

압축하중을 받는 무리말뚝의 주면지지력 특성

안병철 · 이준대^{†*}

충북대학교 토목공학과 · *세명대학교 토목공학과
(2004. 4. 19. 접수 / 2004. 8. 17. 채택)

Characteristics of Skin Friction on Compression Loaded Group Piles

Byung-Chul Ahn · Jun-Dae Lee^{†*}

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University
*Department of Civil Engineering, Semyung University
(Received April 19, 2004 / Accepted August 17, 2004)

Abstract : H-pile can be more easily driven than pipe pile by pile driver and shows high skin friction and plugging effect. And lately It is well known that the high strength H-pile has been widely used for pile foundations. To compare the skin frictions of H piles under different density soil conditions, this paper presents results of a series of model tests on vertically loaded group piles.

Model piles made of steel embedded in weathered granite soil were used in this study. Pile arrangements(2×2, 3×3), pile space(2 D, 4 D, 6 D), and soil density($D_r = 40\%$, 80%) were tested. The main results obtained from the model tests can be summarized as follows.

The series of tests found that compression load for group piles increases as number of piles increase and piles space ratio decrease to $D_r = 40\%$ of soil density. The analysis also found that the theoretical value of skin friction for group piles is greater than practical value as piles space ratio increases to $D_r = 40\%$ of soil density.

Piles showed the greatest difference of the skin friction in case that the pile space ratio(S/D) is 6. The theoretical value by Meyerhof and DM-7 showed 1.83 times and 1.32 times respectively as great as practical value in case of S/D = 6 and 2×2

Key Words : H-pile, group piles, weathered granite soil, skin friction, compression load

1. 서 론

말뚝기초는 일반적으로 많이 사용되고 있는 지반 보강 공법중의 하나로 지반이 매우 연약하거나 지층의 깊이가 비교적 깊은 지반에서 유용하게 활용되고 있다^{1,2)}. 현재 국내에서는 원형이외의 말뚝에 대한 인식부족과 기초자료의 부족 등으로, 주로 강관말뚝이나 PHC말뚝이 보편적으로 사용하고 있다. 강관말뚝은 수평 저항력과 지내력이 큰 것으로 알려져 있으며, PHC말뚝은 경제성이 높고 부식에 대한 안정성이 우수하여 활용성이 보편화되어 있다.

그러나 유럽을 비롯한 동남아, 미국 등지에서는 지반조건에 따라 사각형이나 H형 등 다양한 형태

의 말뚝이 사용되고 있으며, 강말뚝의 안전성과 PHC말뚝의 경제성을 동시에 만족할 수 있도록 H형 강강의 재료를 고강도화하여 수직하중을 받는 지지말뚝으로 활용하고 있다.

구조물이 안정적이고 합리적으로 시공되어 지기 위해서는 여러 기능을 복합적으로 갖도록 말뚝기초가 설계되어야 한다. H말뚝은 재료의 강도가 좋기 때문에 강력한 항타에너지를 사용하여 견고한 지반까지 관입하는 것이 가능하며, 특히 타입시 지반의 변형이 적은 미소 변위 말뚝이므로 조밀한 모래지반이나 견고한 점토질 지반을 관입하는데 있어서 우수한 특성을 가지고 있다.

강관말뚝이나 H말뚝과 같은 개단말뚝이 지중에 타입되면 말뚝쪽에 흠기둥이 형성되고, 이로 인해서 관입 시에는 타입이 어려워지기도 하지만 관입이

[†]To whom correspondence should be addressed.
jdlee@semyung.ac.kr

계속되면 안쪽에 있는 흙기둥은 말뚝의 주면마찰력을 상당히 증가시키게 된다^{3,7)}. H형강 말뚝의 경우 PHC말뚝과 달리 타입 시 플랜지와 웨브사이에 흙이 밀려들어가 마찰력이 더욱 증가하게 되며, 특히 무리말뚝형태로 시공되어 진 경우에는 인접말뚝의 영향으로 인해 주면마찰력의 변화가 예상되므로 보다 합리적인 해석방법이 필요하다.

말뚝의 주면마찰력은 기존 이론식^{5,6)}에 근거하여 산정하고 있으나 말뚝의 지지력에 영향을 미치는 요소들에 대한 매개변수의 적용에 한계가 있기 때문에 보다 신뢰성 있는 재하시험에 의존하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 압축하중을 무리말뚝에 가하여 간격비와 배열 그리고 지반밀도에 따라 무리말뚝의 주면마찰력을 서로 비교함으로써 무리말뚝의 주면마찰 특성을 규명하고 기존 이론식과의 주면마찰력 비교를 통한 H형강 무리말뚝의 거동특성 분석을 실시하였다.

2. 말뚝의 주면마찰력 이론

2.1. US Navy 방법

DM-7⁸⁾의 경우 정역학적 지지력 공식을 기초로 하여 주면마찰력에 있어 수평토압계수를 말뚝별로 구분하여 적용하도록 제안하고 있다.

1) 사질토

$$R_s = K_o \cdot \sigma_v' \cdot \tan \delta \cdot A_s \quad (1)$$

2) 점성토

$$R_s = C_A \cdot A_s \quad (2)$$

- 여기서, A_s : 주면 면적 (m^2)
- C_A : 부착력 (t/m^2)
- K_o : 시공조건에 따른 토압계수
- R_s : 주면마찰력 (kgf)
- δ : 말뚝의 흙사이 마찰각
- σ_v' : 각층의 연직유효응력 (t/m^2)

2.2. US Army⁹⁾ 방법

미 육군에서는 다음과 같은 방법으로 주면마찰력을 산정하고 있다. 주면 마찰력을 계산하는 방법은 H말뚝의 경우 토압계수는 1.5, 벽마찰각은 0.75ϕ 로 정하고 각 층의 유효연직응력을 구한 다음 부착력

값을 정하고 주면면적을 구한다.

1) 사질토

$$R_s = K_o \cdot \sigma_v' \cdot \tan \delta \cdot A_s \quad (3)$$

2) 점성토

$$R_s = C_A \cdot A_s \quad (4)$$

- 여기서, A_s : 주면 면적 (m^2)
- C_A : 부착력 (t/m^2)
- c_u : 비배수 전단강도 (t/m^2)
- K_o : 시공조건에 따른 토압계수
- α : 경험적인 부착력 계수
- δ : 말뚝의 흙사이 마찰각
- σ_v' : 각층의 연직유효응력 (t/m^2)

3. 실험장치 및 방법

3.1. 사용시료의 특성

본 실험에서 사용된 화강풍화토의 물리적인 특성을 알아보기 위해 비중시험 및 체분석을 실시하여 비중, 균등계수 및 곡률계수를 산정하였다. 2mm체로 걸러낸 건조된 화강 풍화토를 가지고 체분석시험을 실시한 결과 Fig. 1과 같이 0.074mm체 통과량 8.4%, 균등계수는 4.10, 곡률계수는 1.24를 나타내었다.

이것을 기준으로 통일분류법(USCS)에 의해 흙을 분류한 결과 SP-SM으로 나타났다. 비중시험결과는 2.79이며, 액성한계시험과 소성한계시험은 모두 NP로 나타났다. 표준단집시험(ASTM, D-698, A4집)을 실시한 결과 최대 건조단위중량은 $1.770gf/cm^3$, 최소 건조단위중량은 $1.424gf/cm^3$ 로 나타났다.

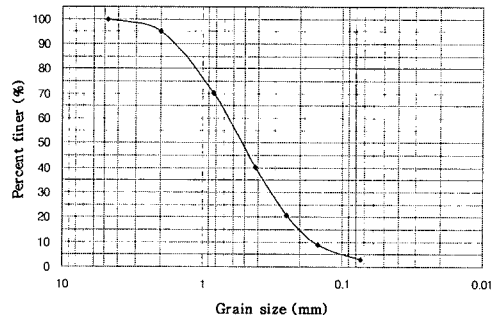


Fig. 1. Grain size distribution curve of granite soil

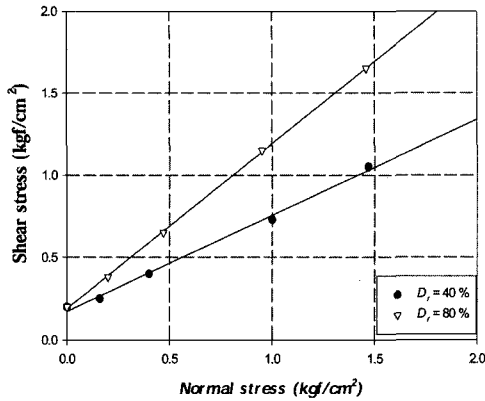


Fig. 2. Results of the direct shear test with relative density

Table 1. Specification of model H-pile

Materials	Length (cm)	Flange (cm)	Web (cm)	Outer diameter (cm)	Thickness (cm)	Elastic modulus (kgf/cm ²)
Steel	45.0	2.0	2.0	2.25	0.1	2.14 × 10 ⁶

기초의 지지력계산에 사용되는 시료의 내부마찰각을 결정하기 위해 직접전단시험을 실시하였다. 상대밀도 40%, 80%에 해당되는 각각의 단위중량을 구한 다음 전단상자에 들어갈 무게를 측정하여 이것을 지름이 60mm이고 두께가 20mm인 전단상자에 잘 다져 넣고 1mm/min의 전단속도로 급속전단시험을 실시하였다. 시료를 포화시키지 않고 건조된 상태에서 하중단계를 3단계로 하여 각각의 수직응력에 대한 전단응력을 구하였으며 상대밀도에 따른 내부마찰각의 변화는 각각 31°, 42°로 나타났으며 점착력은 약 0.2g/cm²으로 나타났다.

3.2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 모형 H말뚝은 탄성계수가 2.14 × 10⁶kgf/cm²인 스테인리스이며, 두께 1.2mm, 길이 45cm, 플랜지와 웨브의 길이는 각각 2.0cm의 크기로 제작하였다. 모형말뚝의 제원을 Table 1에 나타내었다.

하중을 받는 무리말뚝의 축방향력을 측정하기 위해 말뚝선단부터 일정한 간격으로 변형률 게이지를 부착하였다. 말뚝배열과 간격에 따른 무리말뚝 실험을 수행하기 위해 두께 약 12mm의 아크릴판으로 모형 말뚝캡을 제작하였으며, 말뚝머리는 볼트와 너트를 이용하여 말뚝캡에 고정시켰다.

모형토조는 가로 55cm × 세로 55cm × 높이 60cm의 크기로 제작하였으며, 말뚝선단과 모형 상자의

바닥과는 적어도 말뚝지름의 3~4배 이상의 간격을 두어 모형 상자 바닥의 영향을 배제시켰다.

모형실험에 대한 크기효과를 검토하기 위하여 Baligh⁶⁾가 제안한 모래에서의 공동확장이론(cavity expansion theory)을 사용하여 경계조건의 영향을 검토하였다. 확장된 반지름 (R_p)은 확장전의 반지름(R)과 모래의 강성과 관련된 계수 (I_{rr})을 이용하여 식 (5)로 계산할 수 있다.

$$R_p = R(I_{rr} \cdot \sec \phi_i)^{1/2} \quad (5)$$

완전개방상태일 경우 H말뚝의 순단면적과 동일한 등가원형 단면적으로 환산하고 일반적인 강성계수 $I_{rr} = 20$ 을 사용하였을 때 공동확장으로 인한 지름은 약 55.4mm로 나타났다. 그리고 완전폐단말뚝형태로 가정한다면 공동확장으로 인한 지름은 133 mm로 증가한다. 따라서 본 실험의 경우 3×3형태의 무리말뚝배치상태에서 외측말뚝과 토조측면과의 거리가 143mm인 점을 고려한다면 토조의 경계조건이 말뚝의 지지력에 미치는 영향은 적을 것으로 판단된다.

본 실험에서는 사질토 지반에 대하여 말뚝의 중심간격, 말뚝의 배열에 따라 수직하중을 받는 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 화강풍화토를 이용하여 모형지반을 깊이로 따른 평균 상대밀도가 40%, 80%가 되도록 조성하였으며 말뚝의 두부 구속조건은 말뚝캡에 고정되어 있는 형식으로 고정단과 비슷하다. 말뚝의 근입깊이는 40cm로 하였으며, 무리말뚝은 2×2, 3×3배열로 이루어진 경우에 대하여 하중-변위 거동을 관측하였다. 말뚝의 중심간격(S)은 말뚝지름(D)의 2배, 4배, 6배인 경우에 대하여 각각 실험을 실시하였다.

말뚝 향타에 의한 잔류응력을 감소시키기 위하여, 재하시험은 말뚝 타입후 24시간이 경과한 후에 수행하였다. 재하시험은 설계하중의 300%까지의 하중을 20단계로 나누어 재하 하였으며, 각 하중의 재하시간은 2.5~15분간 하중을 유지시켰다. 각 하중 단계마다 data logger를 이용하여 하중과 침하량을 계속하였으며, 말뚝표면에는 선단부에서 말뚝머리까지 5cm간격으로 스트레인게이지를 부착하여 작용하중에 대한 말뚝의 축하중분포 양상을 관찰함으로써 선단지지력과 주면지지력을 분리하여 산정하였다. Fig. 3은 H형강 무리말뚝의 실험장치로 변위는 캡에 설치되어 있는 LVDT를 통해 얻었으며, 기록계를 통해 데이터를 출력하였다.

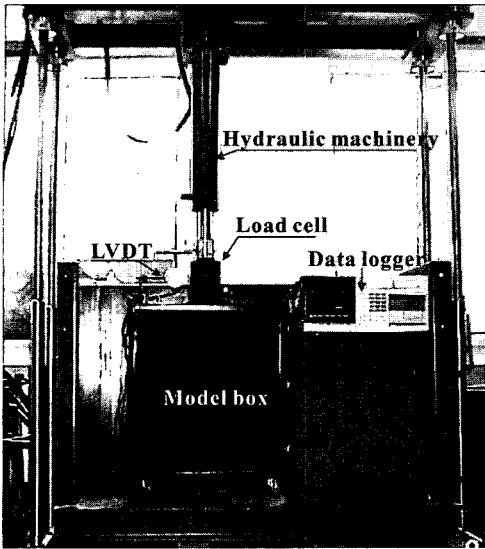


Fig. 3. Pile load test

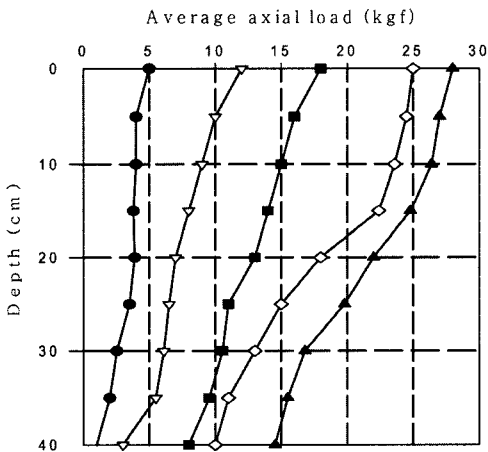


Fig. 4. Load transfer curve of 3x3 pile group in $D_r = 40\%$, $S = 2D$

4. 실험결과 및 분석

4.1. 무리말뚝의 하중-변위곡선

Fig. 4는 3x3무리말뚝의 하중전이분포를 나타낸 것이다. 축하중이 증가함에 따라 말뚝선단부로 갈수록 하중이 감소함을 알 수 있다. 즉 하중이 증가함에 따라 주면마찰력이 부담하는 비율이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 느슨한 지반에서의 3x3무리말뚝에 대한 압축재하시험 결과이다. 말뚝수에 따른 지지력변화를 배제시키기 위해 전체지지력을 말뚝수로 나누어

평균지지력으로 나타냈다. 재하초기 상태에서는 간격비에 따른 지지력의 차이가 크게 발생하지 않았으나 단말뚝에 비해서는 작은 하중을 받는 것으로 나타났다. 간격비가 작은 무리말뚝일수록 높은 압축하중을 받는 것으로 나타났으며, 이것은 화강풍화토와 같이 세립분이 적절히 함유된 흙일수록 다짐효과가 우수하기 때문에 말뚝 타입에 의한 말뚝선단부의 다짐효과가 발휘되어서 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 더 큰 지지력 효과가 발생하게 된다.

Fig. 6은 2x2무리말뚝에 대한 압축재하시험 결과로 3x3무리말뚝과 비슷한 하중-침하량 관계를 나타냈는데 침하량이 2mm이전에는 단말뚝의 지지력이 비교적 크게 나타남을 알 수 있었다. 3x3무리말뚝에 비해 말뚝수가 감소함에 따라 말뚝상호간 증첩효과가 줄어들기 때문에 평균 압축지지력이 감소하는 결과를 나타냈으며, 간격비에 따른 무리말뚝의 평균 지지력 차이는 3x3무리말뚝보다는 다소 감소하는 결과를 보였다.

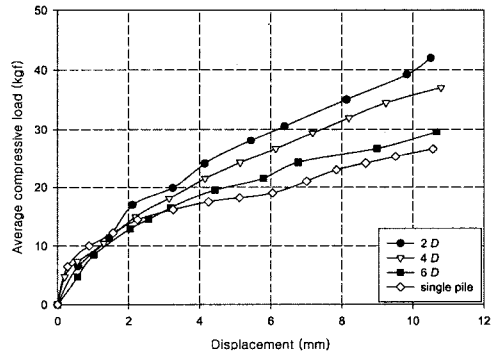


Fig. 5. Load-displacement curve of single pile and 3x3 pile group by compressive load in $D_r = 40\%$

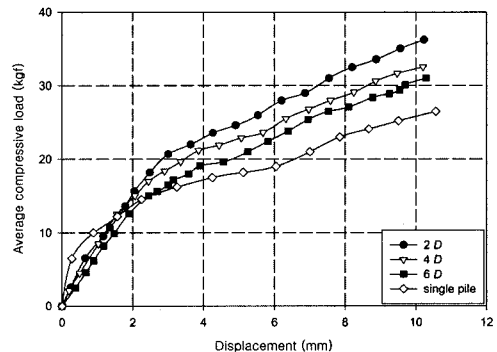


Fig. 6. Load-displacement curve of single pile and 2x2 pile group by compressive load in $D_r = 40\%$

압축하중을 받는 무리말뚝의 주면지지력 특성

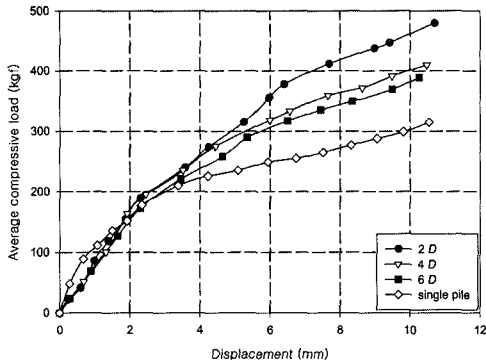


Fig. 7. Load-displacement curve of single pile and 3×3 pile group by compressive load in $D_r = 80\%$

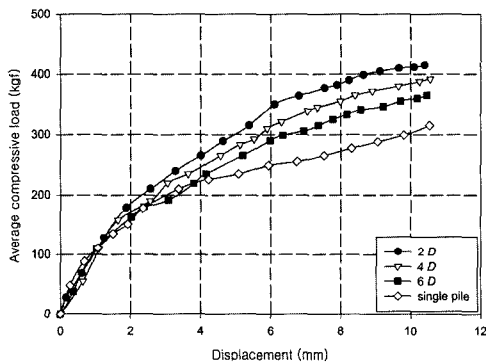


Fig. 8. Load-displacement curve of single pile and 2×2 pile group by compressive load in $D_r = 80\%$

Fig. 7은 조밀한 지반에서의 3×3무리말뚝에 대한 압축재하시험 결과이다. 느슨한 지반과 달리 밀도가 높아짐에 따라 말뚝상호간 구속효과가 높아져 무리말뚝의 평균 압축하중이 증가되었다.

또한, 단말뚝과 지지력을 비교하였을 때 2mm의 말뚝침하 발생 이전에도 큰 하중차이를 나타내지 않았으나 하중의 증가로 무리말뚝의 침하가 계속적으로 발생함에 따라 단말뚝과의 지지력차이가 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 조밀한 지반에서의 2×2무리말뚝에 대한 압축재하시험 결과이다. 3×3무리말뚝과 비교하여 간격비에 따른 지지력 차이가 줄어들었으며 단말뚝과의 하중차이는 여전히 큰 것으로 나타났다.

4.2. 이론식과의 주면마찰력 비교

정적지지력 이론식들 중 압축력을 받는 경우에 Meyerhof⁴⁾의 이론식과 DM-7방법을 적용하여 재하시험에 의해 실측된 값과 비교분석하였다.

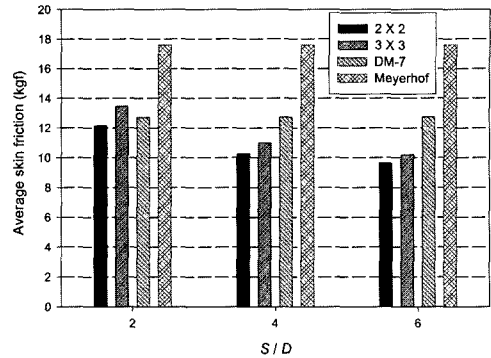


Fig. 9. Comparison of skin friction with theory by compression load test in $D_r = 40\%$

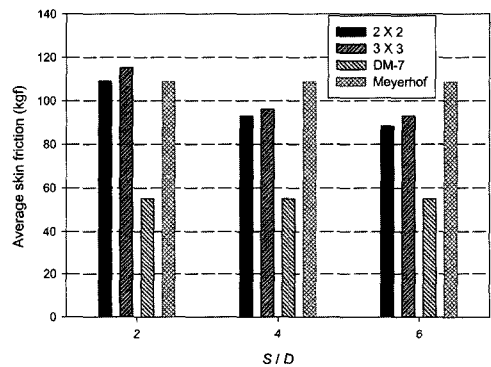


Fig. 10. Comparison of skin friction with theory by compression load test in $D_r = 80\%$

Fig. 9는 느슨한 지반에 타입된 2×2와 3×3무리말뚝에 대한 평균주면마찰력을 이론식과 비교하여 나타낸 것이다. 간격비가 증가함에 따라 이론식과의 마찰력 차이가 증가하는 것으로 나타났으며, DM-7에 의한 지지력 예측이 보다 근접하는 결과를 나타냈다.

이론식과 가장 큰 차이를 나타낸 말뚝은 간격비가 6이고 2×2배열인 경우로 Meyerhof 이론에 의한 주면마찰력 차이는 1.83, DM-7과는 1.32배로 이론식에 의한 방법이 더 큰 값을 나타내었다.

Fig. 10은 조밀한 지반에 타입된 무리말뚝에 대한 평균주면마찰력을 이론식과 비교한 것으로 간격비가 작은 경우에는 이론식보다 실험치가 더 큰 주면마찰력을 나타냈으며, 간격비가 증가함에 따라서는 Meyerhof에 의한 방법이 더 큰 값을 나타냈다. 전반적으로 Meyerhof의 이론식과 실측치가 비교적 일치하는 결과를 나타냈으며, DM-7 방법에 의한 지지력 산정은 조밀한 지반에서는 지반 지지력을 과소평가하는 경향을 나타냈다.

5. 결론

압축시험을 통한 무리말뚝의 주면마찰력을 간격비와 배열 및 지반밀도에 따라 기존 이론식과의 비교를 통하여 분석하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 느슨한 지반에서의 무리말뚝에 대한 압축재하 시험 결과 간격비가 작은 무리말뚝일수록 높은 압축 하중을 받는 것으로 나타났으며, 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 더 큰 지지력 효과가 발생하고 말뚝수가 감소함에 따라 말뚝상호간 중첩효과가 줄어들기 때문에 평균 압축지지력은 감소하는 경향을 나타냈다.

2) 조밀한 지반에서의 무리말뚝에 대한 압축재하 시험 결과 밀도가 높아짐에 따라 말뚝상호간 구속 효과가 높아져 무리말뚝의 평균 압축하중이 증가되었으며, 2×2무리말뚝보다 3×3무리말뚝이 간격비에 따른 지지력 차이가 감소한 것으로 나타났다.

3) 느슨한 지반에 타입된 무리말뚝에 대한 평균 주면마찰력을 이론식과 비교한 결과 간격비가 증가함에 따라 이론식과의 마찰력 차이가 증가하는 것으로 나타났으며, 주면마찰력이 이론식과 가장 큰 차이를 나타낸 말뚝은 간격비가 6이고 2×2배열인 경우 Meyerhof 이론과 1.83배, DM-7 이론과 1.32배로 이론식에 의한 방법이 실측치 보다 더 큰 값을 나타내었다.

4) 조밀한 지반에 타입된 무리말뚝에 대한 평균 주면마찰력을 이론식과 비교한 결과 간격비가 작은 경우에는 이론식보다 실험치가 더 큰 주면마찰력을 나타냈으며, Meyerhof의 이론식과 실측치가 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) Broug, N. W. A., "The Analysis of Cone Resistance and Sleeve Friction as Interactive Stresses, Resulting in a New Pile Bearing Capacity Design Method", Proceedings 2th European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol. 2, pp. 469~478, 1982.
- 2) Dauncey, P. C. and Woodland, A. R., "Bored Cast in Situ Piled Foundations in Keuper Marl for the Birmingham International Arena", Proceedings Piling and Ground Treatment, ICE, London, pp. 139~146, 1983.
- 3) Coyle, H. M., and Ungaro, R., "Improved Design Procedures for Vertically Loaded H-Piles in Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 507~528, 1991.
- 4) Meyerhof, G. G., "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 102, No. GT3, pp. 197~228, 1977.
- 5) Vesic, A. S., "Bearing Capacity of Deep Foundations in Sand", Highway Research Record 39, Highway Research Board, National Research Council, Washington D, C., pp. 112~153, 1963.
- 6) Baligh, M. M., "Cavity Expansion in Sands with Curved Envelopes", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 102, No. GT11, pp. 1131~1147, 1976.
- 7) Matsumoto, T., and Takei, M., "Effects of Soil Plug on Behaviour of Driven Pipe Piles", Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanic and Foundation Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 14~34, 1991.
- 8) Department of the Navy, "Design Manual DM-7 (NAVFAC)", U,S, Government Printing, pp. 177 ~ 244, 1982.
- 9) U.S. Army Corps., "Guide Specification for Construction Section 02456 Steel H-Pile", Center of Geotechnical Engineering Science, 1998.

1) Broug, N. W. A., "The Analysis of Cone Resi-