

水平力を 받는 말뚝

Piles Subjected to Lateral Loads

洪 元 杓*

1. 概 說

말뚝은 예로부터 土木・建築의 各種 構造物基礎에 널리 使用되어 오고 있다. 産業의 발달과 더불어 이러한 構造物이 점차 複雑하여 지고 말뚝의 使用材料, 設置方法 및 使用目的도 多様하여 지고 있다. 즉, 말뚝의 初期材料로는 나무가 많이 使用되었으나 그후 콘크리트, 철근콘크리트, 鋼 등이 使用되고 있다. 더우기 最近에는 이들 材料를 둘 이상 合成한 말뚝도 開發使用되고 있다.

한편, 말뚝의 設置方法으로는 이미 製作되어 있는 既製말뚝을 地盤에 打入 혹은 埋設시키던 方法에서 말뚝이 設置될 位置를 미리 굴착하고 철근콘크리트 등을 넣어 現位置말뚝을 製作하는 方法으로까지 發展하기에 이르렀다.

또한, 構造物이 複雑하여 집에 따라 말뚝에 作用하는 荷重狀態도 複雑하여지고 있다. 이러한 複雑한 荷重條件은 自然 말뚝의 움직임을 複雑하게 하고 있다. 말뚝을 多様하여진 使用目的에 맞게 安全하고 經濟적으로 設計하려면 무엇보다도 이러한 複雑한 荷重條件下에서의 말뚝의 움직임 및 말뚝과 地盤 사이의 相互作用에 관한 發生機構를 明白하게 하여야만 할 것이다.

원래 말뚝은 上部構造物의 荷重을 下部의 地盤에 安全하게 傳達시키기 위하여 使用되었다. 따라서, 이러한 鉛直荷重을 받는 말뚝에 대하여

서는 일적부터 研究되어 設計에 有效하게 活用되고 있다. 그러나, 말뚝에 의하여 支持되고 있는 構造物이 土壓, 風壓, 波力 등을 받게 되면 말뚝머리에는 鉛直力뿐만 아니라 水平力도 同時に 作用하게 된다. 일찍이 말뚝의 設計에서는 이러한 水平力에 대하여서는 檢討가 行하여지지 않았다. 그러나, 水平力を 받는 말뚝의 變位 혹은 破壞는 上部構造物에 지대한 影響을 끼치게 되어 水平力を 받는 말뚝에 注目을 하지 않을 수 없게 되었다. 그 結果, 水平力を 받는 말뚝에 관한 研究는 現在에 이르기까지 活發히 進行되어 오고 있는 實情이다. 따라서, 많은 解析法 및 設計法이 發表되어 그 一部는 이미 設計에 活用이 되고 있기도 하다. 그러나, 한마디로 水平力を 받는 말뚝이라고 하여도 말뚝은 地盤과 접하여 있으므로 말뚝과 地盤의 變形狀態에 따라 그 特性이 달라질 수가 있다. 따라서, 本稿에서는 이러한 점에 착안하여 水平力を 받는 말뚝을 좀 더 明白히 區分하여 그들의 發生機構에 대하여 알아보려고 한다.

2. 主動말뚝과 受動말뚝

水平力を 받는 말뚝은 말뚝과 地盤중 어느것이 움직이는 主體인가에 따라 그림 1에 表示한 바와 같이 主動말뚝(Active pile) 및 受動말뚝(Passive pile)의 2種類로 大別할 수 있다¹⁾.

主動말뚝은 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 말뚝이 地表面上에 既知의 水平荷重을 받는 경우이다. 그 結果, 말뚝이 變形함에 따라 말뚝周邊

* 正會員・中央大學校 工科大学 土木工學科 助教授

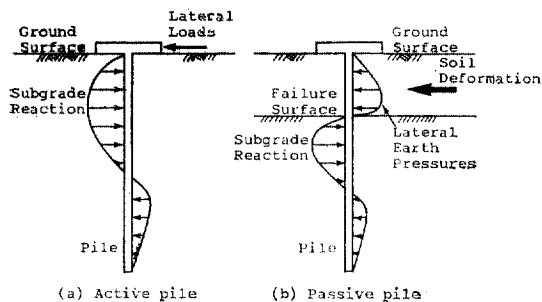


그림 1. 水平力を 받는 말뚝

地盤이 抵抗하므로 地盤에 荷重이 傳達된다. 이 경우에 있어서는 말뚝이 움직이는 主體가 되어 먼저 움직이게 되고 말뚝의 變位가 周邊地盤의 變形을 誘發시키게 된다.

한편, 受動말뚝은 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 우선 어떤 原因에 의하여 말뚝周邊地盤이 變形하게 되고, 그 結果로서 말뚝에 側方土壓이 作用하고 나아가 不動地盤面下の 地盤으로 이 側方土壓이 傳達된다. 이 경우에 있어서는 말뚝 周邊地盤이 움직이는 主體가 되어 말뚝이 地盤 變形의 影響을 받게 된다.

이들 두 種類의 말뚝의 最大相違點은 말뚝에 作用하는 水平力이 主動말뚝에서는 미리 주어지는데 비하여 受動말뚝에서는 地盤과 말뚝사이의 相互作用의 結果에 의하여 定하여지는 점이다. 말뚝 周邊地盤의 變形狀態 및 말뚝과의 相互作用이 대단히 複雜한 點을 考慮하면 受動말뚝이 主動말뚝에 비하여 더욱 複雜한 것을 알 수 있을 것이다.

主動말뚝은 말뚝의 水平抵抗力의 問題로서 자주 取扱되어 왔다²⁾. 다시 말하면, 말뚝의 水平抵抗에 관하여는 주로 主動말뚝이 取扱되어 왔다고 말하여도 過言은 아니다. 이러한 主動말뚝에 대한 各種 問題는 여러 사람들에 의하여 比較的 많이 研究된 편이다³⁾. 예를 들면, 片土壓, 風壓, 波力 등을 받는 構造物의 基礎말뚝, 선박의 충격력에 의한 港灣構造物, 地震時 水平力을 받는 基礎말뚝 등이다.

한편, 受動말뚝은 比較的 最近에 이르러 基礎工學分野에서 注目되기 시작한 말뚝이다. 受動

말뚝의 典型的인 例로는 盛土, 鑛石의 野積 등에 의하여 側方變形이 發生하는 地盤속의 構造物基礎말뚝, 斜面破壞 혹은 地盤의 側方流動을 防止하기 위하여 使用하는 말뚝 등이 있다. 結局, 이러한 地盤의 側方塑性變形은 말뚝에 影響을 미치게 되고 말뚝과 地盤의 相互作用의 結果로 말뚝은 側方土壓을 받게 되어 豫想치 않았던 피해가 發生하는 경우가 종종 있다. 더우기, 말뚝을 使用한 土木·建築構造物이 나날이 增加하여 감에 따라 이러한 受動말뚝의 使用度도 점차 增加되고 있으며 이에 관한 研究도 最近에 土質基礎工學國際會議에서 Specialty Session을 마련하여 集中的으로 整理討論된 바도 있다. 즉, 第8回 Moscow會議(1973) Specialty 5⁴⁾와 第9回 東京會議(1977) Specialty Session 10⁵⁾이 그 例이다.

3. 主動말뚝의 例

主動말뚝이 地表面上의 말뚝部分에 水平力을 받게 되면, 말뚝에는 變位가 發生함과 더불어 地盤에는 그 變位에 抵抗하여 그림 1(a)에 圖示한 바와 같은 地盤反力이 發生하게 된다. 이러한 現象은 말뚝이 鉛直荷重을 받을 경우 地盤으로부터 摩擦抵抗 및 先端抵抗을 받는 現象과 類似한 것이다.

主動말뚝의 設計에 있어서는 두가지 基準에 의거하여 檢討되어야 한다. 즉, 地盤의 極限抵抗破壞에 대하여 적절한 安全率을 가지는가이고 다른 하나는 말뚝의 變位量이 許容範圍에 있는가 檢討하는 것이다. 이와 같은 主動말뚝에 대한 解析法은 옛부터 많이 提案되어 왔으나, 무엇보다도 重要한 點은 말뚝周邊地盤의 變形特性을 表現하는 變數를 어떻게 定義하여 구할 것인가에 있다. 통상 이 變數로는 水平方向의 地盤反力係數가 使用되고 있으며, 地盤反力이 말뚝의 變位에 比例한다고 假定한 Chang의 方法⁶⁾이나 말뚝 길이의 長短을 考慮한 Broms의 方法^{7), 8)} 등이 많이 利用된다.

地表面上의 말뚝部分에 作用하게 되는 水平力은 여러 가지 原因에 의하여 誘發될 수가 있다. 이 原因으로는 背面盛土, 바람, 파도, 충격, 지진 등을 생각할 수가 있다. 主動말뚝의 具體的

인 예를 列舉하면 다음과 같다.

3.1 橋臺基礎말뚝

比較的 높은 強度特性을 가지는 地盤上에 橋臺를 그림 2(a)와 같이 設置後 背面盛土를 하게 되면 橋臺背面에는 그림중에 表示한 바와 같이 土壓이 作用하게 된다. 이러한 片土壓은 橋臺를 水平으로 移動시키려 하며 결국 基礎말뚝의 머리부분에 水平荷重으로 作用하게 되므로 主動말뚝으로 생각할 수 있다. 그밖에도 基礎말뚝을 使用한 옹벽구조물도 모두 이와 같은 種類의 主動말뚝으로 取扱할 수 있다.

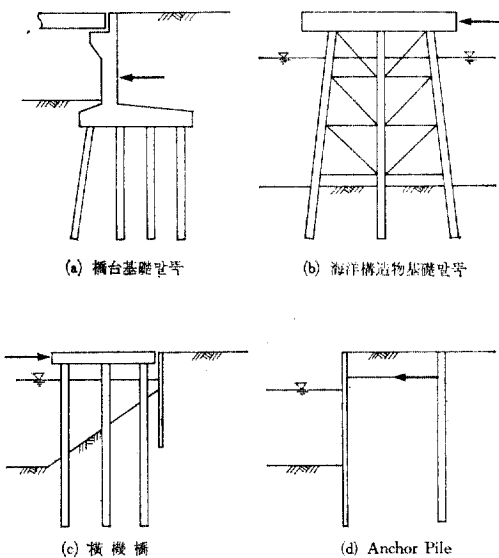


그림 2. 受動말뚝의 例

3.2 海洋構造物基礎말뚝

그림 2(b)와 같은 石油 굴착용 플랫폼 등의 海洋構造物은 바람과 파도에 의하여 끊임없이 水平力을 받게 된다. 따라서 이러한 海洋構造物을 支持하는 基礎말뚝은 主動말뚝의 典型的인 例로 取扱될 수 있으며, 水平力에 대한 充分한 檢討가 絶실히 要求되고 있다. 그 밖에도 이러한 海洋施設物에 선박이 정박할 경우 충격에 의하여서도 水平力이 作用하게 된다.

3.3 港灣構造物基礎말뚝

그림 2(c)에 圖示한 Landing pier(橫棧橋)나 Dolphin과 같은 港灣構造物은 선박의 정박시 作用하는 충격과 파도에 의하여 地表面上의 基礎

말뚝部分이 水平力을 받게 된다. 그 밖에도 防波堤 등을 支持하는 基礎말뚝도 파도에 의하여 週期的인 水平力을 받게 된다.

3.4 地震時의 構造物基礎말뚝

地震時에는 水平진동에 의하여 막대한 크기의 水平力이 말뚝基礎를 가지는 모든 構造物에 作用하게 된다. 따라서, 地震多發 地域에서는 豫想되는 水平力에 대하여서도 充分한 檢討가 要求된다.

3.5 其他主動말뚝

各種 水平引張力에 抵抗하기 위하여 設置하는 말뚝도 모두 主動말뚝에 속한다. 例를 들면, 그림 2(d)와 같이 側壁에 대한 Anchor wire나 Tie rod를 支持하기 위하여 設置한 말뚝을 생각할 수 있다. 이 경우는 Anchor wire나 Tie rod에 發生하는 引張應力이 말뚝에 水平力으로 作用하게 된다. 그 밖에도 橋梁 위에서 교통기관 의 갑작스런 출발 혹은 정지 등의 충격도 下部 基礎말뚝에 微小하나마 水平力을 加하고 있다고 생각할 수도 있다.

4. 受動말뚝의 例

2에서 說明한 바와 같이 受動말뚝은 말뚝周邊地盤의 側方移動에 의하여 水平荷重(側方土壓)을 받는다. 이 現象은 말뚝周邊地盤의 沈下(鉛直移動)에 의하여 發生하는 負摩擦(Negative friction)과 類似한 現象으로 생각할 수 있다. 一般的으로 鉛直荷重 및 水平荷重이 말뚝頭部에 作用할 경우 地盤은 不動의 狀態에서 말뚝의 移動에 抵抗하여 作用한다고 생각하여 말뚝을 設計하였다. 그러나, 地盤이 鉛直 혹은 水平方向으로 移動하게 되면 地盤으로부터의 抵抗力은 이미 期待할 수 없게 되고 오히려 이들 地盤의 移動은 말뚝에 荷重을 加重시키는 結果를 초래하게 된다. 그것이 鉛直移動의 경우는 負摩擦에 의한 鉛直荷重의 增加이고 水平移動의 경우는 水平荷重의 增加가 된다. 이러한 意味에서 地盤의 移動에 의한 受動말뚝의 認識은 實務에 있어서 無視할 수 없는 重要한 事項中的 하나일 것이다.

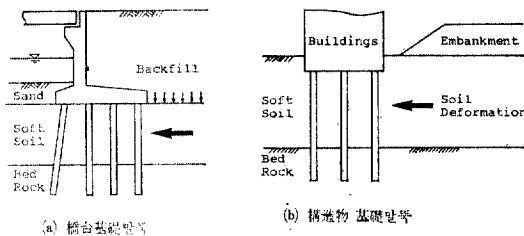
이러한 受動말뚝을 安全하게 取扱하기 위하여서는 무엇보다도 우선 地盤變形에 의하여 말뚝

에 작용하는 側方土壓의 發生機構를 究明하여야 할 必要가 있을 것이다. 地盤의 側方變形은 여러 가지 原因에 의하여 發生될 수 있다. 軟弱地盤上에 盛土 등으로 荷重을 갑자기 加하면 地盤이 미처 壓密되지 못하고 側方向으로 移動하게 될 것이다. 大部分의 경우, 이와 같은 地盤의 側方移動은 바람직하지 못한 現象이기 때문에 가능하면 側方移動이 發生하지 않도록 留意할 必要가 있다. 反對로 地盤의 側方移動을 防止하기 위하여 말뚝을 積極的으로 使用하는 경우도 增加하여 가고 있다.

受動말뚝의 具體的인 例를 列舉하면 다음과 같다.

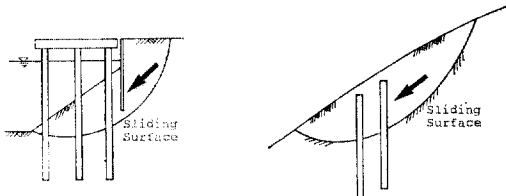
4.1 橋臺基礎말뚝

원래 橋臺는 3.1과 그림 2(a)에서 說明한 바와 같이 主動말뚝으로 取扱하고 있으나 이 橋臺가 軟弱地盤上에 設置되면 또 다른 現象이 附加하게 된다. 즉, 軟弱地盤上의 橋臺에 있어서는 그림 3(a)에 圖示한 바와 같이 背面盛土荷重에



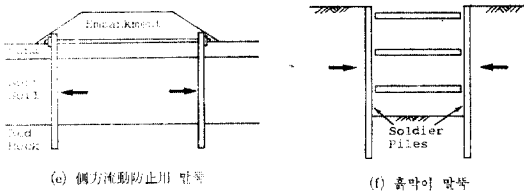
(a) 橋臺基礎말뚝

(b) 橋臺物基礎말뚝



(c) 橫棧橋

(d) 斜面安定用 말뚝



(e) 側方流動防止用 말뚝

(f) 흙막이 말뚝

그림 3. 受動말뚝의 例

의하여 軟弱地盤이 側方으로 移動하게 되고 이 側方移動은 橋臺基礎말뚝에 側方土壓을 加하게 되어 結局 橋臺를 水平으로 移動시키게 된다. 따라서 이러한 경우의 橋臺基礎말뚝은 受動말뚝으로 取扱함이 타당할 것이다. 이러한 말뚝을 主動말뚝만으로 設計함으로 인한 被害例는 많이 報告되고 있는 실정이다⁹⁾.

4.2 構造物基礎말뚝

그림 3(b)에 圖示한 바와 같이 말뚝基礎를 가지는 構造物 부근地盤上에 盛土, 野積 등의 Surcharge가 加하여 지면, 말뚝에는 豫想치 않았던 側方土壓이 作用하게 되어 構造物의 側方移動이나 말뚝破壞의 事故가 發生하게 된다. 따라서, 부근의 工事施工時에는 周邊의 基礎말뚝이 受動말뚝으로 認識되어야 하는가 여부에 留意하여야 한다.

4.3 橫棧橋基礎말뚝

橫棧橋基礎말뚝은 그림 2(c)에서와 같이 主動말뚝으로 많이 取扱하고 있다. 그러나, 橫棧橋가 不安定한 斜面上에 設置되어 있다면, 斜面은 그림 3(c)에 圖示한 바와 같은 任意的 破壞面을 따라 移動하게 될 것이다. 따라서 이 地盤變形으로 인한 側方土壓이 말뚝에 作用하게 되어 受動말뚝으로서의 檢討도 要求된다. 한편, 말뚝은 어느 程度까지의 側方土壓에 抵抗할 수 있다는 점을 利用하면 橫棧橋基礎말뚝을 斜面安定에 有效하게 活用할 수도 있을 것이다.

4.4 斜面安定用말뚝

山沙汰 등의 斜面崩壞를 防止할 目的으로 斜面上에 그림 3(d)와 같이 말뚝을 設置한다. 이것은 受動말뚝이 가지는 水平荷重에 대한 抵抗特性을 積極的으로 活用한 例이다. 第四紀層地盤으로 形成된 移動性 斜面이 많은 日本에서는 옛부터 널리 經驗的으로 使用되었으며, 最近에 이르러 土質工學의 立場에서 合理的인 設計法이 정립되어 가고 있다¹⁰⁾.

4.5 其他受動말뚝

그림 3(e)는 軟弱地盤上에 盛土를 實施할 경우 側方流動을 防止하기 위하여 말뚝을 盛土斷面 兩側에 設置하고 서로 연결시켜 말뚝의 水平荷重抵抗特性을 積極的으로 利用한 例이다.

또한 그림 3(f)와 같이 굴착지반에 使用되는

흙막이用 말뚝도 受動말뚝의 一例가 될 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

1. De Beer, E.E.: "Piles subjected to static lateral loads", State-of-the-Art Report, *Proc., 9th ICSMFE, Specialty Session 10*, Tokyo, pp.1~14, 1977.
2. Poulos, H.G. and Davis, E.H.: *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New York, pp.143~249, 1980.
3. Broms, B.B.: "Stability of flexible structures (piles and pile groups)", *General Report, Session 2, Proc., 5th ECSMFE, Madrid, Vol. 2*, pp.239~269, 1972.
4. ISSMFE: Lateral pressure of clayey soils on structures, *Proc., 8th ICSMFE, Specialty Session 5, Moscow, Vol. 4.3*, pp.227~280, 1973.
5. ISSMFE: The effect of horizontal loads on piles due to surcharge or seismic effect, *Proc., 9th ICSMFE, Specialty Session 10*, Tokyo, 1977.
6. 藤井喬・齊藤正忠: Y.L. Changの方法による杭と版の計算圖表, 技報堂, 東京, 1976.
7. Broms, B.B.: "Lateral resistance of piles in Cohesive soils", *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 90, No. SM2*, pp.27~63, 1964.
8. Broms, B.B.: "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 90. No. SM3*, pp.123~156, 1964.
9. 高速道路調査會: 軟弱地盤上の 橋臺基礎に關する 調査研究報告書, 1979.
10. Hong, W.P.: Stability Analysis of Slope Containing Piles in a Row and Its Design Method, *Thesis, Eng. Dr., Osaka University.*, 1980.

간접과는 대화없다. 신고하여 뿌리뽑자.

과학적인 생활속에 발전하는 우리 사회

本學會誌는 産學協同財團의 一部 補助에 의하여 發刊한 것입니다.