

**Piled Raft 거동특성에 관한 실험적 연구**  
**An Experimental Study on Behavior for  
the Piled Raft**

1. 서론
2. 이론적 배경
3. 모형 실험
4. 실험결과 및 분석
5. 결론

---

**권오균**

**Oh-Kyun Kwon**

계명대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ.

**이승현**

**Seung-Hyun Lee**

선문대학교 토목공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, SunMoon Univ.

**오세봉**

**Se-boong Oh**

영남대학교 토목공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

**임종석**

**Jong-Seok Lim**

목포대학교 토목공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Mokpo National Univ.

**이 활**

**Whoal Lee**

계명대학교 토목공학과 박사과정

Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ.

# Piled Raft 거동특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Behavior for the Piled Raft

권오균<sup>1)</sup>, Oh-Kyun Kwon, 이승현<sup>2)</sup>, Seung-Hyun Lee, 오세봉<sup>3)</sup>, Se-boong Oh,  
임종석<sup>4)</sup>, Jong-Seok Lim, 이활<sup>5)</sup>, Whoal Lee,

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

<sup>2)</sup>선문대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, SunMoon Univ.

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

<sup>4)</sup>목포대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering,  
Mokpo National Univ.

<sup>5)</sup>계명대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ

**SYNOPSIS** : To analyze a bearing capacity for pile groups, a number of model tests have been done and theoretical methods studied. In the case of design of group pile bearing capacity is calculated with only pile capacity. But uncertainty of bearing capacity and behavior of foundation cap(raft) leads to conservative design ignoring bearing effects of foundation cap. In the case of considering bearing capacity of foundation cap, the simple sum of bearing capacity of foundation cap and pile groups cannot be the bearing capacity of total foundation system. Since cap-pile-soil interaction affects the behavior of pile groups. Thus, understanding cap-pile-soil interaction is very important in optimal design. In this paper, the piled raft behavior is studied through model tests of 2×2, 2×3, 3×3 pile group. Changes of behavior of pile group foundation by touching effects of foundation cap with soil are studied. Also changes of spacing between piles. Foundation cap is made of rigid steel plate and piles are made steel pipes. From this model tests, the changes of behavior changes of pile groups by touching effects of foundation cap with soil are studied

**Key words** : pile groups, cap(raft), cap-pile-soil interaction

### 1. 서론

일반적으로 무리말뚝을 설계함에 있어 말뚝만의 지지력을 고려하여 무리말뚝 지지력을 계산하고 있으나, 실제 시공상에 있어서는 무리말뚝기초 상부에 얽은 기초형식으로서 raft의 시공이 이루어지고 있

다. 따라서, 무리말뚝의 지지력설계 시 이러한 raft의 얇은 기초로서의 지지력을 무시하게 될 경우에는 실제 지지력을 과소평가할 수 있다. 또한 상부기초에 의한 지지효과를 고려하는 경우에 있어서 상부기초를 얇은기초로서의 지지력과 무리말뚝의 지지력의 산술적인 합으로만 전체적인 지지력을 평가하는데는 무리가 있을 수 있으며 이는 상부기초인 raft와 말뚝, 그리고 지반간에 상호간섭적인 거동이 발생하기 때문이나 현재까지 상호간의 거동특성이나 통합적 지지력등은 정확히 파악이 되지 않고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 무리말뚝에 미치는 raft의 영향을 평가하기 위하여 raft가 지반에 접촉하지 않은 free standing상태와 raft가 지반에 접촉한 piled raft상태로 나누어 실험을 실시하였다. 또한, 무리말뚝에서의 말뚝의 수량과 말뚝간격이 지지력에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2×2, 2×3, 3×3형태로 말뚝을 배열하여 실험을 실시하였다.

## 2. 이론적 배경

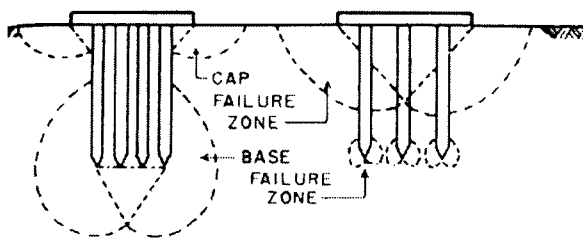
### 2.1 piled raft 지지력 산정방법

#### ① 유효캡 지지면적을 고려한 방법

Vesic(1969)은 캡에 의해 지지되는 효과는 무리말뚝영역의 바깥쪽에 존재하는 유효캡 영역의 일반전단파괴(general failure)에 의하여 발생한다고 하였으며 따라서, 무리말뚝영역 바깥의 유효캡영역에 대해서는 일반적인 얇은 기초 지지력공식을 사용하여 지지력을 추정할 수 있다고 하였다. 따라서, 유효캡을 고려한 piled raft 지지력은 유효캡에 의한 지지력과 말뚝블록의 극한 선단지지력을 합산하여 식 (1)과 같이 계산할 수 있다고 하였다.

$$Q_{ft} = Q_{u(ec)} + Q_{u(b)} \quad (1)$$

여기서 :  $Q_{u(ec)}$  : 유효캡의 극한지지력     $Q_{u(b)}$  : 블록의 극한선단지지력



(a) pier failure                      (b) individual failure

그림 1. 말뚝기초의 파괴영역

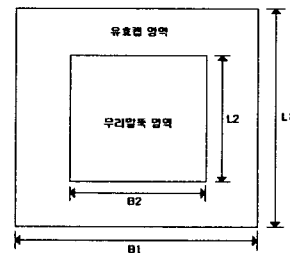


그림 2. 말뚝캡의 유효면적

② 전체캡 지지면적을 고려한 방법

전체캡 지지면적을 고려한 방법은 raft 전체면적이 얇은 기초로서 거동하며 말뚝은 선단지지력만 고려하여 전체 지지력을 계산하는 방법이다. 따라서, 전체캡 지지면적을 고려한 방법은 말뚝캡의 극한지지력과 말뚝선단지지력의 합으로서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{ft} = Q_{u(c)} + n \cdot Q_{p(s)} \tag{2}$$

여기서 :  $Q_{u(c)}$  : 전체캡의 극한지지력  $n \cdot Q_{p(s)}$  : 개별 말뚝의 선단지지력의 합

## 2.2 등가 레프트 해석법과 등가 피어해석법

① 등가 레프트(equivalent raft) 해석법

등가 레프트(piled raft)방법은 말뚝과 raft의 상호작용을 블록형태로 가정하여 말뚝과 raft가 하나의 raft 구조물처럼 거동한다고 생각하고 piled raft의 거동을 해석하는 방법이다. piled raft가 선단지지말뚝 형태로서 거동할 경우는 선단부분, 또는 마찰말뚝형태로서 거동할 경우는 말뚝길이의 2/3 지점에 가상의 raft가 존재한다고 가정하며, 가정한 등가 레프트의 침하량으로부터 piled raft의 침하량을 계산한다. piled raft의 침하량은 식 (3)과 같이 계산한다.

$$w_{aug} = w_{raft} + \Delta w \tag{3}$$

여기서,  $w_{raft}$  : 등가 레프트 침하량  $\Delta w$  : 등가 레프트 윗부분 말뚝의 침하량

② 등가 피어(equivalent pier) 해석법

등가 피어해석법은 무리말뚝이 관입된 부분의 지반을 하나의 pier로 가정하여 횡방향으로 탄성상수가 일정한 등방의 보강토로 보고 계산하는 방법이다. 등가 피어의 지름은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{eg} = 1.13 \cdot \sqrt{A_g} \tag{4}$$

여기서,  $A_g$  : 무리말뚝의 면적

### 3. 모형 실험

#### 3.1 모형 말뚝 및 raft

본 실험에 사용된 토조는 가로×세로×높이=2.2×2×4(m)로서 제작되었다. 사용된 말뚝의 개수는 총 9개이며 말뚝 1본당 1200mm 길이로 제작하였다. 본 말뚝의 재질은 강철로 제작되었으며 직경은 40mm, 두께 3mm로 제작되었다. 또한, raft로서는 실험에 사용된 모든 raft가 강성기초로서 거동할 수 있도록 Hain & Lee(1978)이 제안한 raft 강성계산식(식 (5))을 근거로 최대크기의 raft에서도 강성기초로 거동할 수 있는 두께 16mm로 제작하였다. 사용된 raft의 크기는 표 1 과 같다.

표 1. 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

$$K_r = \frac{4 \cdot E_r \cdot T_r \cdot B_r \cdot (1 - \nu^2)}{3 \cdot \pi \cdot E_s \cdot E_s \cdot L_r^4} \quad (5)$$

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. raft의 크기별 강성비교 ( $K_r$  : 0.01 very flexible,  $K_r$  : 10 very stiff)

raft 조건 \ pile 간격	3 d	4 d	5 d	6 d
2×2	4689.7	2841.2	1849.5	1270.5
2×3	1270.5	674.0	399.5	255.9
3×3	822.1	417.2	239.7	150.0

### 3.2 모형지반

본 실험지반조성에 사용된 모래시료는 10번 체를 통과한 시료를 사용하였으며 세립분의 영향을 최소화하기 위해 물로 세척을 한 후 자연 건조시켰다. 시료의 물리적 성질은 통일분류법상 SP로 분류되었으며 비중은 2.53, 균등계수(Cu)=7.28, 곡률계수(Cc)=3.05로 나타났다. 대상시료의 최대건조단위중량은 1.64( $t/m^3$ ), 최소건조단위중량은 1.38( $t/m^3$ )이었다. 모형지반은 20cm두께로 층다짐을 실시하여 균질한 지반을 조성하였으며 평균상대밀도는 70%이었다.

### 3.3 실험방법

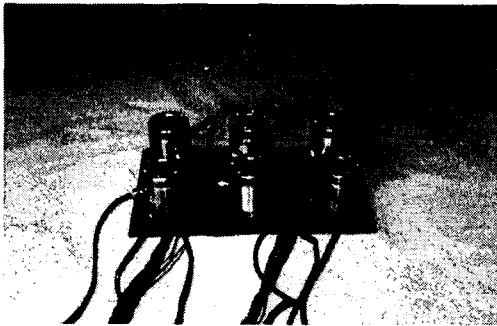


그림 3. 말뚝두부 로드셀 조립

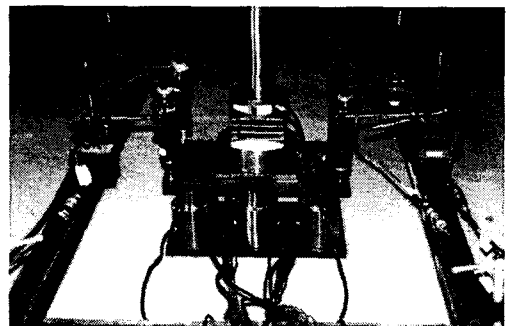


그림 4. 하중재하모습

본 실험에서 말뚝설치는 지반조성 후 25kg의 추를 항타높이 50cm를 유지하며 항타하여 지반에 설치하였으며 말뚝과 raft를 나사로서 연결하여 일체의 구조물로서 거동하게 하였다. 말뚝두부에는 2t 용량의 소형 로드셀을 부착하여 각 말뚝의 하중을 측정하였으며 전체적인 하중은 20t 용량의 로드셀을 사용하여 측정하였다. 변위는 raft의 4곳에 LVDT를 설치하여 측정하였으며 재하실험은 0.5mm/min의 일정한 속도로 실험을 진행하여 하중과 변위를 동시에 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 항복하중 결과

말뚝의 항복하중은 하중-침하곡선으로부터 결정하였으며 그 결과를 [표 3]에 정리하였다. 실험결과 free standing의 경우는 말뚝의 간격에 따른 하중의 증가가 뚜렷하지 않으나 piled raft의 경우는 말뚝간격증가에 따른 하중의 증가가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

표 3. 말뚝상태와 항복하중과의 관계

말뚝 간격	항복하중 (kg)										
	단말뚝		2×2 말뚝			2×3 말뚝			3×3 말뚝		
	free standing	pile raft	free standing	pile raft	raft	free standing	pile raft	raft	free standing	pile raft	raft
단말뚝	390	410									
3 d			1750	2100	1200	2500	3300	2300	3600	5900	3200
4 d			1800	2200	1900	2600	3700	2900	3800	6200	5200
5 d			1800	2300	3100	2700	3900	4500	4000	6500	7400
6 d			1750	2500	3500	2700	4200	6800	4700	7000	8600

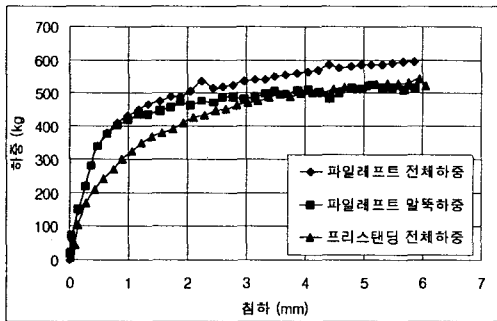


그림 5. 단말뚝의 하중-침하곡선

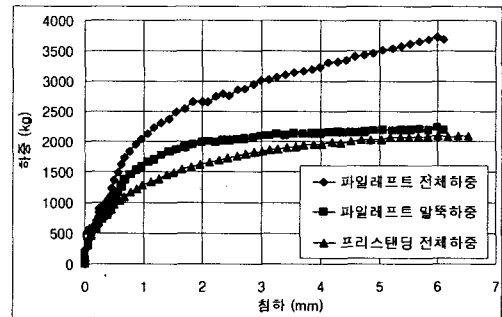


그림 6. 2×2 말뚝(6d간격)의 하중-침하곡선

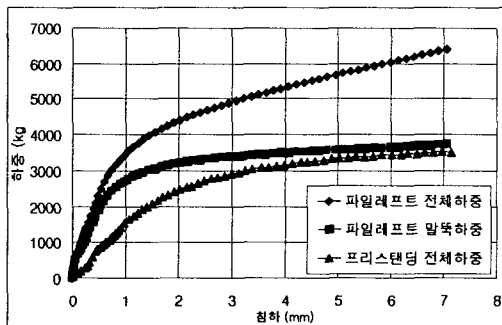


그림 7. 2×3 말뚝(6d간격)의 하중-침하곡선

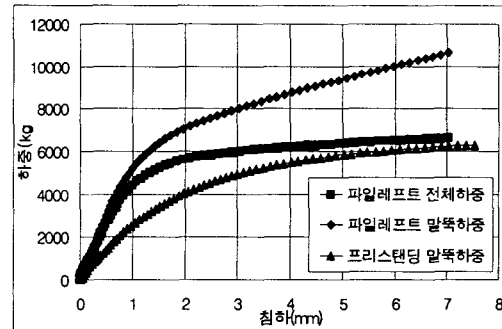


그림 8. 3×3 말뚝(6d간격)의 하중-침하곡선

#### 4.2 piled raft 기초에서의 raft 하중분석

그림 9 는 piled raft 조건에서 raft의 하중지지율을 나타낸 것이다. 그림 9 에 제시된 바와 같이 raft 는 piled raft 에서 상당한 수준의 하중을 지지하고 있는 것으로 나타났는데 2×2 조건에서는 8~22%, 2×3 조건에서는 2~19%, 3×3 조건에서는 15~22%의 하중지지율을 나타내고 있다. 그림 10 ~그림 12

는 각 말뚝배치별 1mm 침하시에 대한 raft 하중을 기준으로 raft만의 하중변화를 백분율로서 나타낸 것으로 침하가 진행됨에 따라 raft하중도 지속적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 그림 5 ~ 그림 8에 나타난 바와 같이 말뚝들의 하중이 약 1mm 전후의 침하에서 항복한 이후 거의 일정한 하중을 유지하고 있는 것과는 매우 다른 모습을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 말뚝의 항복하중 이후의 하중지지가 말뚝에서 raft로 전이되고 있는 것을 나타내고 있는 것으로 판단되며 말뚝이 항복하더라도 raft가 하중을 추가적으로 지지할 수 있음을 나타내고 있다고 생각된다.

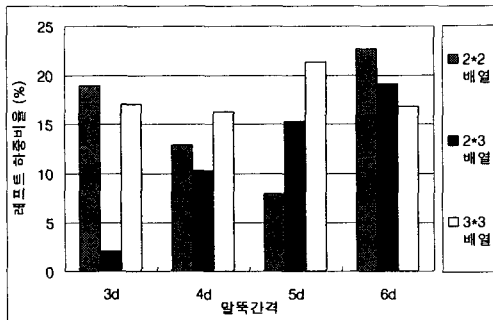


그림 9. 항복하중에서의 레프트 하중비율

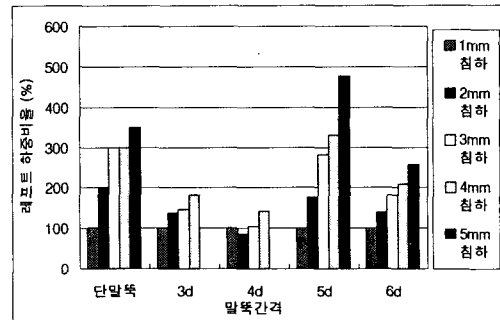


그림 10. 2×2 상태 레프트하중 증가비율

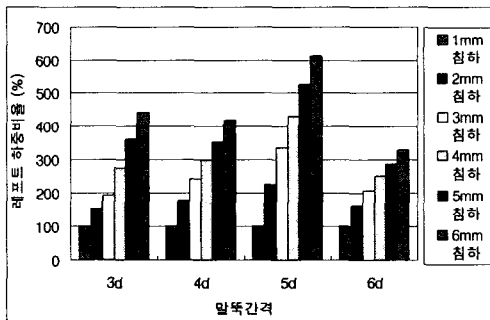


그림 11. 2×3 상태 레프트하중 증가비율

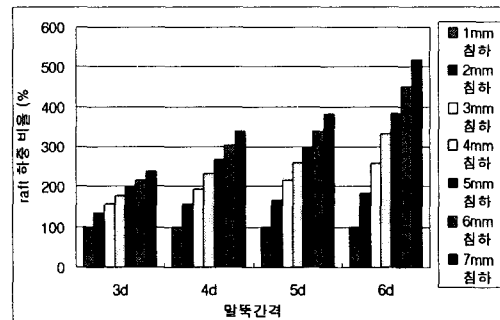


그림 12. 3×3 상태 레프트하중 증가비율

### 4.3 균효율분석

실험결과 그림 13 에 나타난 바와 같이 말뚝수가 증가하고, raft의 크기가 증가할수록 항복하중은 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 말뚝간격과 말뚝수가 동일하더라도 piled raft의 조건상태에서의 하중이 free standing 상태에서의 하중보다는 항상 크게 나타났다. 그림 14 에 나타난 바와 같이 free standing 상태에서의 말뚝하중은 동일한 말뚝간격에서의 piled raft 상태에서 말뚝하중보다도 항상 작은 값을 나타내고 있으며 균효율 또한 동일한 경향을 나타내고 있는데 이는 raft의 구속효과에 따른 말뚝지지력의 증가 때문인 것으로 판단된다.



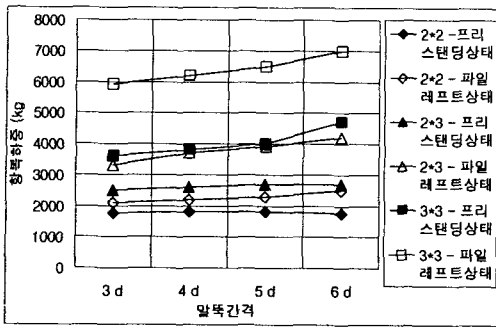


그림 13. 항복하중 비교

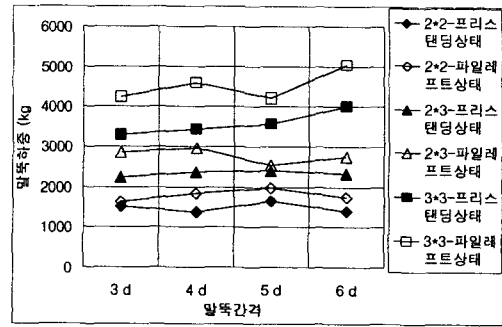


그림 14. 말뚝하중만의 비교

표 4. 말뚝상태와 균효율과의 관계

말뚝간격	2×2 말뚝		2×3 말뚝		3×3 말뚝	
	free standing	pile raft	free standing	pile raft	free standing	pile raft
3 d	0.97	1.01	0.95	1.18	0.94	1.18
4 d	0.88	1.14	1.01	1.23	0.98	1.27
5 d	1.06	1.24	1.02	1.06	1.02	1.17
6 d	0.89	1.09	0.99	1.15	1.14	1.40

#### 4.4 말뚝하중분포

free standing 상태의 경우 그림 15, 그림 17 에 나타난 바와 같이 말뚝의 배치형태와 위치에 관계 없이 하중분포가 분산된 모습을 나타내고 있음을 알 수 있다. 반면에 piled raft의 경우는 2×3 배치형태에서는 piled raft의 중앙에 위치한 말뚝들의 평균하중이 다른 곳에 위치하고 있는 말뚝들의 하중보다 큰 값을 나타내고 있으며 3×3 배치형태의 말뚝들에서는 그림 18 에 나타난 바와 같이 중앙부위가 제일 크고, 면접축부, 모서리부 순으로 하중이 나타나 piled raft의 경우 말뚝위치에 따라 말뚝하중 분포가 다르게 나타났다.

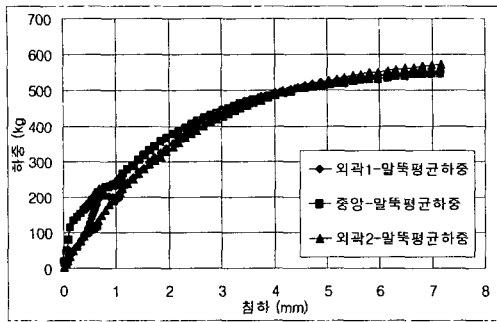


그림 15. 2×3 free standing 말뚝하중분포

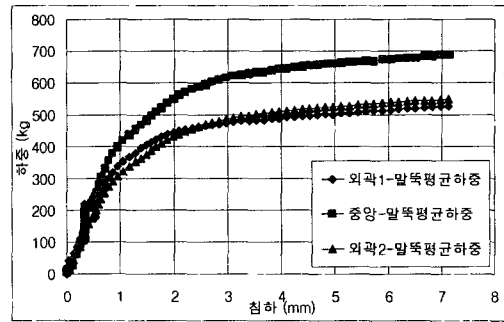


그림 16. 2×3 piled raft 말뚝하중분포

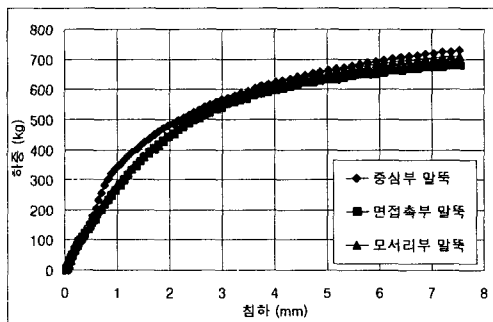


그림 17. 3×3 free standing 말뚝하중분포

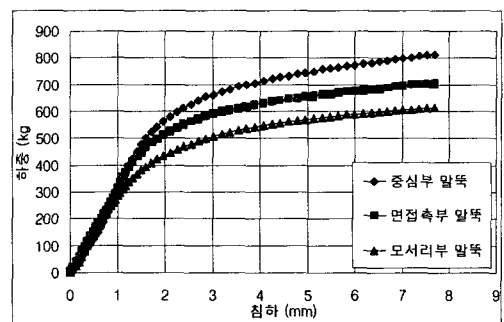


그림 18. 3×3 piled raft 말뚝하중분포

#### 4.5 raft 하중 분석

piled raft 실험시에 사용된 raft와 동일한 크기의 순수 raft만을 가지고 실험을 실시하였을 경우 그림 19 에 제시되어 있듯이 항복하중만을 비교하였을 경우에는 4d이하의 크기에서는 piled raft가 큰 하중을 나타내며, 5d이상의 크기에서는 순수 raft의 하중이 더 크게 나타나고 있다. 그러나, 순수 raft만의 항복 하중 발생 침하량은 대략 7~12mm 정도임에 비하여 piled raft의 항복하중 발생 침하량은 1mm정도(그림 5~8 참조)임을 알 수 있다. 따라서, 그림 20 에 나타나듯이 raft는 1mm 침하에서 대략 200~700kg의 하중을 나타내는 반면에 piled raft의 경우 대략 2100~5000kg의 하중을 나타내고 있어 raft에 비하여 piled raft가 침하나 지지력면에서 크게 우세한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

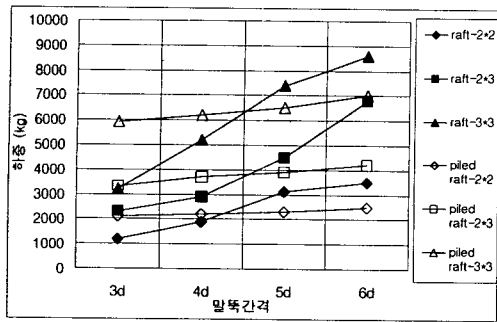


그림 19. 항복하중비교

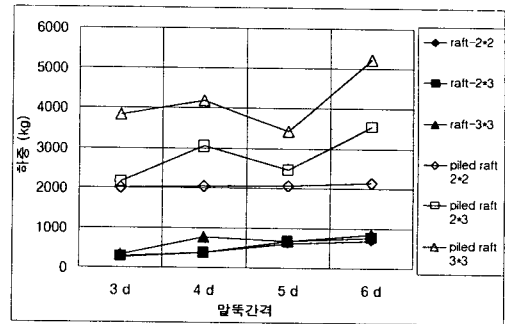


그림 20. 1mm 침하시 하중비교

#### 4.6 이론적 해석과 실험결과 비교 분석

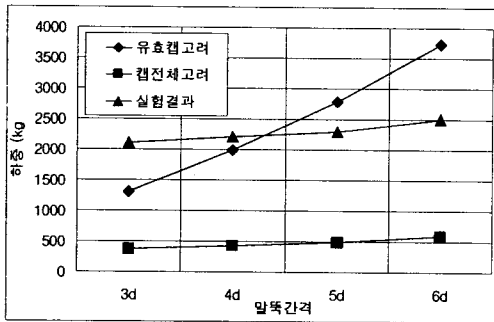


그림 21. 2×2 극한하중 비교

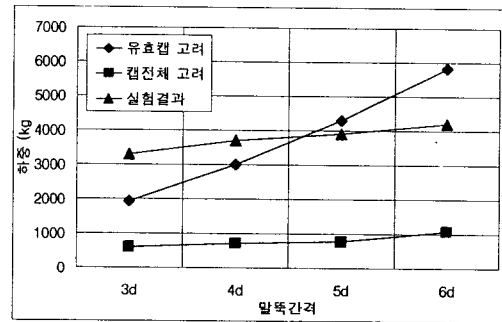


그림 22. 2×3 극한하중 비교

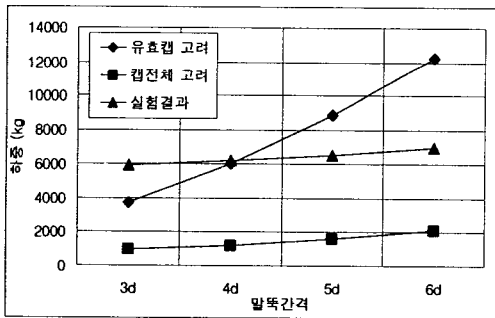


그림 23. 3×3 극한하중 비교

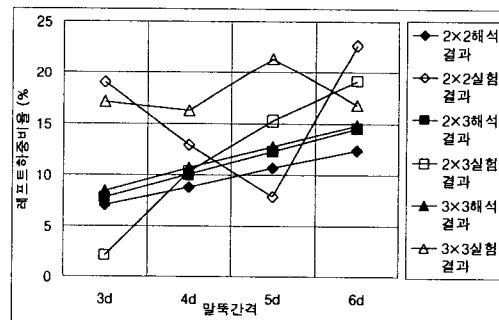


그림 24. 레프트 하중비율 비교

그림 21~그림 24는 이론식에 의한 결과와 실험에 의한 항복하중결과를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 캡전체고려결과는 실제 실험결과와 많은 차이를 나타내고 있는 반면에, 유효캡을 고려한 산정결과는 좁은 말뚝간격에서는 실험결과보다 작고, 5d 이상의 간격에서는 실험결과보다 약간 큰 결과를 나타내고 있으나 실제 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 24에 나타난 바와 같이 이론적 해석에 의한 레프트 하중분담비율은 전체적으로 실험결과보다 작은 값을 나타내고 있어 실제결과보다 과소평가할 수 있는 것으로 나타났다

## 5. 결론

본 연구에서는 말뚝간격을 달리하며 piled raft 실험을 실시하여 무리말뚝에서의 raft의 영향과 말뚝과의 상호거동특성등을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. free standing 상태의 지지력은 동일한 조건인 경우 항상 piled raft 지지력보다 작게 나타났다. 이는 raft의 영향으로서 raft의 지반구속효과에 따른 말뚝의 지지력 증가가 원인인 것으로 판단되며 따라서, 무리말뚝만의 지지력만으로 설계를 할 경우 지지력을 과소평가할 수 있음을 나타내고 있다.
2. piled raft 지지력에서 raft의 하중분담비율은 10~20% 정도로 나타났으며 침하가 진행될수록 말뚝의 지지력은 일정한 값을 유지한데 비해 raft의 지지력은 계속 증가하였다. 이는 말뚝의 항복이후에도 raft가 추가적인 하중분담을 하고 있음을 나타낸다고 판단된다.
3. free standing 조건에서는 말뚝의 하중분포가 일정한 경향을 나타내고 있지 않으나 piled raft의 경우는 2×3조건, 3×3조건 전체에서 중앙부분에 위치하는 말뚝이 가장 큰 하중을 받는 것으로 나타났다. 또한, 이러한 경향이 free standing 조건에서는 나타나지 않고 piled raft에서만 나타나고 있어 이는 raft에 의한 구속효과 증대에 기인한 것 판단된다.
4. raft만의 항복하중은 piled raft 항복하중에 비해 4d이하 크기에서는 작고 5d이상의 크기에서는 크게 나타났으나 동일한 침하량에서 비교시에는 piled raft가 크게 우세한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 얇은 기초만을 구성된 기초에 말뚝과 복합된 기초를 사용할 시에는 침하량이나 지지력면에서 크게 향상시킬 수 있으리라고 판단된다.
5. 극한지지력에 대한 이론적 해석결과와 실험결과와의 비교에서 알 수 있듯이 유효캡을 고려한 piled raft 지지력 산정결과는 실험결과와 유사한 결과를 나타내고 있으나 말뚝간격이 5d를 초과하면 실제 지지력을 과대평가할 수 있는 것으로 나타났다.

## 6. 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