

# 단일主動말뚝의 極限水平抵抗力

Ultimate Lateral Resistance of Single Active Piles

洪 元 杓\*

Hong, Won-Pyo

朴 來 雄\*\*

Park, Rae-Ung

## Abstract

Some methods are presented to estimate the ultimate lateral resistance of single active piles subjected to lateral loads above the ground surface, considering the lateral soil reaction, the pile length and the fixity condition of a pile head. The lateral soil reaction acting on a single active pile embedded in soil due to pile movement can be estimated by use of a theoretical equation which is derived by considering especially the plastic state of ground surrounding the pile and the pile-section shape. The piles are named short or long depending upon the relative magnitude of the induced bending moment to the yielding moment. As for the fixity condition of a pile head, the free head and the unrotated head are considered.

Comparison with other experimental results gives that the calculated ultimate lateral resistance obtained by the author's theory is closer to experimental results than the one obtained by Brom's theory.

## 要 旨

말뚝머리에 水平力을 받는 單一主動말뚝의 極限水平抵抗力을 산정할 수 있는 몇몇 方法이 水平地盤反力, 말뚝길이 및 말뚝頭部拘束條件을 考慮하여 확립提議된다. 말뚝의 移動에 의하여 主動말뚝이 地盤으로 부터 받게 되는 極限水平地盤反力은 말뚝周邊地盤의 塑性狀態 및 말뚝형상을 고려하는 것에 重點을 두어 誘導한 算定理論式을 利用하여 算定될 수 있다. 말뚝은 짧은말뚝, 긴말뚝 등으로 구분되며 이는 말뚝에 발생하는 최대휨모멘트와 降伏모멘트의 비교에 의하여 구분된다. 말뚝머리의 구속조건으로는 頭部自由 및 頭部回轉拘束의 두가지 경우가 취급된다.

實測值와의 비교에 의하면, 本理論에 의한 極限水平抵抗力은 Broms 理論에 의한 理論值보다 더 잘 實測值에 접근하고 있음을 보여 준다.

## 1. 序 論

水平力을 받는 말뚝은 말뚝과 地盤중 어느것

이 움직이는 主體인가에 따라 主動말뚝(Active pile)과 受動말뚝(Passive pile)의 두종류로 大別할 수 있다.<sup>1)</sup> 主動말뚝은 말뚝이 지표면상에 既知의 水平荷重을 받는 경우이다. 그 결과 말뚝

\* 正會員·中央大學校 工科大學 土木工學科 副教授

\*\* 前中央大學校 大學院生

에 변위가 발생하고 말뚝주변지반이 이 변위에 저항하므로 지반에 하중이 전달된다. 이 경우에 있어서는 말뚝이 움직이는 主體가 되어 먼저 움직이게 되고 말뚝의 變位가 주변지반의 변형을 誘發시키게 된다. 그러나, 受動말뚝은 우선 어떤 원인에 의하여 말뚝주변지반이 먼저 變形하게 되고 그 결과로서 말뚝에 側方土壓이 작용하게 된다. 따라서 이 경우에 있어서는 말뚝주변지반이 움직이는 主體가 되어 말뚝이 지반변형의 영향을 받게 된다. 이들 두 종류의 말뚝의 최대차이점은 말뚝에 작용하는 水平力이 主動말뚝에서는 미리 주어지는데 비하여 受動말뚝에서는 지반과 말뚝 사이의 상호작용의 결과에 의하여 정하여 지는 점이다.

受動말뚝의 典型的인 예로는 側方變形이 發生하는 지반속에 설치된 구조물의 기초말뚝, 斜面破壤 혹은 側方流動을 방지하기 위하여 사용하는 말뚝 등이 있다. 결국 이러한 말뚝은 지반으로부터 側方土壓을 받게 되어 예상치 않았던 피해가 발생하는 경우가 종종 있다. 이러한 受動말뚝에 작용하는 側方土壓에 관하여는 筆者에 의하여 다년간 研究되어 오고 있다.<sup>2~5)</sup>

한편, 主動말뚝의 典型的인 예로는 偏土壓, 風壓, 波力, 등을 받는 구조물의 기초말뚝, 선박의 충격력을 받는 항만구조물, 지진시 水平力을 받는 기초말뚝등을 들 수 있다. 이들 主動말뚝에 관하여는 말뚝의 水平抵抗力의 문제로 지난 半世紀 동안 단일말뚝 및 무리말뚝을 대상으로 활발하게 理論的 및 實驗的 연구가 진행되어 오고 있다.<sup>6~14)</sup>

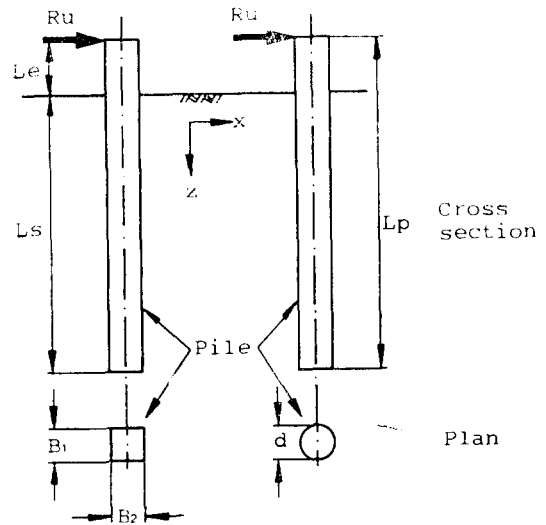
이러한 主動말뚝의 破壤形態는 “말뚝破壤” 및 “地盤破壤”의 둘로 구분된다. 먼저 “말뚝破壤”은 水平力에 의하여 말뚝에 발생한 응력이 말뚝재료의 허용응력을 초과하여 말뚝의 전길이에 걸쳐서 한 개 혹은 수 개의 塑性힌지(Plastic hinge)가 발생하는 경우의 파괴형태이며 “地盤破壤”란 말뚝이 水平力을 받아 지반속에서 一體로 움직이거나 회전하게 되는 경우의 파괴형태이다. 剛性이 크고 길이가 짧은 말뚝이 水平力을 받게 되면 말뚝은 地盤으로부터 反力을 받게 되며 이 反力の 극한치를 極限水平地盤反力(Ultimate lateral soil reaction)이라 하며 剛말

뚝의 設計에서 중요한 사항으로 취급되고 있다.<sup>7~17)</sup>

本研究에 있어서는 먼저 Mohr-Coulomb의 降伏條件을 만족하는 塑性地盤을 대상으로 하여 單一主動剛말뚝 周邊地盤의 破壤에 카니즘을 究明하고 極限水平地盤反力の 算定式을 誘導提案한다. 또한 이 算定式을 利用하여 地盤속에 設置된 單一말뚝이 받을 수 있는 極限水平抵抗力(Ultimate lateral resistance of pile)의 算定法을 確立시키고자 한다.

## 2. 地盤의 極限水平反力

### 2.1. 理論解析<sup>22)</sup>



(a) 矩形말뚝 (b) 圓形말뚝

그림 1. 말뚝의 設置圖

그림 1은 水平力을 받는 矩形 및 圓形斷面을 가지는 剛말뚝의 設置狀態를 概略的으로 圖示한 것이다. 여기서  $R_u$ 는 極限水平荷重,  $L_s$ 는 地表面에서 하중이 가하여지는 곳까지의 거리,  $L_p$ 는 말뚝의 地中貫入길이,  $L_p$ 는 말뚝길이이다.

말뚝이 頭部에 水平力을 받아 이동하게 되면 지반으로부터 反力을 받게 된다. 이 反力중 極限狀態의 反力을 산정할 수 있는 理論式을 유도함에 있어서 受動말뚝에서 행하였던 方法<sup>5)</sup>을 응용하기로 한다.

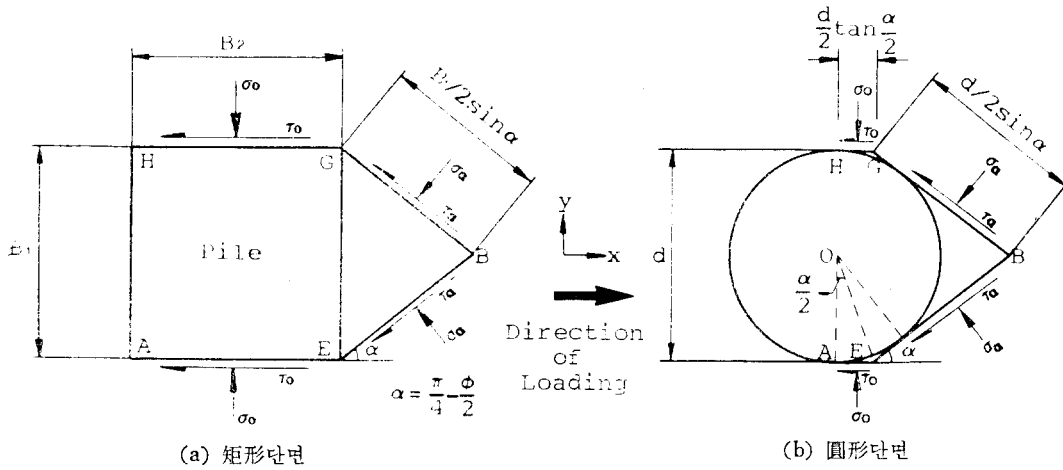


그림 2. 말뚝의 단면도

그림 2와 같이 말뚝을 상면에서 보아 말뚝과 지반사이의 破壞形態를 고려하여 理論解析을 실시한다. 本 理論解析에서는 말뚝과 地盤사이의 다음과 같은 假定을 둔다. (1) Mohr-Coulomb의 降伏條件을 만족하는 塑性狀態의 地盤을 대상으로 한다. (2) 地盤은 그림 2의 AEB면 및 HGB면을 따라 破壞가 發生한다. 단, 여기서  $\alpha = \pi/4 - \phi/2$ 로 한다. (3) 지반은 깊이 방향으로 平面變形率狀態에 있다. (4) 말뚝背面的 主動土壓은 무시한다. (5) 말뚝은 剛體로 한다.

$\phi$ 와  $c$ 는 지반의 內部摩擦角 및 粘着力이다. 한편, 應力圓 B는 破壞面 EB 및 GB에 인접한 지반요소의 應力圓을 나타내고 있다. 또한,  $\phi_0$ 와  $c_0$ 는 각각 矩形말뚝의 경우 지반과 말뚝사이의 마찰각과 附着力이며, 圓形말뚝과 H말뚝의 경우는  $\phi$ 와  $c$ 를 사용한다.

우선 應力圓 A와 B로부터 수직응력  $\sigma_\alpha$ 와 전단응력  $\tau_\alpha$ 는 다음과 같이  $\sigma_1$ 의 향으로 표시될 수 있다.

$$\sigma_\alpha = \sigma_1(1 + \sin\phi) + c \cos\phi \dots\dots\dots(1)$$

$$\tau_\alpha = \{\sigma_1(1 + \sin\phi) + c \cos\phi\} \tan\phi + c \dots\dots\dots(2)$$

한편, 그림 2(a)의 파괴면 AE 및 HG에 작용하는 수직응력  $\sigma_0$ 를 應力圓 A의  $\sigma_1$ 에 근사시키면 다음식이 구하여 진다.

$$\sigma_0 = \sigma_1 \dots\dots\dots(3)$$

$$\tau_0 = \sigma_1 \tan\phi_0 + c_0 \dots\dots\dots(4)$$

파괴면 AE 및 HG에 작용하는 X축방향 힘  $P_1$ 은 다음과 같다.

$$P_1 = 2\tau_0 B_2 = 2\tau_0 \xi B_1 \dots\dots\dots(5)$$

여기서  $\xi (= B_2/B_1)$ 는 말뚝의 형상계수이다. 식(5)에 식(4)를 대입하면 식(6)이 된다.

$$P_1 = 2\xi B_1(\sigma_1 \tan\phi_0 + c_0) \dots\dots\dots(6)$$

삼각형 썩기부 EBG의 파괴면 BE 및 BG에 작용하는 힘의 X축방향성분  $P_2$ 는

$$P_2 = \sigma_\alpha B_1 + \tau_\alpha \frac{B_1}{\tan\alpha} \dots\dots\dots(7)$$

식(1)과 (2)를 식(7)에 대입하면 다음과 같이 된다.

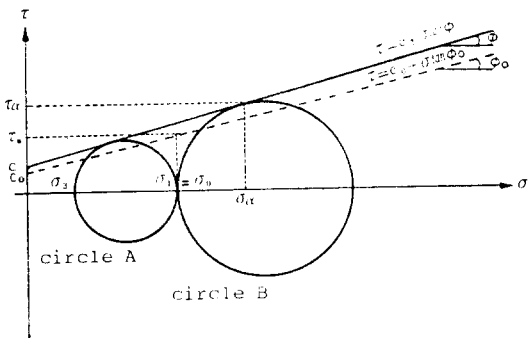


그림 3. 말뚝周邊地盤의 Mohr 應力圓

그림 3은 矩形말뚝 및 圓形말뚝에 대한 破壞面 AEB 및 HGB의 주변지반요소에 대한 Mohr 應力圓을 圖示한 것이다. 그림 중 應力圓 A는 말뚝前面썩기부 GEB에서 멀리 떨어진 지반요소의 응력상태를 나타내고 있으며  $\sigma_1$ 과  $\sigma_3$ 는 각각 이 요소의 最大主應力과 最小主應力이고

$$P_2 = (\sigma_1(1 + \sin\phi) + c \cos\phi) B_1 + \{(\sigma_1(1 + \sin\phi) + c \cos\phi) \tan\phi + c\} \frac{B_1}{\tan\alpha} \dots\dots\dots(8)$$

말뚝이 받게 되는 極限地盤反力  $P_u$  는 식(6)과 (8)의  $P_1$  과  $P_2$  의 합이 되므로 식(9)가 얻어진다.

$$P_u = 2\xi B_1 (\sigma_1 \tan\phi_0 + c_0) + (\sigma_1(1 + \sin\phi) + c \cos\phi) B_1 + \{(\sigma_1(1 + \sin\phi) + c \cos\phi) \tan\phi + c\} \frac{B_1}{\tan\alpha} \dots\dots\dots(9)$$

여기서  $\sigma_1$  을 受動土壓으로 취하여 식(9)를 정리하면 깊이  $z$  에 대하여 다음과 같이 된다.

$$P_u(z) = K_{A1} c B_1 + K_{A2} \gamma z B_1 \dots\dots\dots(10)$$

여기서  $\gamma$  는 지반의 단위체적중량이고  $K_{A1}$  및  $K_{A2}$  는 각각 지반의 점착력과 수직상재토압에 대한 極限水平地盤反力係數로 정하며 다음식으로 표시된다.

$$K_{A1} = 4 \sec\phi + 2 \tan\phi (3 + \sin\phi) + 2 N_s \tan\phi \left\{ \begin{array}{l} \times (1 + \sin\phi) + 4 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \tan\phi_0 \xi \\ + \frac{2c_0}{c} \xi \end{array} \right. \dots\dots\dots(11)$$

$$K_{A2} = (N_s + 2 \tan\phi_0 \xi) N_s$$

$N_s$  는  $\tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$  의 流動係數로 受動土壓係數와 동일하다.  $H$  말뚝의 경우는 식(11)에  $\phi_0 = \phi$  및  $c_0 = c$  를 대입하여 사용한다.

한편 圓形말뚝의 경우는 지반의 파괴면이 그림 2(b)에 표시한  $AEB$  및  $HGB$  를 따라 발생하게 된다. 따라서,  $AE$  및  $HG$  는  $\frac{d}{2} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\phi}{4}\right)$  이 되고 형상계수  $\xi$  는  $\frac{1}{2} \tan(\pi/8 - \phi/4)$  가 된다.  $c_0 = c$  및  $\phi_0 = \phi$  이므로 圓形말뚝의 계수  $K_{A1}$  및  $K_{A2}$  는 식(11)에 이들 사항을 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$K_{A1} = 4 \sec\phi + 2 \tan\phi (3 + \sin\phi) + 2 N_s \tan\phi \left\{ \begin{array}{l} \times (1 + \sin\phi) + 2 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \tan\phi \\ \times \tan\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\phi}{4}\right) + \tan\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\phi}{4}\right) \end{array} \right. \dots\dots\dots(12)$$

$$K_{A2} = \left( N_s + \tan\phi \tan\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\phi}{4}\right) \right) N_s$$

모래지반의 경우  $c=0$  이므로 식(10)은 식(13)으로 된다.<sup>23)</sup>

$$P_u(z) = K_{A2} \gamma z B_1 \dots\dots\dots(13)$$

여기서 계수  $K_{A2}$  는 식(11)과 식(12)에 의거 구할 수 있다.

점토지반의 경우는  $\phi=0$  이므로 矩形말뚝의 식(11)은 다음과 같이 된다.

$$K_{A1} = 4 + 2 \frac{c_0}{c} \xi \left\{ \begin{array}{l} \dots\dots\dots(14) \\ K_{A2} = 1 \end{array} \right.$$

圓形말뚝의 경우는 식(12)로부터 식(15)가 구해진다.

$$K_{A1} = 4 + \tan\left(\frac{\pi}{8}\right) \div 4.4 \left\{ \begin{array}{l} \dots\dots\dots(15) \\ K_{A2} = 1 \end{array} \right.$$

### 2. 極限水平地盤反力係數

앞절의 식(10)에서 안 바와 같이 主動말뚝에 대한 極限水平地盤反力은  $K_{A1}$  및  $K_{A2}$  의 反力係數를 알면 용이하게 산정될 수 있다. 이들 계수는 지반의 內部摩擦角, 말뚝의 형상계수 및 지반과 말뚝사이의 마찰각의 함수로 되어 있다. 그러나 원형말뚝과  $H$ 말뚝의 경우는  $\phi_0 = \phi$  이므로 지반의 내부마찰각과 말뚝의 형상계수만의 함수임을 알 수 있다. 여기에 그림 4는 圓形말뚝과  $H$ 말뚝의 反力係數  $K_{A1}$  및  $K_{A2}$  의 변화를 지반의 내부마찰각의 변화에 따라 圖示한 그림이다.  $H$ 말뚝의 경우는 말뚝형상계수  $\xi$  를 0.5에서 2.0까지 변화시켜보았다. 그림중 점선은 圓形말뚝의 경우를 나타내고 있다. 이 그림으로부터  $K_{A1}$  및  $K_{A2}$  는 말뚝의 형상계수 및 지반의 내부마찰각의 증대와 함께 커지고 있음을 알 수 있다.

### 3. 말뚝의 極限水平抵抗力

지반속에 設置된 말뚝이 地表面上에서 水平力을 받을 경우 말뚝은 지반의 저항을 받게 된다. 그러나 水平力이 과다하게 作用할 경우는 지반과 말뚝중 어느 하나가 파괴하게 된다. 따라서 수평력을 받는 말뚝을 설계할 경우는 말뚝의 극한수평저항력을 산출하여야만 한다. 이 말뚝의 극한수평저항력은 지반의 수평반력, 말뚝머리의 구속조건, 말뚝길이 등에 따라 크게 영향을 받게 된다. 지반의 수평반력에 관하여는 앞장에서 설명하였으며 말뚝머리의 구속조건으로는 頭

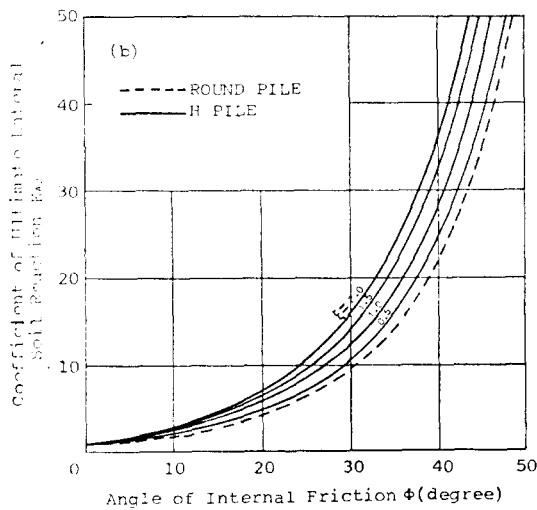
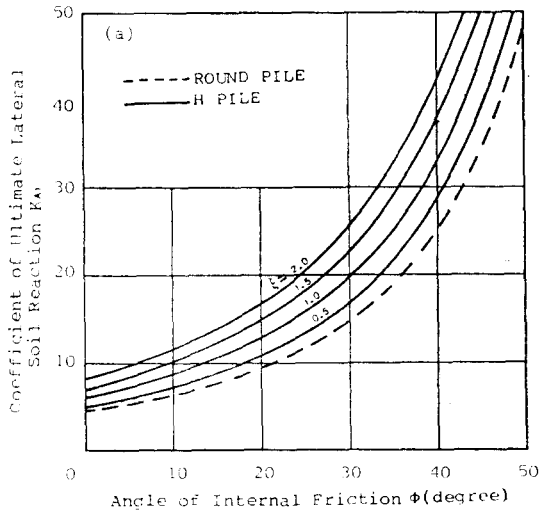


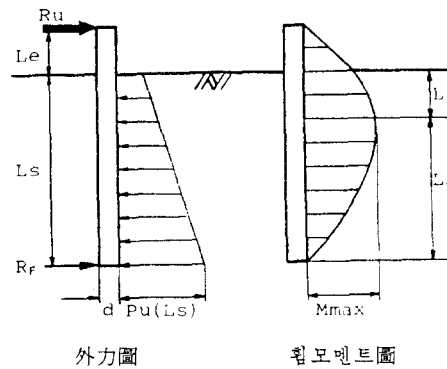
그림 4. 極限水平地盤反力係數  $K_{A1}, K_{A2}$

部自由(Free head)와 頭部回轉拘束(Unrotated head)의 두 경우를 생각할 수 있다. 여기서 頭部自由말뚝이라함은 말뚝머리부분에서 회전과 변위가 자유로운 상태로 되어 있는 말뚝을 의미하며, 頭部回轉拘束말뚝은 말뚝머리부분에서 변위는 자유로우나 회전이 구속되어 있는 경우로 교대의 기초말뚝과 같은 경우를 생각할 수 있다.

한편, 말뚝의 길이에 관하여서는 짧은말뚝과 긴말뚝으로 구분할 수 있다. 이 구분방법은 수평荷重과 지반반력에 의하여 말뚝에 발생하는 最大 휨모멘트  $M_{max}$ 와 말뚝의 降伏모멘트  $M_y$ 의 비교에 의하여 구분하는 방법이다.<sup>10,11)</sup> 즉,  $M_{max}$

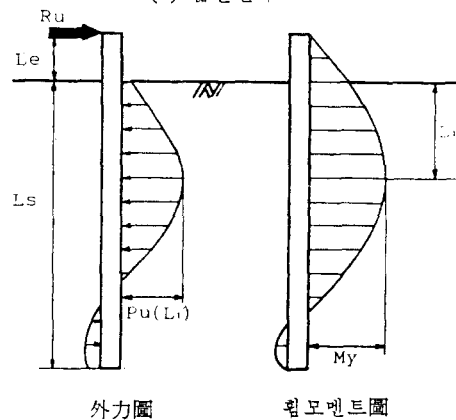
가  $M_y$ 보다 적으면 짧은말뚝으로, 크면 긴말뚝으로 구분된다. 따라서, 긴말뚝의 경우는 말뚝의 極限水平抵抗力이 말뚝의 降伏모멘트에 의하여 결정된다.

### 3.1. 頭部自由말뚝



외力图 휨모멘트圖

(a) 짧은말뚝



외力图 휨모멘트圖

(b) 긴말뚝

그림 5. 頭部自由말뚝

그림 5는 말뚝머리의 拘束條件이 自由인 경우, 말뚝에 작용하는 外力圖(Force diagram)와 휨모멘트圖(Bending moment diagram)이다. 그림 5(a)는 짧은말뚝의 경우이며 그림 5(b)는 긴말뚝의 경우를 나타내고 있다. 여기서  $L_1$ 은 最大 휨모멘트가 발생하는 지반깊이이고  $R_f$ 는 말뚝先端部の 회전점 아래에 발생하는 반대방향의 地盤反력의 합이며,  $P_u(L_1)$ 은 極限地盤反力으로 식(10)에  $z=L_1$ 를 대입하여 구한다. 짧은말뚝에 발생하는 휨모멘트의 최대치는 降伏모멘트 내에 존재하여야 한다. 만약 降伏모멘트를 초과할 경우는 그림 5(b)의 긴말뚝의 경우로

해석하여야 한다. 짧은말뚝의 경우는 말뚝이 수평하중을 받게 되면 말뚝이 先端부근을 중심으로 회전한다고 생각할 수 있어 모멘트 평형을 생각하면 다음과 같다.

$$R_u(L_e+L_s) - \int_0^{L_s} P_u(z)(L_s-z)dz = 0 \dots (16)$$

여기서  $P_u(z)$ 는 식(10)으로 구한다. 식(16)으로 짧은말뚝의 極限水平抵抗力  $R_u$ 를 구하면 다음과 같다.

$$R_u = \frac{3K_{A1} c d L_s^2 + K_{A2} \gamma L_s^3 d}{6(L_e+L_s)} \dots (17)$$

最大휨모멘트가 발생하는 위치  $L_1$ 에서의 剪斷力은 0이므로 식(18)이 성립한다.

$$R_u - \int_0^{L_1} P_u(z)dz = 0 \dots (18)$$

식(18)로부터  $L_1$ 을 구하면 다음과 같다.

$$L_1 = \frac{1}{K_{A2} \gamma} (\sqrt{(K_{A1} c)^2 + 2 K_{A2} \gamma R_u/d} - K_{A1} c) \dots (19)$$

따라서  $L_1$ 의 위치에서의 最大휨모멘트  $M_{max}$ 는 다음과 같이 구하여 진다.

$$\begin{aligned} M_{max} &= R_u(L_e+L_1) - \int_0^{L_1} P_u(z)(L_1-z)dz \\ &= R_u(L_e+L_1) - \left( \frac{1}{2} K_{A1} c d L_1^2 + \frac{1}{6} K_{A2} \gamma L_1^3 d \right) \dots (20) \end{aligned}$$

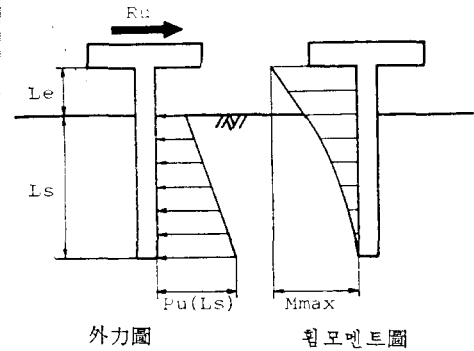
그림 5(b)에서 보는 바와 같이 말뚝이 길어지면 말뚝내에 降伏모멘트가 발생하는 곳에 塑性힌지(Plastic hinge)가 발생하게 되고 이 塑性힌지 아래에서는 완전한 하중전달이 되지 않으므로 지반의 極限反力を 기대할 수 없게 되어 지반의 反力分布는 그림 5(b)의 外力圖에서 보는 바와 같이 塑性힌지 위치  $L_1$  까지만 완전한 極限地盤反力分布를 보이게 된다. 긴말뚝의 경우는 식(20)의 最大휨모멘트  $M_{max}$ 가 降伏모멘트  $M_y$ 를 넘을 수 없으므로 식(20)은 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} M_y &= R_u(L_e+L_1) - \left( \frac{1}{2} K_{A1} c d L_1^2 + \frac{1}{6} K_{A2} \gamma L_1^3 d \right) \dots (21) \end{aligned}$$

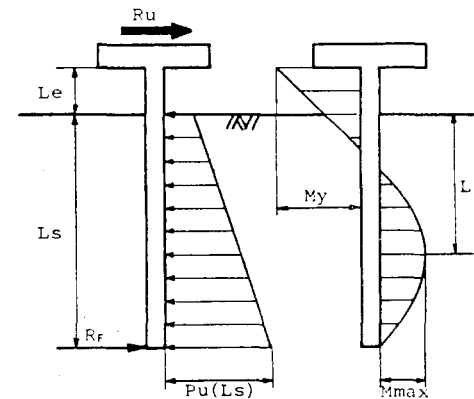
식(21)과 식(19)로부터 긴말뚝의 水平抵抗力  $R_u$ 는 다음과 같이 구하여 진다.

$$R_u = \frac{6M_y + 3K_{A1} c d L_1^2 + K_{A2} \gamma L_1^3 d}{6(L_e+L_1)} \dots (22)$$

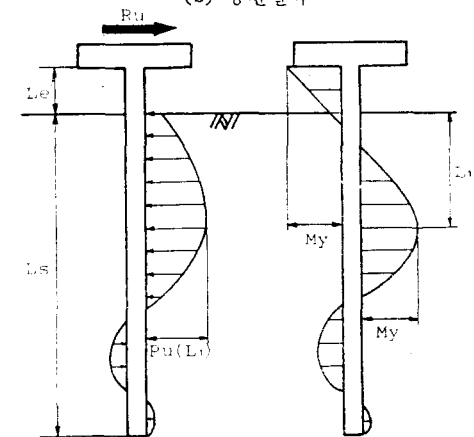
### 3.2. 頭部回轉拘束말뚝



(a) 짧은말뚝



(b) 중간말뚝



(c) 긴말뚝

그림 6. 頭部回轉拘束말뚝

그림 6은 말뚝머리가 構造物下部캡 등에 의하여 회전이 拘束되어 있는 경우의 말뚝에 작용하는 外力圖와 휨모멘트圖이다. 頭部가 拘束되어 있으므로 말뚝머리에 모멘트가 발생한다.

그림 6(a)는 말뚝의 길이가 짧은 경우의 極限地盤反力과 휨모멘트의 分布를 나타내고 있다. 이 그림과 그림 5(a)을 비교하면 地盤反力分布는 頭部自由말뚝과 동일하나 휨모멘트는 頭部에서 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

따라서 말뚝의 極限水平抵抗力  $R_u$ 는 水平方向 힘의 平衡조건으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$R_u = \int_0^{L_s} P_u(z) dz$$

$$= K_{A1} c d L_s + \frac{1}{2} K_{A2} \gamma L_s^2 d \quad \dots\dots(23)$$

말뚝머리에서의 最大휨모멘트는 다음과 같다.

$$M_{max} = \int_0^{L_s} P_u(z)(L_e + z) dz$$

$$= \left( L_e L_s + \frac{1}{2} L_s^2 \right) K_{A1} c d$$

$$+ \left( \frac{1}{2} L_e L_s + \frac{1}{3} L_s^2 \right) K_{A2} \gamma L_s \quad \dots\dots(24)$$

이 最大휨모멘트가 말뚝의 降伏모멘트를 초과하게 되면 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 말뚝머리에 塑性힌지가 발생하며 말뚝先端의 회전점을 중심으로 말뚝이 회전하면서 이동하게 되며 말뚝先端에서는 반대방향의 지반반력  $R_F$ 가 발생하게 된다. 따라서 말뚝에 작용하는 外力의 수평방향 平衡조건으로부터 식(25)가 구하여진다.

$$R_u + R_F = \int_0^{L_s} P_u(z) dz$$

$$= K_{A1} c d L_s + \frac{1}{2} K_{A2} \gamma L_s^2 d \quad \dots\dots(25)$$

식(25)로부터  $R_F$ 를 구하고 말뚝머리에서의 휨모멘트를  $M_y$ 로 하면 다음식이 구하여진다.

$$M_y = \int_0^{L_s} P_u(z)(L_e + z) dz - R_F(L_e + L_s)$$

$$= R_u(L_e + L_s) - \left( \frac{1}{2} K_{A1} c d L_s^2 \right.$$

$$\left. + \frac{1}{6} K_{A2} \gamma L_s^3 d \right) \quad \dots\dots(26)$$

식(26)으로부터 말뚝머리에 降伏모멘트가 발생할 경우의 水平抵抗力은 다음과 같이 구하여

진다.

$$R_u = \frac{6M_y + 3K_{A1} c d L_s^2 + K_{A2} \gamma L_s^3 d}{6(L_e + L_s)} \quad \dots\dots(27)$$

말뚝의 길이가 더욱 길어져 그림 6(c)처럼 地中部에서도 塑性힌지가 발생하게 되면 말뚝머리에서는 負의 最大휨모멘트  $M_{max}^{neg}$ 와 지반깊이  $L_1$ 에서는 正의 最大휨모멘트  $M_{max}^{pos}$ 가 모두 降伏모멘트에 도달한 상태에서 말뚝이 파괴된다.  $L_1$ 은 식(19)로부터 구하여질 수 있으므로  $L_1$ 의 위치에서의  $M_{max}^{pos}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$M_{max}^{pos} = R_u(L_e + L_1) - \int_0^{L_1} P_u(z)(L_1 - z) dz$$

$$- M_{max}^{neg} \quad \dots\dots(28)$$

$M_{max}^{neg}$ 는 식(24)로부터 구할 수 있으나  $M_{max}^{pos}$ 와  $M_{max}^{neg}$ 가  $M_y$ 에 도달한 상태에서의  $R_u$ 는 식(19)와 식(28)에서 다음과 같이 구하여진다.

$$R_u = \frac{12M_y + 3K_{A1} c d L_1^2 + K_{A2} \gamma L_1^3 d}{6(L_e + L_1)} \quad \dots\dots(29)$$

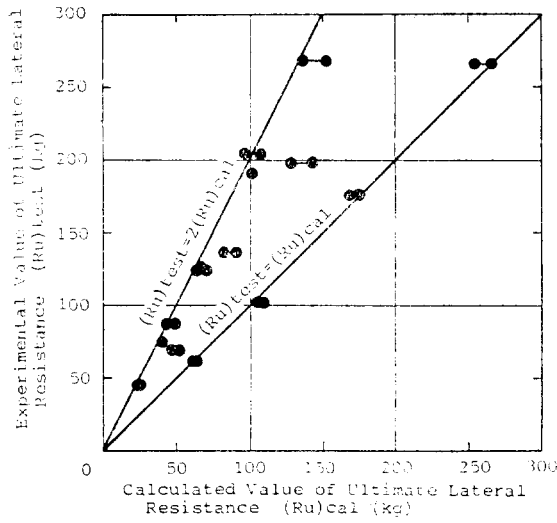
또한 正 및 負의 最大휨모멘트의 合은 식(28)로부터 다음과 같이 구하여진다.

$$M_{max}^{pos} + M_{max}^{neg} = R_u(L_e + L_1)$$

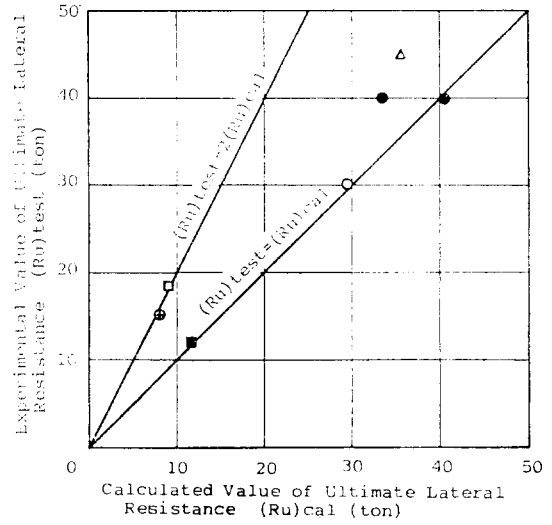
$$+ \left( \frac{1}{2} K_{A1} c d L_1^2 + \frac{1}{6} K_{A2} \gamma L_1^3 d \right) \quad \dots\dots(30)$$

#### 4. 實測値와 비교

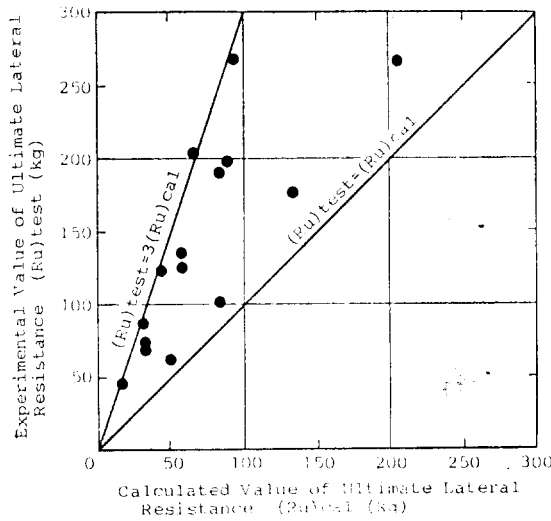
그림 7은 Ramelot과 Vandepierre의 水平載荷試驗結果<sup>10)</sup>를 本理論値 및 Broms<sup>10)</sup>의 理論値와 비교한 그림이다. 實測値는 內部摩擦角이 33.7° 單位體積重量이 93.8lb/ft<sup>3</sup>인 모래地盤에 짧은말뚝으로 분류되는 각종 模型말뚝을 사용하여 실시한 模型實驗으로부터 얻은 결과이다. 그림 7(a)는 實測値와 식(17)에 의한 理論値를 비교한 그림이다. 그림중 두 점을 연결시켜 놓은 것은 矩形말뚝에 대한 결과로 말뚝과 지반사이의 마찰각  $\phi_0$ 를  $\frac{2}{3}\phi$ 에서  $\phi$ 까지 변화시키면서 식(17)을 사용한 理論値의 범위를 圖示한 것이다. 이 그림으로부터 理論値와 實驗値사이의 관계를 나타내는 점은  $(R_u)_{test} = (R_u)_{cal}$  및  $(R_u)_{test} = 2(R_u)_{cal}$ 의 두 직선사이에 분포되어 있



(a) 本理論



(a) 本理論

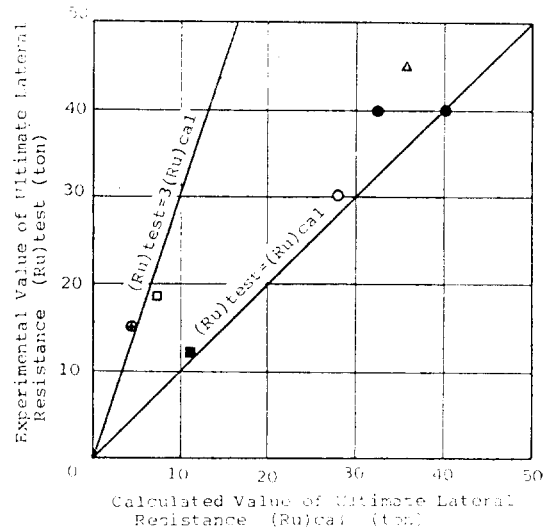


(b) Broms 理論

그림 7. 極限水平抵抗力의 理論値와 實測値의 比較(모래地盤)

음을 알 수 있다. 그림 7(b)는 實驗値와 Broms의 理論値<sup>10)</sup>사이의 關係를 나타내고 있다. 이 그림에 의하면 實測値는 理論値의 3배이내 범위에 분포되어 있음을 알 수 있다.

한편 그림 8은 粘土地盤에 設置하여 실시한 水平載荷試驗의 荷重-變位 曲線으로 부터 얻은 極限水平抵抗力의 實測値를 本理論値 및 Broms의 理論値<sup>11)</sup>와 比較한 그림이다. 그림중 圓으로 표시한 點은 中



(b) Broms 理論

그림 8. 極限水平抵抗力의 理論値와 實測値의 比較(粘土地盤)

井가 實施한 實驗에서 얻은 結果이며,<sup>18~20)</sup> 삼각형은 Kishida<sup>9)</sup>가, 사각형은 佐藤<sup>21)</sup>가 실시한 실험결과이다. 그림중 ⊕로 표시한 점은 실제 Scale을 1/10로 축소하여 圖示한 것이다. 우선 그림 8(a)는 實測値와 粘土地盤에 대한 식(19)와 식(21) 혹은 식(22)로 계산된 理論値를 比較한 그림이다. 이 그림에서도 理論値와 實測値의 關係는  $(R_u)_{test}=(R_u)_{cal}$  및  $(R_u)_{test}=2(R_u)_{cal}$ 의 두 직선 사이에 분포되어 있다. 그림 8(b)는 實



測値와 Broms의 理論値<sup>11)</sup> 사이의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서도 역시 그림 7(b)의 모래의 경우와 마찬가지로 實測値는 理論値의 3배 이내 범위에 분포함을 알 수 있다.

따라서 그림 7과 그림 8로 부터, 本理論에 의거하여 계산되는 理論値는 實測値의 1/2 배 범위 이내에 존재하는 경향이 있으며 Broms 理論에 의거한 理論値는 實測値의 1/3 배 범위 이내에 존재하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 결국 本理論에 의한 理論値가 Broms 理論에 의한 理論値보다 더 잘 實測値에 접근하고 있음을 의미한다.

## 5. 結 論

地盤에 設置된 單一剛말뚝에 水平荷重이 작용되어 졌을 경우 말뚝이 地盤으로 부터 받게되는 極限水平地盤反力の 算定理論式을 誘導할 수 있었다. 本研究에서는 周邊地盤이 Mohr-Coulomb의 降伏條件을 만족시키는 塑性狀態에 도달하는 것에 중점을 두어 理論解析을 實施함으로써 지반 및 말뚝의 특성을 보다 현실에 가깝게 고려할 수 있었다. 더우기 本理論式에 極限水平地盤反力 係數를 도입하여 정리함으로써 식을 간단한 線形式으로 표시할 수 있었다.

또한 이 極限水平地盤反力算定式을 이용하고 말뚝 머리의 拘束條件 및 말뚝길이를 고려하여 單一剛말뚝의 極限水平抵抗力을 산정할 수 있는 방법이 확립되어 질 수 있었다. 本理論에 의하여 산정된 極限水平抵抗力의 理論値는 Broms 理論에 의한 理論値보다 더 잘 實測値에 접근하고 있다.

## 參 考 文 獻

1. 洪元杓: "水平力을 받는 말뚝", 大韓土木學會誌, 第31卷, 第5號, 1983, pp. 32~36.
2. 洪元杓: "粘土地盤속의 말뚝에 作用하는 側方土壓", 大韓土木學會論文集, 第2卷, 第1號, 1982, pp. 45~52.
3. 洪元杓: "브레地盤속의 말뚝에 作用하는 側方土壓", 大韓土木學會論文集, 第3卷, 第3號, 1983, pp. 63~69.
4. 洪元杓: "側方變形地盤속의 端말뚝에 作用하는 土壓", 大韓土木學會論文集, 第4卷, 第1號, 1984, pp. 59~68.
5. 洪元杓: "受動말뚝에 作用하는 側方土壓", 大韓土木學會論文集, 第4卷, 第2號, 1984, pp. 77~88.
6. Poulos, H.G. and Davis, E.H.: *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley & Sons, New York, 1980, pp. 143~161.
7. Reese, L.C.: "Ultimate Resistance against a Rigid Cylinder Moving Laterally in a Cohesionless Soil," *Society of Petroleum Engineers Jour.*, Dec., 1962, pp. 355~359.
8. Reese, L.C.: Discussion on "Soil Modulus for Laterally Loaded Piles", *Trans, ASCE, Vol. 123, Paper No. 2954*, 1958, pp. 1049~1086.
9. Kishida, H. and Nakai, S.: "Large Deflection of a Single Pile under Horizontal Load," *Proc., 9th ICSMFE, Specialty Session 10, Tokyo*, pp. 87~92.
10. Broms, B.B.: "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soil," *Jour, SMFD, ASCE, Vol. 90, No. SM3*, 1964, pp. 123~156.
11. Broms, B.B.: "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils," *Jour, SMFD, ASCE, Vol. 90, No. SM2*, 1964, pp. 27~63.
12. Petrasovits, G. and Awad, A.: "Ultimate Lateral Resistance of a Rigid Pile in Cohesionless Soil," *Proc., 5th ECSMFE, Madrid, Vol. 1*, 1972, pp. 407~412.
13. Sullivan, W.R., Reese, L.C. and Fenske, C.W.: "Unified Method for Analysis of Laterally Loaded Piles in Clay," *Proc., Numerical Methods in Offshore Piling, ICE, London*, 1980, pp. 135~146.
14. Matlock, H.: "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay," *OTC Paper No. 1204, Houston*, April, 1970.
15. 渡正亮·中村浩之: "地すべり抑止工法の設計について", 地すべり, Vol. 5, No. 1, 1968, pp. 25~31.
16. 山肩邦男: "建築構造物のクイの水平抵抗", 土と基礎, Vol. 25, No. 8, 1977, pp. 7~14.
17. 横山幸滿: *くい構造物の計算法と計算例*, 山海堂, 東京, 1979, pp. 16~19.

18. 中井正一・岸田英明：“単グイの水平抵抗の非線形解析”，第10回土質工學研究發表會，1975，pp. 533～536.
19. 中井正一・岸田英明：“水平力を受ける単杭の非線形特性の略算”，第15回土質工學研究發表會，1979，pp. 1001～1004.
20. 中井正一・岸田英明：“杭と地盤の非線形性を考慮した杭の水平抵抗”，第16回土質工學研究發表會，1981，pp. 985～988.
21. 佐藤輝行：“クイの水平載荷試験の荷量一變位曲線にみられる特性について”，土と基礎，Vol. 24，No. 9，1976，pp. 25～32.
22. 洪 元杓・朴 來雄：“單一말목의 水平極限地盤反力”，1983年度學術發表會概要集，大韓土木學會，1983，pp. 1-76～1-81.
23. 洪 元杓・朴 來雄：“모래地盤속에 設置된 單一말목의 極限水平抵抗力”，1984年度學術發表會概要集，大韓土木學會，1984，pp. 14～22.

(접수일자 1987. 7. 6)