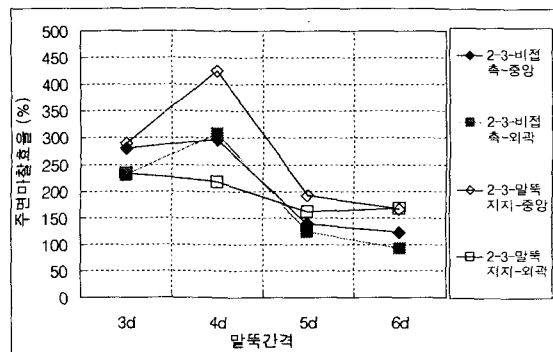


그림 11. 2×3 주면마찰효율

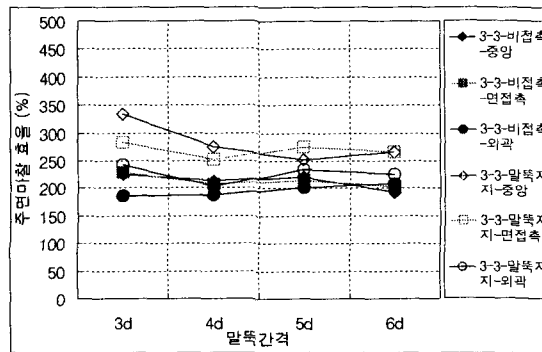


그림 12. 3×3 주면마찰효율

### 4.6 선단지지 효율

선단지지 효율은 그림 13 ~ 그림 15 에 나타난 바와 같이 말뚝수가 증가함에 따라 선단효율도 증가하였으며, 동일한 말뚝배열조건에서는 말뚝간격이 증가함에 따라 선단지지 효율은 감소하는 것으로 나타났다. 비접촉 무리말뚝은 모형실험 대부분의 경우에서 100%이하의 선단지지 효율을 나타내었으며 말뚝지지 전면기초는 약간의 차이는 있으나 100%이상의 선단지지 효율을 공통적으로 나타내어 래프트(raft)의 영향이 말뚝의 선단지지력 증가에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 말뚝지지 전면기초에서 3×3 배열상태의 무리말뚝에서 말뚝간격이 3d 인 경우에 중앙부분 말뚝의 선단지지 효율은 235%이며, 외곽부분은 134%의 선단지지 효율을 나타내고 있으나, 말뚝간격이 6d 인 경우는 각각 168%, 120%로 감소하며, 주로 중앙부분 말뚝의 선단지지 효율이 크게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 비접촉 무리말뚝의 경우는 선단지지 효율의 증가현상이 거의 나타나지 않았으며, 말뚝간격 증가에 따른 경향도 미약

하게 발생했다. 반면에, 말뚝지지 전면기초는 말뚝의 수량이 증가할수록 선단지지 효율이 증가하는 경향이 나타나며, 무리말뚝의 외곽부분보다는 중앙부분에서 우세하게 증가하는 것을 나타내고 있다. 이것은 말뚝지지 전면기초는 래프트에 의한 구속압의 증가와 주변 말뚝간의 상호작용으로 인하여 중앙부분에서 말뚝의 선단효율이 증가한 것으로 판단된다.

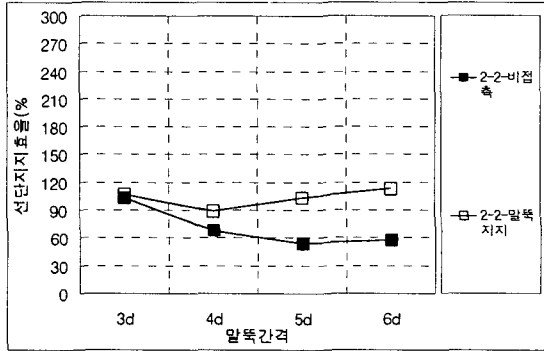


그림 13. 2×2 선단효율

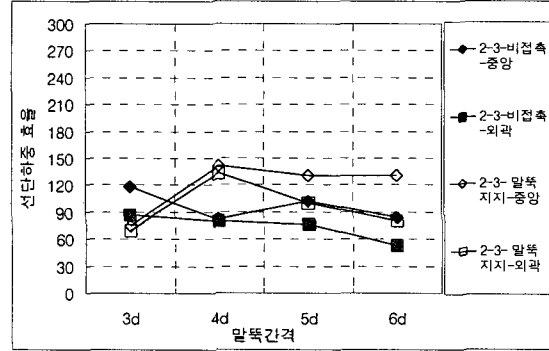


그림 14. 2×3 선단효율

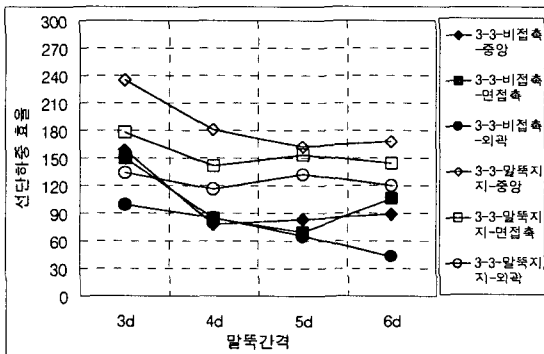


그림 15. 3×3 선단효율

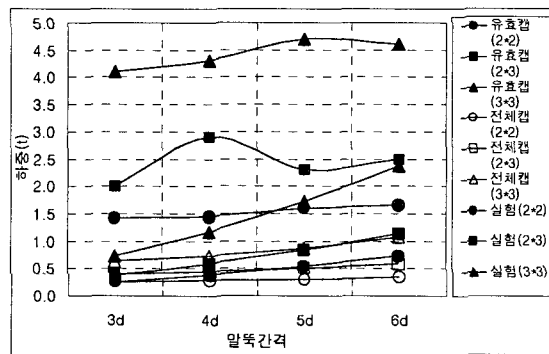


그림 16. 실험결과와 이론적 해석 비교

#### 4.7 실험결과와 이론적 해석 비교

그림 16은 Kishida 등(1965)이 제안한 이론식에 의한 결과와 실험에 의한 항복하중결과를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 실험값과 이론값에 의한 차이는 매우 크게 발생하고 있으며 말뚝간격이 작을수록 그 차이는 더 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 느슨한 지반조건에서 이론식에 의한 말뚝지지 전면기초의 지지력은 매우 신중하게 평가해야 하는 것으로 나타났다.

### 5. 결론

본 연구에서는 말뚝간격과 배열을 변화시켜 상대밀도 28%의 느슨한 조건의 모래지반에서 비접촉 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초에 대한 모형실험을 실시하여 래프트의 영향, 하중-침하 특성, 래프트의 하중분담비율, 항복하중, 균효율 등을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 항복하중은 말뚝지지 전면기초가 비접촉 무리말뚝보다 항상 크게 나타났으며, 말뚝간격이 증가할수록 그 차이는 더욱 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 말뚝지지 전면기초의 래프트가 기초내부에 존재하는 말뚝들의 균효율을 증가시켰기 때문이며, 비접촉 무리말뚝은 말뚝간격 증가에 따른 말뚝 균효율 감소가 원인인 것으로 판단된다. 기초 전체의 지지력은 말뚝간격이 3d 조건에서 최대값을 나타낸 후 말뚝간격이 증가함에 따라 감소하는 경향을 공통적으로 나타내었다.

2. 무리말뚝의 균효율은 말뚝간격 3d 에서 최대값을 나타낸 후 말뚝간격이 증가함에 따라 감소하는 경향을 공통적으로 나타내고 있다. 모든 조건에서 말뚝지지 전면기초가 비접촉 무리말뚝보다 큰 균효율을 나타내고 있어 래프트가 말뚝의 균효율을 증가시키는 역할을 하고 있음을 알 수 있으며, 또한, 말뚝의 수량이 많을수록 큰 균효율을 나타내고 있다.
3. 말뚝간격 3d 에서는 말뚝배열에 따른 래프트하중 분담율이 12~14%정도로 비슷한 수치를 나타내었으나 말뚝간격이 증가함에 따라 말뚝수량이 많은 3×3 배열의 래프트 하중분담율이 다른 말뚝배열에 비하여 크게 나타났다. 본 실험에서 말뚝배열 조건에 따른 raft의 하중분담율을 말뚝간격에 대한 수식으로 나타내면 2×2 말뚝배열은  $1.12 \times \text{말뚝간격} + 11.05$ , 2×3 말뚝배열은  $2.87 \times \text{말뚝간격} + 8.6$ , 3×3 말뚝배열은  $3.75 \times \text{말뚝간격} + 8.1$ 로 나타났다.
4. 주면마찰 효율은 말뚝간격이 증가함에 따라 전체조건에서 감소하는 경향을 공통적으로 나타내었으며 항상 말뚝지지 전면기초가 비접촉 무리말뚝에 비해 큰 값을 나타내었다. 말뚝지지 전면기초에서 말뚝위치에 따른 주면마찰 효율은 말뚝간격이 좁을수록 말뚝위치에 따른 효율차이가 크게 발생하나, 비접촉 무리말뚝은 말뚝간격에 따른 말뚝위치에 의한 효율차이가 거의 발생하지 않아 래프트가 말뚝의 주면마찰 효율에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.
5. 선단지지 효율은 말뚝지지 전면기초가 비접촉 무리말뚝에 비해 항상 큰 값을 나타내고 있어 래프트가 선단지지 효율에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 반면에 선단지지 효율은 주면마찰 효율보다는 상대적으로 작은 값들을 나타내고 있다.
6. 이론식에 의한 말뚝지지 전면기초에 대한 지지력 평가는 실제 지지력과는 매우 다르게 나타날 수 있어 매우 주의깊게 평가해야 하는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- 1) Akinmusuru. J. O, (1980), " Interaction of Piles and Cap in Piled Footings", ASCE, Vol. 106, No. GT 11, 1263-1268
- 2) Hain, S. J., and Lee, I. K. (1978), "The Analysis of Flexible Raft-Piles Systems" Geotechnique 28, No. 1, 65-83
- 3) Katzenbach. R, Arslan. U, and Moormann. C., (2000), "Piled Raft Foundation Project in Germany", Design applications of raft foundations, Thomas Telford, Inc
- 4) Kishida. H, and Meyerhof, G. G. (1965), "Bearing Capacity of Pile Groups Under Eccentric Loads in Sand", 6th ICSMFE, Vol 2, Montreal, 270-274
- 5) Liu, J. L., Yuan, Z. L., and Shang, K. P. (1985), "Cap-pile-soil Interaction of Bored Pile Groups", Proceeding of 11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 3, 20-27
- 6) Prakash. S. and Sharma. H. D, (1989), Pile Foundations In Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc
- 7) Phung Duc Long, (1993), "Footings With Settlement-Reducing Piles in Non-Cohesive Soil", Depratment of Geotechnical Engineering Chalmers University Of Technology S-412-96, Goteborg, Swedan.
- 8) 권오균, 이활, 김진복, 이승현, 오세봉, (2002), "모형실험을 이용한 사질토 지반에서의 Piled raft 거동 특성에 대한 연구", 2002년 가을학술발표회 논문집, (사) 한국지반공학회, pp. 358-365