

# 受動말뚝에 作用하는 側方土壓

## Lateral Earth Pressures Acting on Passive Piles

洪 元 杓\*  
Hong, Won Pyo

### Abstract

By investigating the characteristics of various factors about soil and pile containing in the theoretical equations of lateral earth pressures acting on a row of passive piles which have been already presented in the previous papers, the equations are arranged as a simple form which is convenient to use. The simplified equation is examined so as to be also utilized to single passive pile. And a discussion is carried out on the method how to apply the equations to field.

As the result of this study, the equations can be arranged as a simple linear equation with the coefficients of lateral force  $K_{p1}$  and  $K_{p2}$ . And the simple linear equation is composed of cohesion  $c$  and earth pressures  $\sigma_H$  acting on backside of pile's row against the direction of soil deformation.

In order to apply this equation to field, the active earth pressure can be considered as the earth pressure  $\sigma_H$ . The validity of this consideration is justified by comparing the theoretical values of lateral earth pressures acting on piles with the values observed in field.

### 要 旨

이미 誘導提案된 受動말뚝에 作用하는 側方土壓의 算定理論式을 單一말뚝에까지 發展시킴과 同時에 本算定理論式에 포함되어 있는 地盤과 말뚝에 관한 要素들을 調査하여 使用하기 간편한 形態의 式으로 整理하고자 한다. 즉, 本研究를 통하여 受動말뚝의 側方土壓算定理論式은 側方土壓係數  $K_{p1}$  및  $K_{p2}$ 를 導入함에 의하여 粘着力  $c$ 와 地盤變形方向에 對하여 말뚝列 後面에 作用하는 水平土壓  $\sigma_H$ 의 項으로 構成된 簡單한 線形式으로 整理提案된다.

그 밖에도 本理論式을 現場에 適用할 경우 水平土壓  $\sigma_H$ 로는 主動土壓을 採用함이 合理的이라는 점에 對한 妥當성이 理論値와 實測値의 比較檢討를 통하여 立證되어 진다.

### 1. 序 論

側方變形地盤속의 構造物基礎말뚝,<sup>(1-3)</sup> 橋臺基礎말뚝,<sup>(4)</sup> 橫棧橋基礎말뚝,<sup>(5)</sup> 斜面安定用말

뚝<sup>(6)</sup> 등과 같은 受動말뚝(Passive pile)은 말뚝머리에 水平荷重을 받는 主動말뚝(Active pile)과 구별하여 다루고 있다.<sup>(12)</sup> 主動말뚝의 경우는 말뚝머리에 作用한 水平荷重이 말뚝周邊地盤을 變形시키면서 地盤에 전달되는데 비하여 受動말

\*正會員·中央大學校 工科學部 助教授 土木工學科

뚝의 경우는 어떤 原因에 의하여 우선 말뚝周邊地盤이 變形한 結果 2次的으로 側方土壓이 發生하여 말뚝에 作用하게 된다. 즉 受動말뚝의 경우는 水平荷重이 地盤과 말뚝의 相互作用에 의한 結果로서 決定되기 때문에 地盤과 말뚝에 관한 여러 가지 要素에 의하여 영향을 받게 됨은 물론이고 正確하게 算定하기도 容易하지 못하였다.

筆者는 이미 受動말뚝에 作用하는 側方土壓의 發生機構를 究明하고 側方土壓算定理論式을 確立시키기 위하여 理論解析 및 模型實驗을 實施發表하여 오고 있다.<sup>(7~11)</sup> 즉, 粘土와 모래地盤에 대한 模型實驗結果 側方土壓의 發生機構가 究明될 수 있었으며,<sup>(7~9)</sup> 地盤과 말뚝에 관한 몇몇 要素의 영향을 無理없이 考慮할 수 있는 側方土壓算定理論式도 誘導確立시킬 수 있었다.<sup>(11)</sup> 특히, 本理論에서는 他算定式에서 볼 수 없는 말뚝斷面形狀, 말뚝設置間隔 및 말뚝周邊地盤의 塑性狀態가 보다 現實에 近似하게 考慮되어 있음을 注目할 수 있다. 더우기 實驗值 및 他理論值와의 比較檢討에 의하여 本理論式의 信賴度가 대단히 높은 것이 立證된 바도 있다.<sup>(7~9, 11)</sup>

本論文에서는 이미 誘導提案된 側方土壓算定理論式<sup>(11)</sup>으로 算定하기 곤란한 單一말뚝에 作用하는 側方土壓을 算定할 수 있는 理論式도 別途의 方法으로 誘導確立하여 算定理論式을 單一말뚝에까지 發展시키고 同時에 이들 側方土壓算定理論式의 特性을 더욱 調査하여 使用하기에 보다 簡便한 形態의 식으로 整理하므로써 一見 복잡한 듯한 인상을 除去시키고 使用上의 便利를 도모하고자 한다.

또한 本理論式을 現場에 適用시키는 경우에 留意하여야 할 事項에 대하여 考察하여 보고 山沙汰가 發生되는 斜面에 設置된 말뚝에 作用하는 側方土壓의 實測值과 比較하여 그 妥當性에 대하여서도 檢討하고자 한다.

## 2. 算定理論式

### 2.1. 말뚝의 側方土壓

말뚝이 塑性變形特性地盤속에 一列로 設置되어 있는 경우, 그 地盤이 부근의 上載荷重 등으로 인하여 말뚝列과 直角方向으로 側方變形을

하게 되면 말뚝周邊地盤에는 塑性域이 發生되며 말뚝은 側方土壓을 받게 될 것이다. 원래 이 줄 말뚝의 前面(地盤變形을 받는 面)과 後面에는 서로 平衡을 이룰 수 있는 土壓이 作用하고 있었으나 地盤이 移動하게 되어 土壓의 平衡狀態는 무너지게 되고 말뚝은 偏土壓을 받게 된다. 本研究에서 다루는 側方土壓이라 함은 이러한 土壓의 不均衡狀態下에서 말뚝의 前面과 後面에 각각 作用하는 土壓의 差에 상당하는 것이다.

筆者는 이미 말뚝間隔과 말뚝周邊地盤의 塑性狀態를 보다 現實에 맞게 考慮하는 것에 重點을 두고 理論式을 誘導한 바 있으며,<sup>(7, 11)</sup> 內容을 요약하면 다음과 같다.

우선, 말뚝間隔에 관하여서는 矩形말뚝에 대하여 말뚝사이를 擴大圖示한 그림 1에서와 같이 줄말뚝중 두개의 말뚝사이에 있는 地盤의 움직임을 取扱하는 것에 의하여 말뚝間隔을 처음부터 考慮할 수 있게 된다.

한편, 말뚝周邊地盤의 塑性狀態에 관하여서는 그림 1에 斜線으로 表示한 部分만이 Mohr-Coulomb의 降伏條件을 滿足하는 塑性狀態에 있다고 假定하여 考慮할 수 있다.

이와 같은 理論解析結果 單位깊이당 한개의 말뚝에 作用하는 側方土壓의 算定式은 다음과 같이 誘導된다.<sup>(11)</sup>

$$p = c \left[ D_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{\xi_1(\phi)} \left\{ \frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)} \left( \exp \left( 2\xi \frac{D_1 - D_2}{D_2} G_3(\phi) - 1 \right) + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right) - D_1 \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right\} + \sigma_H \left[ D_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{\xi_1(\phi)} \exp \left( 2\xi \frac{D_1 - D_2}{D_2} G_3(\phi) \right) - D_2 \right] \right] \quad (1)$$

여기서,  $G_1(\phi) = N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1$ ,  $G_2(\phi) = 2 \tan \phi + 2 N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}$ ,  $G_3(\phi) = N_\phi \tan \phi_0$ ,  $G_4(\phi) = 2 N_\phi^{1/2} \tan \phi_0 + c_0/c$ ,  $N_\phi = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$ ,

$D_1$ : 말뚝中心間隔

$D_2$ : 말뚝純間隔

$c, \phi$ : 地盤의 粘着力과 內部摩擦角

$c_0, \phi_0$ : 말뚝과 地盤사이의 附着力과 摩擦角

$\xi$ : 말뚝形狀係數

$\sigma_H$ : 그림 1의 AA' 面に 地盤變形에 대하여 作用하는 水平土壓

식 (1)을  $B_0$ (여기서  $B_0$ 은 矩形말뚝의 경우는 말뚝幅  $B_1$ 을 사용하고 圓形말뚝의 경우는 말뚝直徑  $d$ 를 사용한다.)으로 나누고 粘着力  $c$ 와 水 平土壓  $\sigma_H$ 의 項을 가지는 식으로 整理하면 식 (2)와 같이 表示될 수 있다.

$$\frac{p}{B_0} = K_{p1}c + K_{p2}\sigma_H \quad (2)$$

여기서,  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 는 側方土壓係數이며 다음과 같이 表示된다.

$$K_{p1} = \frac{1}{1-D_2/D_1} \left[ \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{\alpha_1(\phi)} \left\{ \frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)} \right. \right. \\ \left. \left. \left( \exp \left( 2\xi \frac{D_1-D_2}{D_2} G_3(\phi) \right) - 1 \right) + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right\} - \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right] \quad (3)$$

$$K_{p2} = \frac{1}{1-D_2/D_1} \left[ \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{\alpha_1(\phi)} \exp \left( 2\xi \frac{D_1-D_2}{D_2} G_3(\phi) \right) - \frac{D_2}{D_1} \right]$$

粘着力이 0인 砂質土의 경우는 식 (2)에  $c=0$ 을 代入하면 側方土壓  $p/B_0$ 는  $\sigma_H$ 만의 項으로 表示된다.

한편, 内部摩擦角이 0인 粘性土의 경우는 별도의 유도과정으로 다음 식이 구하여 진다. (11)

$$p = cD_1 \left( 3 \ln \frac{D_1}{D_2} + 2\xi \frac{D_1-D_2}{D_2} \frac{c_0}{c} \right) + \sigma_H(D_1-D_2) \quad (4)$$

식 (4)를 역시  $B_0$ 으로 나누어 整理하면 식 (2)와 같은 形態로 表示할 수 있을 것이다. 단, 이 경우의 側方土壓係數  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 는 다음과 같이 별도의 式으로 表示되어야 할 것이다.

$$K_{p1} = \frac{1}{1-D_2/D_1} \left[ 3 \ln \frac{D_1}{D_2} + 2\xi \frac{c_0}{c} \right] \quad (5)$$

$$K_{p2} = 1$$

여기서, 식 (5)중의  $K_{p2}$ 는 식 (3)에  $\phi=0$ 을 代入한 結果와도 一致한다. 따라서 側方土壓係數  $K_{p1}$ 은 식 (3)으로 구하되  $\phi=0$ 인 粘性土의 경우는 식 (5)로부터 구하며, 側方土壓係數  $K_{p2}$ 는 식 (3)만으로 구할 수 있다.

## 2.2. 單一말뚝의 側方土壓

식 (1) 및 식 (4)는 總말뚝을 대상으로 하여 誘導된 식이므로 單一말뚝의 側方土壓을 算定하기에는 使用될 수 없다. 왜냐 하면, 말뚝間隔을

나타내는 變數  $D_1$ 과  $D_2$ 가 單一말뚝의 경우는  $D_1=D_2$ 로 생각될 수 있으나 이것을 식 (1) 및 식 (4)에 代入하면 不定이 되기 때문이다. 따라서, 單一말뚝의 側方土壓算定式은 別途의 方法으로 誘導될 必要가 있다.

그림 1의 矩形말뚝중 한개만의 말뚝 AEGH가 設置되어 있는 경우, 地盤의 側方移動에 의한 土壓을 算定할 수 있는 理論式은 다음과 같이 誘導될 수 있다.

우선 破壞面 AE 및 HG에 作用하는 垂直應力을  $\sigma_\alpha$ 라 하면, 이 部分에 作用하는  $x$ 軸方向 힘  $p_1$ 은 식 (6)과 같다.

$$p_1 = 2\xi B_1(\sigma_\alpha \tan \phi + c) \quad (6)$$

한편, 三角形 破기部 EBG의 破壞面 BE 및 BG에 作用하는  $x$ 軸方向 힘  $p_2$ 는 다음과 같이 表示된다.

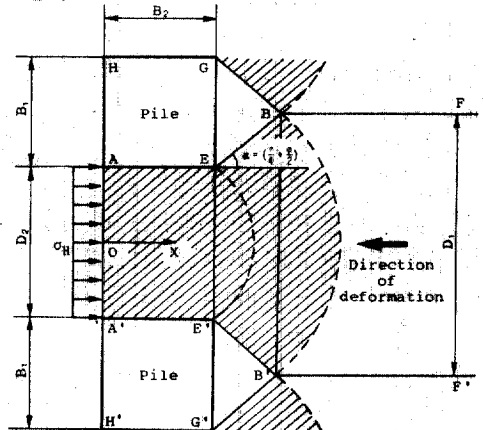


그림 1. 受動말뚝 周邊地盤의 塑性狀態

$$p_2 = \sigma_\alpha B_1 + \frac{B_1}{\tan \alpha} (\sigma_\alpha \tan \phi + c) \quad (7)$$

따라서, 말뚝에 作用하는 側方土壓  $p$ 는 다음과 같다.

$$p = p_1 + p_2 = \left( \frac{1}{\tan \alpha} + 2\xi \frac{c_0}{c} \right) B_1 c + \left( 1 + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + 2\xi \tan \phi \right) B_1 \sigma_\alpha \quad (8)$$

여기서, 地盤變形方向의 主應力  $\sigma_H$ 에 對應하는 主應力을  $\sigma_\alpha$ 로 近似시키면 地盤降伏條件으로부터 다음과 같은 關係가 成立할 수 있다.

$$\sigma_\alpha = \sigma_H N_\phi + 2c N_\phi^{1/2} \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 代入하면,

$$p = (G_2(\phi) + 2\xi G_4(\phi)) B_1 c + (G_1(\phi))$$

표 1. 側方土壓係數  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$

	$K_{p1}$		$K_{p2}$
	$\phi \neq 0$	$\phi = 0$	
줄말뚝	$\frac{1}{1-D_2/D_1} \left[ \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{\alpha_1(\phi)} \left( \frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)} \left( \exp \left( 2\xi \frac{D_1-D_2}{D_2} \times G_3(\phi) \right) - 1 \right) + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right) + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right]$	$\frac{1}{1-D_2/D_1} \left[ 3 \ln \frac{D_1}{D_2} + 2\xi \frac{D_1-D_2}{D_2} \frac{c_0}{c} \right]$	$\frac{1}{1-D_2/D_1} \left[ \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{\alpha_1(\phi)} \exp \left( 2\xi \frac{D_1-D_2}{D_2} G_3(\phi) \right) - \frac{D_2}{D_1} \right]$
단일말뚝	$G_2(\phi) + 2\xi G_4(\phi)$		$G_1(\phi) + 2\xi G_3(\phi) + 1$
비고	$G_1(\phi) = N_f^{1/2} \tan \phi + N_f - 1$ , $G_2(\phi) = 2 \tan \phi + 2 N_f^{1/2} + N_f^{-1/2}$ , $G_3(\phi) = N_f \tan \phi$ , $G_4(\phi) = 2 N_f^{1/2} \tan \phi + c_0/c$ $N_f = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$ , H形말뚝과 圓形말뚝의 경우 $\phi_0 = \phi$ , $c_0 = c$		

$$+ 2\xi G_3(\phi) + 1) B_1 \sigma_H \quad (10)$$

식 (10)을 말뚝幅  $B_1$ 으로 나누어 整理하면 줄말뚝의 側方土壓算定式 (2)와 同一한 形態로 될 수 있다.

단, 單一말뚝의 경우의 側方土壓係數  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 는 다음 식으로 算出되어야 한다.

$$\left. \begin{aligned} K_{p1} &= G_2(\phi) + 2\xi G_4(\phi) \\ K_{p2} &= G_1(\phi) + 2\xi G_3(\phi) + 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

粘着力이 0인 砂質土의 경우는 식 (2)에  $c=0$ 을 代入하면  $p/B_0$ 은  $\sigma_H$ 만의 項으로 表示되며 内部摩擦角이 0인 粘性土의 경우는  $\phi_0 = \phi = 0$ 을 식 (11)에 代入하면 된다.

以上과 같이 하여 求하여진 側方土壓係數  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 의 식을 整理하면 표 1과 같다.

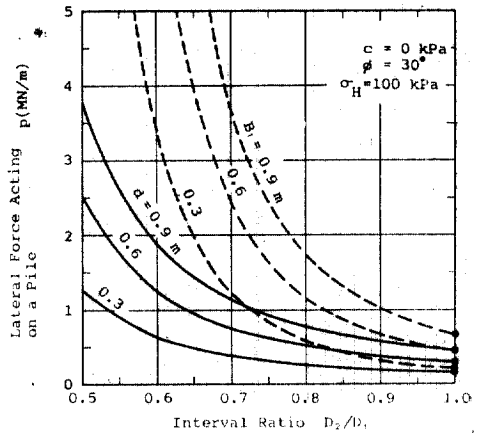
### 3. 理論式的 考察

#### 3.1. 말뚝間隔

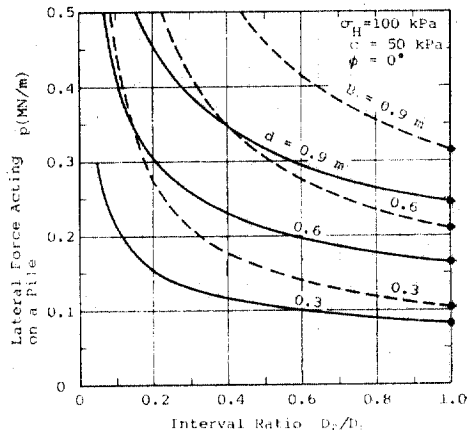
側方變形地盤속에 設置된 受動말뚝에 作用하는 側方土壓은 식 (2)로 算定될 수 있도록 앞章에서 提案되었다. 이 식은 地盤條件 및 줄말뚝의 여부에 따라 側方土壓係數단을 잘 선택하면 單一말뚝에서부터 줄말뚝에 이르기까지 널리 使用될 수 있을 것이다.

그러나, 이들 식을 함께 使用함에는 먼저 單一말뚝의 算定式과 줄말뚝의 算定式 사이의 連續性이 檢討되어야만 할 것이다.

그림 2는 砂質土地盤과 粘性土地盤을 대상으로 圓形말뚝과 正方形 H말뚝의 側方土壓  $p$ (kN



(a) 砂質土地盤



(b) 粘性土地盤

그림 2. 側方土壓과 間隔比의 關係

/m)를 말뚝間隔比  $D_2/D_1$ 의 變化에 따라 圖示한 것이다.  $D_2/D_1$ 이 1인 경우를 除外하고 砂質土地盤의 경우는 식 (1)에 의하여 側方土壓을 算

定하였으며 粘性土地盤의 경우는 식 (4)에 의하여 算定하였다. 한편, 그림중  $D_2/D_1$ 이 1인 경우의 側方土壓(·表示한 값)은 식 (10)에 의하여 算定한 값이다. 즉, 單一말뚝은 말뚝사이의 間隔  $D_1$ 과  $D_2$ 가 거의 같은 경우이므로  $D_2/D_1$ 이 1인 경우로 간주하여 單一말뚝의 側方土壓值를 圖上에 表示한 것이다.

이들 結果는 말뚝사이의 間隔이 넓어짐에 따라 즉 間隔比  $D_2/D_1$ 이 0에서 1로 커짐에 따라 側方土壓의 값이 減少되고 있음을 잘 나타내고 있다.

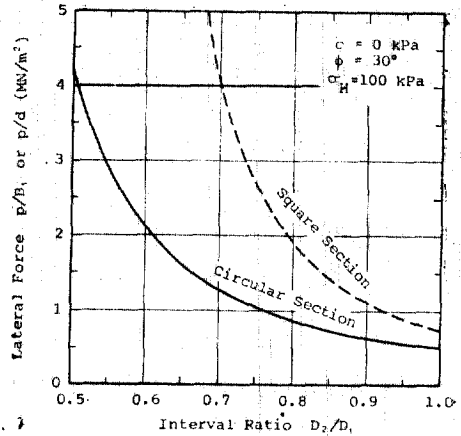
그리고 總말뚝의 側方土壓算定式(1) 혹은 (4)를 使用하여 구한 算定值는  $D_2/D_1$ 이 1에 가까워짐에 따라 감소하면서 單一말뚝의 算定式(10)에 의한 값에 수렴하여 가고 있음을 알 수 있다. 따라서, 식 (1) 혹은 식(4)는 식 (10)과 連續性 있게 使用될 수 있으리라 思慮된다.

한편, 그림 3은 側方土壓  $p$ 를 말뚝幅  $B_1$  혹은 말뚝直徑  $d$ 로 각각 나눈 값으로 縱軸을 잡고 그림 2의 結果를 再整理한 그림이다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 그림 2 속의 말뚝幅 및 말뚝直徑의 變化에 따른 여러개의 曲線은 그림 3의 關係圖에서는 각각 唯一한 曲線으로 表示되어진다. 이것은 相對的 말뚝間隔比  $D_2/D_1$ 이 一定하면 말뚝의 單位幅當 側方土壓  $p/B_0$ 은 말뚝幅 혹은 말뚝直徑에 關係없이 항상 一定함을 의미한다.

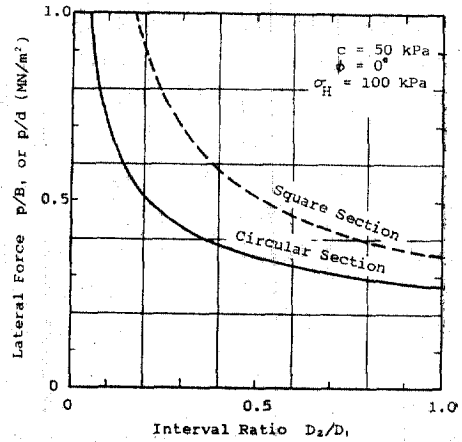
以上과 같은 檢討에 의거하여 側方土壓算定式 (1), (4) 및 (10)은 側方土壓係數만을 각각 식 (3), (5) 및 (11)로 하는 하나의 統一된 形態의 線形式(2)로 整理提案되어질 수 있을 것이다.

### 3.2. 側方土壓係數

말뚝에 作用하는 단위깊이당 側方土壓  $p$ (kN/m)를 말뚝幅  $B_0$ 로 나눈  $p/B_0$ 의 側方土壓은 말뚝에 作用하는 側方土壓을 말뚝의 單位幅當 側方土壓으로 換算시킨 값이다. 이 側方土壓  $p/B_0$ 은 식 (2)와 같이  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 의 두개의 側方土壓係數를 導入하여 粘着力  $c$ 와 水平土壓  $\sigma_H$ 의 項으로 整理된 簡單한 線形式으로 算定할 수 있다. 앞 節에서의 檢討를 통하여 이 側方土壓  $p/B_0$ 는 말뚝直徑  $d$  혹은 말뚝幅  $B_1$ 에 關係없이



(a) 砂質土地盤



(b) 粘性土地盤

그림 3. 말뚝 單位幅當 側方土壓

말뚝間隔比  $D_2/D_1$ 이 一定하면 항상 一定함이 밝혀진 바 있다.

側方土壓係數  $K_{p1}$  및  $K_{p2}$ 는 식 (3), (5), 혹은 (11)로 구할 수 있다. 이들 식으로부터 側方土壓係數는 여러가지 要素에 의하여 決定됨을 알 수 있다. 즉  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 는 말뚝形狀係數  $\xi$ , 말뚝間隔比  $D_2/D_1$ (單一말뚝의 경우 除外), 地盤의 內部摩擦角  $\phi$ , 말뚝과 地盤사이의 附着力과 摩擦角  $c_0$ 와  $\phi_0$ 의 函數로 되어 있다. 여기서 말뚝과 地盤사이의 附着力과 摩擦角을 地盤의 粘着力 및 內部摩擦角과의 關係로 表示할 수 있다면, (13,14) 側方土壓係數는  $\xi$ ,  $D_2/D_1$  및  $\phi$ 만으로 決定될 수 있다.

우선, 말뚝形狀係數  $\xi$ 에 대하여는 식 (3), (5) 및 식(11)에서 알 수 있는 바와 같이  $\xi$ 가 增大하

표 2. 말뚝形狀係數  $\xi$

말뚝斷面	薄板形	正方形	矩形 및 H形	圓形
形狀係數 $\xi$	0	1	$B_2/B_1$	$\frac{1}{2} \tan(\pi/8 + \phi/4)$

면  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 도 增大한다. 몇몇 대표적인 경우의 말뚝形狀係數에 관하여는 이미 文獻(11)에서 考察한 바 있으며 그 結果를 整理한 것이 표 2와 같다.

이와 같이 하여 말뚝形狀係數가 決定되면 側方土壓係數  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 는 말뚝間隔比  $D_2/D_1$ 과 內部摩擦角  $\phi$ 만의 函數로 된다.  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 는 표 1에 의거하여 直接 計算할 수 있으나,  $D_2/D_1$ 과  $\phi$ 를 變數로 하여  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 를 구할 수 있는 圖表를 作成하여 利用하면 便利할 것이다. 그림 4(a)는 圓形말뚝에 대한  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 의 값을 圖示하고 있으며, 그림 4(b)는 말뚝形狀係數가 0인 薄板形말뚝의 側方土壓係數를 나타내고 있다. 그림 4(c)~(f)는 말뚝形狀係數가 0.5에서 2.0까지의 H形말뚝의 側方土壓係數를 圖示하고 있다. 그림 4로부터 말뚝間隔比  $D_2/D_1$ 이 增大하면 側方土壓係數  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 는 減少하고 있음을 알 수 있다.  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 가 減少하면 식 (2)로부터 알 수 있는 바와 같이 側方土壓  $p/B_0$ 가 減少하게 된다. 이는 말뚝間隔比  $D_2/D_1$ 의 增加는 말뚝間隔의 增大를 의미하며 말뚝間隔이 넓어지면 말뚝에 作用하는 土壓이 減少하게 됨을 의미한다. 또한, 內部摩擦角  $\phi$ 가 增大하면  $K_{p1}$ 과  $K_{p2}$ 도 增大하게 되어 側方土壓도 增大하게 된다.

### 3.3. 水平土壓 $\sigma_H$

말뚝에 作用하는 側方土壓의 算定式(2)에는 地盤變形에 對항하여 그림 1의 AA'面に 圖示한 바와 같은 水平土壓  $\sigma_H$ 의 項이 포함되어 있으며 이 식은  $\sigma_H$ 의 線形式으로 構成되어 있다. 여기서 水平土壓  $\sigma_H$ 로는 主動土壓에서 受動土壓까지의 範圍를 考慮할 수 있을 것이다. 그림 5는 砂質土 및 粘性土地盤속의 圓形말뚝을 대상으로 水平土壓  $\sigma_H$ 를 主動土壓에서 受動土壓까지 變化시킴에 따른 말뚝의 側方土壓에 미치는 影響을 調査한 結果이다. 이 그림에 의하면 두 地盤 모두

가 同一한 傾向을 보이고 있다. 즉, 側方土壓은  $\sigma_H$ 를 主動土壓으로 한 경우가 가장 낮으며 靜止土壓, 受動土壓의 順으로 增大되고 있다. 主動土壓과 靜止土壓인 경우의 側方土壓은 그다지 큰 差異가 없으나, 受動土壓의 경우는 큰 差異가 보이고 있다. 特히, 砂質土地盤의 경우는 이러한 差異가 더욱 顕著하게 나타난다.

本理論을 利用하여 側方土壓을 算定하려면  $\sigma_H$ 를 現實에 맞게 正確하게 알아야 할 것이다. 원래 地盤속의 말뚝에는 靜止土壓이 作用하고 있으나 地盤의 側方變形으로 인하여 말뚝列 前後面に 土壓의 不平衡狀態가 發生하게 된다. 이때 말뚝列 後面地盤(그림 1의 AA'面 左側部)이 前面地盤의 變形方向과 同一方向으로 變形하게 되면 말뚝列 後面地盤은 靜止土壓狀態에서 主動土壓狀態로 變化된다고 생각할 수 있을 것이다. 한편, 말뚝列 後面地盤이 前面地盤의 變形方向과 同一方向으로 移動하지 않고 저항한다면 後面地盤은 靜止土壓狀態에서 受動土壓狀態에 接近한다고 생각할 수 있을 것이다. 그러나, 基礎工學上 問題가 되는 側方變形地盤속의 受動말뚝에 있어서는 地盤에 側方變形이 發生하게 되면 말뚝列 前後의 地盤은 서로 연결이 되어 있는 狀態에서 一體가 되어 同一方向으로 移動하게 될 것이다. 이 事實은 模型實驗에서도 觀測할 수 있었다.<sup>(7,8)</sup> 따라서, 側方變形地盤속의 受動말뚝의 경우는 主動土壓을  $\sigma_H$ 로 使用함이 타당할 것이다.

### 4. 實測值와의 比較

그림 6은 山沙汰(Landslide)를 防止하기 위하여 斜面에 設置한 말뚝에 作用하는 側方土壓의 實測值<sup>(15)</sup>를 식 (2)에 의거하여 구한 理論值과 比較하여 模型實驗에서 얻은 理論式의 信賴度를 再檢討한 結果이다.

實測值로는 日本新瀉縣東戶野의 한 典型的인

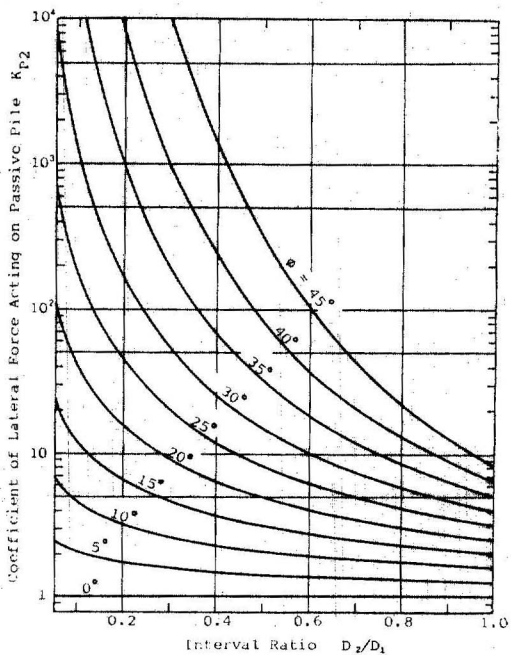
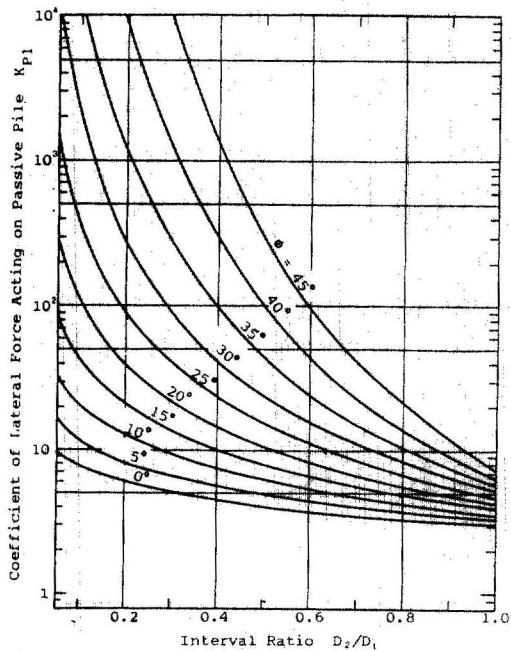
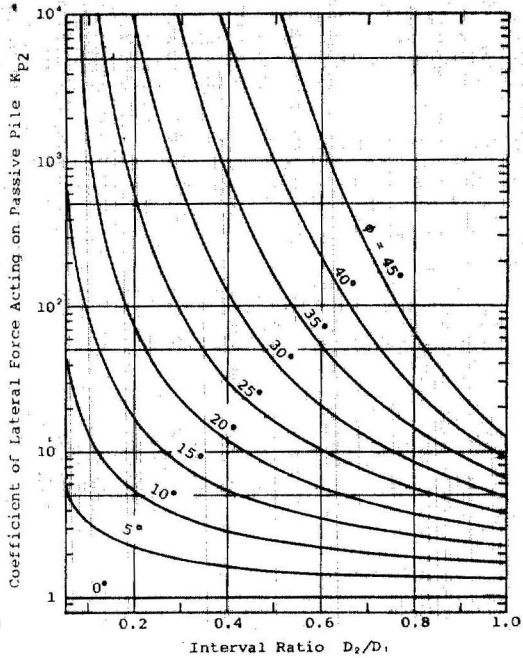
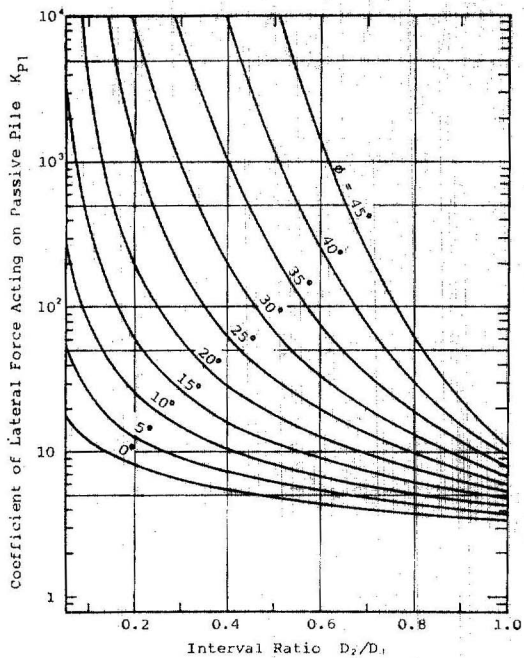


그림 4-1. 側方土壓 係數圖

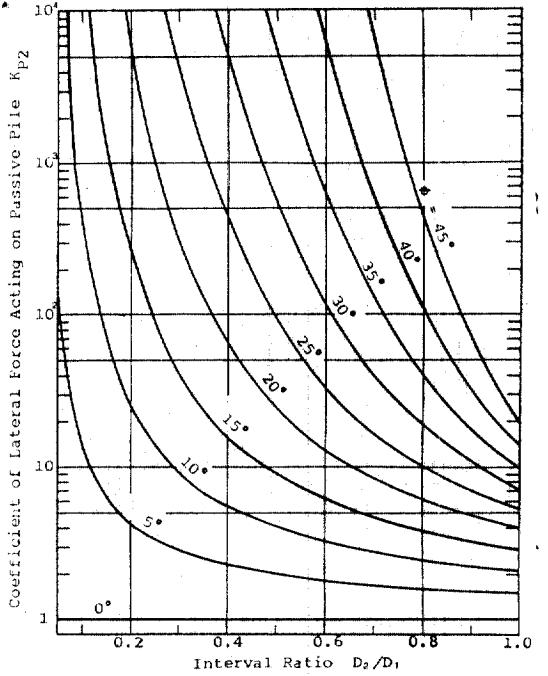
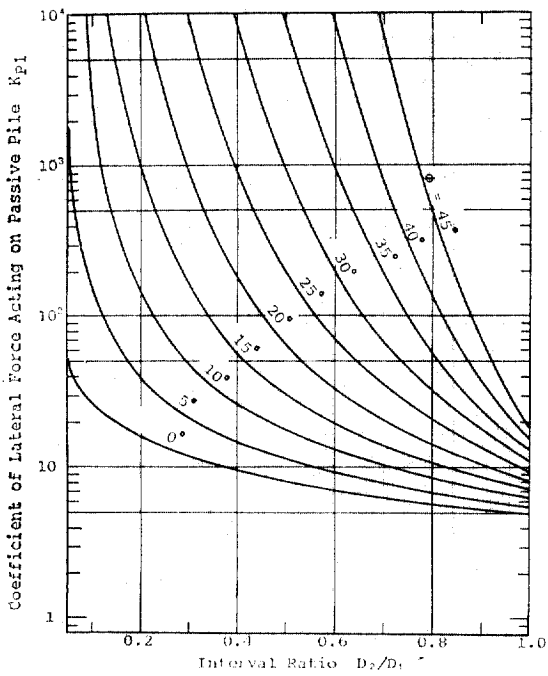
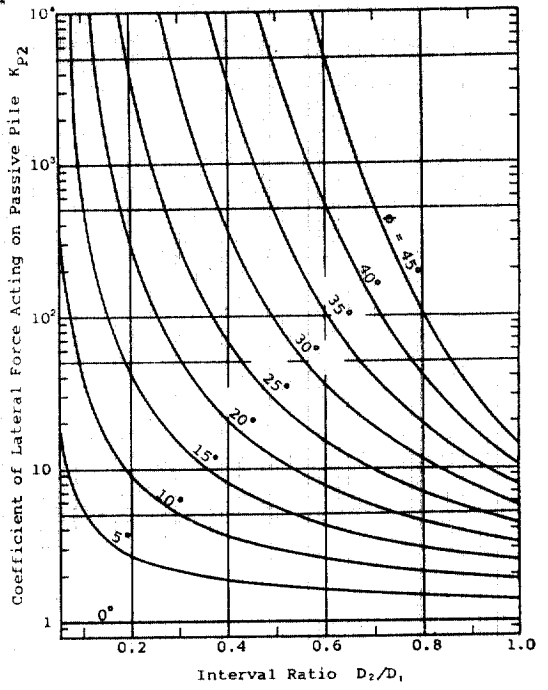
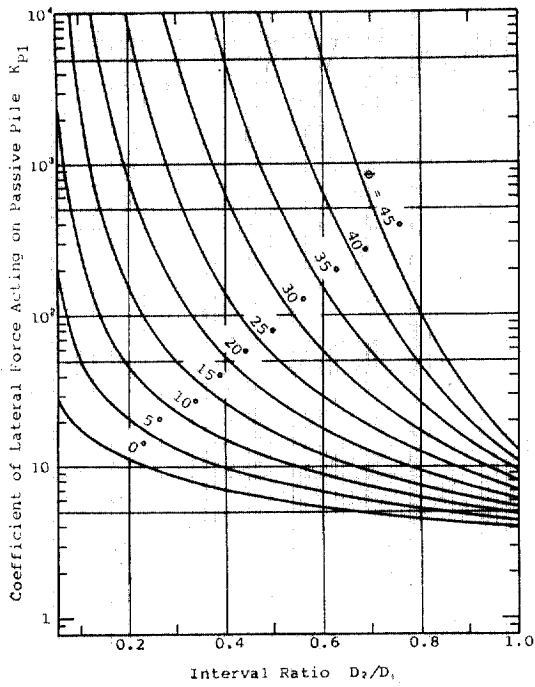


그림 4-2. 側方土壓係數圖



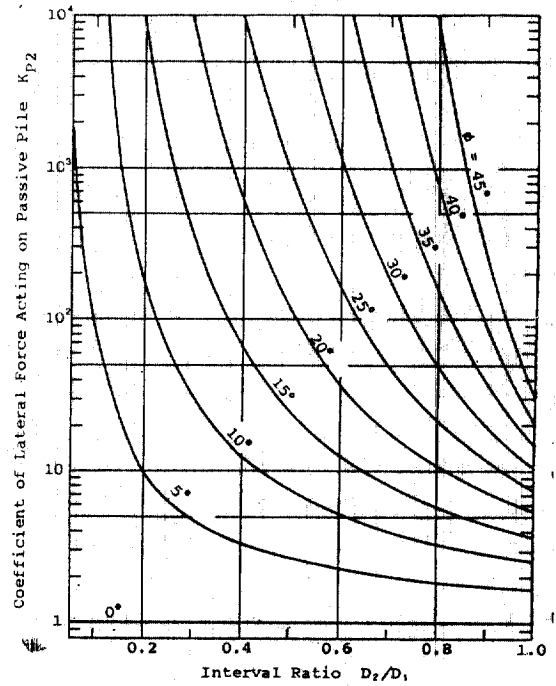
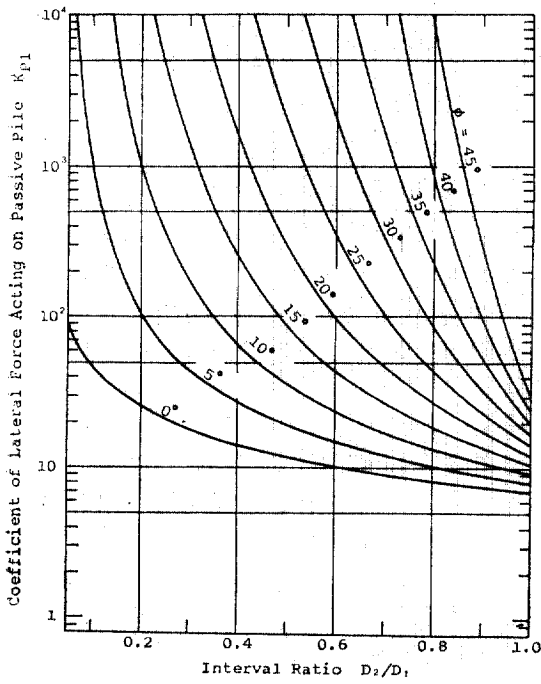
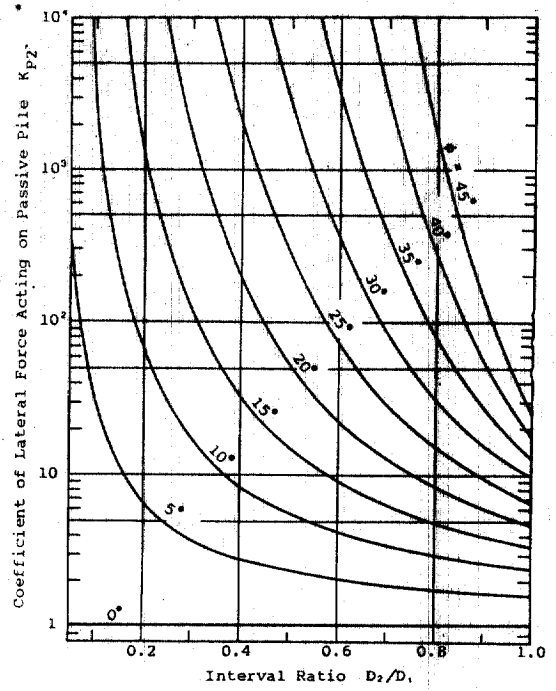
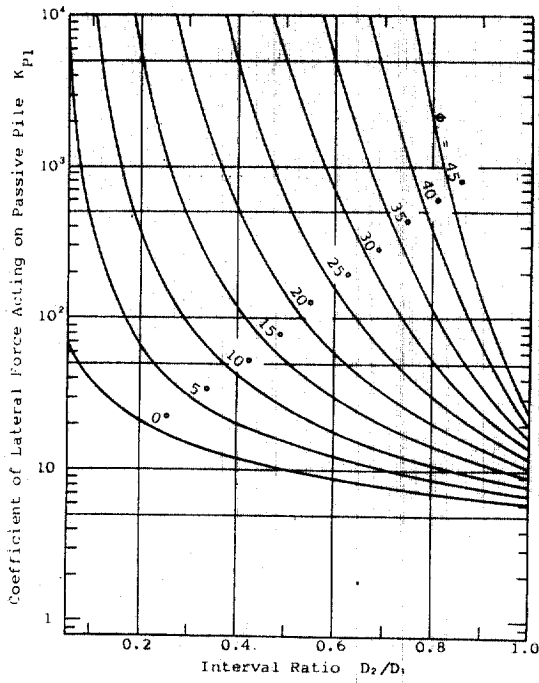
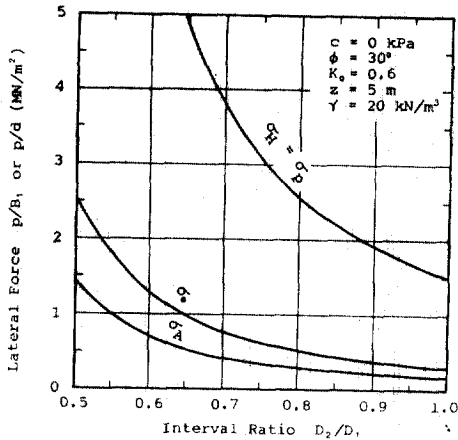
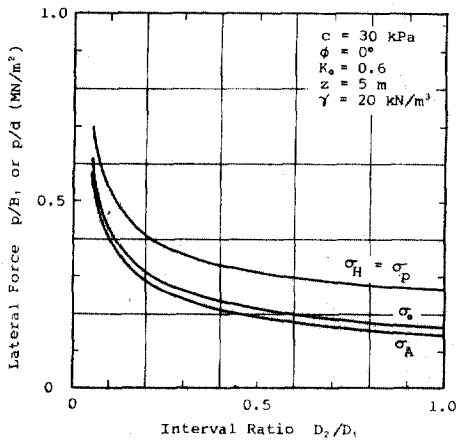


그림 4-3. 側方土壓 係數圖



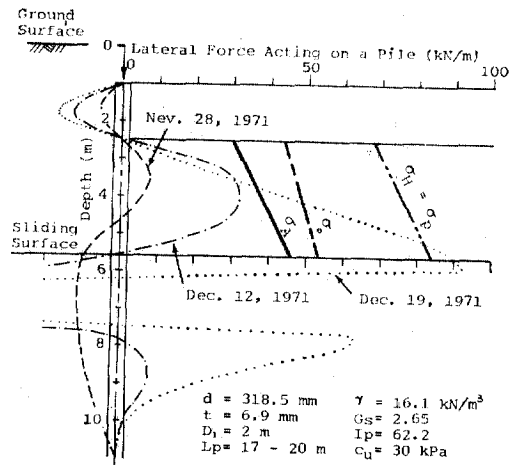
(a) 砂質土地盤



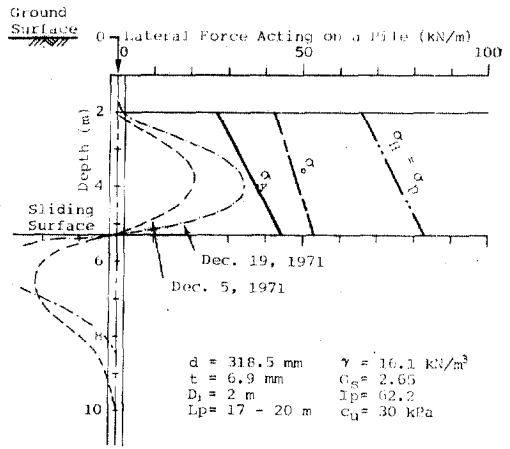
(b) 粘性土地盤

그림 4-4. 水平土壓  $\sigma_H$ 의 影響

第3紀層 斜面에 設置된 測定用말뚝에서 얻은 實測結果<sup>(15)</sup>를 利用한다. 이곳은 地表에서 數 m 깊이에 이르는 泥岩(Mudstone)片이 섞인 粘土層이 完만한 크리프성의 移動을 하는 斜面으로 옛부터 수차례 山沙汰가 發生하였다. 이에 대한 防止策으로 1971년에는 여름에서 가을 사이에 直徑 318.5 mm, 두께 6.9 mm, 길이 17~20 m의 鋼管말뚝을 2 m 間隔으로 35 개 設置하였다. 이들중 3개의 말뚝에 1 m 깊이의 間격으로 strain gage를 말뚝列 前後面方向에 附着시켜 말뚝에 發生하는 變形率을 測定하였다. 이 結果로부터 말뚝에 作用하는 側方土壓이 구하여졌다. 여기서 實測結果와 理論值를 比較檢討한 대상이 되는 말뚝은 上記 3개의 말뚝중 地盤의 土質實驗을 실시한 地域附近의 No.2 말뚝과 No.3 말뚝의



(a) No. 2 말뚝



(b) No. 3 말뚝

그림 4-5. 理論值와 實測值의 比較

두개의 말뚝이다. 이 地盤의 非排水剪斷強度와 單位體積重量의 平均値는 각각 30 kPa 과 16.1 kN/m<sup>3</sup>이며 거의 完全 飽和狀態에 있다. 그밖의 土質實驗結果는 그림중에 表示되어 있는 바와 같다. 實測된 側方土壓의 分布는 그림 6에 가는 曲線으로 圖示되어 있다. 한편, 理論值는 식(2)에 의거하여 算定하였으며 水平土壓  $\sigma_H$ 의 값으로 主動土壓, 靜止土壓 및 受動土壓을 使用한 結果가 모두 그림 6에 굵은 線으로 圖示되어 있다. 단, 靜止土壓係數  $K_0$ 는 Alpan<sup>(16)</sup>의 式을 利用하여 塑性指數  $I_p$ 로부터 算出하였다.

그림 6에 의하면 側方土壓의 實測值는 말뚝 設置후 크리프特性에 의하여 時間이 지남에 따라 점차 增加하여 깊이 方向으로 포물선 分포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 No.3 말뚝

의 경우는 最終測定時(1971년 12월 19일)의 側方土壓이 대단히 큰 값의 三角形分布를 하고 있다. 이 結果로부터 알 수 있는 바와 같이 側方土壓은 어느 限界까지는 포물선 분포로 增加하지만, 말뚝周邊地盤의 移動이 과잉으로 增大하게 되면 말뚝에는 地盤이 極限狀態에 도달하였을 때의 側方土壓이 作用하게 된다. 이 경우의 말뚝의 變位는 50 cm에까지 달하였다 한다. 그러나 말뚝을 使用하여 斜面을 安定시키려면 말뚝과 地盤 어느쪽에도 破壞가 發生하여서는 안 될 것이다. 따라서, 實際 設計에 使用되어야 할 側方土壓은 말뚝周邊地盤의 移動이 큰 極限狀態에 도달한 때의 最終值가 아닌 말뚝周邊地盤이 塑性狀態에 도달하려고 할 때의 側方土壓이어야 할 것이다. 따라서, 여기서는 포물선 분포를 보이는 曲線중 마지막 曲線을 實測值로 하여 理論值와 比較하고자 한다.

이들 그림에 의하면, 實測值는 포물선 분포를 보이고 있으나 理論值는 사다리꼴 분포를 하고 있다. 이는 理論式에서 말뚝이 完全한 剛體로 假定되어 있고 地盤의 移動도 깊이 方向으로 均一하게 假定되어 있기 때문이다. 그러나, 實際는 말뚝이 水平方向으로 약간 移動하게 되는 영향 및 斜面과괴면 부근과 拘束反力이 作用하는 말뚝머리 부근에서 地盤의 移動이 拘束당하게 되는 영향 등으로 인하여 地盤의 移動量은 깊이 方向으로 精確하게 均一한 상태를 유지할 수는 없다.

한편, 理論值는 水平土壓  $\sigma_H$ 를 主動土壓  $\sigma_A$ 로 使用한 경우가 實測值와 가장 良好한 一致를 보이고 있다. 이것은 이미 3.3절에서 說明한 事項이 타당함을 立證할 수 있을 것이다. 즉 移動性斜面과 같은 側方變形地盤속에 設置된 말뚝의 경우는 말뚝列 後面의 地盤도 前面地盤移動方向과 同一方向으로 移動하게 되므로 말뚝列 後面의 地盤은 主動狀態에 있게 된다.

## 5. 要約 및 結論

말뚝이 設置된 地盤에 側方變形이 發生하면 말뚝列 前後면의 土壓不均衡으로 인하여 말뚝은 地盤變形方向으로 側方土壓을 받게 된다. 이 側

方土壓을 精確하게 算定하기 위하여 말뚝과 地盤에 관한 몇몇 要素의 영향을 無理없이 考慮한 理論式이 確立되었다. 特히, 他算定式에서 볼 수 없는 말뚝斷面形狀, 말뚝設置間隔 및 말뚝周邊地盤의 塑性狀態를 보다 現實에 近似시켜 考慮함에 重點을 두고 誘導된 理論式에 側方土壓係數  $K_{p1}$  및  $K_{p2}$ 를 導入하여 整理하므로써 粘着力  $c$ 와 말뚝列 後面의 水平土壓  $\sigma_H$ 의 項으로 構成된 간단한 線形式으로 表現될 수 있었다. 이 簡單한 形態로 整理된 算定式은 單一말뚝의 경우에도 使用가능하도록 檢討提案되었다.

側方土壓係數는 말뚝形狀係數, 말뚝間隔比 및 地盤의 內部摩擦角의 函數이므로 말뚝의 斷面이 定하여지면 말뚝間隔比와 地盤의 內部摩擦角을 變數로 한 實用圖를 作成할 수 있다. 圓形말뚝과 H形말뚝에 대하여 作成提案된 實用圖는 側方土壓算定 및 受動말뚝設計에 매우 有益하게 利用될 수 있을 것이다.

한편, 側方變形地盤속에서 地盤變形에 저항하기 위하여 말뚝列 後面에 作用하는 水平土壓  $\sigma_H$ 를 主動土壓으로 하고 理論式에 의거하여 算定된 側方土壓은 實測值와 良好한 一致를 보이고 있다. 따라서 側方變形地盤속의 말뚝列 後面에 作用하는 水平土壓은 主動土壓으로 생각함이 타당하다.

## 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임을 밝히며 이에 謝意를 表하는 바이다.

## 參 考 文 獻

1. Moser, M.A.: "Lateral pressure of clayey soils on structures," *Proc., 8th ICSMFE, Speciality Session 5, Moscow, Vol. 4.3, 1973, pp. 252~253.*
2. Peck, R.B. and Raamot, T.: "Foundation behavior of iron ore storage yards," *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 90, No. SM3, 1964, pp. 85~123.*
3. Uriel, S. et al.: "Behavior of precast piles under lateral pressures at a shipbuilding site," *Proc., 6th ECSMFE, Vienna, Vol. 1, 1976, pp. 585-590.*
4. 高速道路調査會: 軟弱地盤上の橋台基礎に關する調

- 査研究報告書, 1979.
5. Ito, T. and Matsui, T.: "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles," *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 4, 1975, pp. 43~59.
  6. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W.P.: "Design method for the stability analysis of the slope with landing pier," *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 4, 1979, pp. 43~57.
  7. 洪元杓: "粘土地盤속의 말뚝에 작용하는 側方土壓", 大韓土木學會論文集, 第2卷, 第1號, 1982, pp. 45~52.
  8. Matsui, T., Hong, W.P. and Ito, T.: "Earth Pressures on piles in a row due to lateral soil movements," *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 2, 1982, pp. 71~81.
  9. 洪元杓: "모래地盤속의 말뚝에 작용하는 側方土壓", 大韓土木學會論文集, 第3卷, 第3號, 1983, pp. 63~69.
  10. 洪元杓: "側方變形地盤속의 圓形말뚝에 작용하는 土壓의 算定", 中央大學校論文集, 自然科學編, 1983, pp. 319~328.
  11. 洪元杓: "側方變形地盤속의 圓形말뚝에 작용하는 土壓", 大韓土木學會論文集, 第4卷, 第1號, 1984, pp.
  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.
  13. Bowles, J.E.: *Foundation Analysis and Design*, 3rd Ed., McGraw-Hill, Tokyo, 1982, pp. 602~610.
  14. Tomlinson, M.J.: *Pile Design and Construction Practice*, A Viewpoint Publication, London, 1977, pp. 118~174.
  15. 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)調査一, 1977, pp. 2~10.
  16. Alpan, I.: "The empirical evaluation of the coefficient  $K_0$  and  $K_{or}$ ," *Soils and Foundations*, Vol. 7, No. 1, 1967, pp. 31~40.

(接受: 1984. 3. 14)