

# 모래地盤속의 말뚝에 作用하는 側方土壓

Lateral Earth Pressures Acting on Piles in Cohesionless Soil

洪 元 杓\*  
Hong, Won Pyo

## Abstract

A theoretical equation is presented to estimate the lateral earth pressures acting on piles in a row in cohesionless soil. Then, a series of model tests are carried out for various kinds of pile diameters and pile intervals, followed by very good agreements between the experimental and theoretical values of the lateral earth pressures on piles.

The experimental results prove the validity of an assumption on the plastic condition of soil around piles set up in the theoretical derivation. And also the significance of the theoretical values by the presented theoretical equation is clarified.

## 要 旨

모래 地盤속에 設置된 줄말뚝에 作用하는 側方土壓을 算定할 수 있는 理論式이 提案되고 말뚝의 設置條件을 여러가지로 變化시킨 模型實驗이 實施된다.

말뚝에 作用하는 側方土壓의 實驗値는 말뚝의 直徑과 말뚝의 設置間隔을 여러가지로 變化시켜도 理論値와 극히 良好한 一致를 보이고 있다. 또한 側方土壓算定理論式의 誘導時 말뚝周邊地盤의 塑性狀態에 대한 假定の 妥當性이 實驗結果에 의하여 立證되고 提案된 算定理論式에 의한 側方土壓의 理論値가 가지는 意味도 明白하게 說明되어 진다.

## 1. 序 論

受動말뚝<sup>(1-3)</sup>에 있어서는 말뚝에 作用하는 側方土壓이 地盤과 말뚝의 相互作用의 結果로서 정하여 지므로 이 側方土壓을 正確하게 豫測하는 데에는 많은 困難이 수반된다. 그러나 側方變形이 發生되고 있는 地盤속의 受動말뚝을 安全하게 設計하기 위하여서는 이 側方土壓을 正確하게 算定하는 것이 무엇보다도 重大한 事項일 것이다<sup>(4)</sup>.

여기에 本研究는 地盤속에 設置된 受動줄말뚝에 作用하는 側方土壓의 發生機構를 究明하는 것을 目的으로 하고 있다<sup>(5-8)</sup>. 筆者는 지금까지 말뚝의 設置間隔과 말뚝周邊地盤의 塑性狀態를 보다 現實에 가까운 形態로 考慮하는 것에 重點을 두고 塑性變形地盤속의 受動말뚝에 作用하는 側方土壓의 算定理論式을 誘導提案하여 오고 있다<sup>(5,8)</sup>.

本論文은 側方變形地盤속의 受動말뚝에 作用하는 側方土壓의 模型實驗에 관한 두 편의 論文중 두

\* 正會員·中央大學校 工科大學 土木工學科 助教授

번째 논문이다. 첫번째 논문<sup>(6)</sup>에서는, 模型實驗裝置를 製作하고 粘土地盤을 對象으로 한 實驗을 실시하여 提案된 側方土壓算定理論式의 信賴性을 立證한 바 있다. 한편, 本論文에서는 모래地盤을 對象으로 하여 地盤속에 一定間隔을 두고 一列로 設置된 受動줄말뚝에 作用하는 側方土壓을 算定할 수 있는 理論式을 提案하고, 모래地盤속의 줄말뚝의 設置條件을 여러가지로 變化시킨 模型實驗을 實施하여 말뚝의 側方土壓과 地盤의 變位量 사이의 關係 및 提案된 算定理論式의 信賴性을 檢討하고자 한다.

## 2. 算定理論式

直徑  $d$ 인 圓形말뚝이 모래地盤속에  $D_1$ 의 中心間隔으로 一列로 設置되어 있는 줄말뚝의 斷面圖와 平面圖는 그림 1과 같다. 이때 不動地盤面上의 두께  $H$ 의 地盤이 말뚝들과 直角方向으로 側方變形하면 말뚝周邊地盤에는 塑性域이 發生할 것이며 이로 인하여 말뚝은 側方土壓을 받게 될 것이다. 이러한 줄말뚝중 그림 1의 平面圖에 斜線으로 表示한 말뚝中心間의 地盤을 擴大하여 圖示하면 그림 2와 같으며  $ACDFF'D'C'A'$  部分의 地盤에 대하여 理論解析을 實施하는 것으로 충분하리라 생각된다. 地盤은 깊이 方向으로 平

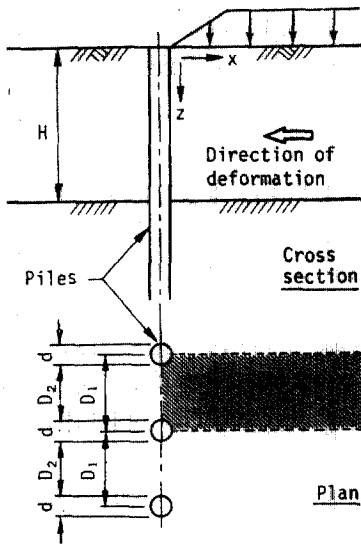


그림 1. 말뚝設置圖

面變形率狀態에 있으며 周邊地盤은  $AEBB'E'A'$  部分만이 Mohr-Coulomb의 降伏條件을 滿足하는 塑性狀態에 있다고 假定한다. 그밖의 假定과 자세한 誘導過程에 대하여서는 參考文獻<sup>(6),(8)</sup>을 參照하기로 하고 概略의인 誘導課程을 略述하면 다음과 같다.

우선 土塊  $EBB'E'$ 를  $x$ 軸에 수직인 方向으로 分割한 微小要素에 作用하는 힘의  $x$ 方向 平衡條件으로부터 얻을 수 있는 微分方程式을 不靜定積分하면 土塊  $EBB'E'$  內의  $x$ 方向應力  $\sigma_x$ 는 다음과 같이 구하여 진다.

$$\sigma_x = \frac{(C_1 D) \sigma_1^{(\phi)}}{G_1(\phi)} \quad (1)$$

한편, 土塊  $AEE'A'$  內의  $x$ 方向應力  $\sigma_x$ 에 대하여서도 同一하게 誘導하면 다음 식이 구하여 진다.

$$\sigma_x = \frac{C_2 \exp\left(\frac{2N_\phi \tan \phi}{D_2} x\right)}{N_\phi \tan \phi} \quad (2)$$

단,  $N_\phi = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$ ,  $G_1(\phi) = N_\phi^{\frac{1}{2}} \tan \phi + N_\phi - 1$ . 여기서,  $\phi$ 는 모래의 內部磨擦角이고  $D$ 는 土塊  $EBB'E'$  內의 한 位置에 있어서  $x$ 軸에 수직인 方向의 길이이다. 또한  $C_1$ 과  $C_2$ 는 積分常數이며,  $x=0$ 인  $AA'$ 면에 水平土壓  $\sigma_H$ 가 作用함을 境界條件으로 하여 구할 수 있다.

말뚝에 作用하는 側方土壓은  $BB'$ 면과  $AA'$ 면에 作用하는 土壓  $p_{BB'}$ 와  $p_{AA'}$ 의 差異에 의한 것이다. 여기서  $p_{BB'}$ 는  $D=D_1$ 인 경우의 식 (1)에 말뚝中心間隔  $D_1$ 을 곱한 土壓이며  $p_{AA'}$ 는  $\sigma_H$ 에  $D_2$ 을 곱한 土壓인 것을 생각하면, 單位 깊이當한개의 말뚝에 作用하는  $x$ 方向 側方土壓  $p$ 는 다음과 같이 구하여 진다.

$$\begin{aligned} p &= p_{BB'} - p_{AA'} \\ &= \sigma_H \left[ D_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \cdot \exp\left( \frac{D_1 - D_2}{D_2} \tan\left( \frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) G_3(\phi) \right) - D_2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

단,  $G_3(\phi) = N_\phi \tan \phi$

塑性變形이 發生한 地盤속의 全側方土壓  $P$ 는 식 (3)을 積分하여 식 (4)와 같이 구하여 진다.

$$P = \int_0^H p dz \quad (4)$$

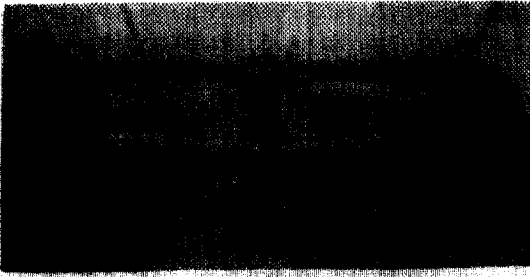


사진 1. 實驗裝置圖

여기서  $z$  는 地表面에서부터의 깊이를 나타낸다.

### 3. 模型實驗

實驗은 첫번째 論文<sup>(6)</sup>에서 이미 製作發表한 模型實驗裝置를 利用하여 實施한다. 本實驗裝置는 空氣壓制御部, 實驗裝置本體 및 測定系의 三部分으로 構成되어 있다. 사진 1은 實驗裝置本體이며, 이 實驗裝置本體는 말뚝과 地盤試料를 넣을 模型箱子와 地盤에 側方變形을 發生시키기 위한 載荷裝置로 構成되어 있다. 實驗裝置의 細

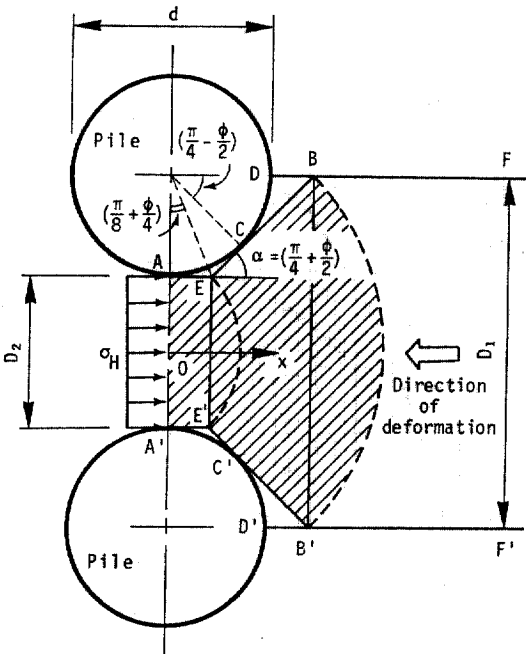


그림 2. 말뚝周邊地盤의 塑性狀態

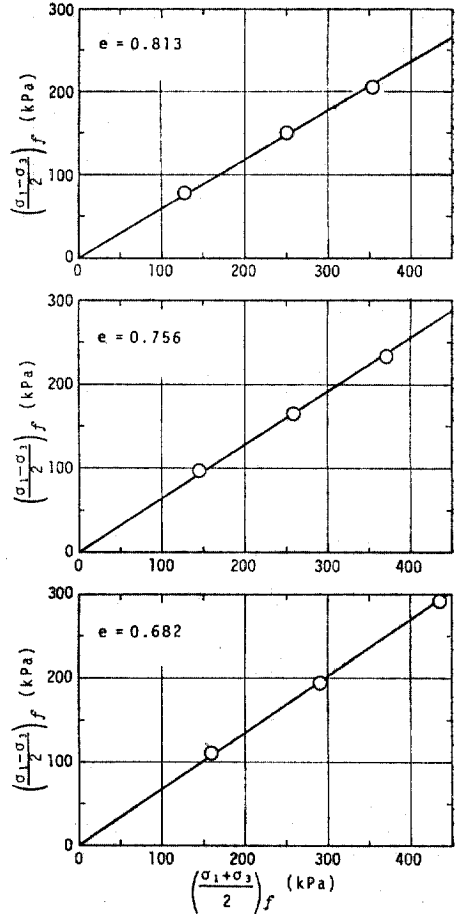


그림 3. 豊浦모래의 三軸壓縮試驗結果

部特徵 說明 및 實驗方法에 관하여는 參考文獻<sup>(6)</sup>을 参照하기 바라므로 詳細한 說明을 略한다.

模型地盤의 모래試料로는 比重이 2.64인 豊浦 모래(日本標準모래)가 使用된다. 모래의 間隙比  $e$ 가 각각 0.813, 0.756 및 0.682인 空氣乾燥狀態의 이 모래試料에 대한 三軸壓縮試驗結果는 그림 3과 같다. 이 試驗結果로부터 모래試料의 內部摩擦角  $\phi$ 와 間隙比  $e$ 와의 關係는 그림 4와 같이 얻어질 수 있다. 本實驗에 使用된 模型모래地盤 供試體의 平均間隙比는  $0.865(\pm 0.005)$ 이므로 이 供試體의 內部摩擦角은 그림 4로부터  $0.616 \text{ rad} (35.3^\circ)$ 로 推定된다.

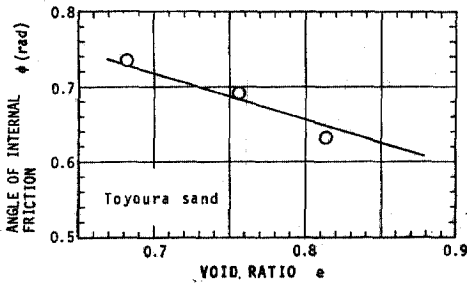


그림 4. 内部摩擦角과 間隙比의 關係

표 1. 實驗케이스

No.	d(cm)	D <sub>1</sub> (cm)	D <sub>2</sub> /D <sub>1</sub>	specimen
S-1	2	7.5	0.73	Sand φ=35.3° e=0.87 Gs=2.64
S-2	2	15.0	0.87	
S-3	2	30.0	0.93	
S-4	3	15.0	0.80	
S-5	3	30.0	0.90	
S-6	4	15.0	0.73	
S-7	4	30.0	0.87	

모래의 模型地盤은 實驗時 모래試料과 模型箱子 사이의 摩擦力의 影響을 줄이기 위하여 模型箱子內面에 grease를 바르고, 줄말뚝과 모래地盤供試體를 模型箱子속에 넣어 만든다. 모래地盤供試體는 모래試料를 一定한 間隙比가 얻어질 수 있도록 잘대기를 使用하여 模型箱子속에 均一하게 채워 넣어 만든다. 말뚝直徑이 2 cm, 3 cm 및 4 cm인 세種類의 模型鋼말뚝을 말뚝中心間隔 D<sub>1</sub>이 각각 7.5 cm, 15 cm 및 30 cm이 되도록 變化 配置시켜 표 1에 表示한 바와 같이 7회의 實驗을 實施할 수 있게 한다.

#### 4. 實驗結果 및 考察

##### 4.1 말뚝의 側方土壓과 地盤變位量의 關係

그림 5는 말뚝에 作用하는 側方土壓 P와 地盤의 變位量 δ와의 關係를 No. S-3, No. S-5 및 No. S-7의 實驗結果에 대하여 例示한 것이다. 이 그림에 의하면 말뚝에 作用하는 側方土壓은

地盤變位量의 增加와 함께 점차 增加하여 最大値의 極限側方土壓(그림중 언직화살표로 表示한 位置)에 도달한 후 多小 減少하는 傾向이 있음을 알 수 있다. 또한 地盤의 變位量에 대한 側方土壓의 初期增加率이 클수록 말뚝에 作用하는 極限側方土壓이 클 수도 있다.

그림 5에 表示한 3종의 實驗케이스에 대하여 말뚝의 側方土壓 P와 地盤의 變位量 δ와의 關係를 兩面對數紙上에 再整理하면 그림 6과 같다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 검은 點으로 表示된 말뚝의 側方土壓과 地盤의 變位量 사이의 實驗値는 兩面對數紙上에 變曲點을 갖는 直線關係로 近似表示를 할 수 있을 것이다. 이것은 粘土試料에 대한 實驗結果<sup>(6)</sup>와도 一致하는 結果이다. 이 變曲點의 값을 그림 5 상에 수평방향 화살표로 表示하면 말뚝에 作用하는 側方土壓은 變曲點에 도달하기 까지의 地盤變位量에 대하여 거의 線形的으로 增加하고 있음을 알 수 있다. 그림 6의 縱軸上에 원으로 表示한 側方土壓은 算定理論式(3) 및 (4)에 의거하여 計算된 理論値를 나타낸다. 단, 理論式(4)를 使用할 때 側方變形地盤의 두께 H는 0.3 m로 한다. 이들 그림으로부터 理論値는 變曲點에 있어서의 側方土壓의 實驗値에 가까운 것을 알 수 있다.

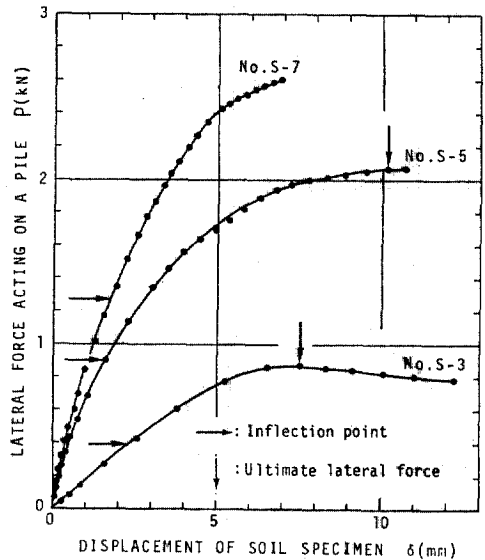


그림 5. 側方土壓과 地盤變位量의 關係

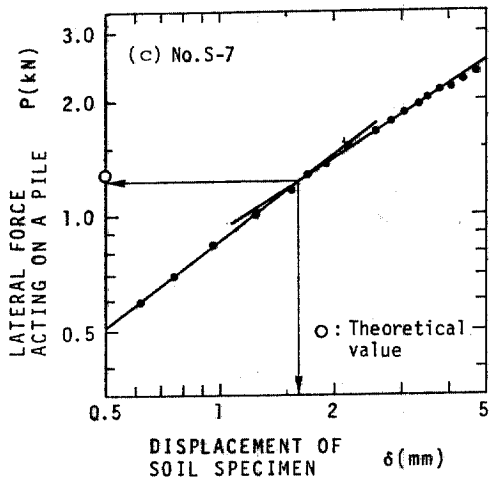
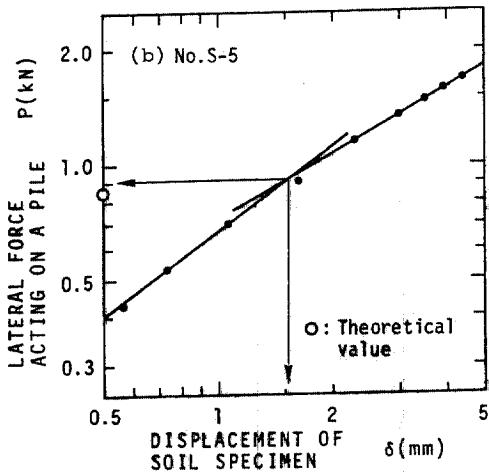
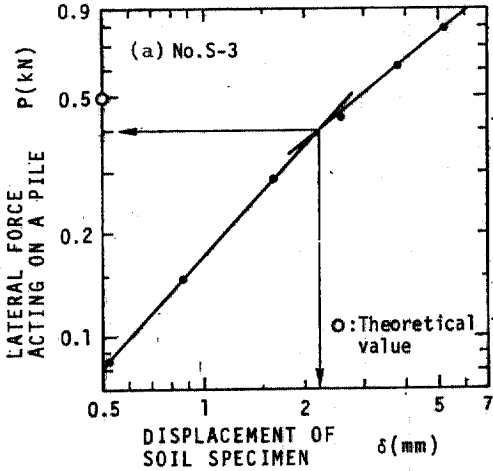


그림 6. 側方土壓과 地盤變位量의 兩面對數關係

이들 結果로부터 그림 5 및 그림 6에 表示된 變曲點은 말뚝周邊地盤이 線形的인 彈性領域을 넘어 塑性狀態로 되려고 할 때의 應力狀態를 나타내고 있다고 생각할 수 있을 것이며 이는 理論解析 상의 地盤의 塑性狀態에 대한 假定과도 一致한다고 思慮된다.

#### 4.2 實驗値와 理論値의 比較

그림 7은 표 1의 全實驗케이스에 대한 實驗結果를 가지고 말뚝의 側方土壓의 實驗値와 理論値를 比較한 그림이다. 여기서 實驗値는 그림 6의 變曲點에 있어서의 側方土壓이며 理論値는 식 (3) 및 (4)로부터 구한 側方土壓이다. 이 그림으로부터, 理論値는 여러 種類의 말뚝直徑 및 말뚝間隔에 대한 實驗値와 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 앞章에서 誘導提案된 理論式은 地盤이 塑性狀態에 도달하려 할 때 地盤속의 말뚝에 作用하는 側方土壓을 比較的 正確하게 豫測할 수 있음이 判明될 수 있을 것이다. 또한, 單一말뚝이라고 생각하여도 무방할 정도로 말뚝間隔이 큰  $D_2/D_1=0.93$ 인 경우도 포함되어 있으므로 單一말뚝에 대하여서도 本理論式의 適用이 可能하리라 본다.

全實驗結果에 대하여 말뚝直徑  $d$ 의 變化에 따른 말뚝의 側方土壓  $P$ 와 말뚝間隔比  $D_2/D_1$ 의 關係를 圖示하면 그림 8과 같다. 그림중 實線은

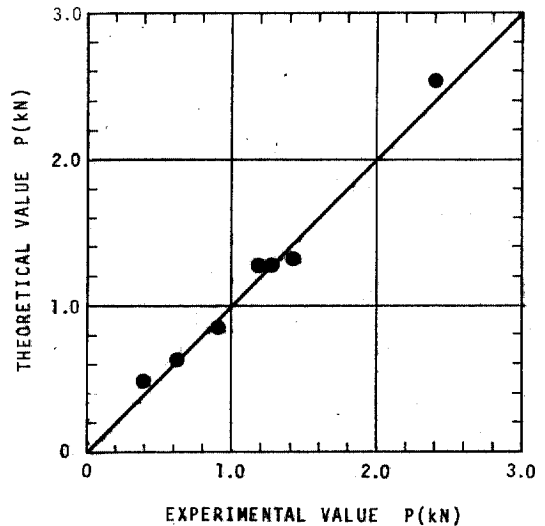


그림 7. 理論値와 實驗値의 比較

提案理論式에 의거한 理論曲線이다. 이들 結果에 의하면 말뚝直徑  $d$ 가 一定한 경우 말뚝間隔比  $D_2/D_1$ 이 적을 수록 그 말뚝間隔이 좁아질 수록 말뚝의 側方土壓의 實測値는 理論値의 傾向에 따라 增加함을 볼 수 있다. 한편, 말뚝間隔比가 一定하면 말뚝直徑의 增大와 함께 말뚝의 側方土壓은 線形的으로 增大하는 傾向이 보인다.

그림 9는 그림 8의 側方土壓을 말뚝中心間隔  $D_1$ 으로 나누어  $P/D_1$ 과  $D_2/D_1$ 의 關係를 整理한 그림이다. 여기서  $P/D_1$ 은 말뚝 한개 당 作用하는 側方土壓을 말뚝中心間隔으로 나눔으로써 地盤의 單位幅當으로 表示한 側方土壓을 意味하게 된다. 그림중 우선 모래의 內部摩擦角  $\phi$

가  $35.3^\circ$ 인 本實驗의 경우를 보면, 말뚝間隔比  $D_2/D_1$ 이 變化되지 않는 한  $P/D_1$ 은 말뚝直徑  $d$ 에 無關하게 항상 一定함을 알 수 있다. 따라서  $P/D_1$ 과  $D_2/D_1$ 을 座標軸으로 택하므로써 말뚝直徑에 相關없이 그림 8의 3종의 말뚝直徑에 대한 實驗結果를 그림 9와 같이 整理할 수 있게 된다. 그림중 實線은 理論曲線을 나타낸다. 이 그림으로부터 여러 種類의 말뚝直徑 및 말뚝間隔에 대한 實驗値는 理論曲線에 極히 良好한 一致를 보이고 있는 狀態를 再確認할 수 있다. 또한 그림 9 중에는 모래의 內部摩擦角이  $30^\circ$  및  $40^\circ$ 인 경우의 理論曲線도 아울러 表示하고 있다. 이들은 地盤의 內部摩擦角의 增大와 함께 말뚝의 側方土壓도 增大될 것을 理論的으로 보여 주고 있다.

### 5. 結論

모래地盤속의 줄말뚝에 作用하는 側方土壓의 發生機構를 究明할 目的으로 理論解析과 模型理論을 實施한 本研究結果를 整理하면 다음과 같다.

(1) 말뚝의 側方土壓과 地盤의 變位量사이의 實驗値는 兩面對數紙 상에서 變曲點을 갖는 直線關係로 近似表示될 수 있으며, 이 側方土壓은 變曲點에 도달하기 까지 地盤變位量에 대하여 거의 線形的으로 增加하다가 極限側方土壓에 도달한 후 다소 減少하는 傾向이 있다.

(2) 變曲點에서의 말뚝의 側方土壓 實驗値는 提案理論式에 의한 算定値와 極히 良好한 一致를 보인다. 따라서 말뚝周邊地盤이 塑性狀態로 되려고 할 때 줄말뚝에 作用하는 側方土壓은 本提案理論式으로 豫測될 수 있다.

(3) 말뚝에 作用하는 側方土壓은 말뚝直徑 및 地盤內部摩擦角의 增大와 함께 增大하고 말뚝間隔의 增大와 함께 減少하는 傾向이 있다.

결국 말뚝周邊地盤의 塑性狀態를 考慮하고 말뚝의 設置間隔, 말뚝直徑, 地盤의 內部摩擦角의 影響을 考慮할 수 있도록 誘導提案된 本側方土壓算定理論式은 높은 信賴度를 가지고 있다고 結論지어 질 수 있다.

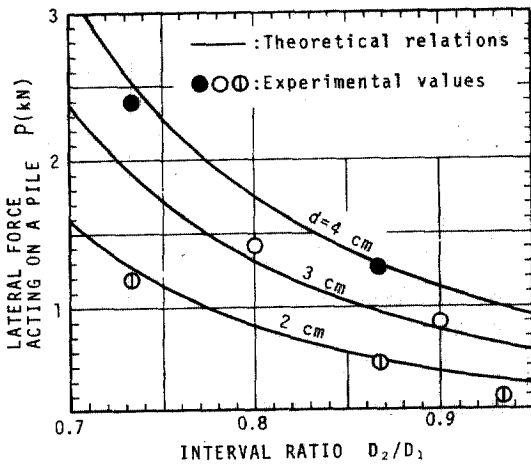


그림 8. 側方土壓과 間隔比의 關係

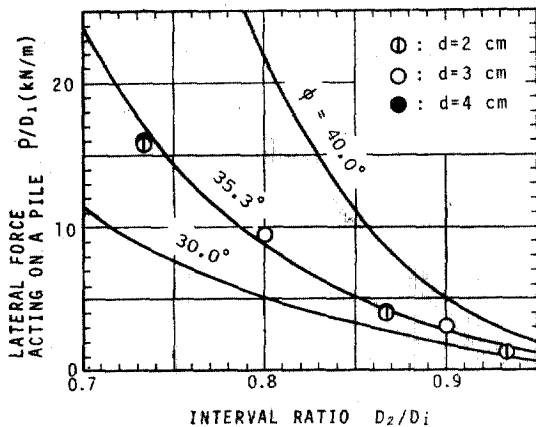


그림 9. 內部摩擦角의 影響

### 感謝의 말

本研究는 1982年度 한국과학재단 지원研究結果의 一部임을 밝히며 同財團에 謝意를 表한다.

### 參 考 文 獻

1. De Beer, E., "Piles Subjected to Static Lateral Loads", State-of-the-Art Report, *Proc., 9th ICS-MFE, Specialty Session 10, Tokyo, 1977*, pp. 1~14.
2. Hong, W.P., Stability Analysis of Slope Containing Piles in a Row and Its Design Method, *Thesis, Eng. Dr., Osaka University, 1980*, pp. 3~5.
3. 松井保, "主働杭と受働杭", *土と基礎*, 第30卷, 第7號, 1982, pp.103~104.
4. Ito, T. and Matsui, T., "Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles", *Soils and Foundations, Vol. 15, No. 4*, pp.43~59.
5. Hong, *op. cit.*, pp.30~89.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

(接受: 1983. 5. 27)