

말뚝의 허용횡방향지지력 결정법의 비교연구

이승현¹, 한진태^{2*}

¹선문대학교 건설시스템안전공학과, ²한국건설기술연구원

An Comparative Study on the Method of Determining Allowable Horizontal Bearing Capacity of Piles

Seung-Hyun Lee¹, Jin-Tae Han^{2*}

¹Dept. of Civil Infrastructure Systems and Safety Engineering, Sunmoon University

²Korea Institute of Construction Technology

요약 말뚝의 허용횡방향지지력을 결정하는 방법으로는 지반반력법과 극한횡방향지지력에 근거한 방법이 많이 쓰이고 있는데 설계시 지반반력법에 근거한 방법만을 적용하는 경우가 있다. 본 연구에서는 지반조건과 말뚝머리 구속조건 그리고 말뚝길이에 따른 말뚝의 허용지지력을 이들 두 가지 방법을 적용하여 구하고 상호 비교함으로써 해석에서 고려한 조건들이 말뚝의 허용횡방향지지력 결정법에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 연구결과에 따르면 말뚝머리 구속조건 및 말뚝길이에 상관없이 연약 점성토 지반에 설치된 말뚝의 경우 지반반력법에 의한 허용횡방향지지력이 설계를 지배함을 알 수 있었고 점성토의 비배수강도가 커짐에 따라 극한횡방향지지력을 통한 허용횡방향지지력이 설계를 지배함을 알 수 있다. 사질토 지반에 설치된 말뚝의 경우 느슨한 사질토지반에 설치된 말뚝머리 자유인 짧은말뚝의 경우를 제외하고 모든 경우에 있어 극한횡방향지지력을 통한 허용횡방향지지력이 설계를 지배함을 알 수 있다. 횡방향말뚝의 설계시 허용 횡방향변위량에 근거한 설계만으로 충분하다는 견해도 있지만 본 연구결과에 따르면 극한횡방향지지력에 근거한 허용횡방향지지력의 계산 또한 필요함을 알 수 있었다. 수평지반반력계수는 허용횡방향변위량 이내에서는 말뚝폭에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었으며 실제 많이 쓰이는 말뚝폭의 범위인 20~90cm 인 경우 말뚝폭의 영향을 무시해도 될 것으로 생각된다.

Abstract Among several methods for determining the allowable lateral resistances of piles, the subgrade reaction method and ultimate lateral resistance method are generally used. To determine the effects of the soil conditions, pile head restraint conditions, and pile lengths on determining the allowable lateral resistances of piles, computations of the allowable lateral resistances of piles using the two methods were executed, and the computation results were compared. For piles in soft cohesive soil, the pile design is governed by the allowable lateral resistance of a pile from subgrade soil reaction method regardless of the pile head restraints conditions and pile lengths. The allowable lateral resistance of a pile from the ultimate lateral resistance governs the design as the undrained shear strength increases. Except for the case of a short pile, which is installed in loose granular soil, the allowable lateral resistance of a pile from ultimate lateral resistance governs the design of laterally loaded piles. According to this study, computation of the ultimate lateral resistance of a pile is needed, even though some opinions suggest that the design of a laterally loaded pile is satisfied only by the subgrade reaction method. The pile width barely influences the coefficient of horizontal subgrade reaction. Realistically, the effect of the pile width can be disregarded in the condition of common pile widths of 20~90cm.

Keywords : Allowable Lateral Resistance of a Pile, Subgrade Reaction Method, Cohesive and Cohesionless Soil, Pile Head Restraint Condition, Coefficient of Subgrade Reaction

*Corresponding Author : Jin-Tae Han(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: jimmyhane@kict.re.kr

Received February 24, 2021

Accepted June 4, 2021

Revised March 22, 2021

Published June 30, 2021

1. 서론

말뚝에는 축방향 하중에 추가하여 횡방향하중과 모멘트가 작용될 수 있는데 이러한 작용하중의 원인으로는 바람, 파도, 지진, 토압 등을 들 수 있다. 횡방향하중을 받는 말뚝의 말뚝머리 구속조건으로는 크게 말뚝머리 자유조건과 말뚝머리 회전구속조건으로 나눌 수 있는데 말뚝머리 구속조건을 결정짓는 요소는 말뚝과 말뚝캡의 상대강성과 말뚝머리 연결방식이라 할 수 있다. 횡방향말뚝의 지지력결정법으로는 Brinch Hansen 방법과 Broms 방법이 있으며[1-3] 횡방향말뚝의 변위해석법으로는 탄성해석법, 지반반력법이 있다. 횡방향말뚝의 설계를 위한 허용횡방향지지력을 결정하기 위해서는 극한 횡방향지지력을 안전율로 나누거나 말뚝의 허용 횡방향 변위량에 대응하는 횡방향하중을 구하여 둘 중 작은 값을 선택하게 된다. 국내에서 횡방향말뚝 설계시 이들 두 가지 방법 중 주로 지반반력법에 근거한 방법만을 적용하는 경우가 있어 주의가 필요하다 할 수 있다. 지반반력법에 의한 말뚝의 허용횡방향지지력은 말뚝의 횡방향 허용변위량에 의존하는 방법이다. 말뚝의 횡방향 허용변위량에 관해서는 정량적으로 제시된 자료가 거의 없는데 일본의 경우 1990년 이전에는 평시의 경우 말뚝의 횡방향 허용변위량을 10 mm로 보았으며 지진시에는 횡방향 허용변위량을 15 mm로 보았다[4]. 1990년 이후에는 말뚝의 횡방향 허용변위량을 말뚝지름의 1%에 해당되는 변위 또는 15 mm 중에서 큰 값으로 하고 있다[5, 6]. 말뚝지름의 1%에 해당되는 변위량을 허용변위량으로 하는 경우 허용변위량 15 mm에 대응하는 말뚝지름은 1.5 m 인데 실제적으로 많이 쓰이는 말뚝지름을 고려해 볼 때 대부분의 말뚝에서는 15 mm 가 말뚝의 횡방향허용변위량 기준이 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 다양한 지반조건과 말뚝조건 및 말뚝머리 구속조건을 고려하고 횡방향말뚝의 설계에 많이 쓰이는 Broms 방법과 지반반력법을 적용하여 결정된 허용횡방향지지력을 상호비교함으로써 해석에서 고려한 조건에 따라 어떤 해석법이 설계를 지배하는지 살펴보고자 하였다. 또한 지반반력법의 주요인자인 지반반력계수의 특성과 적용상의 주의점에 대하여 문헌고찰 내용을 중심으로 강조하고자 하였다.

2. 말뚝의 극한 횡방향지지력

Broms 방법에서는 말뚝을 짧은말뚝(강제말뚝)과 긴

말뚝(연성말뚝)으로 고려하는데 L 을 말뚝 근입길이라 하면 짧은 말뚝에 대한 기준은 사질토의 경우 $L/T \leq 2$ 이고 점성토의 경우 $L/R \leq 2$ 이다. 여기서 T 와 R 은 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같이 정의된다[1-3].

$$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5} \quad (1)$$

$$R = \left(\frac{EI}{k_h} \right)^{1/4} \quad (2)$$

Where E denotes modulus of elasticity of pile, I denotes moment of inertia of pile, k_h denotes coefficient of horizontal subgrade reaction, n_h denotes constant of horizontal subgrade reaction ($k_h = n_h z$), z denotes depth from ground surface

식 (2)에서 점성토에 해당되는 k_h 는 깊이에 관계없이 일정한 값을 갖는다고 본다. 긴말뚝 기준은 사질토의 경우 $L/T \geq 4$ 이고 점토의 경우 $L/R \geq 3.5$ 가 된다. 말뚝의 극한횡방향지지력을 얻고자 할 때 점성토에 설치된 짧은말뚝의 경우 지표면으로부터 $1.5B$ 깊이까지의 지반반력은 없다고 보고 이후로 $9s_u B$ 인 일정한 극한지반반력이 작용하는 것으로 본다. 여기서 B 는 말뚝 폭을 의미하며 s_u 는 점성토의 비배수강도를 의미한다. 사질토에 설치된 짧은말뚝의 경우 말뚝배면에 작용하는 수동토압은 무시하고 말뚝 전면에서의 수동토압은 Rankine 수동토압의 3배에 해당되는 수동토압이 작용되는 것으로 본다. 사질토에 설치된 긴말뚝의 경우 지반반력은 포물선 분포를 보이는데 지표면으로부터의 깊이가 z_0 이후로 지반반력은 감소하게 된다. 여기서 z_0 란 지표면으로부터의 지반반력의 분포합력이 말뚝머리에 작용하는 극한횡방향력과 동일하게 되는 깊이를 의미한다. 점성토에 설치된 긴말뚝의 경우 지표면으로부터 $1.5B + z_0$ 이후로 지반반력이 감소하게 된다. 점성토와 사질토에 설치된 말뚝의 극한횡방향지지력(H_u)을 말뚝머리 구속조건에 따라 표로 나타내면 Table 1과 같다. Table 1에서 e , M_y , γ' , K_p 는 각각 지표면으로부터 횡방향력이 작용하는 지점까지의 거리, 말뚝재료의 소성모멘트, 사질토의 유효단위중량, Rankine 수동토압계수를 의미한다. Table 1을 통해 알 수 있듯이 긴말뚝의 경우 극한횡방향지지력은 말뚝의 항복모멘트에 의존하는 것과는 달리 짧은말뚝의 극한횡방향지지력은 지반반력에 전적으로 의존하게 된다.

3. 지반반력법

횡방향하중을 받는 말뚝의 횡방향거동에 대한 미분방정식은 식 (3)과 같다[7].

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + p = 0 \quad (3)$$

Where, p denotes soil reaction per unit pile length, y denotes lateral displacement of pile, z denotes depth

p 와 y 사이의 관계는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$k_h = p/y \quad (4)$$

수평지반반력계수의 산정과 관련해서는 지반의 단위면적당 스프링상수 개념의 지반반력계수, k' 에 말뚝의 지름을 곱한 $k_h = k' B$ 로 보는 경우와 말뚝의 수평지반반력계수가 말뚝지름과 무관하게 적용되는 경우를 볼 수 있는데 후자의 경우 그 근거는 Fig. 1을 통해 설명된다.

Fig. 1은 깊이 z 에 있는 두 개의 말뚝단면을 나타내고 있는데 고려하는 말뚝길이는 단위길이이다. 그림에 나타나 있는 바와 같이 말뚝폭이 B 에서 nB 로 증가하면 압

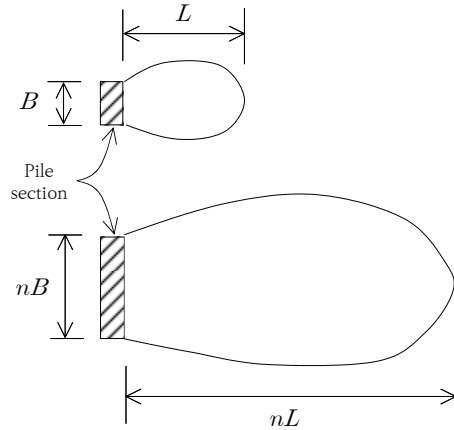


Fig. 1. Influence of pile width on dimensions of bulb of pressure

력구근(bulb of pressure)의 길이도 L 에서 nL 로 증가된다. 이때 말뚝의 횡방향변위는 압력구근의 영향범위와 평균압력에 근사적으로 비례하게 된다. Fig. 1에서 말뚝의 단위길이당 작용하는 횡방향하중을 H 라 하면 평균압력은 말뚝폭이 B 인 경우 H/B 가 되고 말뚝폭이 nB 인 경우 $H/(nB)$ 가 된다. 그런데 말뚝폭이 B 인 경우와 nB 인 경우 횡방향변위량은 각각 $H/B \times L$ 와 $H/(nB) \times (nL) = H/B \times L$ 에 비례하여 서로 같음을 알 수 있다. 따라서 하중 작용영역의 크기효과를 고려해

Table 1. Formulas of ultimate lateral resistance of pile

Cohesive soil	Free head	Short pile ($L/R \leq 2$)	$H_u = \frac{2.25s_u B(L-1.5B-z_0)^2}{e+1.5B+0.5z_0}, z_0 = \frac{H_u}{9s_u B}$
		Long pile ($L/R \geq 3.5$)	$H_u = \frac{M_y}{e+1.5B+0.5z_0}$
	Restrained head against rotation	Short pile ($L/R \leq 2$)	$H_u = 9s_u B(L-1.5B)$
		Long pile ($L/R \geq 3.5$)	$H_u = \frac{2M_y}{(1.5B+0.5z_0)}, z_0 = \frac{H_u}{9s_u B}$
Cohesionless soil	Free head	Short pile ($L/T \leq 2$)	$H_u = \frac{0.5\gamma' L^3 BK_p}{L+e}$
		Long pile ($L/T > 4$)	$H_u = \frac{M_y}{e+0.54 \left(\frac{H_u}{\gamma' BK_p} \right)^{0.5}}$
	Restrained head against rotation	Short pile ($L/T \leq 2$)	$H_u = 1.5\gamma' L^2 BK_p$
		Long pile ($L/T > 4$)	$H_u = \frac{3M_y}{z_0}, z_0 = 0.82 \left(\frac{H_u}{\gamma' BK_p} \right)^{0.5}$

볼 때 수평지반반력계수(k_h)는 말뚝 폭에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이러한 가정은 말뚝폭이 20~90 cm 인 경우 합리적으로 여겨진다[8]. 재하면적의 크기를 고려한 이러한 논의는 지반의 선형탄성거동에 근거하고 있다는 점에 유념해야 한다. 말뚝폭이 지반반력계수에 약간의 영향을 미친다는 연구결과도 있는데 수평지반반력계수는 본질적으로 변위, 깊이, 말뚝폭, 재하방법, 재하속도 그리고 재하횡수 등에 의존하는 경험적인 값임에 유의할 필요가 있다[9]. 지반반력계수를 고려함에 있어 k_h 와 n_h 의 정확도는 해석에 결정적인 영향을 미치지 않는다고 알려져 있는데 n_h 의 값이 32배 증가할 때 말뚝에 발생되는 휨모멘트는 2배 정도 차이를 보이는 것으로 알려져 있다[10]. Palmer and Thompson[11]은 k_h 를 식 (5)와 같이 제안한 바 있다.

$$k_h = k_{h(z=L)} \left(\frac{z}{L} \right)^n \quad (5)$$

Where, L denotes pile embedment depth, z denotes depth from ground surface, $k_{h(z=L)}$ denotes coefficient of horizontal subgrade reaction at pile tip, n denotes coefficient which is equal or greater than 0

Davisson and Prakash[12]에 따르면 모래지반의 경우 n 값으로 1.5가 적당하고 비배수조건하에 있는 점토지반의 경우 n 값으로 0.15가 적당하다고 보았는데 일반적으로는 사질토 지반에 설치된 말뚝의 경우 식 (6)이 많이 쓰인다.

$$k_h = n_h z \quad (6)$$

Terzaghi[13]는 수중 모래지반에 대하여 n_h 값으로 느슨한 사질토지반과 중간밀도의 사질토지반 그리고 조밀한 사질토지반 각각에 대하여 1500 kN/m^3 , 5200 kN/m^3 그리고 12500 kN/m^3 을 제안한 바 있다. 점토의 경우 수평지반반력계수는 일반적으로 깊이에 무관하게 일정하다고 보는데 Davisson[14]은 점토의 비배수강도(s_u)와 말뚝의 수평지반반력계수(k_h) 사이에 $k_h = 67s_u$ 인 관계가 있음을 제안한 바 있다.

3.1 점토지반에 대한 횡방향변위량 (k_h =일정)

3.1.1 말뚝머리 자유조건

말뚝머리 자유조건하에서의 말뚝 변위에 대한 해석하는 식 (7)과 같다[15].

$$y = e^{\beta z} [C_1 \cos(\beta z) + C_2 \sin(\beta z)] + e^{-\beta z} [C_3 \cos(\beta z) - C_4 \sin(\beta z)] \quad (7)$$

Where,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h}{4EI}}$$

$$A = \frac{M_t}{2\beta^2 EI} \quad (M_t : \text{Bending moment at pile head})$$

$$B = \frac{H_t}{2\beta^3 EI} \quad (H_t : \text{Lateral load at pile head})$$

$$C_2 = \left\{ \begin{array}{l} A[1 + 2\sin(\beta L)(\sin(\beta L) + \cos(\beta L)) - e^{-2\beta L}] \\ + B[2\sin^2(\beta L)] \end{array} \right\} / \{2 + 4\sin^2(\beta L) - (e^{2\beta L} + e^{-2\beta L})\}$$

$$C_3 = \left\{ \begin{array}{l} A[e^{2\beta L} + 2\sin(\beta L)\cos(\beta L) + \sin^2(\beta L) - \cos^2(\beta L)] \\ + B[e^{2\beta L} - 2\sin(\beta L)\cos(\beta L) - 1] \end{array} \right\} / \{e^{2\beta L} + e^{-2\beta L} - 4\sin^2(\beta L) - 2\}$$

$$C_4 = A - C_2$$

$$C_1 = 2C_2 + C_3 - (A + B)$$

3.1.2 말뚝머리 회전구속조건

말뚝머리 회전구속조건하에서 점토지반에 대한 해석하는 식 (7)과 동일한 형태를 갖는데 식 (7)에서 C_1 , C_2 , C_3 그리고 C_4 는 다음과 같다.

$$C_1 = \left\{ B[1 + 2\cos^2(\beta L) + e^{-2\beta L} - 2\cos(\beta L)\sin(\beta L)] \right\} / \{2[e^{2\beta L} - e^{-2\beta L} + 4\cos(\beta L)\sin(\beta L)]\}$$

$$C_4 = \left\{ B[e^{2\beta L} + \sin^2(\beta L) + 2\cos(\beta L)\sin(\beta L) - \cos^2(\beta L)] \right\} / \{2[e^{-2\beta L} - 4\cos(\beta L)\sin(\beta L) - e^{2\beta L}]\}$$

$$C_2 = B/2 + C_4$$

$$C_3 = B/2 + C_1$$

$$B = \frac{H_t}{2\beta^3 EI}$$

3.2 사질토지반에 대한 횡방향변위량 ($k_h = n_h z$)

3.2.1 말뚝머리 자유조건

말뚝머리 자유조건에 대한 말뚝의 횡방향변위(y_z)는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$y_z = y_A + y_B \quad (8)$$

Where y_A denotes lateral displacement due to pile head load, y_B denotes lateral displacement due to moment load at the pile head

식 (8)은 탄성거동을 가정한 중첩의 원리가 적용됨을 나타내고 있다. y_A 와 y_B 에 영향을 미치는 인수를 무차원량으로 정의하여 횡방향변위를 나타내면 식 (8)는 식 (9)와 같이 표현된다[16].

$$y_z = y_A + y_B = A_y \frac{H_t T^3}{EI} + B_y \frac{M_t T^2}{EI} \quad (9)$$

Reese and Matlock[17]은 식 (9)에 대하여 유한차분법을 적용하여 계수 A_y 와 B_y 를 결정하였는데 Z_{max} 가 4인 경우 지표면에서의 말뚝의 횡방향변위량($y_{z=0}$)은 식 (10)과 같게 된다. 여기서 $Z_{max} = L/T$ 로 정의되며 L 은 말뚝의 근입길이를 의미하고 T 는 식 (1)에 의한 값이다.

$$y_{z=0} = \frac{2.435H_t T^3}{EI} + \frac{1.623M_t T^2}{EI} \quad (10)$$

짧은말뚝($Z_{max} \leq 2$)에 대한 지표면에서의 횡방향변위량은 식 (11)과 같이 표현된다[18].

$$y_{z=0} = \frac{4.7H_t T^3}{EI} + \frac{3.25M_t T^2}{EI} \quad (11)$$

3.2.2 말뚝머리 회전구속 조건

말뚝머리 회전구속 조건인 경우 말뚝의 횡방향변위량은 식 (12) 및 식 (13)과 같이 표현된다.

$$y_{z=0} = \frac{0.93H_t T^3}{EI} \quad (Z_{max} \geq 5) \quad (12)$$

$$y_{z=0} = \frac{1.1H_t T^3}{EI} \quad (Z_{max} \leq 2) \quad (13)$$

4. 허용횡방향지력의 비교

다양한 점성토와 사질토 지반을 가정하고 말뚝머리 구속조건을 말뚝머리자유와 말뚝머리구속으로 고려하여 짧

은말뚝과 긴말뚝에 대한 두 가지 방법을 써서 허용횡방향지력을 결정하고 상호비교해 보았다. 여기서 두 가지 방법이란 극한횡방향지력에 안전율을 적용하는 방법과 허용횡방향변위량에 대응하는 말뚝의 횡방향지력을 허용횡방향지력으로 보는 방법을 말한다. 말뚝의 허용횡방향지력 비교를 위해 고려한 말뚝의 물리적 특성은 Table 2와 같다,

Table 2. Physical properties of pile for analysis

Steel
Diameter = 40.64cm
Thickness = 12mm
Area = 148.7cm ²
Moment of inertia = 28,000cm ⁴
Elastic modulus = 2×10 ⁸ kN/m ²

구체적인 계산을 위해 가정한 점성토지반의 물성값과 말뚝길이는 Table 3과 같고 사질토지반의 물성값과 말뚝길이는 Table 4와 같다. Table 3에 나타난 수평지반반력계수(k_h)는 앞서 기술된 $k_h = 67s_u$ 를 적용하여 얻은 값들이다. Table 3에서 짧은말뚝 길이는 $L = 2R$ 로부터 계산한 값을 소숫점 아래로 버림하여 결정하였고 긴말뚝 길이는 $L = 3.5R$ 로부터 계산한 값을 소숫점 위로 올림하여 결정하였다. Table 4에서 ϕ' 은 사질토지반의 내부마찰각을 의미하고 k_h 는 앞서 기술된 Terzaghi의 제안값들을 사용하였다. Table 4에서 짧은말뚝 길이는 $L = 2T$ 로부터 계산한 값을 소숫점 아래로 버림하여 결정하였고 긴말뚝 길이는 $L = 4T$ 로부터 계산한 값을 소숫점 위로 올림 하여 결정하였다.

Table 3. Soil properties and pile length (cohesive)

Consistency	soft	stiff	hard
s_u (kN/m ²)	15	75	200
k_h (kN/m ²)	1005	5025	13400
R (m)	2.756	1.843	1.442
short pile length (m)	5	3	2
long pile length (m)	10	7	6

Table 4. Soil properties and pile length (cohesionless)

Relative density	loose	medium	dense
ϕ' (degree)	30	34	38
n_h (kN/m^3)	1500	5200	12500
T (m)	2.077	1.620	1.359
short pile length (m)	4	3	2
long pile length (m)	9	7	6

점성토지반에 대한 말뚝의 허용횡방향지지력을 두 가지 방법을 이용하여 구한 다음 극한횡방향지지력에 안전율을 적용하여 구한 허용 횡방향지지력을 지반반력법을 통해 구한 허용 횡방향지지력으로 나누어 구한 값을 Table 5에 나타내었다. 지반반력법을 적용하여 허용횡방향지지력을 결정하는 경우 말뚝머리 허용변위량값으로 15 mm를 적용하였다.

Table 5. Ratio of allowable lateral resistance of pile in cohesive soil

Pile head condition	Consistency	short pile	long pile
Free head	soft	1.56	1.69
	stiff	1.18	0.91
	hard	0.86	0.55
Fixed head	soft	1.48	1.28
	stiff	1.24	0.73
	hard	0.99	0.47

Table 5를 통해 알 수 있듯이 말뚝머리 구속조건 및 말뚝길이에 상관없이 연약 점성토 지반에 설치된 말뚝의 경우 지반반력법에 의해 결정된 허용횡방향지지력이 설계를 지배함을 알 수 있고 점성토의 비배수강도가 커짐에 따라 극한횡방향지지력을 통한 허용횡방향지지력이 설계를 지배함을 알 수 있다. 사질토 지반에 대해서도 두 가지 방법을 통해 구한 허용횡방향지지력비를 나타내면 Table 6과 같다.

Table 6. Ratio of allowable lateral resistance of pile in cohesionless soil

Pile head condition	Relative density	short pile	long pile
Free head	loose	1.24	0.35
	medium	0.43	0.17
	dense	0.15	0.11
Fixed head	loose	0.89	0.70
	medium	0.31	0.36
	dense	0.11	0.24

Table 6을 통해 알 수 있듯이 사질토 지반에 설치된 말뚝의 경우 느슨한 사질토지반에 설치된 말뚝머리 자유인 짧은말뚝의 경우를 제외하고는 모든 경우에 있어 극한횡방향지지력을 통한 허용횡방향지지력이 설계를 지배함을 알 수 있다. Table 5와 Table 6에 나타난 결과는 극한횡방향지지력을 통해 허용횡방향지지력을 결정할 때 안전율로 3을 적용한 결과임에 주의할 필요가 있으며 안전율이 달라지는 경우 즉 예를 들어 안전율을 2로 하는 경우에는 Table 5와 Table 6의 값에 1.5 (=3/2)를 곱한 값을 적용해야 한다.

5. 결론

다양한 점성토와 사질토를 가정하고 말뚝머리 구속조건 및 말뚝길이를 달리하여 두 가지 방법을 통해 말뚝의 허용횡방향지지력을 결정하고 상호 비교해 보았다. 말뚝의 허용횡방향지지력을 결정하는 두 가지 방법으로는 극한 횡방향지지력에 안전율을 적용하는 방법과 지반반력법을 의미한다. 본 연구를 통해 유도된 결론은 다음과 같다.

- 1) 말뚝머리 구속조건 및 말뚝길이에 상관없이 연약 점성토 지반에 설치된 말뚝의 경우 지반반력법에 의한 허용횡방향지지력이 설계를 지배함을 알 수 있고 점성토의 비배수강도가 커짐에 따라 Broms 방법을 통해 결정된 허용횡방향지지력이 설계를 지배함을 알 수 있다.
- 2) 사질토 지반에 설치된 말뚝의 경우 느슨한 사질토 지반에 설치된 말뚝머리 자유인 짧은말뚝의 경우를 제외하고는 모든 경우에 있어 Broms 방법을 통해 결정한 극한횡방향지지력을 이용해서 구한 허용횡방향지지력이 설계를 지배함을 알 수 있다.
- 3) Broms 방법으로부터의 극한횡방향지지력을 통해 허용횡방향지지력을 결정한 경우의 안전율은 3을 적용하였으므로 안전율이 달라짐에 따라 해석결과도 달라질 수 있음에 유의할 필요가 있다.
- 4) 횡방향말뚝의 설계시 허용 횡방향변위량에 근거한 설계만으로 충분하다는 견해도 있지만 본 연구결과에 따르면 극한횡방향지지력에 근거한 허용횡방향지지력의 계산 또한 필요함을 알 수 있었다.
- 5) 수평지반반력계수는 허용횡방향변위량 이내에서는 말뚝쪽에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었으며 실제 많이 쓰이는 말뚝폭의 범위인 20~90 cm 인

경우 수평지반반력계수에 미치는 말뚝폭의 영향은 무시해도 될 것으로 생각된다.

References

- [1] Brinch Hansen, J., "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces", Danish Geotechnical Institute (Geoteknisk Institut) Bull, No. 12, Copenhagen, p. 5-9, 1961.
- [2] Broms, B. "The Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 90, No. SM2, pp. 27-63, March 1964.
DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000611>
- [3] Broms, B. "The Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 90, No. SM3, pp. 123-156, May 1964.
DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0002132>
- [4] Shirato, M., Nakatani, S., Matsui, K., Nakaura, T., "Geotechnical Criterion for Serviceability Limit State of Horizontally-Loaded Deep Foundations", Proceedings of the 2nd International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, GIFU, Japan, 11-12 June, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203867310.ch13>
- [5] Okahara, M., Nakatani, S., & Matsui, K. "A study on vertical and horizontal bearing characteristics of piles", JSCE J. of Struct. Engrg. 37, 1453-1466 in Japanese. 1991a.
- [6] Okahara, M., Takagi, S., Nakatani, S., & Kimura, Y. "A study on the bearing capacity of single piles and design method of column shaped foundations", Technical Memorandum of PWRI, (2919), Public Works Research Institute in Japanese, 1991b.
- [7] Reese, L. C., Isenhowe, W. M., Wang, Shin-Tower, Analysis and design of shallow and deep foundations, John Wiley & Sons, Inc., pp. 382-386, 2006.
- [8] Robinson, K. E., "Horizontal Subgrade Reaction Estimated from Lateral Loading Tests on Timber Piles", Behavior of Deep Foundations, ASTM STP 670, Raymond Lundgren, ed. American Society for Testing and Materials, pp. 520-536, 1979.
DOI: <https://doi.org/10.1520/STP33749S>
- [9] Davisson, M. T., "Estimating Buckling Loads for Piles", Proceedings of the second Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, pp. 351-369, 1963.
- [10] Reese, L. C. and Matlock, H., "Non-dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth", Proceedings 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Austin, TX, pp. 1-41, 1956.
- [11] Palmer, L. A. and Thompson, J. B., "The Earth Pressure and Deflection along the Embedded Lengths of Piles Subjected to Lateral Thrust", Proceedings Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Holland, Vol. V, pp. 156-161, 1948.
- [12] Davisson, M. T. and Prakash, S., "A Review of Soil Pile Behavior", Highway Research Record, No. 39, pp. 25-48, 1963.
- [13] Terzaghi, K. "Evaluation of coefficients of subgrade reaction", Géotechnique, 4: 297-32, 1955.
- [14] Davisson, M. T., "Lateral Load Capacity of Piles", Highway Research Record, Washington, DC, pp. 104-112, 1970.
- [15] Lee, S. H., "A Theoretical Study on the Analytical Solutions for Laterally Loaded Pile", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 11, Issue 3, pp. 111-116, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2011.11.3.111>
- [16] Matlock, H. and Reese, L. C., "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles", Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 127, part 1, pp. 1220-1247, 1962.
DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000303>
- [17] Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D., "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand", Proceedings Offshore Technology Conference, Houston, TX, Paper No. OTC 2080, pp. 473-483, 1974.
- [18] Prakash, S., Sharma, H., Pile foundations in engineering practice, John Wiley & Sons Inc, pp. 343-354, 1990.

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건설시스템안전공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

한 진 태(Jin-Tae Han)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2006년 8월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)

- 2011년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원

<관심분야>

지반내진공학, 기초공학