

측방변형을 일으키는 모래지반속의 H형 말뚝에 작용하는 수평력

김영인*

*경상대학교 토목환경공학부, 해양산업연구소

Behavior and Lateral Force of H-piles under Lateral Soil Movement in Sand

YOUNG-IN KIM*

*Division of Civil & Environmental Eng., Gyeongsang National Univ., Tongyeong, Korea

KEY WORDS: Lateral Force 수평력, Sliding Surface 활동면, Interval Ratio 간격비, Lateral Ground Flow 측방유동, Sliding Mass 활동토괴, Plastic Deformation 소성변형

ABSTRACT: In lateral ground flow, slope stability, and land slide problems, H-piles have often been used, on a horizontally deforming ground, to prevent the failure of mass of soil in a downward and outward movement of a slope. Here, theoretical equations are derived to estimate the lateral force, assuming that the Mohr-Coulomb's plastic states occur in the ground, just around H-piles. In this study, some model experiments were performed to check the lateral forces determined from theoretical equations, using several pile widths, heights and various interval ratios between H-piles for sand specimens. The solution of the theoretical equation, derived from previous studies, showed reasonable characteristics for constants of soil, as well as for the interval, widths, and heights of H-pile.

1. 서 론

측방변형이 발생하는 지반 중에 시공된 구조물의 기초말뚝이나 사면활동방지용 말뚝, 단순히 지반의 측방유동을 방지하기 위한 말뚝 등은 수동말뚝의 전형적인 예이며 특히 소성변형상태인 지반이면서 상하 활동토괴를 갖는 사면활동인 경우 상부토괴는 횡방향 변형상태에 있고 시공된 말뚝은 소성변형 지반에 횡방향으로 저항하는 역할을 하게 된다. 변형지반 중에 말뚝이 일렬로 위치해 있을 때의 말뚝의 저항효과는 중요한 역할을 하게되며 이 경우 지반과 말뚝의 상호 작용에 의한 말뚝의 거동해석 및 응력해석은 어려운 문제점들을 갖고 있다.

지반과 말뚝의 상호작용에 있어서 말뚝사이의 간격을 고려하지 않은 해석들이 있었고 (Kitazima and Kishi, 1967; Sommer, 1977; Hennes, 1963; Polous, 1975) 말뚝과 지반의 상호작용이 합리적으로 취급되면서 말뚝간격의 영향을 고려한 연구들(Ito et al., 1982; De Beer and Carpentier, 1977)이 있었으나 H형 말뚝에는 적용될 수 없어 지금까지의 연구는 원형말뚝에만 적용될 수 있는 결과들이다.

H형 말뚝의 특성상 말뚝의 플랜지폭과 시공간격을 고려한 이론해석의 결과를 실제지반에 적용시킬 때 말뚝의 폭과 말뚝 중심간 간격, 주변 흙의 교란상태, 그리고 안정된 지반이 파괴될때의 전단변형과 압축변형, 말뚝에 걸리는 수평력의 극한값 등을 주의 깊게 고찰할 필요가 있다.

이론해석 결과의 신뢰도는 말뚝의 폭과 말뚝간의 간격으로 표현되는 간격비의 변화량에 의해서 좌우된다.

본 연구에서는 H형 말뚝에 적용할 수 있는 전보의 이론해석(김영인, 2001)을 모형실험을 통해 H형 말뚝의 간격비를 다양하게 변화시킬 때 나타나는 말뚝주변흙의 교란상태 및 전단변형, 압축변형 등을 고찰하고 모래지반의 측방변형시 말뚝에 작용하는 수평력을 규명하고자한다.

2. 말뚝의 수평력

지표면으로부터 임의의 깊이 z 에서 H형 말뚝 한 개에 작용하는 수평압력의 크기 $\sigma(z)$ 는 다음과 같이 주어진다(김영인, 2001).

$$\sigma(z) = \frac{D_2}{K_p \tan \phi} [(\gamma z K_p^2 \tan \phi + 2 c \sqrt{K_p^3} \tan \phi + 2 c \sqrt{K_p} \tan \phi + c) \times \exp\left(-\frac{2 H K_p \tan \phi}{D_2}\right) - c (2\sqrt{K_p} \tan \phi + 1)] + D_1 (\gamma z K_p + 2 c \sqrt{K_p}) - 2 D_2 (\gamma z K_p + 2 c \sqrt{K_p}) \quad (1)$$

여기서, D_1 : H형 말뚝의 중심간 간격

D_2 : H형 말뚝의 순간격

K_p : 수동토압계수

H : H형 말뚝단면의 높이

말뚝의 플랜지 폭 B는 D_1 - D_2 로 표시되고, 식(1)에서 $M=K_p \tan \phi$ 로 놓으면 다음과 같이 정리될 수 있다.

제1저자 김영인 연락처: 경상남도 통영시 인평동 445
055-640-3150 yikim@nongae.gsnu.ac.kr

$$\sigma(z) = D_2 \left[(\gamma z K_P + 2c\sqrt{K_P} + \frac{2c}{\sqrt{K_P}} + \frac{c}{M}) \exp\left(\frac{2HM}{D_2}\right) - \frac{2c}{\sqrt{K_P}} - \frac{c}{M} - 2\gamma z K_P - 4c\sqrt{K_P} \right] + D_1(\gamma z K_P + 2c\sqrt{K_P}) \quad (2)$$

점착력 $c=0$ 인 사질토의 경우 (2)식에서 수평압력의 크기 $\sigma(z)$ 는 다음과 같이 된다.

$$\sigma(z) = D_2 \left[\gamma z K_P \exp\left(\frac{2HM}{D_2}\right) - 2\gamma z K_P \right] + D_1 \gamma z K_P = D_2 \gamma z K_P \left[\exp\left(\frac{2HM}{D_2}\right) - 2 \right] + D_1 \gamma z K_P \quad (3)$$

따라서, 지표면에서 임의의 깊이 z 까지 H형 말뚝 한 본에 작용하는 전체 수평력의 크기 P_t 는 다음과 같다.

$$P_t = \int_0^z \sigma(z) dz = \frac{1}{2} D_2 \gamma z^2 \left[K_P \exp\left(\frac{2HM}{D_2}\right) - 2K_P \right] + \frac{1}{2} D_1 \gamma z^2 K_P \quad (4)$$

3. 모형실험

3.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 횡하중 조정장치, 토조, 변위와 하중측정 및 데이터 기록장치의 3개 부분으로 크게 나눌 수 있다. 토조는 강판으로 제작하였으며 토조 내부크기는 60cm 길이 \times 30cm 높이 \times 30cm 폭으로 하였다.

시료변위시 마찰력을 줄이기 위해 그리이스를 토조 내부벽면에 도포 하였으며 하중과 변위의 측정 및 기록은 Data logger(TDS-302)를 이용하였다. 실험장치는 Fig. 1, Fig. 2, Photo 1, Photo 2에 모형말뚝은 Fig. 3, Fig. 4와 같다.

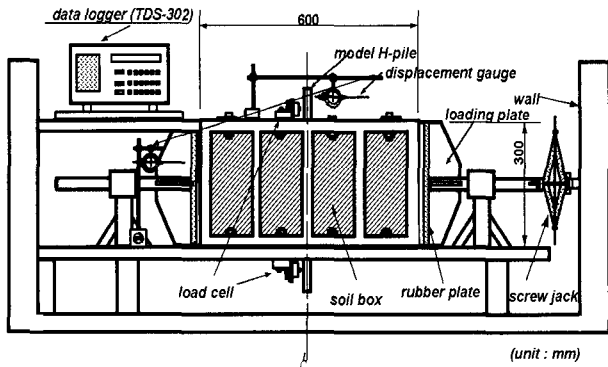


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up(cross section)

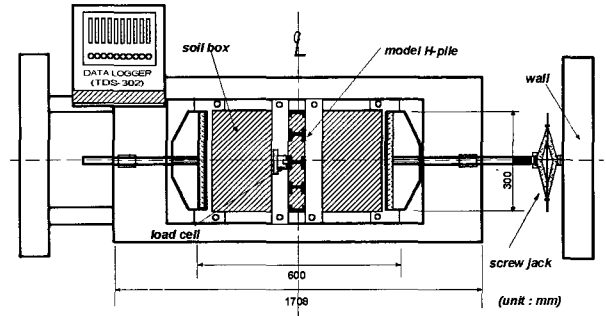


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up(plan view)

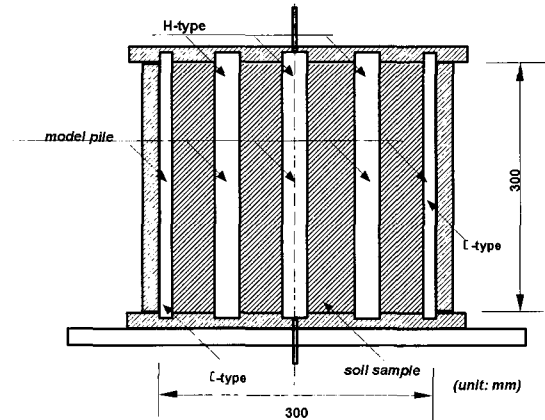


Fig. 3 Cross section of soil box and model piles

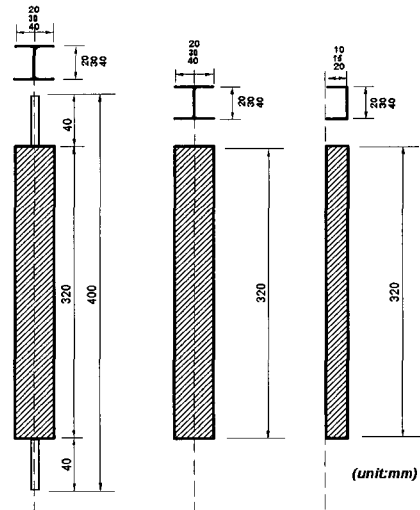


Fig. 4 Dimension of model piles

토조의 한 가운데는 Fig. 3과 같이 하중 측정용 H형 말뚝을 배치하고 좌우로 H형 말뚝과 토조 벽면에는 L형 말뚝을 배치하여 일렬배치상태로 하였다. 말뚝 단면의 크기를 Fig. 4와 같이 H형의 경우 폭(B) \times 높이(H) \times 길이(L)를 $4^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}} \times 32^{\text{cm}}$, $3^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}} \times 32^{\text{cm}}$, $2^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}} \times 32^{\text{cm}}$, $4^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}} \times 36^{\text{cm}}$, $3^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}} \times 36^{\text{cm}}$, $2^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}} \times 36^{\text{cm}}$ 의 6종류로 하고, L형의 경우 B \times H \times L를 $2^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}} \times 32^{\text{cm}}$, $1.5^{\text{cm}} \times 3^{\text{cm}} \times 32^{\text{cm}}$, $1^{\text{cm}} \times 2^{\text{cm}} \times 32^{\text{cm}}$ 의 3종류로 하여 스테레스강으로 제작하여 사용하였고, 중앙의 말뚝은 하중 측정을 위해 웹(web) 부분을 길게 하였으며 말뚝의 양단은 자유단으로 하였다.

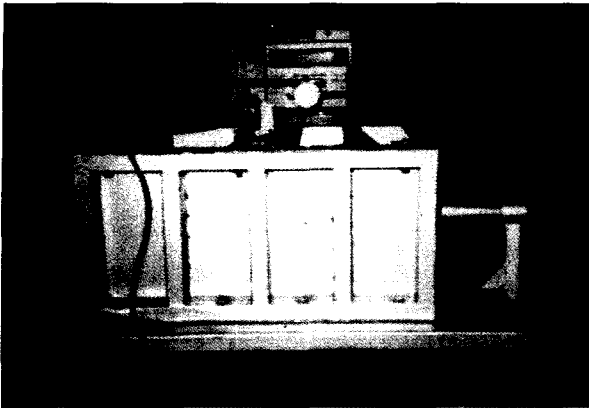


Photo 1 View of experimental set up (side view)

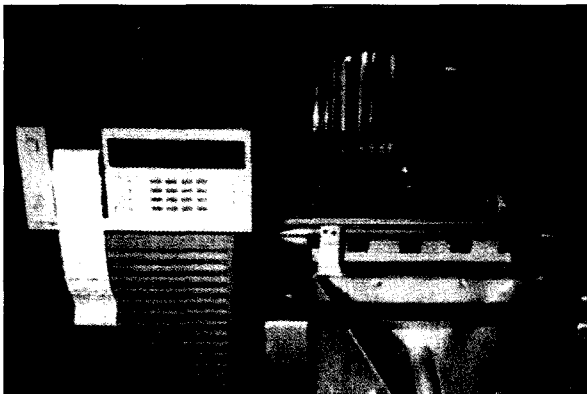


Photo 2 View of experimental set up (front view)

3.2 실험방법

실험은 토조 내에 모형말뚝을 설치하되 간격비 (D_2/D_1)를 임의로 조정하기 위해 말뚝의 개수를 달리 하였다. D_1 과 D_2 는 $D_1-D_2=B$ 의 관계가 있고, D_1 값이 커지면 D_2 값도 따라서 커지고 간격비 D_2/D_1 값도 커진다. 여기서, 간격비 D_2/D_1 는 말뚝의 중심간 간격에 대해 순간격이 차지하는 비율을 말하며, 이 값이 갖는 의미는 말뚝단면의 폭 B 를 고려하지 않고 말뚝이 얼마만큼 큰 간격으로 떨어져 위치하는가를 곧 바로 알 수 있는 변수값이 된다. 즉, 순간격이 폭 B 만큼 떨어져 있으면 $D_2/D_1=0.5$ 값을 나타낸다.

시료는 모래(주문진 표준사, 일반모래)를 토조내부에 채워되 토조 내의 상하 밀도를 균일하게 하기 위하여 투입 낙하고를 일정하게 하였으며 시료의 토성치는 Table 1에 나타냈다.

횡하중 조정장치를 통해 하중판으로부터 시료에 측압을 가하고 측압이 중앙의 하중측정용 말뚝에 전달되는 순간부터 토조 상하에 부착된 로드셀에 전달되며 로드셀이 감지한 측압은 말뚝 한 분당 받게 되는 횡하중으로 기록장치에 기록되어지고, 하중판의 횡방향 변위는 다이얼 게이지로부터 측정된다. 상하의 로드셀은 용량 500kgf 를 사용하였으며, 하중판의 수평방향 변위 속도는 1mm/min 를 유지하였다.

3.3 실험결과 및 고찰

Table 1은 실험에 사용된 2종류의 모래시료의 토성치와 간격비 D_2/D_1 의 변화에 따른 실험결과를 나타낸 것이다. Table 1

에서 모래시료 및 모형말뚝에 대한 12가지 경우의 말뚝단면의 폭(B) 및 높이(H), 간격비 D_2/D_1 등의 실험조건과 (4)식의 이론식에 의한 Pt값 및 실험치를 나타내고 있다. 여기서 ϕ 값이 증가하면 말뚝에 작용하는 P의 값은 증가함을 알 수 있다. 또한, Table 1과 Fig. 7, Fig. 8에서 임의의 ϕ 값에 대해서 간격비 D_2/D_1 값이 증가하면 오히려 P값은 감소함을 알 수 있고 이러한 두 가지 현상은 각각 ϕ 값이나 D_2/D_1 값이 크면 클수록 증가나 감소율이 현저함을 알 수 있다. Table 1에서 임의로 선택한 S-1, S-2, S-3, S-6, S-7, S-8, S-11의 시료에 대한 실험결과에서 시료의 변위량 δ 와 H-pile 한 개당 작용하는 수평력 P 와의 관계를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에서 각각의 시료는 공통적으로 수평력 P는 ϕ 값, 말뚝단면의 제원인 B, H에 비례하고 D_2/D_1 에 반비례하며 시료의 변형이 증가하여 일정변형에 달한 후에는 항복하중을 거쳐 더 이상의 하중증가 없이 변위만 증가하는 형태를 보여주고 있다.

Table 1 Appearance of parameters for sand specimen and theoretical and experimental values of lateral force

standard sand									
NO.	D_2/D_1	D_1 (m)	D_2 (m)	H(m)	B(m)	z(m)	P(kg)	P'(kg)	
S-1	0.73	0.15	0.11	0.04	0.04	0.30	148.1	151.5	
S-2	0.80	0.15	0.12	0.03	0.03	0.30	90.4	86.0	
S-3	0.87	0.15	0.13	0.02	0.02	0.30	41.8	45.5	
S-4	0.47	0.075	0.035	0.04	0.04	0.15	630.6	635.3	
S-5	0.60	0.075	0.045	0.03	0.03	0.30	301.0	308.6	
S-6	0.73	0.075	0.055	0.02	0.02	0.30	74.0	73.2	

P:theoretical value, P*:experimental value
 constant of soil; $G_s=2.64, \phi=34.5^\circ, vt=1.52(t/m^3),$
 $c=0(t/m^3), e=0.76$

sand									
NO.	D_2/D_1	D_1 (m)	D_2 (m)	H(m)	B(m)	z(m)	P(kg)	P'(kg)	
S-7	0.73	0.15	0.11	0.04	0.04	0.30	103.3	113.0	
S-8	0.80	0.15	0.12	0.03	0.03	0.30	59.7	62.9	
S-9	0.87	0.15	0.13	0.02	0.02	0.30	32.5	35.8	
S-10	0.47	0.075	0.035	0.04	0.04	0.20	458.5	465.7	
S-11	0.60	0.075	0.045	0.03	0.03	0.30	173.0	180.5	
S-12	0.73	0.075	0.055	0.02	0.02	0.30	51.6	57.4	

P:theoretical value, P*:experimental value
 constant of soil; $G_s=2.63, \phi=32.5^\circ, vt=1.56(t/m^3),$
 $c=0(t/m^3), e=0.69$

Fig. 6의 (a),(b),(c)와 Fig. 8의 (b)는 Fig. 5 만으로는 특정 변위에서의 항복하중값을 파악하기 어렵기 때문에 하중과 변위의 관계를 log p-log δ 곡선으로 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 이론값은 (4)식의 Pt값이며 2개의 접선이 만나는 점 A를 항복하중으로 보면, A점에 대응하는 수평력 P값은 대략 (4)식의 이론값과 근사하게 나타나고 있어 (4)식의 Pt값은 실무에서 응용할 때 적절한 안전율을 고려하여 사용함이 타당 할 것이다.

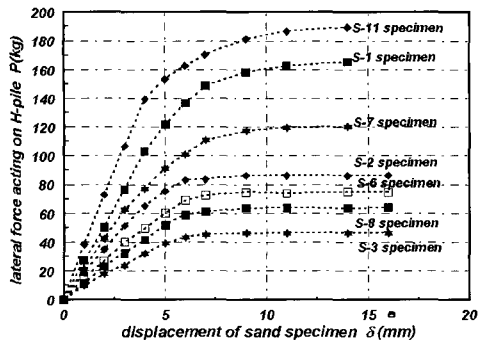


Fig. 5 Relation between lateral force P and displacement of sand specimen δ

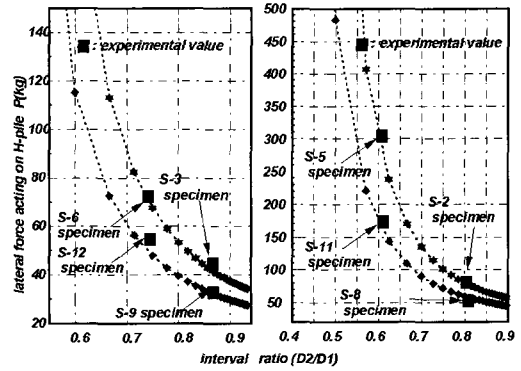


Fig. 7 Relation between lateral force P and interval ratio D_2/D_1

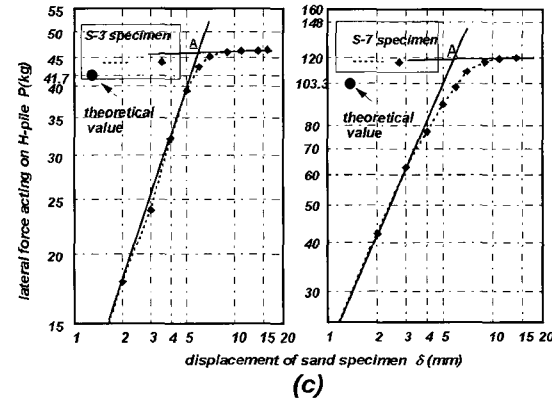
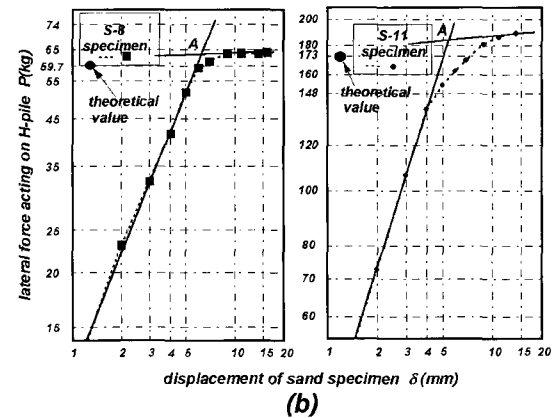
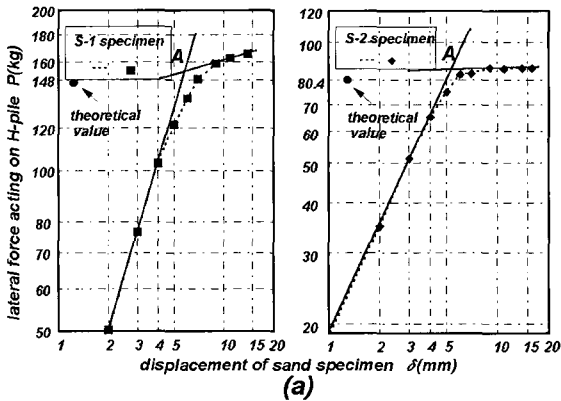


Fig. 6 Relation between lateral force P and displacement of sand specimen δ in log-log scale

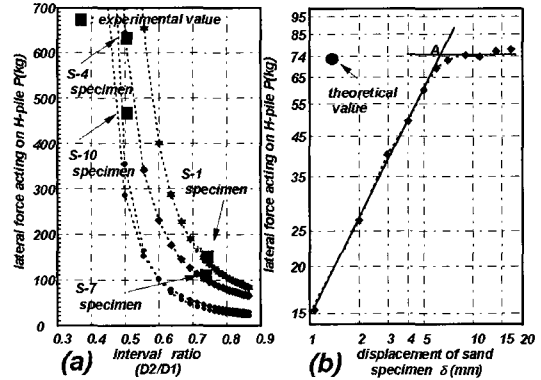


Fig. 8 Relation between lateral force P and interval ratio D_2/D_1

Fig. 7은 ϕ 값이 같은 동일시료에서 B, H가 다를 경우, Fig. 8의 (a)는 ϕ 값이 다르고 B, H 값도 다른 경우의 이론식의 p 값과 실험에서 얻은 항복하중에 해당하는 P값과의 관계를 각 시료에 대해 간격비 D_2/D_1 값의 변화에 따른 관계를 나타낸 것이다. 2가지 경우의 그림에서 수평력 P는 D_2/D_1 에 반비례하여 동일 내부미찰각에서는 말뚝단면의 폭 B, H에 수평력이 비례하고 동일 간격비에서는 ϕ 값에 비례함으로써 이론식의 특성을 잘 나타내고 있다.

4. 결 론

측방변형이 발생하는 모래지반속의 H형 말뚝에 적용할 수 있는 이론해석의 결과를 실험을 통해 규명하고자 말뚝의 단면 크기 및 말뚝 중심간 간격을 다양하게 변화 시켜가면서 모형 실험을 하였으며 말뚝의 간격비를 변화시킬 때 나타나는 말뚝 주변흙의 교란상태 및 전단변형, 압축변형, 말뚝에 작용하는 수평력 등을 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수평력 P를 하중-변위곡선인 $\log p\text{-}\log\delta$ 곡선 상에서 두 개의 접선이 만나는 점을 항복하중으로 볼 때 이 점에 대응하는 수평력은 이론식의 P 값과 근사하였다.
- (2) ϕ 값이 증가하면 말뚝에 작용하는 P의 값은 증가하고 임의의 ϕ 값에 대해서 간격비 D_2/D_1 값이 증가하면 오히려 P값은 감소하며 이러한 두 가지 현상은 각각 ϕ 값이나 D_2/D_1 값이 크면 클수록 증가율이나 감소율이 현저하였다.
- (3) ϕ , B, H 등의 각각의 변수들에 의한 실험결과의 P값들은

동일 내부마찰각에서는 말뚝단면의 폭 B, H에 수평력이 비례하고 동일 간격비에서는 ϕ 값에 수평력이 비례함으로서 실험결과는 이론식의 특성을 잘 따랐다.

참 고 문 헌

- 김영인 (2001). "소성변형지반 중의 H형 말뚝에 작용하는 수평력", 한국해양공학회지, 제15권 제4호, pp 86-91.
- De Beer, E.E. and Wallays, M. (1970). "Stabilization of a slope in Schists by means of bored piles reinforced with steel beams," Proc., 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Beograd, Vol 3, pp 361-369.
- De Beer, E.E. and Wallays, M. (1972). "Forces induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soil around the pile", Proc., 5th ECSMFE, Madrid, Vol 1, pp 325-332.
- De Beer, E.E., and Carpentier, R. (1977). "Discussion, Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles", Soils and Foundations Vol 17, No 1, pp 68-82.
- De Beer, E.E. (1977). "Piles subjected to static lateral loads", State-of-the-art Report, Proc., 9th ICSMFE, Specialty Session 10, Tokyo, pp 1-14.
- Hennes, R. G. (1963). "Analysis and control of landslide", Bull. of University of Washington, Engineering Experiment Station, No 91, pp 41-44.
- Ito, T. and Matsui, T. (1975). "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles", Soils and Foundations Vol 15, No 4, pp 43-59.
- Ito, T. and Matsui, T. (1977). "The effect of piles in a row on the slope stability", Proc., 9th ICSMFE, Specialty Session 10, Tokyo, pp 81-86.
- Ito, T. and Matsui, T. (1978). "The effect of piles in a row on the slope stability", Soils and Foundation, Vol 18, No 2, pp 41-44.
- Ito, T., Matsui, T. and Hong, W.P. (1964). "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", J. of SMFD, ASCE 90(SM3), pp 123-156.
- Ito, T., Matsui, T. and Hong, W.P. (1979). "Design method for the stability analysis of the slope with landing pier", Soils and Foundations, Vol 19, No 4, pp 43-57.
- Ito, T., Matsui, T. and Hong, W.P. (1981). "Design method for stabilizing piles against landslide_one row of piles", Soils and Foundations, Vol 21, No 1, pp 21-32.
- Ito, T., Matsui, T. and Hong, W.P. (1982). "Extended design method for stabilizing piles against large scale landslide_multi-rows of piles", Soils and foundations, Vol 22, No 1, pp 1-13.
- Kitazima, S. and Kishi, S. (1967). "An effect of embedded pipes to increase resistance against circular slides in soft clay foundation", Technical Note of Port and Harbor Research Institute, Vol 29, pp 63-94.
- Poulos, H.G. (1971). "Behavior of laterally loaded piles_1.Single piles", J. of SMFD, ASCE 97(SM5), pp 711-731.
- Poulos, H.G. (1971). "Behavior of laterally loaded piles_2. Pile Groups", J. of SMFD, ASCE 97(SM5), pp 733-751.
- Poulos, H.G. (1972). "Behavior of laterally loaded piles_3.Socketed piles", J. of SMFD, ASCE 99(SM5), pp 341-360.
- Poulos, H.G. (1973). "Analysys of piles in soil undergoing lateral movement", J. of SMFD, ASCE 99(SM5), pp 391-405.
- Poulos, H.G. (1975). "Lateral load-deflection prediction for pile group", J. of Geotechnical Engineering Division, ASCE 101(GT1), pp 127-132.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980). Pile foundation analysis and design, John Willey and Sons, New York, pp 143-162.
- Sommer, H. (1977). "Creeping slope in a stiff clay", Proc. 9th ICSMFE, Specialty Session 10, Tokyo, pp 113-118.

2002년 9월 14일 원고 접수

2002년 11월 13일 최종 수정본 채택