

側方變形地盤속의 줄말뚝에 作用하는 土壓

Earth Pressures Acting on a Row of Piles due to Lateral Soil Movements

洪 元 杓*
Hong, Won Pyo

Abstract

Theoretical equations are derived to estimate the lateral earth pressures acting on piles with various shape of pile section due to lateral soil movements. And also examination of characteristics of the equations and comparison with other equations are carried out.

The equations can be derived by calculating the difference between the two earth pressures acting on front and back sides of pile's row under plastic state satisfying Mohr-Coulomb's yield criterion, which is developed on the soil between two piles among the piles in a row. The theoretical equations can reasonably consider the pile section-shape, the pile interval and the plastic condition in the soils just around piles.

Additionally, the factors about soils and piles influencing on the lateral earth pressures are clarified and the high reliability of the equations is proved.

要 旨

側方變形地盤속에 一定한 間隔을 두고 一列로 設置된 各種 斷面의 말뚝에 作用하는 側方土壓을 算定할 수 있는 理論式이 誘導되고 理論式의 特性檢討 및 他理論과의 比較檢討가 實施된다.

줄말뚝중 두개의 말뚝사이에 있는 地盤이 Mohr-Coulomb의 降伏條件을 滿足시키는 塑性狀態에 도달하려 할 때 말뚝列 前後面에 作用하는 土壓의 差를 算定함에 의하여 줄말뚝에 作用하는 側方土壓算定理論式이 誘導될 수 있다. 本理論式에서는 特히 말뚝斷面形狀, 말뚝設置間隔 및 말뚝周邊地盤의 塑性狀態가 無理없이 考慮되고 있다.

그 밖에도 本研究를 통하여 側方土壓에 影響을 미치는 地盤과 말뚝에 關한 몇몇 要素가 究明되고 本理論式의 信賴度가 대단히 높다는 事實도 立證된다.

1. 序 論

말뚝을 使用한 土木建築構造物이 나날이 增加하여 감에 따라 地盤의 側方塑性變形이 原因이

되어 말뚝周邊地盤으로부터 2次的으로 發生되는 側方土壓을 받게 되는 受動말뚝^(1,2)이 增加하고 있으며 이에 關한 研究도 최근에 제 8회 및 9회 土質基礎工學 國際會議 등을 통하여 활발히 進行되고 있다^(1,2). 이더한 受動말뚝을 포함하고 있는 地盤의 問題를 취급할 경우 가장 重要한

*正會員·中央大學校 工科大學 土木工學科 助教授

基本事項은 말뚝에 作用하는 側方土壓을 精確하게 算定하는 것이다. 그러나, 이 側方土壓은 말뚝과 地盤에 관한 여러 가지 要因에 의하여 영향을 받고 있어 이를 精確하게 豫測하는 것은 容易한 일이 아님을 이미 여러 번 지적한 바 있다⁽³⁻⁵⁾. 따라서, 現在 設計에 利用되고 있는 側方土壓은 理論的 근거가 희박하게 제안된 算定式⁽⁶⁾에 의하여 구하여 지는 경우가 많다. 이러한 算定式을 利用함으로 인하여 發生된 事故報告는 우리 周邊에서 종종 발견되고 있다⁽⁷⁾. 그나마, 이들 算定式은 말뚝 한개에 作用하는 側方土壓만에 관한 식이 대부분이므로 줄말뚝 혹은 무리말뚝에는 적용이 곤란하다.

筆者는 지금까지 말뚝設置間隔과 말뚝周邊地盤의 塑性狀態를 考慮하는 것에 重點을 두고 粘土地盤⁽⁸⁾과 모래地盤⁽⁹⁾속의 圓形말뚝에 作用하는 側方土壓의 算定理論式을 提案하고 模型實驗을 통한 側方土壓 發生機構의 究明을 實施發表하여 오고 있다. 本論文에서는 模型實驗^(3,4)을 통하여 認定되어 질 수 있음이 立證된 理論의 妥當性을 基礎로 하여 지금까지의 成果를 各種斷面形狀을 가지는 말뚝에까지 확대시켜 보다 一般的인 側方土壓算定理論式을 誘導한다. 또한 本理論式의 考察을 통하여 側方土壓에 영향을 미치는 地盤 및 말뚝에 관한 要素를 分析하고 각 要素의 特性을 檢討한 후 他算定式과도 比較檢討하여 本算定理論式의 信賴度를 再檢討하고자 한다.

2. 理論式의 誘導

그림 1은 $B_1 \times B_2$ 크기의 矩形말뚝이 D_1 의 中心間隔으로 地盤속에 一列로 設置되어 있는 狀態의 斷面圖와 平面圖이다. 이 경우 斷面圖에서 보는 바와 같이 不動地盤面上的의 두께 H 의 地盤이 上載荷重 등으로 인하여 側方移動하게 되면 말뚝周邊地盤에는 塑性域이 發生할 것이며 말뚝은 側方土壓을 받게 된다.

本章에서는 이와 같은 側方變形地盤속의 줄말뚝에 作用하는 土壓을 算定할 수 있는 理論式을 誘導하기로 한다. 우선, 그림 2(a)에서 보는 바와 같은 $B_1 \times B_2$ 크기의 矩形말뚝에 대하여 理論

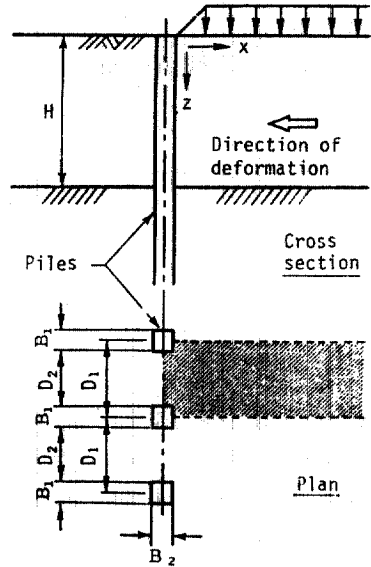
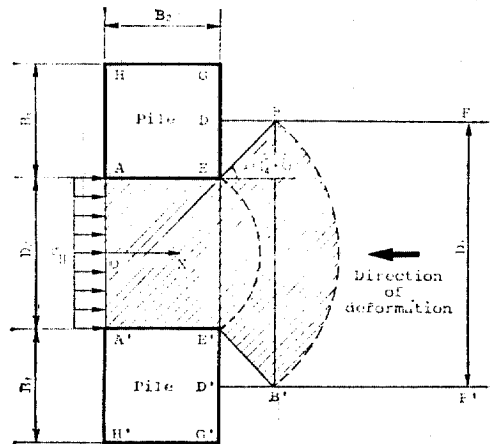


그림 1. 側方變形地盤속의 말뚝設置圖

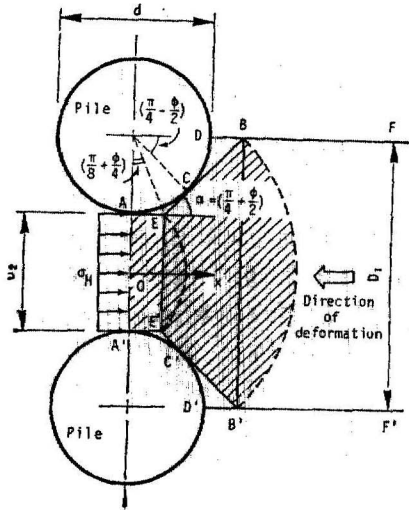
誘導를 展開한 후 各種斷面形狀을 가지는 말뚝에 대하여 擴大解析하고자 한다.

2.1. 矩形말뚝

一定한 間隔으로 設置된 줄말뚝에 관한 理論解析을 實施함에 있어서는 그림 1에 斜線으로 表示한 部分의 地盤움직임만을 대상으로 하면 충분할 것이다. 이 움직임으로 인한 말뚝周邊地盤의 塑性狀態는 土質條件에 따라서도 상당히



(a) 矩形말뚝



(b) 圓形말뚝

그림 2. 말뚝周邊地盤의 塑性狀態

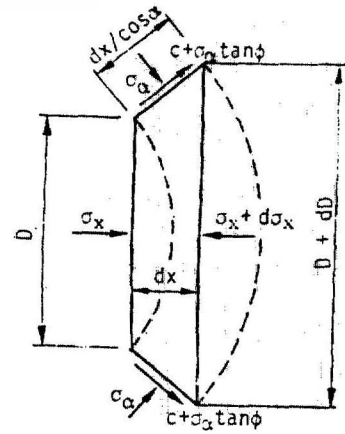


그림 3. (a) EBB'E' 內의 微小要素

변화된다고 생각된다. 그러나, 本理論解析에서는 Mohr-Coulomb의 降伏條件을 滿足시키는 塑性狀態의 地盤을 대상으로 한다.

줄말뚝중 두개의 말뚝사이의 地盤을 擴大시키면 그림 2(a)와 같이 AEDFF'D'E'A' 部分으로 表示할 수 있다. 여기에 다이스(Dies)를 통한 금속의 押出理論⁽³⁾을 適用시켜 單位깊이당의 말뚝에 作用하는 側方土壓을 算定할 수 있는 理論式을 구할 수 있을 것이다. 本理論解析에는 다음과 같은 事項이 假定되며, 이들 假定에 대한 妥當性은 이미 實驗의으로 立證된 바 있다^(3,4).

1) 地盤이 變形하면 AEB 및 A'E'B' 면을 따라 破壞面이 發生한다. 단, EB面 및 E'B'面은 x軸方向과 $(\pi/4 + \phi/2)$ 의 角을 이룬다.

2) 말뚝周邊地盤은 AEBB'E'A' 部分만이 塑性狀態가 되어 Mohr-Coulomb의 降伏條件을 滿足한다. 따라서, 이 地盤은 内部摩擦角 ϕ 및 粘着力 c 로 表示한다.

3) 破壞面 AEB 및 A'E'B'에는 摩擦力이 作用하고 있지만 AEBB'E'A' 部分(그림 2의 斜線部分)內의 應力分布는 이들 面에 摩擦力이 作用하지 않는 경우의 應力分布와 同一하게 취급한다.

4) 地盤은 깊이 方向으로 平面變形率狀態에 있다.

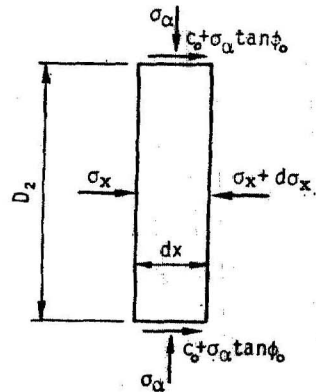


그림 3. (b) AEE'A' 內의 微小要素

5) 말뚝은 剛體로 한다.

우선, 그림 2(a)의 EBB'E' 部分內의 微小要素에 作用하는 힘을 그림 3(a)와 같이 表示하고 이 힘들의 x軸方向 平衡條件으로부터 다음 식이 얻어진다.

$$-Dd\sigma_x - \sigma_x dD + 2dx \left\{ \sigma_\alpha \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + \sigma_\alpha \tan \phi + c \right\} = 0 \quad (1)$$

假定 3)에 의거하면, 主應力 σ_x 에 對應하는 主應力으로는 EB面 및 E'B'面에 作用하는 수직應력 σ_α 를 近似的으로 생각할 수 있다. 따라서 假定 2)의 地盤降伏條件으로부터 다음과 같은 관계가 성립할 수 있다.

$$\sigma_x = \sigma_x N_p + 2cN_p^{1/2} \quad (2)$$

여기서 $N_p = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$

또한, 微小要素의 幅 dx 는 식(3)과 같이 表示할 수 있다. 식(1)에 식(2)와 (3)을 代入하여

$$dx = \frac{d\left(\frac{D}{2}\right)}{\tan \alpha} = \frac{1}{2} N_p^{-1/2} dD \quad (3)$$

變數分離形 미분방정식으로 整理한 후 積分하면 식(4)가 구하여진다.

$$\sigma_x = \frac{(C_1 D)^{G_1(\phi)} - cG_2(\phi)}{G_1(\phi)} \quad (4)$$

여기서, C_1 은 積分常數이고, $G_1(\phi) = N_p^{1/2} \tan \phi + N_p - 1$, $G_2(\phi) = 2 \tan \phi + 2N_p^{1/2} + N_p^{-1/2}$

한편, 그림 2(a)의 AEE'A' 部分內의 微小要素에 作用하는 힘은 그림 3(b)에 圖示한 바와 같으며 x 軸方向의 平衡條件으로부터 다음 식이 얻어진다.

$$D_2 d\sigma_x = 2(\sigma_x \tan \phi_0 + c_0) dx \quad (5)$$

여기서, ϕ_0 및 c_0 는 地盤과 말뚝사이의 摩擦角 및 附着力이다.

식(2)를 식(5)에 代入하고 變數分離形 미분방정식으로 整理한 後 積分하면 式(6)이 구하여진다.

$$\sigma_x = \frac{C_2 \exp\left(\frac{2G_3(\phi)}{D_2} x\right) - cG_4(\phi)}{G_3(\phi)} \quad (6)$$

여기서, C_2 는 積分常數이고, $G_3(\phi) = N_p \tan \phi_0$, $G_4(\phi) = 2N_p^{1/2} \tan \phi_0 + c_0/c$

그림 2(a)에 圖示한 바와 같이 $x=0$ 인 AA' 面에서의 應力 σ_x 는 地盤變形에 抵抗하는 單位깊이당 一定分布의 水平土壓 σ_H 와 같으므로 식(6)의 積分常數 C_2 는 다음과 같이 定하여진다.

$$C_2 = \sigma_H G_3(\phi) + cG_4(\phi) \quad (7)$$

EE' 面에서의 x 軸값은 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= \overline{AE} = \overline{A'E'} \\ &= B_2 = \xi B_1 = \xi (D_1 - D_2) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\xi (= B_2/B_1)$ 는 말뚝形狀係數이다. 식(7)과 (8)을 식(6)에 代入하면 EE' 面에서의 應力이 구하여 질 수 있다. 또한, EE' 面에 作用하는 應力은 EBB'E' 部分의 식(4)에 $D=D_2$ 를 代入하여서도 얻을 수 있다. 이들 값은 連續條件에 의하여 서로 一致하여야 한다. 따라서, 식(4)와 (6)으로부터 積分常數 C_1 은 다음과 같이 定하여진다.

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{D_2} \left[\frac{G_1(\phi)}{G_3(\phi)} \left\{ (\sigma_H G_3(\phi) + cG_4(\phi)) \right. \right. \\ &\quad \times \exp\left(2\xi \frac{D_1 - D_2}{D_2} G_3(\phi)\right) - cG_4(\phi) \left. \right\} \\ &\quad \left. + cG_2(\phi) \right]^{-G_1(\phi)} \quad (9) \end{aligned}$$

말뚝에 作用하는 x 軸方向의 單位깊이당 側方土壓 P 는 BB' 面과 AA' 面에 作用하는 土壓의 差인 생각하여 식(10)과 같이 구하여진다. 여기서, BB' 面에 作用하는 土壓 $p_{BB'}$ 는 식(9)를 식(4)에 代入한 후 $D=D_1$ 인 경우의 應力을 利用하고, AA' 面에 作用하는 土壓 $P_{AA'}$ 는 σ_H 를 利用한다.

$$\begin{aligned} p &= p_{BB'} - p_{AA'} \\ &= D_1 |\sigma_x|_{D=D_1} - D_2 \sigma_H \\ &= c \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \left\{ \frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)} \left(\exp\left(2\xi \frac{D_1 - D_2}{D_2} \right. \right. \right. \right. \\ &\quad \times G_3(\phi) - 1) + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \left. \right\} - D_1 \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \left. \right] + \sigma_H \\ &\quad \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \exp\left(2\xi \frac{D_1 - D_2}{D_2} G_3(\phi)\right) - D_2 \right] \end{aligned} \quad (10)$$

粘着力 c 가 0인 砂質土의 경우는 식(10)에 $c=0$ 을 代入하여 식(11)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} p &= \sigma_H \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \exp\left(2\xi \frac{D_1 - D_2}{D_2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times G_3(\phi)\right) - D_2 \right] \end{aligned} \quad (11)$$

內部摩擦角 ϕ 가 0인 粘性土의 경우는 그림 2(a) 중에 $\phi=0$ 을 代入한 후 上記와 同一한 方法으로 誘導한다. 즉, EBB'E' 部分 및 AEE'A' 部分內의 각각의 微小要素에 作用하는 힘의 x 軸方向 平衡條件으로부터 얻는 微分方程式을 積分하여 이들 각각의 要素에 대한 應力方程式을 구한다. 그 다음, AA' 面에서의 境界條件 및 EE' 面에서의 連續條件으로부터 積分常數를 결정한 후, BB' 面과 AA' 面에 作用하는 土壓의 差를 구하면 다음 식과 같이 整理된다.

$$\begin{aligned} p &= cD_1 \left(3 \ln \frac{D_1}{D_2} + 2\xi \frac{D_1 - D_2}{D_2} \frac{c_0}{c} \right) \\ &\quad + \sigma_H (D_1 - D_2) \end{aligned} \quad (12)$$

식(10), (11) 혹은 (12)를 側方變形地盤 깊이 H 에 대하여 積分하면 終말뚝중 한개의 말뚝에 作用하는 全側方土壓을 구할 수 있다.

2. 2. 기타斷面의 말뚝

前節에서는 $B_1 \neq B_2$ 인 矩形斷面의 말뚝에 作用

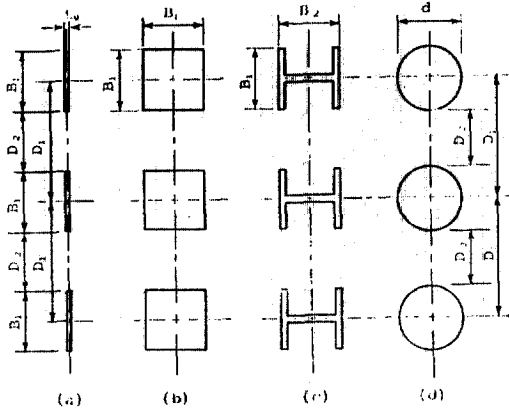


그림 4. 各種斷面形狀의 줄말뚝

하는 土壓算定式을 알아 보았다. 本節에서는 이를 基本으로 하여 그밖의 斷面의 말뚝에 대하여 檢討하기로 한다.

그림 4는 4가지의 斷面을 가지는 말뚝의 設置圖를 보여 주고 있다. (a)의 경우는 두께가 얇은 板이 地盤變形方向에 수직으로 놓여 있는 경우이다. 이 경우는 말뚝形狀係數 $\xi (=t_0/B_1)$ 는 대단히 적어 0으로 생각할 수 있으므로 側方土壓算定式은 식(10)으로부터 식(13)과 같이 구하여진다. 또한, 그림 2의 길이 $\overline{AE(A'E')}$ 에서의 剪斷抵抗을 無視하는 경우에도 ξ 는 0으로 생각할 수 있다.

$$p = cD_1 \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} - 1 \right] + \sigma_H \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} - D_2 \right] \quad (13)$$

$c=0$ 인 砂質土의 경우는 식(11)로부터,

$$p = \sigma_H \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} - D_2 \right] \quad (14)$$

$\phi=0$ 인 粘性土의 경우는 식(12)로부터

$$p = 3cD_1 \ln \frac{D_1}{D_2} + \sigma_H(D_1 - D_2) \quad (15)$$

만약, 이러한 薄板이 地盤變形方向에 平行으로 놓여져 있다면, 말뚝形狀係數는 B_2/t_0 이 되고 D_2 는 $D_1 - t_0$ 이 된다. 이들 값을 식(10)에서 (12)사이에 代入하면 側方土壓을 算定할 수 있으나, $D_1 = D_2$ 로 인하여 대단히 적은 값이 算出될 것이다.

(b)의 경우는 $B_1 = B_2$ 인 正方形斷面의 말뚝이

므로 말뚝形狀係數는 1이 된다. 따라서, 식(10), (11), (12)는 각각 식(16), (17), (18)로 된다.

$$p = c \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \left\{ \frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)} \left(\exp \left(2 \frac{D_1 - D_2}{D_2} \right) \times G_3(\phi) \right) - 1 \right\} + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right] - D_1 \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} + \sigma_H \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \exp \left(2 \frac{D_1 - D_2}{D_2} \right) \times G_3(\phi) - D_2 \right] \quad (16)$$

$$p = \sigma_H \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \exp \left(2 \frac{D_1 - D_2}{D_2} \right) \times G_3(\phi) - D_2 \right] \quad (17)$$

$$p = cD_1 \left(3 \ln \frac{D_1}{D_2} + 2 \frac{D_1 - D_2}{D_2} \frac{c_0}{c} \right) + \sigma_H(D_1 - D_2) \quad (18)$$

(c)는 H形말뚝의 경우이며 이 경우는 플랜지와 웨브사이의 홈이一體로 되어 움직일 것이 예상되므로 矩形斷面의 경우와 同하게 생각하여도 무방할 것이다. 단, 이 경우 말뚝과 地盤사이의 摩擦角 ϕ_0 와 附着力 c_0 로는 地盤의 内部 摩擦角 ϕ 와 粘着力 c 를 使用할 수 있다. 따라서 $G_3(\phi) = N_s \tan \phi$, $G_4(\phi) = 2N_s^{1/2} \tan \phi + 1$ 를 使用하여야 할 것이다.

(d)는 圓形말뚝의 경우로 이미 先行研究를 통하여 發表한 바 있다⁽³⁻⁵⁾. 圓形말뚝의 경우는 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 破壞面 $\overline{AE(A'E')}$ 의 길이가 $\frac{1}{2}(D_1 - D_2) \tan(\pi/8 + \phi/4)$ 이므로 식(8)을 利用하면 圓形斷面말뚝의 形狀係數는 $\frac{1}{2} \tan(\pi/8 + \phi/4)$ 로 정하는 것이 適當할 것이다. 따라서, 식(10), (11), (12)는 다음과 같은 식(19), (20), (21)로 誘導된다.

$$p = c \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \left\{ \frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)} \left(\exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} \right) \times \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) G_3(\phi) \right) - 1 \right\} + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right] - D_1 \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} + \sigma_H \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) G_3(\phi) \right) - D_2 \right] \quad (19)$$

$$p = \sigma_H \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} \right) \times \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) G_3(\phi) - D_2 \right] \quad (20)$$

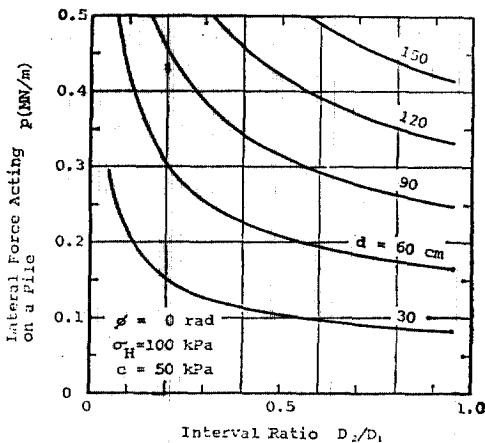
$$p = cD_1 \left(3 \ln \frac{D_1}{D_2} + \frac{D_1 - D_2}{D_2} \tan \frac{\pi}{8} \right) + \sigma_H (D_1 - D_2) \quad (21)$$

단, 말뚝과 地盤사이의 摩擽力과 附着力에 대하여서는 H形말뚝의 경우와 同一하게 생각함이 타당할 것이다. 식 (19), (20), (21)은 이미 提案된 圓形말뚝의 側方土壓算定理論式과도 一致하고 있다(3~5).

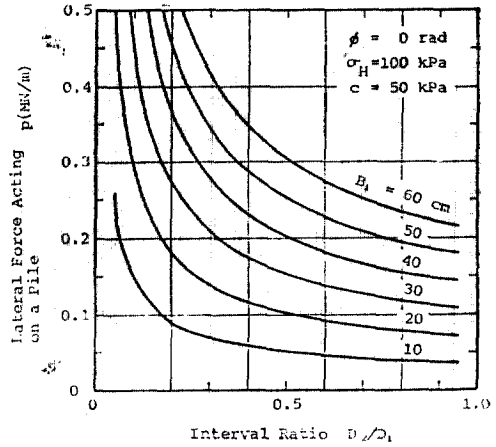
위에서 檢討한 바와 같이 圓形말뚝의 形狀係數는 말뚝의 直徑에 의하여 決定되지 않고 地盤의 內部摩擽角에 의하여 決定된다. 이는 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 말뚝周邊地盤의 破壞面 \overline{AE} 와 $\overline{A'E'}$ 의 假定에 의거하기 때문이다. 따라서 圓形말뚝의 形狀係數는 內部摩擽角이 0° 인 粘性土의 0.21에서부터 內部摩擽角이 45° 인 砂質土의 0.33까지의 範圍에 있게 될 것이다.

3. 理論式의 特性

前章에서 誘導된 理論式에는 여러 가지의 要素가 포함되어 있음을 알 수 있다. 즉, 말뚝의 設置狀態를 나타내는 要素, 地盤의 狀態를 나타내는 要素 및 말뚝과 地盤사이의 特性을 나타내는 要素가 그것이다. 이들중 圓形말뚝에 대한 一部 要素의 特性은 이미 實驗적으로 究明된 바 있다(2,3). 本章에서는 圓形말뚝 및 矩形말뚝(H形말뚝을 豫상하여 $\phi = \phi_0$, $c = c_0$ 로 함)을 대상으로 이들 要素에 의한 影響을 調查하여 本理論式의 特性을 檢討하고자 한다.



(a) 圓形말뚝



(b) 矩形말뚝

그림 5. 側方土壓과 間隔比의 關係

3.1. 말뚝에 관한 要素

그림 5(a) 및 (b)는 각각 圓形과 正方形말뚝에 대한 말뚝設置間隔 및 말뚝直徑(혹은 말뚝幅)이 側方土壓에 미치는 影響을 圖示한 것이다. 즉, 橫軸에는 D_1 및 D_2 에 의한 影響을 檢討하기 위한 變數로 말뚝間隔比 D_2/D_1 을 表示하고 縱軸에는 總말뚝중 한개의 말뚝에 作用하는 單位길이당 側方土壓 p 를 表示하므로써, 말뚝直徑 d 혹은 말뚝幅 B_1 과 말뚝間隔比 D_2/D_1 의 變化에 따른 側方土壓의 變化狀態를 파악할 수 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 말뚝直徑 혹은 말뚝幅이 一定하면 側方土壓은 D_2/D_1 의 減少와 함께 增加하며 D_2/D_1 이 더욱 적어지면 側方土壓은 비약적으로 增加한다. 여기서 D_2/D_1 이 減少함은 말뚝間隔이 좁아짐을 의미하고 말뚝間隔이 좁아지면 말뚝과 地盤사이의 相互作用에 의한 影響이 더욱 增加하여 地盤이 말뚝사이를 빠져 나가기 위하여는 더욱 큰 側方土壓이 말뚝에 作用하게 됨을 의미한다. 따라서, 本理論式은 말뚝間隔의 增減에 따른 側方土壓의 變化狀態를 잘 나타내고 있다고 할 수 있다.

한편, D_2/D_1 이 一定한 경우 말뚝直徑 혹은 말뚝幅이 增加하면 側方土壓이 增加하는 傾向이 있음도 그림 5로부터 알 수 있다. 이들 關係를 말뚝直徑 및 말뚝幅과 側方土壓의 關係圖로 再作成하여 보면 그림 6과 같이 된다. 이 그림

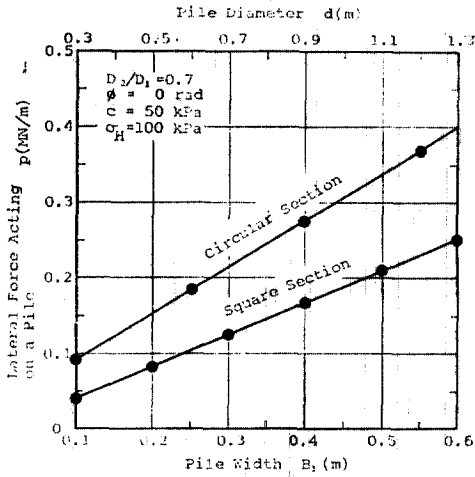


그림 6. 말뚝直徑 및 말뚝幅의 影響

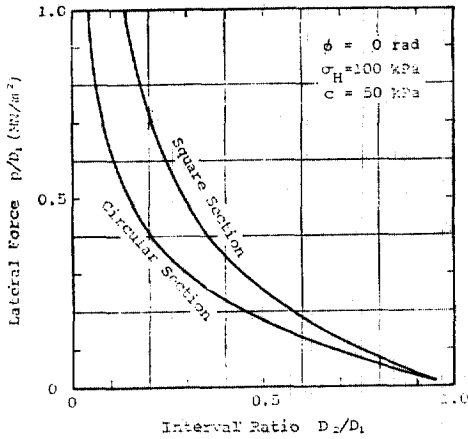


그림 7. p/D_1 와 D_2/D_1 의 關係

에 의하면 말뚝直徑과 말뚝幅이 增加함에 따라 側方土壓은 線形的으로 增大되고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 側方土壓 p 를 말뚝中心間隔 D_1 으로 나누어서 그림 5의 結果를 p/D_1 과 D_2/D_1 의 關係로 再整理한 그림이다. 여기서 p/D_1 은 말뚝列方向의 單位幅當으로 分割한 側方土壓을 의미하게 된다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 그림 5(a)와 (b) 속의 말뚝直徑 및 말뚝幅의 變化에 따른 여러개의 曲線은 p/D_1 과 D_2/D_1 의 關係圖에서는 각각 唯一한 曲線으로 表示되어진다. 이것은 相對的 말뚝間隔比 D_2/D_1

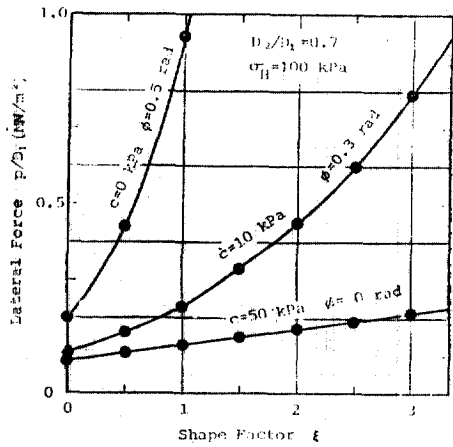


그림 8. 斷面形狀係數의 影響

D_1 이 一定하면 말뚝列方向單位幅當 側方土壓 p/D_1 은 말뚝直徑 혹은 말뚝幅에 關係없이 항상 一定함을 의미한다.

그림 8은 말뚝斷面形狀의 影響을 調査하기 위하여 3종의 地盤을 대상으로 側方土壓 p/D_1 과 말뚝形狀係數 ξ 의 關係를 圖示한 것이다. 이 그림으로부터 側方土壓은 말뚝形狀係數의 增大와 함께 增大됨을 알 수 있다. 內部摩擦角이 0인 粘性土의 경우는 側方土壓과 말뚝形狀係數가 線形的 關係를 보이고 있으나 內部摩擦角이 增大할수록 말뚝形狀係數의 增大에 따른 側方土壓 p/D_1 의 非線形的으로 增加率도 增大되고 있다. 이 結果로부터 充分한 剛性을 가진 말뚝에 作用하는 側方土壓은 矩形 혹은 H形말뚝보다 말뚝形狀係數가 적은 圓形말뚝의 경우가 적을 것에 예측될 수 있다.

3.2. 地盤에 관한 要素

그림 9와 그림 10은 砂質土의 內部摩擦角 ϕ 와 粘性土의 粘着力 c 에 대한 影響을 調査하기 위하여 p/D_1 과 ϕ 및 c 를 座標軸으로 하여 圓形말뚝과 正方形말뚝에 대한 檢討結果를 圖示한 것이다. 이들 그림으로부터 側方土壓 p/D_1 은 內部摩擦角과 粘着力의 增大와 함께 增大함을 알 수 있다. 즉, 말뚝間隔比 D_2/D_1 이 一定하면 側方土壓 p/D_1 은, 砂質土의 경우는 內部摩擦角의 增大에 非線形的으로 增大하나, 粘性土의 경

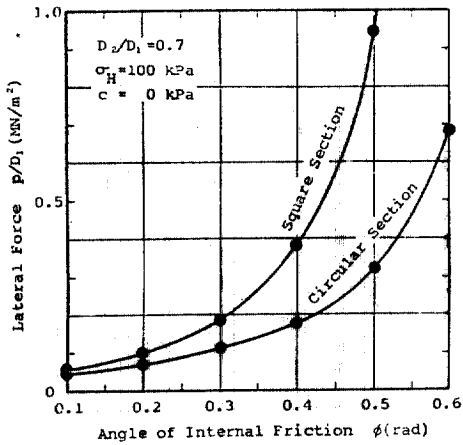


그림 9. 内部摩擦角의 影響

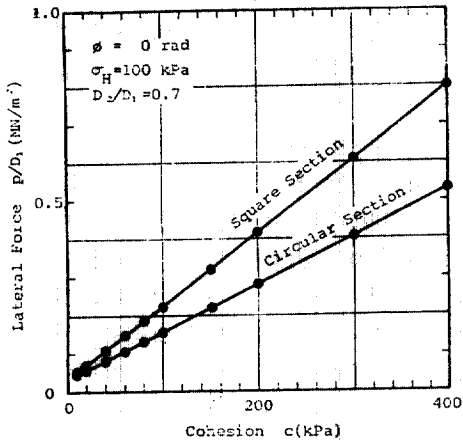


그림 10. 粘着力의 影響

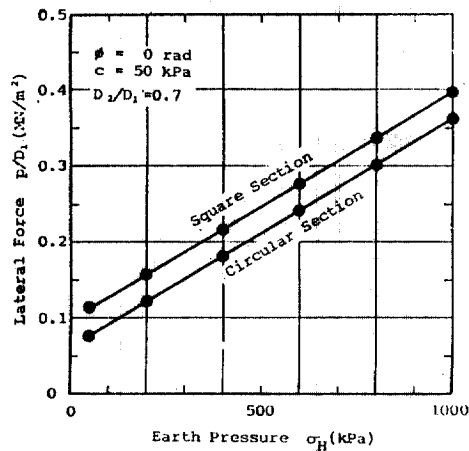


그림 11. σ_H 의 影響

우는 粘着力의 增大에 線形的으로 增大한다. 이들 傾向은 地盤強度가 크면 클수록 말뚝周邊地盤이 말뚝사이로 빠져 나가기 위하여는 점점 더 큰 側方土壓이 말뚝에 作用하게 됨을 의미한다.

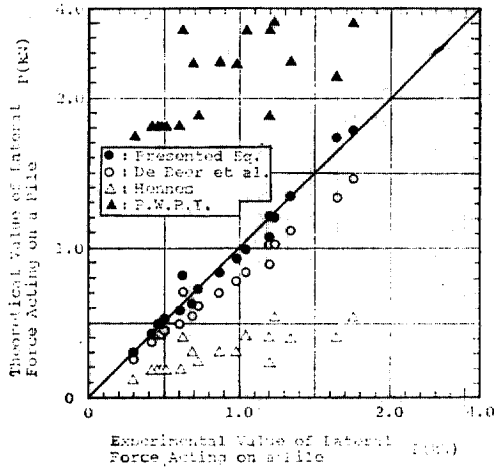
그림 11은 그림 2의 AA' 面に 作用하는 水平土壓 즉 地盤變形에 抵抗하는 水平土壓 σ_H 의 影響을 調査하여 본 그림이다. 이 그림으로부터 側方土壓 P/D_1 은 水平土壓 σ_H 의 增大와 함께 線形的으로 增大함을 볼 수 있다. 이는 그림 2의 AA' 面に 作用하는 水平土壓이 크면 클수록 말뚝周邊地盤이 말뚝사이로 빠져 나가기 위하여는 점점 더 큰 側方土壓이 말뚝에 作用하게 됨을 의미한다.

結局 地盤強度와 水平土壓 σ_H 가 큰 地盤의 경우에는 말뚝周邊地盤에 Mohr-Columb의 降伏條件을 만족시키는 塑性狀態가 發生하기 위하여는 土壓이 점점 增大되어야만 함을 考慮하면 그림 9에서 그림 11까지 結果의 傾向은 合理的이라고 생각할 수 있을 것이다.

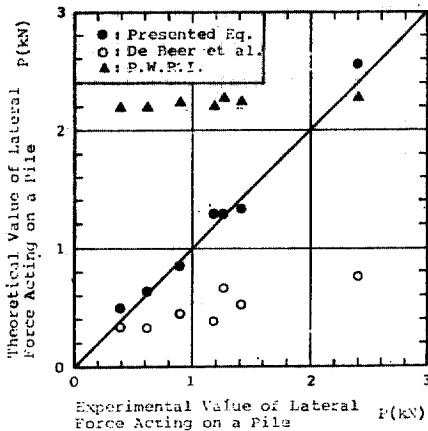
以上과 같은 檢討結果 말뚝에 作用하는 側方土壓의 發生機構는 말뚝과 地盤에 관한 여러 가지 要素에 의하여 복잡하게 影響을 받고 있음을 究明할 수 있으며, 이 結果는 實驗的으로 이미 一部 究明된 바^(3,4)와도 一致한다. 따라서, 本理論式은 上記의 여러 要素를 合理的으로 考慮할 수 있다고 思慮되며, 特히, 종래의 側方土壓算定式에서 다룰 수 없었던 말뚝設置間隔, 말뚝斷面形狀 및 말뚝周邊地盤의 塑性狀態를 合理的으로 考慮할 수 있게 되었다.

4. 他理論과의 比較

그림 12는 本理論式의 信賴性을 檢討하기 위하여 實驗値를 各種 理論式에 의한 算定値와 比較한 結果이다. 實驗値로는 粘土試料과 모래試料에 대하여 이미 實施發表한 模型實驗의 結果^(3,4)를 利用하고, 算定式으로는 本理論式 以外에 Hennes式⁽⁶⁾, 日本土木研究所(P.W.R.I.)式⁽⁹⁾ 및 De Beer et al.式⁽¹⁰⁾을 利用한다. 이들 算定式에 대하여는 이미 整理한 바 있다⁽⁶⁾. 그림중 검은 원으로 表示한 것은 實驗値와 本理論式에 의한



(a) 粘土地盤



(b) 모래地盤

그림 12. 理論値와 實驗値의 比較圖

算定値와의 관계를, 흰 원은 De Beer et al. 식의 算定値와의 관계를, 흰 삼각형은 Hennes 식의 算定値와의 관계를, 검은 삼각형은 日本土木研究所식에 의한 算定値와의 관계를 나타내고 있다.

우선, 粘土地盤속의 말뚝에 작용하는 側方土壓의 發生機構를 究明하기 위하여 Crown clay 를 使用하여 實施한 模型實驗結果⁽³⁾를 理論値와 比較檢討한 그림 12(a)로부터 각종 算定式에

의한 理論値의 特性을 全體的으로 볼 수가 있다. 즉, 식(21)에 의한 理論値는 實驗値와 극히 良好한 一致의 關係를 보이는 반면 De Beer et al. 식의 理論値는 實驗値에 비하여 다소 적게 算定하고 있으며, Hennes의 理論式은 側方土壓을 크게 過小算定하고 있다. 그러나, 日本土木研究所式은 側方土壓을 크게 過大算定하고 있음을 알 수 있다.

한편, 그림 12(b)는 모래試料에 대하여 實施한 模型實驗結果⁽⁴⁾를 理論値와 比較한 그림이다. 여기에서 Hennes 식은 粘土地盤에만 적용 가능하므로 除外시켰다. 이 그림으로부터는 식(20)은 側方土壓을 精確하게 算定하고 있고 日本土木研究所式은 역시 크게 過大算定하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 De Beer et al. 식의 理論値는 粘土地盤의 경우와는 달리 實驗値와 상당한 차이를 보여 주고 있다. 즉, 모래地盤의 경우 De Beer et al. 理論은 側方土壓을 크게 過小算定하고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 他理論値가 實驗値와 많은 차이를 보이는 점을 考察하여 보면 다음과 같다. Hennes 식에는 말뚝사이의 흙의 壓縮 및 剪斷變形이 考慮되어 있지 않음에 기인한 것이며, 日本土木研究所式은 地盤의 極限狀態에 있어서의 理論値를 提示하고 있음에 기인할 것이다. 또한 이들 식에는 말뚝設置間隔이 考慮되지 않은 점도 看過하여서는 안될 것이다. 한편, De Beer et al. 理論은 그림 2의 EB面 혹은 E'B'面에 작용하는 수직응력 σ_v 의 過小算定에 의한 것이며 이는 이미 理論적으로 예측한 바⁽¹¹⁾와도 一致하는 結果이다.

5. 結 論

側方變形地盤속에 一定한 間隔을 두고 一列로 設置된 柱말뚝중 두개의 말뚝中心間에 있는 地盤이 Mohr-Coulomb의 降伏條件을 滿足시키는 塑性狀態에 도달하려 할 때의 말뚝列 前後面에 작용하는 土壓의 差를 算出함에 의하여 말뚝에 작용하는 側方土壓算定理論式을 誘導할 수 있다. 本理論解析을 통하여 圓形말뚝에 대하여 얻은 結果를 各種斷面의 말뚝에 擴張시키므로서

말뚝設置間隔, 말뚝斷面形狀 및 말뚝周邊地盤의 變性狀態를 無理없이 考慮한 側方土壓算定理論式을 確立提案할 수 있다.

本理論式의 特性을 檢討한 結果에 의하면, 側方土壓은 말뚝設置間隔, 말뚝直徑(혹은 幅), 말뚝形狀係數, 地盤의 内部摩擦角과 粘着力 및 水平土壓 σ_H 에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

끝으로, 本理論에 의한 側方土壓의 理論値는 實驗値와 良好한 一致를 보이고 있으나, Hennes 式과 De Beer et al. 式은 側方土壓을 過小算定하며 日本土木研究所式은 過大算定을 하고 있다.

〈感謝의 말〉

本研究는 文教部의 1983年度 學術研究助成費支援에 의한 結果의 一部임을 밝히며 謝意를 表하는 바이다.

參 考 文 獻

1. ISSMFE: Lateral pressure of clayey soils on structures, *Proc. 8th ICSMFE, Specialty Session 5, Vol. 4, 3*, Moscow, 1973, pp. 227~280.
2. ISSMFE: The effect of horizontal loads on piles, due to surcharge or seismic effect, *Proc. 9th ICSMFE, Specialty Session 10*, Tokyo, 1977.
3. 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.
4. 洪 元杓: "모래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.
5. 洪 元杓: "側方變形地盤속의 圓形말뚝에 作用하는 土壓의 算定", 中央大學校論文集, 自然科學編, 1983, pp. 319~328.
6. 山田剛二·渡正亮·小橋澄治: 地すべり斜面崩壊の 實態と對策, 山海堂, 東京, 1971, pp. 67~183.
7. 新潟縣農林部治山課: 地すべり調査報告書—地すべり工法(杭打)調査—, 1977.
8. Thomsen, E.G., Yang, C.T. and Kobayashi, S.: *Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing*, Macmillan, New York, 1965.
9. 渡正亮·中村浩之: "地すべり抑止工法の設計につて", 地すべり, Vol. 5, No. 1, 1968, pp. 25~31.
10. De Beer, E.E. and Carpentier, R.: Discussion, *Soils and Foundations, Vol. 17, No. 1*, 1977, pp. 68~82.
11. Hong, W.P.: Stability Analysis of Slope Containing Piles in a Row and Its Design Method, *Thesis, Eng. Dr., Osaka University*, 1980, pp. 47~52.
12. 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.

(接受: 1984. 1. 9)