

# 화강풍화토 지반에 타입된 PHC 말뚝의 수평지지력에 대한 추정치와 실측치의 비교

## A Comparison between Predicted and Measured Values for Lateral Bearing Capacity of PHC Pile in Weathered Granite Soil

오        재        화\* · 이        문        수\*\*  
Oh,        Jae        Hwa · Lee,        Moon        Soo

### Abstract

This study dealt with the comparison of lateral bearing capacity for vertical PHC pile between predicted and measured values driven in weathered granite soils to build world cup gymnasium in Kwangju area. Recently, the calculation of horizontal bearing capacity of piles foundation has been considered very important for earthquake or wind resistant design in Korea. During this study, Matlock & Reese, Broms and Chang's methods were selected in prediction of lateral resistance of PHC piles. As for case study, the prediction values were compared with 5 measured ones based on ASTM. The result showed that prediction values proposed by Matlock & Reese, Chang and Broms were smaller than real values. Three proposed methods by Matlock & Reese and Chang based on lateral deflection and Broms by ultimate lateral resistance turned out valid in view of engineering practice.

### I. 서        론

오래 전부터 말뚝은 상부구조물의 하중을 하부 지반에 안전하게 전달시키기 위하여 각종 구조물의 기초에 널리 사용되어 왔다. 일반적으로 말뚝에 작용하는 하중은 구조물과 중력으로 인한 연직 하중과 풍하중, 지진력 및 토압으로 인한 수평하중이 있다.

말뚝기초에 관한 기존의 연구는 주로 연직지지력에 대해서만 경험식들이 많이 제안되어 왔고,

연직재하시험도 일반적으로 수행하고 있다. 그러나 토압, 풍압, 지진력 등에 의한 측방토압을 받게 되면 연직력 뿐만 아니라 수평력과 휨모멘트도 동시에 작용되기 때문에 이에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다. 기존의 말뚝설계에서는 이러한 수평력에 대해서는 검토가 이루어지지 않았으나 최근에는 구조물의 대형화로 인하여 수평력을 받는 말뚝에 주목하지 않을 수 없다. 그러나 말뚝의 횡방향지지력은 그 추정공식도 많지 않고 시험의 난이성, 경제성으로 인해 더욱 말뚝의 수평재하시험

\*조선대학교 공과대학

\*\*전남대학교 농과대학

키워드 : 화강풍화토, 허용변위, 수평지지력, PHC말뚝 수평재하시험, 화강풍화토, 강열감량

자료는 확보하기 어려운 실정에 있다 우리 나라에서는 이(1998) 등<sup>2)</sup>과 파일테크회사(1996)<sup>4)</sup>의 경부고속철도 축조를 위한 횡방향 말뚝재하시험을 비롯하여, 홍(1999)<sup>5)</sup> 등에 의하여 많은 연구가 수행되었다. 수평하중을 받는 단일말뚝의 거동에는 다양한 인자들이 영향을 미치고 있으며 휨강성(EI), 말뚝의 근입길이 비(L/D), 말뚝두부 및 선단 구속조건, 지반조건, 수평하중조건, 지하수위 조건들이 대표적인 인자들이라 할 수 있다. 수평재하시험 결과는 화강풍화토 지반에 타설된 5본의 말뚝을 이용하였고, 수평하중을 받는 연직말뚝에 대한 수평거동의 해석적 방법에 대해서는 허용변위법, 극한하중법 등을 이용하였다. 일반적으로 우리나라의 화강 풍화토는 통일분류에 의하면 SC 내지는 SM으로 분류가 되어 모래와 점토의 중간적 성질을 띄고 있으나, 추정공식에는 모래와 점토의 중간적 성질을 띄고 있는 지반에 적용될 적절한 방법이 없으므로 본문에서는 모래에 가까운 지반임을 감안해서 모래에 적용되고 있는 방법을 채택하였다. 따라서 본 연구에서는 허용변위법을 적용하고 있는 Matlock과 Reese방법과 Chang의 방법 그리고 극한하중법을 적용하고 있는 Broms의 방법을 사용하여 수평 허용지지력을 추정하고 그 결과의 타당성을 입증하기 위해서 광주광역시 풍암지구에서 시공 중에 있는 월드컴경기장의 기초공사 중 PHC 말뚝의 수평지지력을 현장재하시험으로 구한 결과와 비교하여 추정공식의 적용성을 검토하였다.

## II. 분석 및 현장시험

### 1 분석방법

#### 가. Matlock과 Reese의 방법<sup>8)</sup>

지반반력해석법은 수평하중말뚝을 탄성기초 위의 보처럼 취급한다. 특히 탄성지반을 일련의 독립된 탄성스프링으로 생각한 Winkler모델 지반에 보가 지지된다고 가정한다

Fig. 1(a)는 지표면(즉, z = 0)에서 횡하중 Q<sub>g</sub>와

모멘트 M<sub>g</sub>를 받는 길이 L의 말뚝을 나타내고, Fig. 1(b)는 말뚝에 가해진 하중과 모멘트에 의해 유발된 말뚝의 처짐 형상과 흙의 저항력의 일반적 특성을 보여준다.

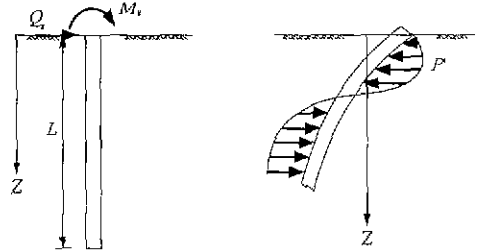


Fig. 1. (a) Laterally loaded pile (b) Soil resistance on pile caused by lateral load

Winkler의 모델에 의하면 탄성매체는 무한히 밀접되어 있는 독립된 스프링의 연속체로 대체될 수 있다. 이 가정에 의하여 지반반력계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{p'}{x} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, k : 지반반력계수  
p' : 접지압  
x : 처짐

깊이 z에서 사질토의 지반반력계수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$k_z = n_p z \dots\dots\dots(2)$$

여기서, n<sub>p</sub> : 수평지반반력 계수의 상수

Fig. 1(b)와 탄성기초 위의 보 이론을 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_p I_p \frac{d^4 x}{dz^4} = p' \dots\dots\dots(3)$$

여기서, E<sub>p</sub> : 말뚝재료의 탄성계수  
I<sub>p</sub> : 말뚝단면의 단면이차모멘트

지반반력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p' = -kx \dots\dots\dots(4)$$

윗 식의 부호는 지반반력이 말뚝 처짐과 반대방향이므로 음이다.

식(3)과 (4)를 조합하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_p I_p \frac{d^4 x}{dz^4} + kx = 0 \dots\dots\dots(5)$$

위 식의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_z(z) = A_x \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} + B_x \frac{M_g T^3}{E_p I_p} \dots\dots\dots(6)$$

여기서,  $x_z$  : 임의의 깊이에서 말뚝의 처짐  
 $Q_g$  : 허용 횡하중  
 $M_g$  : 모멘트  
 $T$  : 흙-말뚝 계의 특성 길이

$$\left( \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_b}} \right)$$

또한 식(6)은 모멘트( $M_g$ )가 0일 때 허용횡하중  $Q_g$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_g = \frac{x_z(z) E_p I_p}{A_x T^3} \dots\dots\dots(7)$$

나. Chang의 방법<sup>7)</sup>

지반반력계수,  $k_b$ 가 일정하고 말뚝의 근입길이가 충분히 길어서 사실상 반무한 길이로 볼 수 있는 경우, 식(5)의 일반해는 다음과 같다.

$$y = e^{-\beta z}(A \cos \beta z + B \sin \beta z) + e^{\beta z}(C \cos \beta z + D \sin \beta z) \dots\dots\dots(8)$$

여기서,  $\beta = \sqrt[4]{\frac{k_b d}{4E_p I_p}}$

$z \rightarrow \infty$ 일 때,  $x = 0$ 인 조건을 식(8)에 대입하면 C와 D는 0이 되어, 식(8)은 다음과 같은 간단한 형태로 된다.

$$y = e^{-\beta z}(A \cos \beta z + B \sin \beta z) \dots\dots\dots(9)$$

여기서,  $A = \frac{H_0 + \beta M_0}{2E_p I_p \beta^3}$

$$B = -\frac{M_0}{2E_p I_p \beta^2}$$

식 (9)에  $z = 0$ 의 조건을 대입하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_0 = \frac{2E_p I_p \beta^3 x}{1 + \beta e} \dots\dots\dots(10)$$

여기서,  $e$  : 지상 돌출부의 길이

다. Broms 방법<sup>6)</sup>

이 방법은 말뚝두부 자유조건과 회전구속의 두 경우를 고려하고 있다. 짧은 말뚝의 기준은  $L/T \leq 2$  혹은  $L/R < 2$ 로 하고, 긴 변형말뚝의 기준은  $L/T \geq 4$  혹은  $L/R \geq 3.5$ 로 하였다.

두부 자유조건에서 짧은 말뚝의 회전중심은 말뚝 선단 부근으로 가정하여 이 부근에 작용하는 높은 토압은 말뚝 선단에 집중하중으로 대치하고 말뚝 선단에서 모멘트를 취하여 수평저항력  $H_u$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_u = \frac{0.5 \gamma_t d L^3 K_p}{e + L} \dots\dots\dots(11)$$

여기서,  $\gamma_t$  : 흙의 단위중량

$d$  : 말뚝의 직경

$L$  : 말뚝의 길이

$K_p$  : 수동토압 계수

$e$  : 지표면에서 말뚝 두부까지의 깊이

최대모멘트가 발생하는 위치  $f$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$f = 0.82 \sqrt{\frac{H_u}{dK_p\gamma}} \dots\dots\dots(12)$$

$f$  위치에서 말뚝의 최대 휨 모멘트( $M_{max}$ )는 다음 식으로 구하여 진다.

$$M_{max} = H_u(e + \frac{2}{3} f) \dots\dots\dots(13)$$

식(11)의  $H_u$ 를 사용하여  $M_{max}$ 가  $M_y$ (말뚝의 항복모멘트)보다 크면 긴 말뚝으로 취급하며 이 경우의  $H_u$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$H_u = \frac{3}{2} \gamma K_p f^2 d \dots\dots\dots(14)$$

$$M_y = H_u(e + \frac{2}{3} f) \dots\dots\dots(15)$$

이 식의 결과는  $e/d$ 와  $M_y/K_p\gamma d^4$ 의 값으로 도해법에 의해  $H_u$ 를 구할 수 있다.

## 2. 현장시험

### 가. 수평재하시험

수평재하시험은 ASTM K3966-90에 제시된 수평재하시험방법 중 cycle loading schedules method에 준하여 시험을 수행하였다. 하중은 각 단계별로 2.70tf씩 증가시켜 재하하였다. 하중재하는 각 단계하중에서 15분씩 유지하였으며 특히 하중재하 후 5분간 유지하고 다음단계의 하중을 재하하였다. 재하하중은 하중계로 측정하였으며 말뚝의 변위량은 다이얼 게이지(1/100mm)와 경사계로 측정하였다. 측정시간은 각 수평하중 단계에서 재하가 완료된 후 규정에 의거 0, 5, 10분에 측정하였으며 하중과 그에 따른 말뚝의 변위량을 측정하였다. 본 시험에 사용된 오일잭은 50tf까지 하중을 가할 수 있으며, 로드셀은 최대 10tf까지 받

을 수 있는 것을 사용하였다. Fig. 2는 반력말뚝을 이용한 수평재하시험의 개요도 이다.

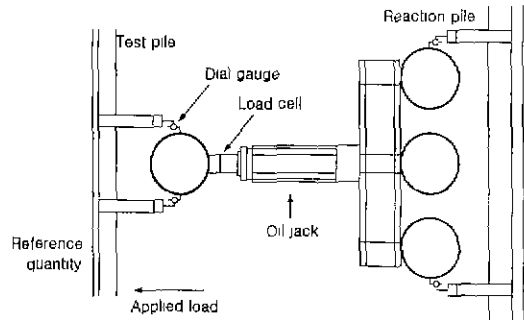


Fig. 2. Outline of pile load test for lateral bearing capacity

### 나. 현장 지반 조건

광주 풍암지구 월드컴경기장 건설공사 현장의 말뚝기초를 사설지역으로 선정하였으며 선정된 말뚝 기초지반의 보링주상도는 Fig. 3과 같다. 그림에서와 같이 시험말뚝이 관입된 부지는 기반암인 화강섬록암이 풍화를 받아 형성된 풍화대 지반으로 세립질 또는 실트질모래로 구성되어 있으며 완전 내지 높은 풍화를 보이고 있다.

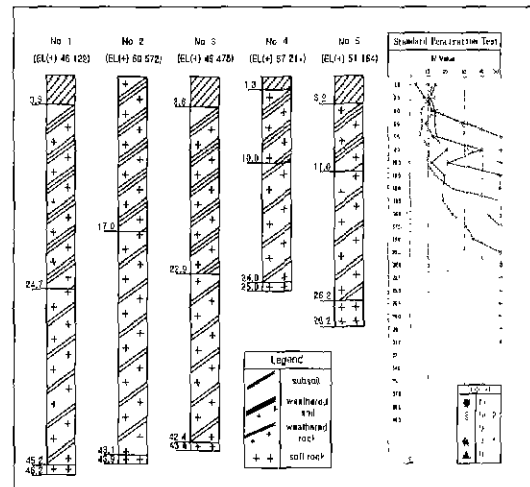


Fig. 3. Boring log of test piles (Daehan Goetec Co's reports)<sup>3)</sup>

화강풍화토층의 두께는 원지반고에 따라 0~22.9m의 범위로 분포하고 있다.

또한, 표준관입시험(SPT)에 의한 N값은 8~50 이상으로 매우 다양한 상대밀도를 나타내고 있다. 이 지반은 적황색을 띄고 있는 화강암계 풍화토<sup>1)</sup>로서 물리적 특성은 Table 1과 같다

Table 1. Physical properties

Contents	Value by tests
Water content (%)	15.00 ~ 21.00
Liquid limit (%)	28 ~ 34
Specific gravity	2.64 ~ 2.66
Unit weight of soil (tf/m <sup>3</sup> )	1.72 ~ 1.79
Chemical weathering index(CWI)	21 ~ 25
Ignition loss (Li)	3 ~ 5
#200 percent finer by weight (%)	7.76 ~ 14.00
Coefficient of permeability (k <sub>15</sub> : cm/s)	2.5×10 <sup>-5</sup> ~ 3.6×10 <sup>-4</sup>
USCS	SM

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 수평지지력 산출

Matlock과 Reese, Chang 그리고 Broms의 이론에 의한 수평지지력의 추정결과는 Table 2와 같다. 다만 동일 지반의 말뚝타입위치에 대응하는 수평지반반력계수의 상수( $n_h$ )를 적용하여야 하나, 토질의 종류와 지하수위 조건에 따라 평균값을 사용하였기 때문에, 말뚝의 타입위치에 따른 정확한 추정값을 산정하기에는 한계가 있다. 시험말뚝 No. 2와 No. 3은 L/T가 각각 2.89와 3.53으로서 장주와 단주의 중간영역에 속하지만, 중간영역에 사용한 공식이 없어 현장제하시험에서는 장·단주에 관계없이 지지력을 측정할 수 있으므로 이들 중간영역의 두 개의 말뚝을 장주로 간주하여 수평지지력을 산출하였다. 추정된 수평지지력의 크기는 Broms방법, Chang방법, Matlock과 Reese방법

순으로 나타났다. 이 말뚝에서는 내진·내풍하중을 감안하여 말뚝 한개의 설계하중은 10tf으로 결정되었으며 어느 추정식이나 10tf이상을 보이고 있어 설계당시에 10tf이상의 수평지지력이 보장되어야 할 것이다. 화강풍화토로 이루어진 월드컵경기장의 기초지반은 사질토와 점성토의 중간적 성질을 가지고 있는 중간토로 보는 것이 타당하나 사질토로 간주하여 말뚝의 수평지지력을 계산한 결과 실측치와 추정치 사이의 대응성이 좋았다. 각 제안식에 의한 수평지지력 추정치가 같은 값으로 얻어지는 이유는 말뚝의 수평지지력이 말뚝두부에서 최대치를 발휘하고 근입깊이와는 무관하기 때문이다.

본 연구에서 선정된 5본의 말뚝에 대한 휨모멘트의 최대치는 수평하중에 의한 휨모멘트 값과  $\sigma_{all} = M/Z$ 에 의해서 계산한 휨모멘트의 최대값을 비교한 결과 관입된 5본의 말뚝 중에서 No. 5이 가장 큰 값으로 15.93 t·m이고 말뚝 자체에 의한 휨모멘트 값은 57.49 t·m이므로 이들 5본

Table 2. Predicted and measured values of result lateral bearing capacity for PHC piles

Contents	Test pile No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
	Penetration depth (m)		16.9	5.5	6.7	11.5
Predicted value ( $Q_{all}$ : tf/ea)	Matlock & Reese	10.33	10.33	10.33	10.33	10.33
	Broms	14.70	14.70	14.70	14.70	14.70
	Chang	14.38	14.38	14.38	14.38	14.38
Allowable displacement (mm)		10	10	10	10	10
Elapsed time after driven pile (month)		1	1	1	1	1
Bearing capacity measured at allowable displacement (tf)		17.40	20.80	15.50	15.00	20.90
Location of maximum bending moment from surface (m)		2.59	2.22	2.41	2.59	2.68
Maximum bending moment (tf·m)		15.72	14.48	14.89	15.51	15.93

(\*Displacement are not considered in Brom's method.)

말뚝의 최대 휨모멘트는 수평력에 의해서 지배됨을 확인하였다. 따라서, 말뚝 자체에 의한 휨모멘트는 고려의 대상에서 제외하고 수평하중에 의한 휨모멘트의 크기와 지표로부터 심도를 Table 2에 나타내었다. No. 1, No. 4, No. 5는 장주에 속하므로 Matlock과 Reese의 공식을 적용함에 있어서 표를 이용하거나 그림을 이용하여 지표로부터 최

대 휨 모멘트가 발현되는 깊이를 구할 수 있으나 장주도 단주도 아닌 과도영역에 속한 No. 2와 No. 3 말뚝은 그림을 활용할 수밖에 없는 실정이며, 이 그림을 자세히 검토하면 말뚝의 관입심도가 증가함에 따라 최대 휨모멘트의 크기도 증가할 뿐만 아니라, 휨모멘트가 나타나는 심도도 지표로부터 약간 증가됨을 알 수 있었다.

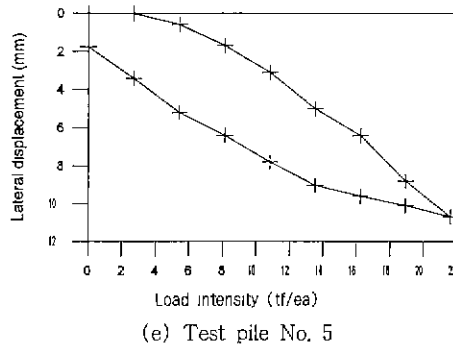
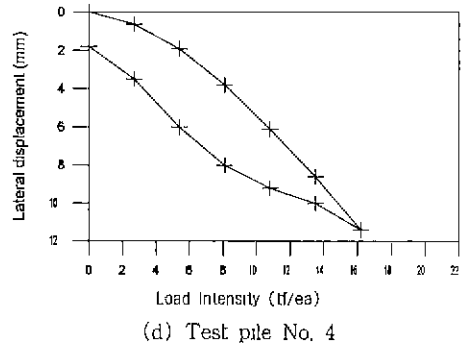
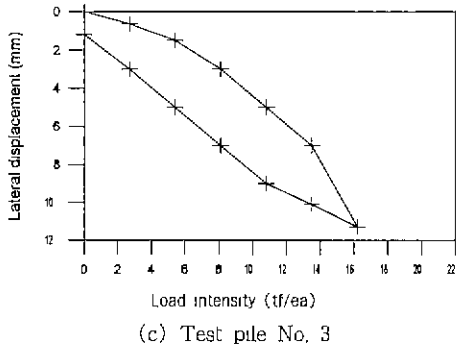
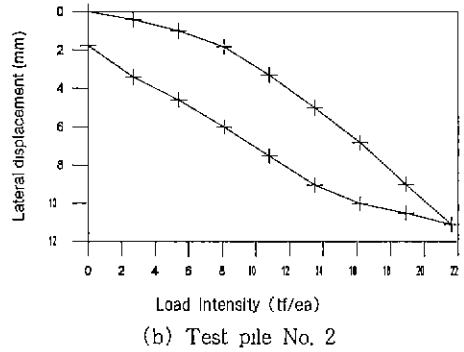
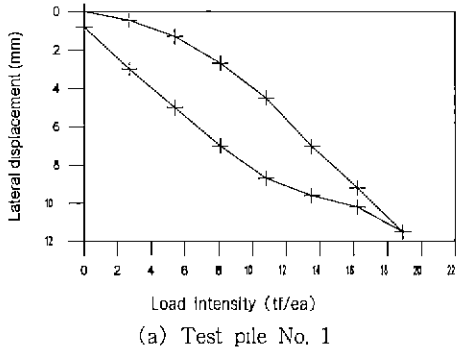


Fig. 4. Relationship between load intensity and lateral displacement for test piles

## 2. 하중-변위 곡선

월드컵경기장에서 말뚝 타입 후 약 1개월이 경과한 후 말뚝 5본에 대해서 수평재하시험을 실시하였으며, 하중-변위곡선방법(p-s curve method)<sup>3)</sup>에 의하여 하중-변위량을 산출하였다. 주어진 말뚝에 대한 3종의 제안식을 적용한 결과 5개의 모든 말뚝이 설계지지력에 접근하고 있으며 말뚝타입 후 수평재하시험 결과 모든 말뚝의 실측값이 설계값보다 더 큰 지지력을 보이고 있다. 이 사실로 미루어 볼 때 추정식은 안전측으로 평가되고 있으며, 공학적으로 충분한 실용성을 가지고 있다고 보아진다.

## IV. 결 론

화강풍화토 지반위에 대형구조물인 월드컵경기장을 축조하는데 지진하중과 풍하중을 고려한 연직말뚝의 수평 지지력을 허용변위법과 극한하중법으로 추정하고, 수평재하시험의 실측치와 비교한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 허용변위(10mm)를 적용한 Matlock과 Reese 및 Chang의 방법 그리고 극한지지력을 이용한 Broms 방법의 추정치는 실측치와 비교한 결과, 안전측으로 평가되어 공학적으로 실용성이 있는 것으로 판단되었다.

2. 추정된 수평지지력의 크기는 Broms 방법, Chang 방법, Matlock과 Reese 방법 순으로 나타났다. 또한 화강풍화토인 증간토는 모래에 적용되는 수평지지력공식을 사용하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

3. 화강풍화토는 사질토 지반에 타설된 말뚝거동에 가까운 결과를 보이고 있으나 점성토지반의 거동과는 상이한 결과가 예상되므로, 향후 이 분야의 연구가 절실히 요망된다

4. 동일한 직경의 말뚝의 관입심도가 증가함에 따라 최대 휨모멘트가 발현되는 깊이도 증가하며

휨모멘트의 크기도 함께 증가함을 알 수 있었다.

이 논문은 1997년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다  
동 재단에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 이광찬, 1998, 화강토의 풍화도에 따른 토질공학적 특성, 박사학위 논문.
2. 이인모, 이현중, 1988, 지진하중을 받는 파일기초의 횡방향 동적 거동해석, 한국지반공학회지, 4(1), pp. 29~36.
3. (주)대한지오택, 1999, 광주월드컵경기장 말뚝의 수평·인발 재하시험 보고서.
4. (주)파일테크, 1996, Lateral Pile Load Test Report-Kyungbu Highspeed Railway Project lot ○~○.
5. 홍원표, 1999, 수평하중을 받는 말뚝의 해석 및 설계, 한국지반공학회, 말뚝기초위원회 워크샵, pp. 93~139.
6. Broms, B., 1964, The Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils, J. Soil Mech. Found. Div, ASCE, Vol. 90, No. SM3, pp. 123~156.
7. Chang, Y. L., 1937, Discussion on "Lateral Pile-Loading Tests" by L. B. Feagin, Trans, ASCE, Vol. 102, pp. 272~278.
8. Matlock, H. and L. C. Reese, 1962, Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 127, part 1, pp 1220~1247.
9. Prakash, Shamsher., and Sharma, Hari D., 1990, Pile Foundation in Engineering Practice, John Wiley & Sons, pp. 335~373.