

모형실험을 이용한 사질토지반에서의 Piled raft 거동특성에 대한 연구 An Study of Behavior of Granuler soil for the Piled raft from the Model Test

권 오균¹⁾, Oh-Kyun Kwon, 이 활²⁾, Whoal Lee, 김 진복³⁾, Jin-Bok Kim
이 승현⁴⁾, Seung-Hyun Lee, 오세봉⁵⁾, Se-boong Oh,

- ¹⁾계명대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Keimyung Univ
²⁾계명대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering. Keimyung Univ
³⁾계명대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering. Keimyung Univ
⁴⁾선문대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, SunMoon Univ.
⁵⁾영남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

Abstract

In this paper the model tests have been conducted and the results were compared with those by the theoretical methods to study the behaviors of the piled raft. The size of model box is $2.2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$. The raft is made of rigid steel plate and piles are made of steel pipes. Generally the bearing capacity of group piles is designed with only the pile capacities, which is ignored the bearing capacity of raft. 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 2×2 , 2×3 , and 3×3 pile groups. The spacing between piles is changed in the model tests. And the behaviors of free standing and piled raft are also studied.

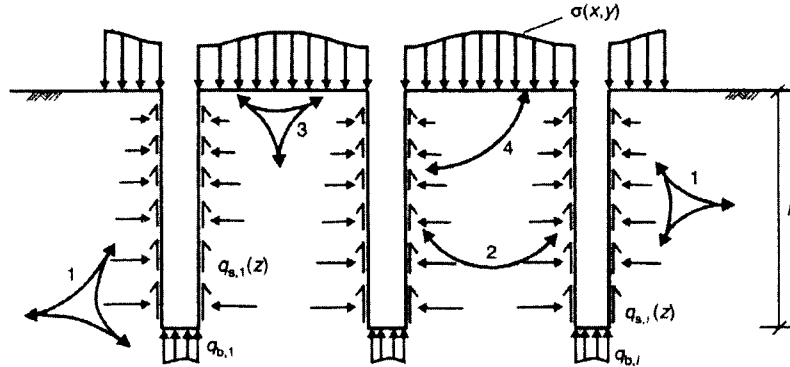
1. 서론

일반적으로 무리말뚝을 설계함에 있어 말뚝만의 지지력을 고려하여 무리말뚝의 지지력을 계산하고 있으나, 실제 시공 상에 있어서는 무리말뚝만으로 시공되는 것이 아니라 말뚝기초 상부에 raft가 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 raft와 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 raft의 영향을 평가하기 위하여 raft가 지반에 접촉하지 않

은 free standing 상태와 raft가 지반에 접촉한 piled raft 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. piled raft 거동에 영향을 미치는 요소



[그림 2.1] 무리말뚝거동에 대한 영향요소(Katzenbach et al, 2000)

기본적으로 piled raft를 구성하는 무리말뚝은 많은 수의 말뚝과 상부구조물인 cap으로 이루어져 있기 때문에 구조물의 거동에 영향을 미치는 요소들이 많아 구조물의 지지거동 예측에 어려움이 많다. [그림 2.1]은 무리말뚝의 거동특성에 영향을 미치는 요소(Katzenbach, Arslan and Moorman, 2000)를 크게 4가지로 분류하여 나타낸 것으로 ① 지반과 말뚝간의 상호작용, ② 지반과 raft의 상호작용, ③ 말뚝과 말뚝간의 상호작용, ④ 말뚝과 raft의 상호작용 등으로 구분하고 있다. 이외에도 Phung(1993), Liu(1985) 등이 무리말뚝의 거동에 영향을 미치는 여러 가지 변수들에 대하여 연구한 바 있다.

3. 모형 실험

3.1 모형 말뚝 및 raft

본 실험에 사용된 모형토조의 크기는 가로×세로×높이가 2.2 m×2 m×2 m이며, 강제를 사용하여 제작하였다. 모형실험에 사용된 말뚝의 최대 갯수는 9개이고, 말뚝의 길이는 1200 mm이다. 본 말뚝의 재질은 강제이며, 직경은 40mm, 두께 3mm로 제작되었다. 또한 모형실험에 사용된 모든 raft가 강성기초로서 거동할 수 있도록 Hain & Lee(1978)가 제안한 raft 강성계산식을 근거로 최대크기의 raft에서도 강성기초로 거동할 수 있도록 두께 16mm로 제작하였다. 모형실험에 사용된 raft의 크기는 다음의 [표 3.1]과 같다.

[표 3.1] 말뚝간격과 배열에 따른 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 raft와 지반과의 접지압, 말뚝 상호간의 침하 등은 raft의 강성에 영향을 받는다. 본 실험

에서는 강성기초를 사용하며 이에 적합한 raft의 두께는 식 (1)을 이용한 연성지수(K_r)를 고려하여 결정하였으며, 본 실험에 사용된 각 raft의 연성지수는 [표 3.2]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 raft는 강성기초로 간주할 수 있다.

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

여기서, E_r : raft 탄성계수 T_r : raft 두께 B_r : raft 폭
 L_r : raft 길이 ν : 지반의 포아송비 E_s : 지반의 탄성계수

[표 3.2] raft의 크기별 강성지수

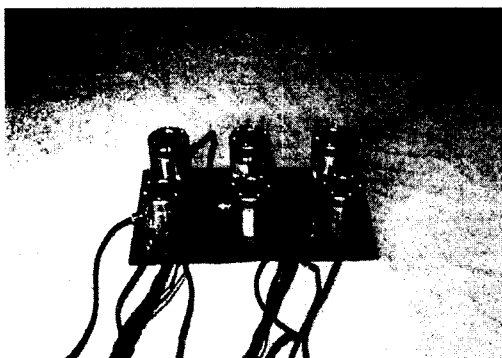
raft 조건 \ pile 간격	3 d	4 d	5 d	6 d
2×2	4689.7	2841.2	1849.5	1270.5
2×3	1270.5	674.0	399.5	255.9
3×3	822.1	417.2	239.7	150.0

3.2 모형지반

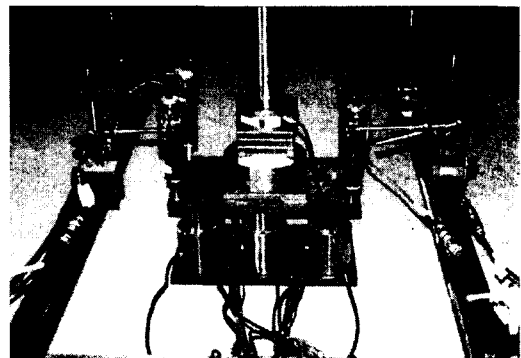
모형실험의 지반을 조성하기 위해 사용된 모래시료는 체가름하여 10번 체를 통과한 시료만을 사용하였으며 세립분의 영향을 최소화하기 위해 물로 세척을 한 후 자연 건조시켰다. 시료의 물리적 성질은 통일분류법상 SP로 분류되었으며 비중은 2.53, 균등계수(C_u)는 7.28, 곡률계수(C_c)는 3.05로 나타났다. 모형시료의 최대건조단위중량은 1.64 tonf/m^3 , 최소건조단위중량은 1.38 tonf/m^3 이었다. 모형지반은 20 cm 두께로 층다짐을 실시하여 균질한 지반을 조성하였으며 조성된 지반의 평균상대밀도는 약 43.2%이었다.

3.3 실험방법

본 실험에서는 모형지반을 조성한 후 모형말뚝을 다음과 같은 방법으로 지반에 설치하였다. 25 kgf의



[그림 3.1] 말뚝두부에 조립된 로드셀 모습



[그림 3.2] 하중재하 모습

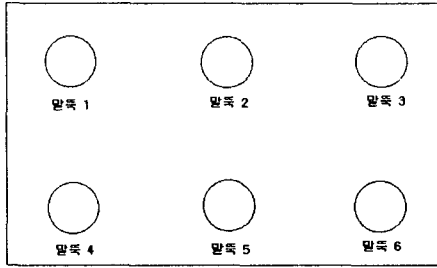
추를 지반에서 높이 50 cm 를 유지하면서 모형말뚝을 향타하여 지반에 설치하였으며 말뚝과 raft는 나사

로서 체결하여 일체의 구조물로서 거동할 수 있도록 하였다. 말뚝두부에는 2 tonf 용량의 소형 로드셀을 부착하여 각 말뚝의 두부에 작용하는 하중을 측정하였으며, piled raft에 작용하는 전체 하중은 20 tonf 용량의 로드셀을 사용하여 측정하였다. 변위는 raft의 4곳에 LVDT를 설치하여 측정하였으며, 하중재하는 0.5 mm/min의 일정한 속도로 재하하였다. piled raft에 작용하는 하중과 변위는 하중계와 변위계를 Data Logger (TDS602)에 연결하여 동시에 측정하였다.

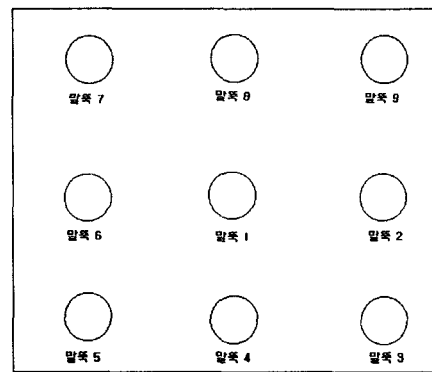
4. 실험결과 및 분석

4.1 말뚝배치

본 실험에서의 말뚝배치는 [그림 4.1]과 [그림 4.2]와 같이 배치하였으며 향타순서는 말뚝번호순서대로 향타를 실시하였다. 4.2장 이하의 실험결과분석에서는 말뚝의 위치에 따라 그림을 제시하였는데 말뚝위치에 따른 분류는 [표 4.1]과 같다.



[그림 4.1] 2×3 말뚝 배치도



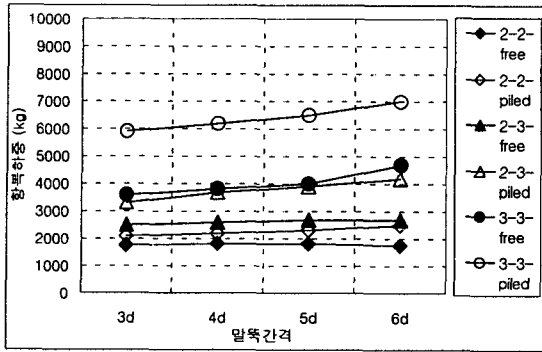
[그림 4.2] 3×3 말뚝 배치도

[표 4.1] 말뚝번호 분류

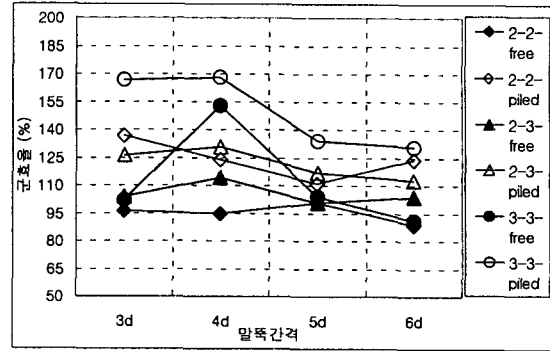
말뚝배치	결과	말뚝번호	말뚝배치	결과	말뚝번호
2-3	중앙	2, 5	3-3	중앙	1
	외곽 1	1, 4		면접측부	2, 4, 6, 8
	외곽 2	3, 6		외곽부	3, 5, 7, 9

4.2 항복하중

본 지반조건에 대한 실험결과에서 나타난 항복하중은 [그림 4.3]과 같다. 2×2와 2×3 형태로 배열된 free standing 조건에서 항복하중은 말뚝간격에 따라 거의 일정한 크기로 나타난 반면에 piled raft의 경우는 말뚝간격이 증가함에 따라 항복하중은 증가하는 경향을 나타나고 있다. 또한, 3×3 형태로 배열된 경우는 free standing 조건과 piled raft 조건에서 말뚝간격증가에 따라 항복하중은 증가하는 경향을 나타나고 있다. [그림 4.3]에 나타난 바와 같이 piled raft 조건에서의 항복하중은 동일한 말뚝간격에서의 free standing 조건에서의 항복하중보다 항상 큰 값을 나타내었다. 그리고, 말뚝수가 증가할수록 piled raft 조건과 free standing 조건과의 항복하중차이는 점차 커지는 경향을 나타내었다.



[그림 4.3] 항복하중



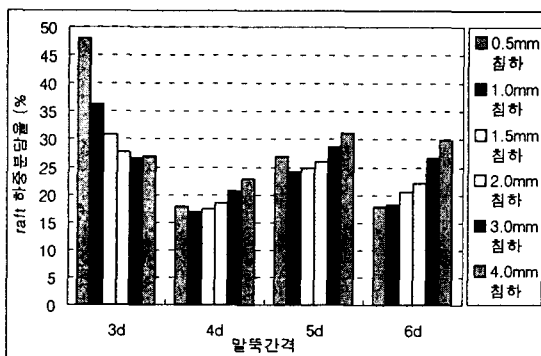
[그림 4.4] 균효율

4.3 균효율

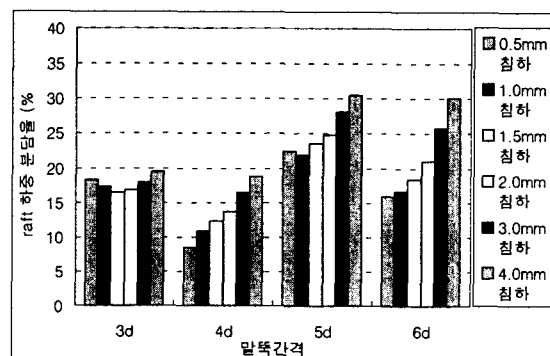
[그림 4.4]에 제시된 균효율은 piled raft 또는 free standing 조건에서 발생한 항복하중에서 말뚝만의 하중을 산정하여 단말뚝 free standing 조건에서의 항복하중을 기준으로 분석한 것이다. free standing의 경우는 말뚝의 수량에 관계없이 평균적으로 95~106%의 균효율을 나타내어 무리말뚝의 지지력향상에 거의 효과가 없는 것으로 판단되었다. 반면에 piled raft 조건의 경우는 2×2 배열은 111~137%, 2×3 조건의 경우는 113~131%, 3×3 배열은 131~168%의 균효율을 나타내어 말뚝의 수량이 증가할수록 균효율이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 piled raft 조건에서 raft의 존재가 무리말뚝의 지지력 향상에 일정한 역할을 하고 있다는 것을 나타내고 있는 것으로 판단되었다. 또한, 말뚝간격이 3d인 경우에 균효율은 최대값을 나타내었으며, 이후 말뚝간격이 증가할수록 균효율은 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

4.4 레프트 하중비율

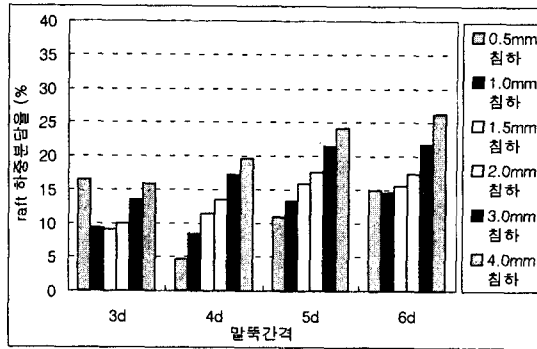
본 실험에 사용된 모형말뚝의 직경은 40mm이며 말뚝의 극한하중을 말뚝지름의 0.1d로 산정할 경우에는 4mm침하에서의 raft 하중분담율을 결정하는 것이 중요하다. [그림 4.5]~[그림 4.7]에서는 본 실험에 사용된 모형말뚝 직경의 10%에 해당하는 침하량까지의 raft 하중분담율을 나타내었다. 침하초기부분에서 일부분 raft 분담비율이 크게 나온 것을 제외하고는 대부분의 경우에서 침하량이 증가함에 따라 raft의 하중분담율도 증가하고 있는 것을 나타내고 있다. 이것은 침하가 진행됨에 따라 하중의 지지메카니즘이 말뚝에서 raft로 서서히 전이되고 있는 것을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 그리고, 말뚝간격이 증가할수록 raft 분담비율이 증가하는 것을 나타내고 있다. 또한 침하량이 말뚝직경의 10%에 해당할 경우에 말뚝간격이 6d인 조건에서 raft 하중분담율이 30%정도의 수치를 나타내었으며 3d인 경우에서도 15~25% 정도의 하중분담율을 나타내었다.



[그림 4.5] 2×2 레프트 하중비율



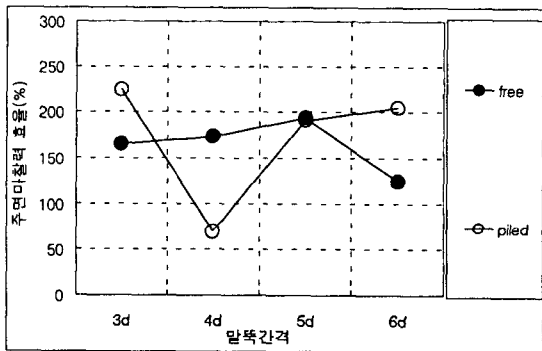
[그림 4.6] 2×3 레프트 하중비율



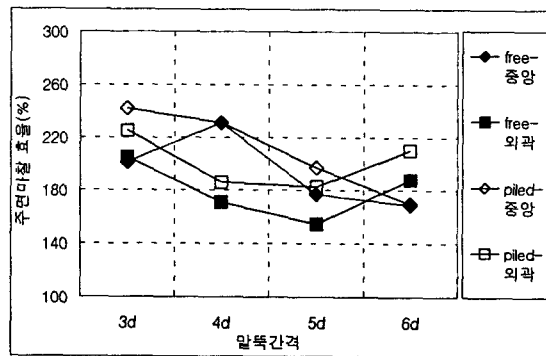
[그림 4.7] 3x3 레프트 하중비율

4.5 주면효율

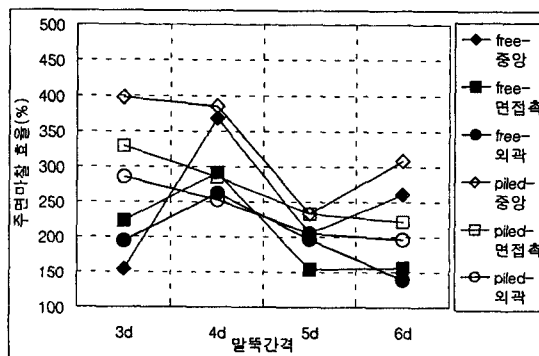
무리말뚝의 주면효율은 [그림 4.8]~[그림 4.10]에 나타난 바와 같이 동일한 말뚝간격에서 말뚝의 수량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며 2x3와 3x3조건에서는 말뚝의 간격이 증가할수록 주면효율이 감소하다 말뚝간격이 5d를 넘어서면 일정해지는 경향을 나타내었다. 또한, 대부분의 조건에서 piled raft 조건의 주면효율이 free standing 조건에서의 주면효율보다 큰 값을 공통적으로 나타내었다. 이러한 경향들은 사질토지반의 경우에서 piled raft 조건에서 말뚝간격이 3d 이내로 무리말뚝이 배치된다면 말뚝의 주면효율이 최대로 발휘될 수 있다는 것을 의미하고 있는 것으로 판단된다.



[그림 4.8] 2x2 주면효율



[그림 4.9] 2x3 주면효율

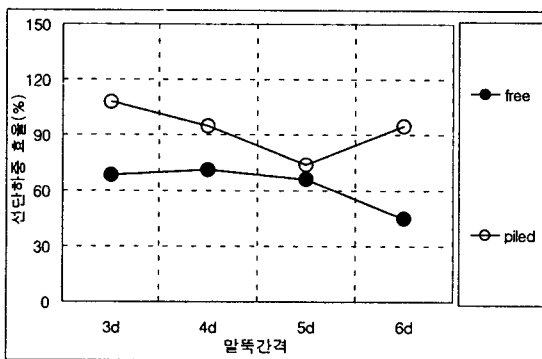


[그림 4.10] 3x3 주면효율

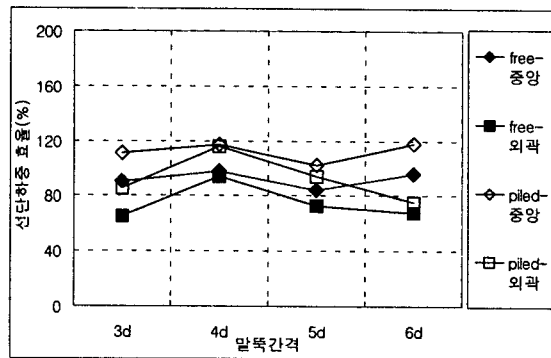
4.6 선단효율

선단효율은 2x2배열은 free standing 경우가 평균 63%, piled raft 경우가 평균 93%를 나타내어 선단하중의 증가현상을 나타나지 않았으며 모든 말뚝배열조건에서 말뚝간격이 증가함에 따라 선단효율이

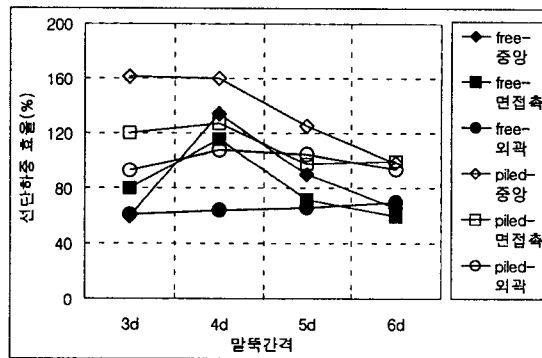
감소하는 현상을 나타내었다. 반면에 3×3배열의 경우는 free standing 경우는 대부분 100%이하의 선단효율을 나타내고 있으나, piled raft 경우는 중앙부분이 평균 136%, 면접촉부분이 평균 111%, 외곽부분이 평균 100%정도의 선단효율을 나타내어 말뚝의 위치에 따라 선단효율이 크게 달라지는 경향을 나타내었다. 특히, 3×3조건의 piled raft 경우에서 중앙부분에서의 선단효율은 말뚝간격이 3d인 경우에 최대 160%정도의 선단효율을 나타내지만, 말뚝간격이 증가함에 따라 감소하는 모습을 나타내는 반면에 외곽부분에 위치한 말뚝의 경우는 말뚝간격이 3d에서 6d로 변화함에 따라 선단효율은 93%에서 94%로 거의 변동이 나타나지 않았다. free standing의 경우는 선단효율의 증가현상이 거의 나타나지 않았으며, 말뚝간격증가에 따른 경향도 미약하게 발생했다. 반면에 piled raft의 경우는 말뚝의 수량이 증가할수록 선단효율이 증가하는 경향이 나타나며 무리말뚝의 외곽부분보다는 중앙부분에서 우세하게 증가하는 것을 나타내고 있다. 이것은 piled raft의 경우 raft에 의한 구속압의 증가와 주변 말뚝간의 상호작용으로 인하여 중앙부분에서 말뚝의 선단효율이 증가한 것으로 판단된다.



[그림 4.11] 2×2 선단효율



[그림 4.12] 2×3 선단효율



[그림 4.13] 3×3 선단효율

5. 결론

본 연구에서는 말뚝간격과 배열을 변화시켜 상대밀도 43%의 모래지반에서 piled raft에 대한 모형실험을 실시하여 raft의 영향, 하중-침하 특성, raft의 하중분담비율, 항복하중, 균효율 등을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. piled raft 조건에서의 항복하중은 동일한 조건에서의 free standing 조건보다 항상 크게 나타났으며 말뚝수량이 증가할수록 그 차이는 더욱 증가하는 경향을 나타내었다.
2. 무리말뚝의 균효율은 free standing 조건에서는 증가경향을 나타내지 않는 반면에 piled raft조건에서

는 말뚝수가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며 특히 3×3 조건에서는 말뚝간격 3d에서 최대의 효율을 나타내었다.

3. 무리말뚝의 침하량이 말뚝직경의 10%에 해당할 경우에 말뚝의 수량에 관계없이 말뚝간격이 6d인 조건에서 raft 하중분담율이 30%정도의 수치를 나타내었으며 3d인 경우에서도 15~25% 정도의 하중분담율을 나타내어 piled raft 조건의 경우에 raft의 하중분담율이 상당히 큰 것으로 나타났다.
4. 주변효율의 경우는 free standing 조건과 piled raft 조건 모두에서 증가하는 경향을 나타내었으나 대부분의 경우에서 piled raft 조건이 크게 나타났다. 또한 말뚝수량이 증가할수록 주변효율이 증가하는 경향을 나타내었으며 중앙부분에서의 증가경향이 우세하게 나타났다.
5. 선단효율은 2×3 조건까지는 piled raft 조건과 free standing 조건 모두에서 증가하는 경향은 나타나지 않았다. 반면에 3×3 조건에서 중앙부분에 위치한 말뚝에서 증가경향이 나타났으나 그 경향은 주변효율에 비해 미약하게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2000년 산·학·연 공동연구개발사업(과제번호 자유-5) 지원으로 수행된 연구의 일부로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Akinmusuru. J. O, (1980), " Interaction Of Piles And Cap In Piled Footingss", 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) 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
- 5) Prakash. S. and Sharma. H. D, (1989), Pile Foundations In Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc
- 6) 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.