

PHC말뚝의 設計와 施工 特性

李 明 煥

〈工學博士·파일테크代表〉

1. 序 言

우리나라의 既成 콘크리트말뚝의 使用量은 年間 350萬톤을 上廻하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 物量은 世界的으로 類例가 없는 實積이다. 全世界的으로 建設工事が 가장 活潑한 것으로 알려진 日本의 年間 既成 콘크리트말뚝 使用物量이 550萬톤에 不過한 것과 比較해 볼 때 우리나라에서의 既成 콘크리트말뚝 使用量은 엄청난 것임을 알 수 있다.

國內에서 使用되는 既成 콘크리트말뚝은 全量 遠心力 成形法으로 製造되고 있다. 既存의 遠心力 콘크리트 말뚝은 콘크리트의 基準 壓縮強度가 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 PC말뚝(pretensioned spun prestressed concrete pile)이 大部分이었으나 1992年부터 國內에서도 生産되기 始作한 PHC말뚝(pretensioned spun high strength concrete pile)은 콘크리트의 壓縮強度가 $800\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상인 高強度 材質을 갖고 있다.

PHC말뚝은 高強度 材質을 갖고 있음에 따라 既存의 PC말뚝 使用에 따른 諸般問題點⁽¹⁾을 解消하는데 큰 寄與를 하였고 國內의 말뚝基礎 關聯 技術水準 向上을 可能케 하였다. 特히 PHC말뚝 普及 初期에 PHC말뚝 生産業體와 專門技術者들이 中心이 되어 PHC말뚝에 對한 體系的인 研究^{(2),(3)}를 遂行한 것은 오늘날 PHC말

뚝의 普及擴大에 原動力이 되었다. 또한 最近 完了한 「高強度 콘크리트말뚝의 設計와 施工」⁽⁴⁾ 研究課題는 向後 PHC말뚝의 持續的 活用 및 新規需要 創出에 큰 보탬이 될 것으로 期待된다.

이와 같은 研究勞力 結果 現在 PHC말뚝은 國內 既成 콘크리트말뚝 市場의 50% 以上の 占有率을 確保하고 있으며 向後 그 比率은 더욱 높아질 것으로 展望된다.

이웃 日本의 境遇 PHC말뚝은 全體 既成 콘크리트말뚝 市場의 95% 以上을 占有하고 있으며, 그 技術水準 또한 世界第一을 자랑하고 있다.

國內의 境遇 그간 PHC말뚝의, PC말뚝 對比 優秀性和 鋼管말뚝 對替可能性 등이 幅넓게 認識되어 온 것도 事實이지만 아직도 建設技術者들에게 確固한 信賴를 주지 못하고 있는 部分도 無視할 수 없는 實情이다.

아직도 大部分의 建設技術者들의 PHC말뚝에 對한 理解는 “PC말뚝보다는 安全한 基礎를 建設할 수 있지만 非經濟的이며, 鋼管말뚝보다는 經濟的이나 그 品質을 確信할 수 없다”라는 程度인 것 또한 現實인 것이다.

PHC말뚝이 보다 積極的인 活性化를 기하기 위해서는 PHC말뚝의 特性에 對한 徹底한 研究와 最適施工 方案 導出, 그리고 그 成果를 弘報함으로써 技術者들의 認識을 改善하도록 하여야 할 것이다.

本稿에서는 그간 國內에서 調査된 PHC말뚝의

設計와 施工 特性을 事例를 中心으로 記述하였다. 國內에서의 研究結果 PHC말뚝은 適切히 使用하면 PC말뚝보다 安全함은 물론 더욱 經濟的 일 수 있으며 鋼管말뚝과 比較하더라도 더욱 優秀한 荷重支持 能力을 갖을 수 있음을 알 수 있다. 이는 물론 PHC말뚝의 特性을 充分히 理解하고 適切한 設計 및 施工管理가 되었을 境遇의 例이다.

따라서 PHC말뚝을 제대로 活用하기 위해서는 그 特性에 대한 理解가 必須的임을 알 수 있었으며, 보다 幅넓은 適用을 위해서는 持續的인 研究가 必要함을 알 수 있다.

2. PHC말뚝의 杭打施工 貫入特性

近來에 들어 말뚝의 杭打時 發生하는 地盤震動 및 騒音은 主要 建設公害로 認識되어 都心地에서는 물론 邑·面·地域, 심지어 農漁村 地域에서도 杭打作業이 不可能한 境遇가 많이 發生하고 있다.

이에 따라 말뚝의 杭打施工은 크게 減少하였으나 아직도 大規模 新開發團地나 隣近에 住居施設이 없는 調件에서는 杭打工法이 採擇되고 있다.

이는 杭打公法은 餘他 말뚝施工工法보다 支持力 側面에서 가장 有利한 長點과 더불어 施工費가 가장 낮은 工法이기 때문이다.

이와 같은 理由로 인하여 아직도 상당히 많은 物量의 말뚝이 杭打公法으로 施工되고 있으며, 따라서 말뚝의 杭打施工 貫入性은 말뚝基礎 選定의 가장 重要한 尺度로 認識되고 있다. PHC말뚝이 보다 幅넓게 活用되기 위해서는 杭打施工 貫入性에 대한 充分한 理解와 弘報가 必要하다.

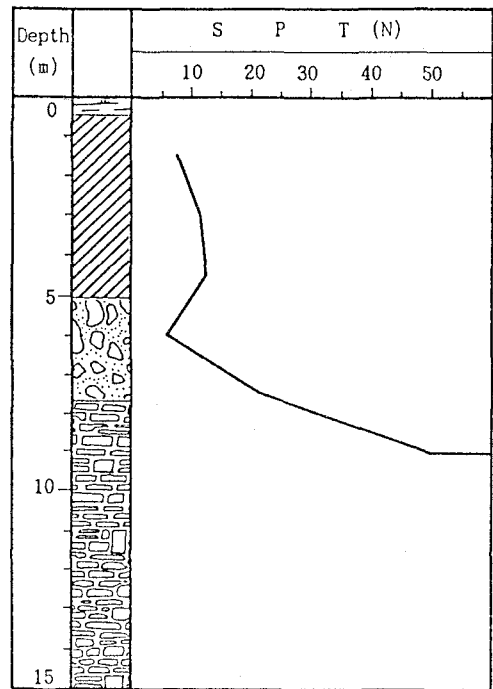
말뚝의 杭打施工 貫入性은 地盤條件, 杭打裝備의 特性과 말뚝材料의 特性에 따라 決定된다. 말뚝을 施工하여 그 效率을 極大化하기 위해서는 말뚝材料가 갖고 있는 最大許容값까지 荷重을 支持할 수 있는 地盤條件까지 말뚝을 貫入시켜야 한다.

그러나 말뚝을 支持力이 큰 地盤까지 杭打貫入시키기 위해서는 地盤의 抵抗보다 큰 값의 杭打力

이 必要하다. 말뚝을 보다 支持力이 높은 地盤까지 貫入시키기 위해서 큰 打擊力을 使用하면 一定한 杭打應力(單位面積當 杭打力) 範圍以內에서만 安全한 材料의 許容 杭打應力 限界를 超過하게 되어 말뚝材料의 破損이 發生한다. 따라서 주어진 地盤條件, 杭打裝備 條件下에서 特定材質의 말뚝은 어떤 限界以上の 貫入은 不可能하다는 것이 杭打施工 貫入性 理論의 根幹이다.

前述한 바와 같이 PHC말뚝은 PC말뚝보다 60% 높은 材料의 壓縮強度를 갖고 있다. 말뚝材料의 許容 杭打應力은 壓縮強度에 正比例(콘트리트말뚝의 許容 杭打應力은 壓縮強度의 60%)하는 바, PHC말뚝은 PC말뚝보다 60% 큰값의 杭打力으로 杭打가 可能하다. 따라서 보다 높은 支持力을 갖는 地盤까지 貫入될 수 있다. <그림 1>은 우리나라의 많은 곳에서 나타나는 典型的인 地盤條件을 나타내 준다.

이와 같은 地盤條件의 特性은 支持層의 N값 變化가 急激하게 나타난다는데 있다. 말뚝이 윗쪽의 比較的 軟弱한 地層을 貫入할 때는 地盤의 抵抗이 크지 않으며 따라서 杭打應力도 낮게 된



<그림 1> 지반조건 (1)

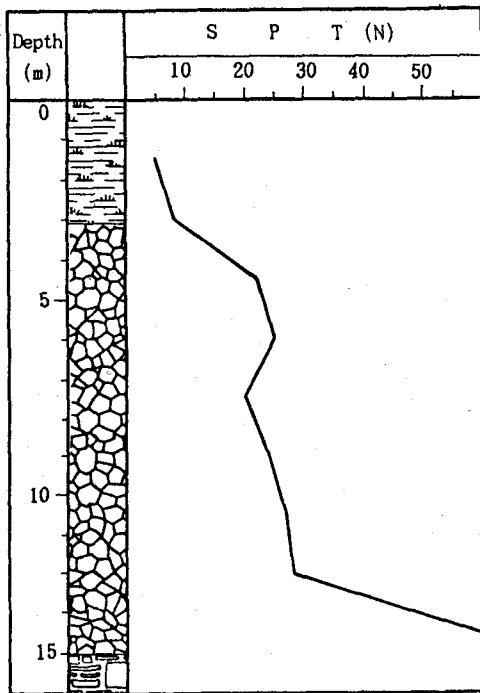
다. 그러나 말뚝의 先端部가 N값이 增加하는 支持層에 貫入됨에 따라 地盤의 先端抵抗은 急激하게 높아지게 되며 이에 따라 杭打應力 또한 急增하게 된다.

國內에서 一般的으로 施行되는 말뚝規格과 杭打裝備 調査에 의하면 이와 같은 地盤條件에서의 杭打應力은 PC말뚝의 許容杭打應力 範圍를 上廻하는 水準이 되며 따라서 PC말뚝은 充分한 支持力을 갖는 地盤까지 貫入되기 前에 말뚝材料의 破損이 發生하게 된다.

反面 PHC말뚝은 PC말뚝 材料보다 60% 높은 材質強度를 갖고있어 大部分의 國內 土質條件에서 充分한 杭打貫入이 可能하다.

그림2와 같은 地盤條件은 말뚝의 支持力 側面에서 가장 理想的인 條件을 갖추고 있다.

地盤條件은 N값이 漸進的으로 增加하기 때문에 地盤의 抵抗도 말뚝이 貫入되는 깊이에 따라서서히 높아지게 된다. 말뚝 材料에 發生하는 杭打應力도 地盤의 抵抗에 比例하여 增加하기 때문에 상당히 깊은 곳까지 貫入할 때까지 말뚝材料의 許容杭打應力 範圍以內의 條件을 滿足



〈그림 2〉 지반조건(2)

시킬 수 있다.

이와 같은 地盤條件에서는 PC말뚝도 상당히 깊은 곳까지 杭打 貫入이 可能하며, PHC말뚝은 理論上 PC말뚝이 貫入되는 곳보다 60% 더 높은 地盤抵抗을 갖는 곳까지 貫入시킬 수 있다.

3. PHC말뚝의 支持力 特性(PC말뚝 對比)

앞章에서 說明한 바와 같이 PHC말뚝은 어떠한 地盤條件에서도 PC말뚝보다 60% 높은 地盤抵抗을 갖는 곳까지 말뚝의 先端部를 貫入시킬 수 있다. 이에따라 말뚝 設計의 指標인 支持力 또한 PC말뚝 對比 60% 높은 값으로 定할 수 있는 長點을 갖고 있다.

PHC말뚝의 長點은 이와 같은 支持力의 單純 比較外에 施工과 關聯한 實務的 次元에서 意味를 갖고 있다.

앞에서 說明한 그림1과 같은 地盤條件의 境遇 아직도 많은 設計에서는 PC말뚝이 採擇되고 있다. 이때의 設計荷重은 $\phi 350\text{mm}$ 는 40ton, $\phi 400\text{mm}$ 의 PC말뚝은 50ton이 大部分이다.

그러나 實際 施工結果를 보면 前述한 急激한 杭打應力 增加로 인하여 말뚝 材料의 破損과 支持力 未達이 發生하고 있다. 이와 같은 地盤條件에 PHC말뚝을 設計하면 N값 50程度인 支持層까지의 貫入이 可能하여 支持力 未達을 防止함은 물론이고 PC말뚝보다 60% 높은 設計를 할 수 있다.

이와 같은 地盤條件에서는 設計의 經濟性 뿐만 아니라 構造物의 安全을 위해서도 PHC말뚝이 使用되어야 한다.

그림2와 같은 地盤條件에서는 PC말뚝을 使用하더라도 構造物의 安全에는 큰 問題가 發生하지 않는다. 이러한 地盤에서는 상당히 큰 周面摩擻力을 期待할 수 있기 때문이다. 特히 最近의 研究結果⁽⁵⁾에 의하면 杭打時에는 큰 抵抗을 나타내 주지 않던 周面摩擻力이 時間經過에 따라 큰 幅의 增加를 보여주고 있어 結果적으로 높은 地盤 支持力을 나타내 주기 때문이다. 卽 PC말뚝에서도 杭打時에는 큰 抵抗을 나타내 주지 않던 周面地盤에서 큰 摩擻力을 얻을

수 있어 높은 地盤支持力을 얻을 수 있다.

그러나 이는 말뚝의 設計荷重 決定의 두가지 要素中 地盤의 支持力에 대한 것으로 이 境遇에는 말뚝材料의 荷重支持能力이 設計를 支配하게 된다.

即 地盤의 支持力은 상당히 높지만 PC말뚝을 使用하면 말뚝材料의 許容範圍인 $125\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上の 設計는 不可能하다. 이와 같은 地盤條件에 PHC말뚝을 使用하면 PHC말뚝의 材料 許容範圍인 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 設計가 可能하며 따라서 보다 經濟的인 設計가 可能하다.

以上에서 說明한 바와 같이 PHC말뚝은 地盤條件과 關係없이 PC말뚝보다 安全하고 經濟的인 設計가 可能함을 알 수 있었다. 그러나 이와 같은 內容은 아직도 實務 技術者들에게 充分히 認識되지 못하고 있으며 따라서 많은 問題點이 解決되지 못하고 있는 實情이다.

4. 長大말뚝 施工 可能性

PHC말뚝이 國內에 普及되기 以前, 既成콘크리트 말뚝 適用의 最大 脆弱點은 이음施工이 不可能하다는 것이었다. 따라서 既成말뚝의 實

務的인 運搬과 施工 限界인 15m보다 깊은 貫入이 必要한 地盤條件에서는 溶接이음이 可能한 鋼管말뚝 使用이 不可避하였다.

PC말뚝의 이음施工이 不可能하였던 가장 致命的인 缺陷은 말뚝 杭打時 發生하는 頭部損傷이었다.

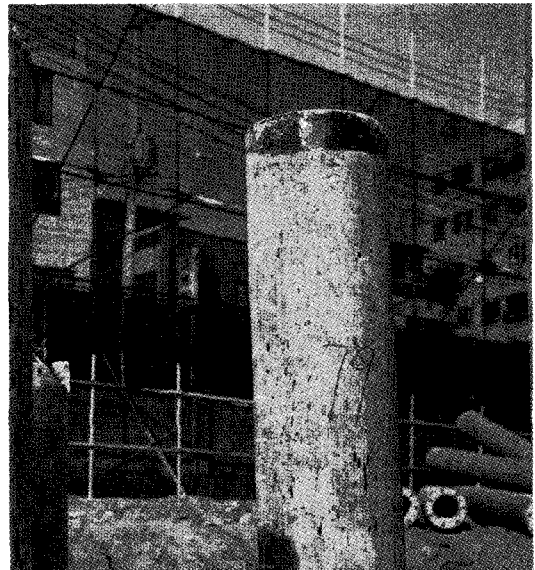
말뚝의 頭部損傷은 말뚝材料의 許容杭打應力을 超過하는 打撃力으로 杭打함으로써 發生한다. 따라서 말뚝材料의 許容杭打應力이 낮은 ($300\text{kg}/\text{cm}^2$) PC말뚝의 境遇 充分한 頭部保護裝置(쿠션)을 使用하더라도 頭部損傷을 防止할 수 없었다. PHC말뚝의 境遇 PC말뚝보다 60% 높은 材質 許容 杭打應力을 갖고 있어 細心한 頭部保護裝置와 施工 品質管理를 並行하면 頭部損傷없이 말뚝을 杭打할 수 있다.

그림3은 國內에서 蔓延되고 있는 PC말뚝의 杭打後 頭部損傷 事例이다. 그림4는 같은 現場에 杭打된 PHC말뚝의 杭打後 頭部狀態이며 頭部損傷이 나타나지 않았음을 알 수 있다.

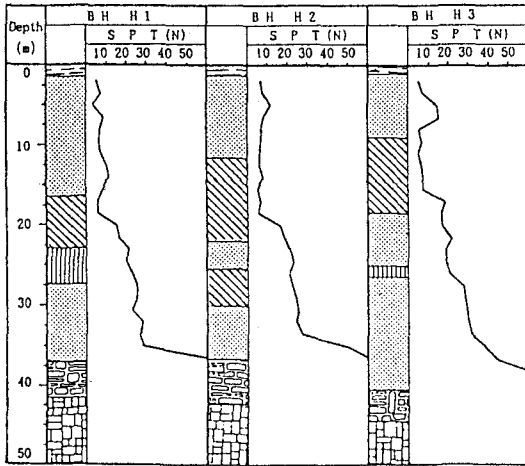
이와같은 PHC말뚝의 長點이 技術者들에게 認識되게 됨에 따라 從來에는 鋼管말뚝으로 設計하는 것이 當然視되던 그림5 또는 그림6과 같은 地盤條件에서도 PHC말뚝을 使用하여 成



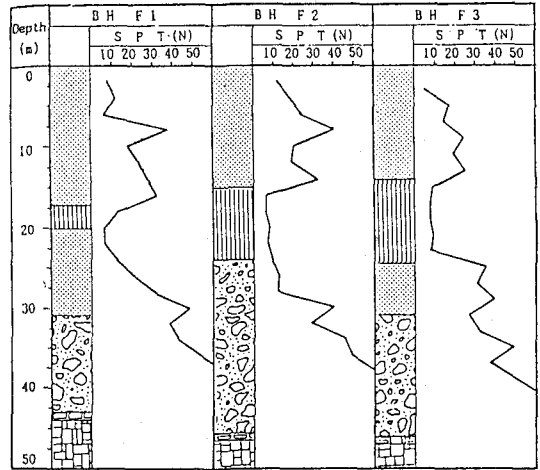
〈그림 3〉 PC말뚝의 頭部損傷



〈그림 4〉 PHC말뚝의 杭打後 頭部



〈그림 5〉 지반조건 (3)



〈그림 6〉 지반조건 (4)

功的인 建設이 可能케 되었다.

그림5와 같은 地盤條件의 境遇, 말뚝의 貫入과 溶接이음에 問題가 없었으나, 그림6과 같이 中間에 堅固한 地層이 나타날 境遇에도 充分한 쿠션 使用과 徹底한 杭打施工管理가 이루어 지면 PHC말뚝 使用이 可能하다.

最近에는 國內 最長말뚝 條件인 60m以上の PHC말뚝 杭打도 成功的으로 試圖되어 向後의 展望을 밝게해 준다.

5. 長大 PHC말뚝의 支持力 特性 (鋼管말뚝 對比)

PHC말뚝이 長大말뚝 條件에 適用되게 됨에 따라 PHC말뚝과 鋼管말뚝의 荷重支持 能力에 대한 關心이 高潮되고 있다.

말뚝基礎의 支持力 異論에 의하면 同一한 地盤條件에서 同一한 깊이까지 同一한 形態의 말뚝을 同一한 施工方法으로 貫入시키면 말뚝 材料에 關係없이 同一한 支持力(地盤의)을 갖는다.

實際 現場에서의 杭打結果 PHC말뚝은 鋼管말뚝과 거의 同等한 杭打施工 貫入성을 갖고 있다. 따라서 말뚝의 支持力 側面에서 PHC말뚝은 鋼管말뚝과 같은 支持力을 갖는 것으로 볼 수 있다.

最近의 研究結果⁶⁾ PHC말뚝은 同一한 地盤에 杭打된 鋼管말뚝보다 先端支持力은 높지만

周面摩擦力은 낮은 것으로 나타나고 있다.

이는 鋼管말뚝은 先端部가 開放된 狀態로 施工되는 데 反하여 PHC말뚝은 先端部가 閉塞된 形態인 것으로 인한 差異이며, 實務의 次元에서는 거의 同等한 支持力을 갖는 것으로 보아도 좋다.

6. 結 言

本稿에서는 PHC말뚝의 杭打施工 貫入性, 長大말뚝 施工성을 알아보고 그 支持力을 比較해 보았다.

PHC말뚝은 從來 國內에서 使用되던 PC말뚝의 短的을 補完할 수 있는 많은 特性을 갖고 있으며 鋼管말뚝을 代替할 수 있는 可能性을 確認할 수 있었다.

그러나 國內의 境遇 이와같은 PHC말뚝의 特性은 充分히 技術者들에게 理解되지 못하고 있으며 따라서 積極 活用되지 못하고 있다. 여기서 PHC말뚝의 長점을 最大限 活用하기 위해서는 PHC말뚝 特性에 適合한 施工方案이 定立되어야 하지만 아직도 過去의 非合理的 施工 慣行이 改善되지 않고 있는 것도 PHC말뚝 普及 擴大에 걸림돌이 되고 있다.

PHC말뚝이 그 特性을 充分히 認定받고 效果的으로 活用되기 위해서는 그 特性에 가장 適合한 施工指針을 早速히 樹立하고 이를 널리 弘報하여 技術者들의 理解를 增進시켜야 하겠다. ▲