

## 負摩擦力 低減 말뚝基礎의 設計와 施工

李 長 五\*

### 1. 머리말

最近에 臨海埋立地에 建設되는 構造物이 많아 짐에 따라 말뚝基礎에 作用하는 負摩擦力(negative skin friction)이 큰 問題中의 하나로서 대두되게 되었다. 負摩擦力은 構造物의 設計荷重以外로 말뚝을 아래 方向으로 끌어 내리는 힘(downdrag force)으로서 地盤沈下에 따라 말뚝과 말뚝 先端地盤에 追加荷重으로 作用하는 것이다. 이 負摩擦力은 地盤에 따라서 大端히 큰 값으로 되는 境遇가 있으며 이러한 境遇에는 常識的인 設計가 困難하게 된다. 그러므로, 이러한 境遇의 對策으로서 負摩擦力을 減少시킬 수 있는 여러가지의 方法이 檢討되고 實用化의 研究가 進行되고 있으며, 그中의 하나가 말뚝表面에 特殊한 瀝青材料(slip layer compound)를 塗布한 “Slip Layer 말뚝(以下 SL 말뚝)”이다. 이 SL 말뚝은 瀝青材料의 粘彈性的 特性을 利用하여 負摩擦力을 低減시키는 말뚝으로서 日本에서는 1976年頃 實用化되어 널리 使用되고 있으며, 우리나라에서는 光陽製鐵所의 1期 設備工事에서 처음 使用하였다.

瀝青材(bitumen)를 塗布하여 負摩擦力을 低減시키는 方法은 Bjerrum, Johannesson & Eide (1969) 등의 本格的인 研究로 始作하여 여러 研究者들의 實驗結果, 그 低減效果가 있음이 立證되었다. 低減效果는 大體的으로 80%~90%로 減少되었다고 提示하고 있으며, 低減效果에 큰 影

響을 미치는 要素로서는 말뚝 取拔時의 瀝青材의 損傷과 瀝青材의 硬度 및 말뚝의 斷面形狀等이며, 地盤의 壓密係數나 瀝青材의 塗布두께 等은 크게 問題가 되지 않는다고 한다.

以下, 光陽製鐵所에서 使用한 鋼管 SL 말뚝基礎의 設計와 施工에 對하여 記述하며, 記述되지 않은 事項은 一般的으로 使用되고 있는 鋼管 말뚝基礎의 設計 및 施工法과 같다.

### 2. SL 말뚝의 概要

SL 말뚝은 鋼管말뚝 外周面에 塗布된 滑動層(slip layer)의 剪斷變形에 依하여 말뚝에 傳達되는 負摩擦力을 低減시키는 말뚝이다. 滑動層은 Shell 石油(株)에서 開發한 特殊한 瀝青材인 “SL Compound”를 6mm 以上の 두께로 塗布한 것으로서 말뚝 打入時 等の 아주 짧은 載荷時間에 對해서는 彈性的인 舉動을 나타내고 地盤沈下와 같은 아주 긴 載荷時間에는 粘性流體로서의 舉動을 나타내는 特性을 가지고 있다. SL 말뚝의 負摩擦力 低減原理는 이와같은 滑動層의 粘彈性的인 特性을 利用한 것이다. . 말뚝의 構成은 圖-1에 表示한 바와 같이 鋼管말뚝의 表面에 滑動層의 接着性을 向上시키기 위하여 Primer를 塗布하고, 그위에 SL Compound를 塗布한 다음 White Wash나 SL Guard 800 또는 Vinylon clothe 等の 保護材料로서 滑動層을 保護한 것이다. 圖-2는 SL 말뚝의 一般圖이며, SL Compound 塗布部의 最下端部에는 말뚝打入時의 塗

\* 正會員, 製鐵엔지니어링(株) 常務理事

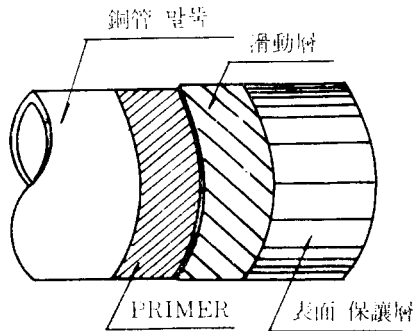


圖-1. SL 말뚝의 構成圖

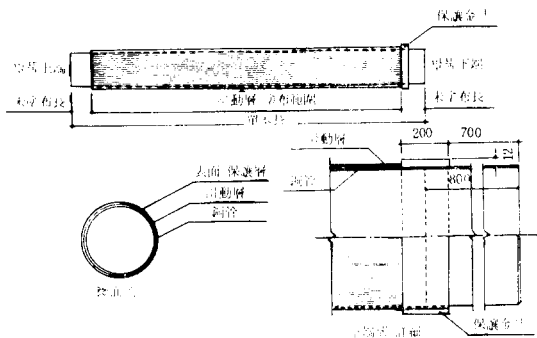


圖-2. SL 말뚝의 一般圖

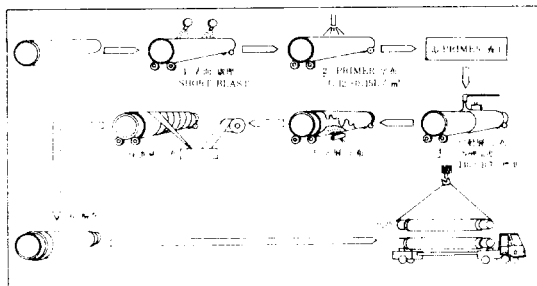


圖-3. SL 말뚝의 造製工程 概要圖

布層의 剝離와 損傷을 防止하기 爲한 保護金具를 設置한다. 圖-3은 SL 말뚝의 製造工程의 概要를 圖示한 것이다.

### 3. SL 말뚝基礎의 設計

#### 1) 設計 順序

SL 말뚝基礎의 設計는 一般 말뚝基礎의 設計法과 基本的으로는 같으며, 地盤의 沈下速度와 滑動層의 材料 및 두께等에 影響을 받는 殘留 負

摩擦力의 算定이 重要하고, 그 設計 順序를 flow chart 로 나타내면 圖-4 와 같다.

#### 2) 負摩擦力의 檢計

말뚝에 作用하는 負摩擦力에 對한 檢計方法은 各 設計基準에 따라서 若干의 差異가 있으나, 말뚝머리에 作用하는 荷重과 負摩擦力에 對하여 말뚝 自體의 強度와 말뚝 先端地盤의 支持力에 關한 安全性을 確認하는 것이다. 即, 負摩擦力에 對한 檢計는 다음 두 式을 모두 滿足하여야 한다.

$$(P+P_{nf})/A_p \leq \sigma_{fa} \dots\dots\dots(1)$$

$$P+P_{nf} \leq (R_{up}+R_f)/F_s \dots\dots\dots(2)$$

여기서,  $P$ ; 말뚝머리에 作用하는 長期荷重(ton)  
 $P_{nf}$ ; 負摩擦力에 依하여 發生되는 말뚝의 最大軸力(ton)

$A_p$ ; 말뚝의 實斷面積( $m^2$ )

$\sigma_{fa}$ ; 말뚝材料의 短期許容 應力度( $t/m^2$ )

$R_{up}$ ; 말뚝 先端地盤의 極限支持力(ton)

$R_f$ ; 말뚝周面의 正摩擦力에 依한 支持力(ton)

$F_s$ ; 安全率( $F_s = 1.2$ )

但, 地震時 等の 短期荷重에 對하여는 負摩擦力을 考慮하지 않고 있으며, 單말뚝(Single pile)에서의  $P_{nf}$  및  $R_f$ 는 다음 式으로 算定한다.

$$P_{nf} = \phi \int_0^{L_n} \tau \cdot dz \dots\dots\dots(3)$$

$$R_f = \phi \int_{L_n}^L \tau \cdot dz \dots\dots\dots(4)$$

여기서,  $\phi$ ; 말뚝周長(m)

$\tau$ ; 말뚝의 周面摩擦力( $t/m^2$ )

(一般的인  $\tau$  值 · 粘性土:  $\tau$

$$= K \cdot \tan \phi_a \cdot \sigma_v = (0.2 \sim 0.35) \sigma_v$$

· 砂質土:  $\tau$

$$= 3 + N/5)$$

$\sigma_v$ ; 有效上載荷重(effective overburden pressure)

$N$ ; 標準貫入試驗의  $N$ 值

$L_n$ ; 말뚝머리부터 中立點까지의 距離(m) (摩擦말뚝, 不完全支持 말뚝(先端  $N$  值  $\leq 20$ )의 境遇;  $L_n = 0.8La$

모래 또는 Sandy Gravel 層中에 支持된 支持말뚝의 境遇;  $L_n = 0.9La$

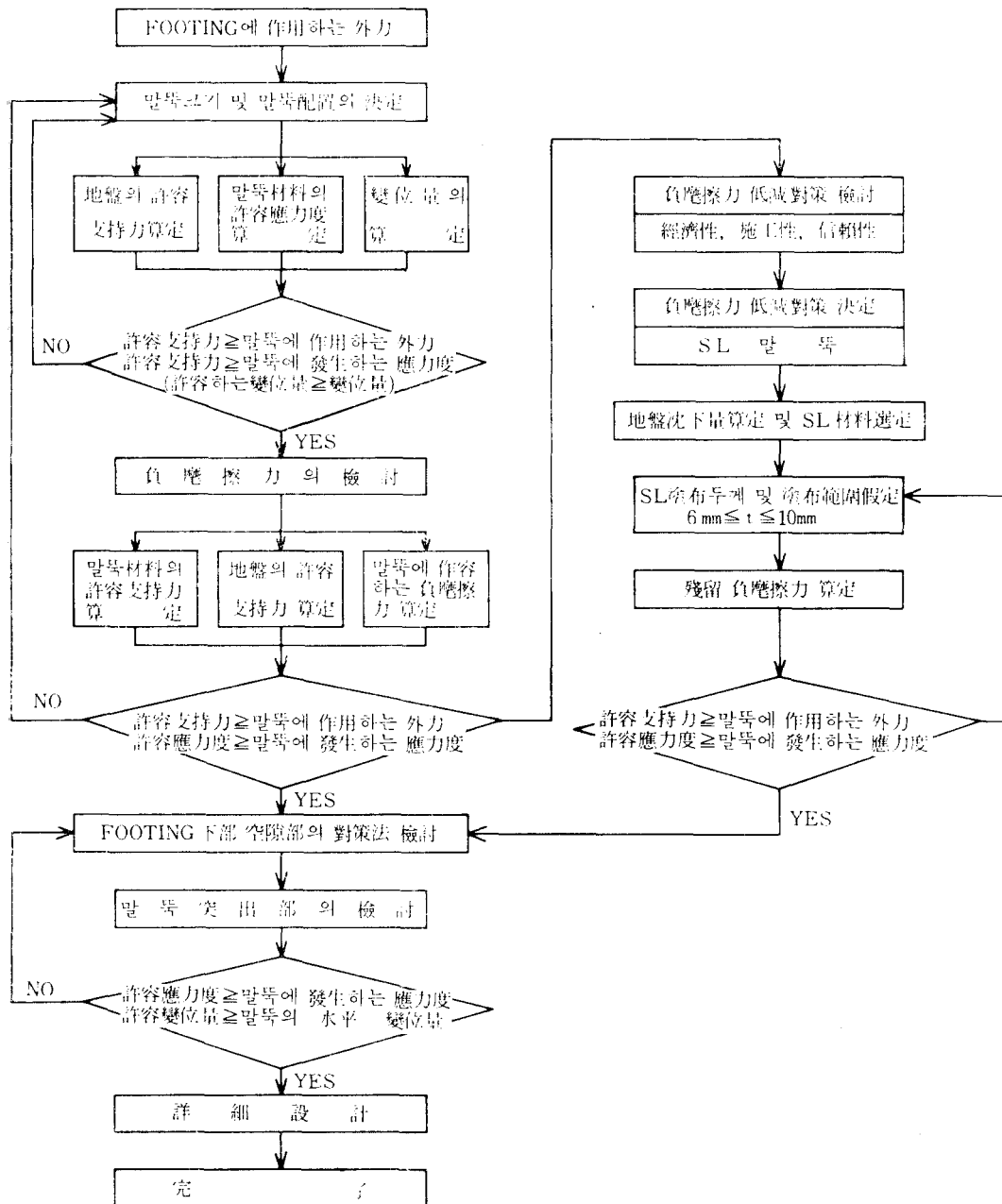


圖-4. SL 말뚝基礎의 設計 Flow chart

岩盤 또는 단단한 토층에 支持된 支持  
 持말뚝의 境遇;  $L_n=1.0L_a$ )

$L_a$ ; 壓密層 下端까지의 深度(m)

$L$ ; 말뚝의 全長(m)

### 3) SL 말뚝의 設計

#### (1) 塗布材料의 示方

##### ① Primer

말뚝과 滑動層의 接着性を 견고히 하기 爲하여 바탕치리 한후 말뚝表面에 塗布하는 Primer는 Shell 石油(株) 製品的 “SL Primer”를 使用하며 그 特性은 表-1과 같다.

表-1. SL primer 의 特性

區 分	範 圍
粘度, 25°C	35~55C.P
比重, 25/25°C	0.900~1.000
引火點(P.M.C.C)	21°C 以上
固 型 分	45~60%
溶 劑	40% 以上

##### ② 滑動層 材料

SL Compound 에는 感溫性이 다른 A, B, C, D의 4 가지의 grade 가 있으나, 年間 平均 氣溫이

表-2. SL Compound B-grade 의 材料特性

軟火點 (°C)	針入度 (1/10mm)	PI	Stiffness 係數(t/m <sup>2</sup> )					
			말뚝打入時(t=0.01秒)			1年後(t=3×10 <sup>2</sup> 秒)		
			10°C	15°C	20°C	10°C	15°C	20°C
65~75	40~60	+1.4	10°C	15°C	20°C	10°C	15°C	20°C
		+3.2	4×10 <sup>3</sup>	2.5×10 <sup>3</sup>	1.5×10 <sup>3</sup>	80×10 <sup>-4</sup>	25×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>

表-3 表層溫도와 貯藏期間에 따른 適正 保護層 材料

貯藏期間		表層溫度				
		10°C 以下	10~20°C	20~30°C	30~40°C	40~50°
1 週	間	無 塗 布	White Wash 塗布		SL Guard 800, vinylon clothe 또는 span bond 마름	
2 週	間	White Wash	SL Guard 800 塗布			
3 週	間	塗 布				
4 週	間					
5 週	間					
6 週	間					

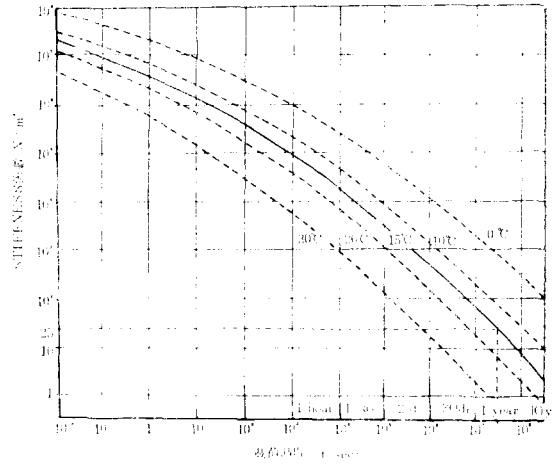


圖-5. 載荷時間과 stiffness 係數와의 關係

15°C 前後를 對象으로한 B-Grade 를 一般的으로 使用하고 있다. B-Grade 의 材料特性은 表-2와 같으며 載荷時間과 stiffness 係數와의 關係는 圖-5와 같다.

##### ③ 保護層의 材料

保護層 材料는 White Wash 나 Shell 石油(株) 製品的 “SL Guard 800” Vinylon clothe, Span bond 등을 使用하며, 長期 保管時에 滑動層의 流動變形 및 損傷을 防止하기 爲한 것이다. 이 材

料의 選定 標準은 表-3과 같으며, 外氣溫度가 낮은 境遇나 SL 말뚝의 貯藏期間이 길지 않은 境遇에는 保護層을 塗布하지 않아도 된다.

(2) SL Compound의 塗布두께

SL Compound의 塗布두께(滑動層의 두께)는 一般의으로 6~10mm가 適當하다. 5mm以下의 얇은 두께의 境遇에는 損傷으로 因하여 負摩擦力의 低減效果가 적게 되고, 11mm以上으로 두꺼운 境遇에는 保管時에 發生하는 流動變形이 크게 되기 때문이다. SL Compound의 塗布두께는 現場條件을 考慮하여 SL Compound의 grade를 決定한 다음, 말뚝에 傳達되는 殘留 負摩擦力, 말뚝 打入時에 發生하는 變形量, 保管中에 發生하는 流動量의 3가지 項目에 對하여 各各의 條件을 滿足하도록 決定하지만, 一般的으로 殘留 負摩擦力의 크기로 부터 SL Compound의 設計두께가 決定된다. 이의 設計두께에 對해서는,

- 흙中에 있는 물이나 酸素의 影響을 받아 表面이 多少 酸化되고,

- 土壓에 依하여 SL Compound 層속으로 土砂가 滲어 들어가게 되어 Asphalt의 特性이 變하는 것.

等を 考慮하여 殘留 負摩擦力으로부터 計算된 塗布두께에 2mm 程度의 餘裕두께를 加算하여 設計두께로 한다. 光陽製鐵所에서 使用한 SL 말뚝은 B-Grade의 SL Compound를 使用하였으며, 設計 塗布두께는 4mm에 餘裕 2mm를 加算하여 6mm로 하였다.

(3) SL Compound의 塗布 範圍

SL Compound의 塗布範圍는 負摩擦力의 크기에 따라 決定되므로 負摩擦力이 作用하는 全 區間에 塗布하거나 負摩擦力이 큰 區間에만 塗布하게 된다. 一般的으로 말뚝길이 가 긴 鋼管말뚝의 境遇에는 말뚝을 上杭, 中杭, 下杭으로 나누어 打入하게 되므로 中杭에 SL Compound를 塗布하고, 上杭과 中杭에는 塗布하지 않는다. 上杭은 말뚝 頭部處理를 위함이고, 下杭은 正摩擦力에 依한 支持力을 얻기 위함이다. 또한, 中杭에 塗布하는 SL Compound도 말뚝端部 50cm 程度에는 現場熔接 및 Handling 등을 考慮하여 塗布하지 않는다. 그러므로 말뚝 이음部分에는

負摩擦力이 低減되지 않으므로 設計時에는 반드시 이를 考慮하여 殘留 負摩擦力을 算定하여야 한다.

(4) 殘留 負摩擦力 算定

SL compound를 塗布한 區間에 對한 殘留 負摩擦力은 地盤沈下量, SL Compound의 塗布두께 및 地中溫度에 影響을 받으며 Asphalt의 粘彈性的 性質로부터 다음과 같은 關係성이 成立된다.

$$\tau' = \frac{s \cdot d}{3 \cdot h} \dots \dots \dots (5)$$

여기서,  $\tau'$ ; 剪斷應力(殘留 負摩擦力) ( $t/m^2$ )  
 $s$ ; SL Compound의 stiffness 係數(表-2 參照) ( $t/m^2$ )  
 $d$ ; 變位量(말뚝周邊 흙의 沈下量) (m)  
 $h$ ; SL Compound의 塗布두께(m)

圖-6은 SL Compound는 B-grade를 使用하고 地中溫度가 15°C일 境遇에 對하여 地盤沈下量 및 SL Compound 塗布두께와 殘留 負摩擦力과의 關係를 나타낸 것이다.

殘留 負摩擦力은 (5)式에서 알 수 있는 바와 같이 地盤 沈下速度에 比例하여 增加하고 SL Compound 두께에 反比例한다. 地盤沈下는 地面에서 最大值로 되고 深度가 깊어짐에 따라 減少하므로 實際의 殘留 負摩擦力의 分布는 深度가 깊어짐에 따라 減少하게 될 것이다. 그러므

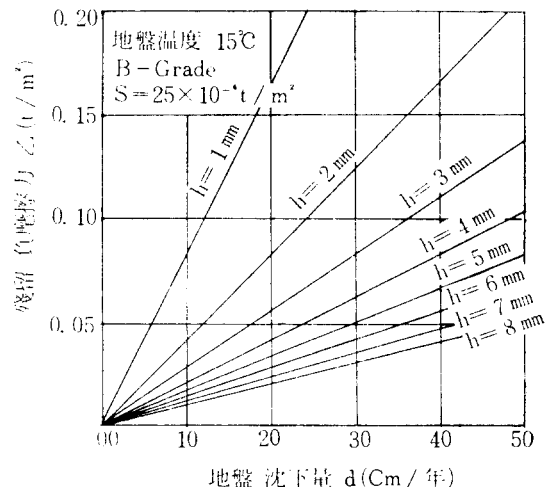


圖-6. 地盤 沈下量 및 SL compound 두께, 殘留 負摩擦力과의 關係

로 殘留負摩力을 算定할 때 地盤沈下量을 地表面沈下量으로 適用하인 安全側의 設計로 된다 또한, 地盤沈下量은 時間의 經過에 따라 적어지므로 말뚝 施工時의 初期 沈下量으로 殘留負摩力을 算定하면 이것도 또한 安全側의 設計로 된다. 지금까지 記述한 바와 같이 地中溫度, 地盤沈下量, SL Compound의 두께 등으로 부터 SL Compound 塗布區間의 殘留負摩力을 算定하고, 現場 熔接部 등의 未塗布 區間에 對한 負摩力等을 算定하여 前述한 (1) 및 (2) 式으로 말뚝 本體의 強度와 말뚝 先端地盤의 支持力에 對한 安全性을 檢討하면 된다.

#### 4. SL 말뚝의 施工

SL 말뚝의 施工方法 및 Hammer의 選定等은 一般的으로 使用하고 있는 말뚝의 境遇와 同一하지만, SL 말뚝은 負摩力의 低減性能을 最大限으로 發揮시키기 爲해서는 SL 말뚝의 特性을 充分히 考慮하여 取扱해야 한다. 그러므로 여기서는 SL 말뚝의 取扱上 特히 留意할 事項에 對해서만 記述한다.

##### 1) SL 말뚝의 運搬

SL 말뚝을 運搬할 때에는 SL Compound 層이 부드러우므로 다음과 같은 配慮가 必要하다.

① SL Compound의 塗布 範圍에는 말뚝이 서로 억누르지 않고 다른 材料가 直接 接觸하지 않도록 適切한 間隔을 維持시켜야 한다.

② SL Compound의 塗布 範圍에는 받침목, 썬기목, 接觸 防止材 및 Wire等을 直接 接觸시키지 말아야 한다. 부득이 하여 SL Compound의 塗布 範圍에 接觸시킬 境遇에는 緩衝材(고무판 등)를 使用한다.

③ SL Compound의 塗布 範圍 위에는 걸어 다니지 말아야 한다.

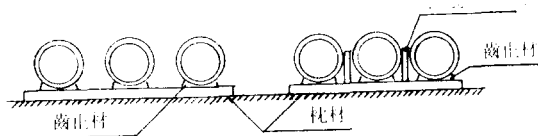


圖-7. 받침목 및 썬기목설치

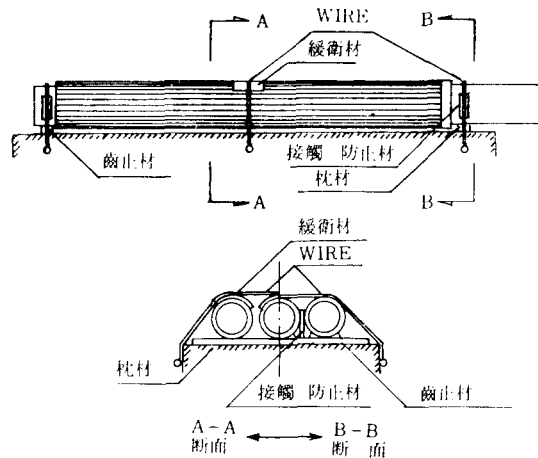


圖-8. 말뚝運搬時 固定裝置說明圖

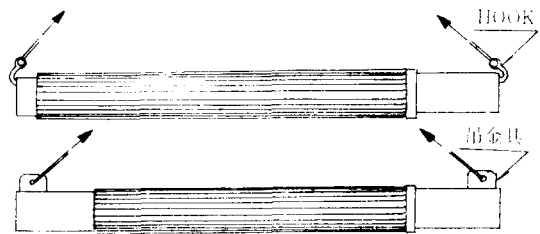


圖-9. 말뚝取扱時의 Hook 使用 및 串金具設置圖

④ SL 말뚝을 끌어올릴 때에는 兩端에 Hook를 걸든가 끌어 올리는 金具를 附着시켜 이를 利用하여야 한다.

⑤ SL 말뚝을 運搬할 때에는 積材된 것이 미끄러지지 않도록 堅固하게 固定시켜야 한다.

##### 2) SL 말뚝의 保管

SL Compound 層은 時間의 經過와 함께 流動變形을 일으키고, 溫度가 높거나 長期間 保管하게 되면 流動變形이 顯著하게 된다. 이러한 特性을 考慮하여 保管時에는 다음과 같은 配慮가 必要하다.

① 保管場所를 整理하고 SL 말뚝이 直接 地表面에 닿지 않도록 받침목위에 놓는다. 받침목의 位置는 未塗布部 또는 運搬時의 支持點과 같은 곳을 利用하여 받침목에 依하여 損傷이 일어나는 곳을 限定시킨다.

② SL 말뚝의 포개서 쌓지 않는 것이 原則이며 通風이 잘 되는 곳에 保管하여야 한다.

③ SL 말뚝의 現場 保管時期는 1週間 以內가

原則이며, 現場 搬入後 바로 施工하는 것이 바람직하다.

④ 여름의 高溫時에는 溫度 上昇에 依한 SL compound 層의 流動 變形을 極力防止하기 爲하여 撒水를 하거나 通風이 잘 되는 덮개를 使用하여 直射日光을 받지 않도록 한다.

### 3) SL 말뚝의 打入

SL 말뚝의 세우기 및 打入할 때에는 다음 事項을 配慮하여야 한다.

① 保管 場所에서 말뚝 打入位置까지의 移動은 반드시 小運搬用 Crane 을 使用하여 SL 말뚝을 옆으로 놓여진 그대로 地表面의 위로 끌어 올리고 SL Compound 層에 損傷을 주지 않도록 注意한다.

② SL 말뚝을 세울 때에는 들어 올리는 金具를 使用한다.

③ 地表面 가까이 있는 단단한 모래 자갈층이나 轉石等の 地中 障害物이 있는 境遇에는 이것을 撤去하고 打入한다.

④ 外氣溫度가 낮은 境遇에는 打擊에 依한 衝擊으로 SL Compound 層이 부서지게 되어 균열 또는 剝離가 일어날 可能性이 있으므로 外氣溫度 5°C 以下에서는 打入하지 않는 것이 좋다.

### 4) SL Compound 層의 補修

SL 말뚝은 前述한 바와같이 充分히 注意하여 取扱하면 負摩擦力의 低減效果가 減少될 程度까지의 損傷은 發生하지 않을 것이다. 그러나, 取扱過程에서 SL Compound 層에 有害한 損傷이 發生 할 때에는 말뚝打入 前에 補修하여야 한다. 一般的으로 SL Compound 의 塗布 範圍에는 받침목이나 Wire 가 맞닿아 凹部가 發生하는 境遇에는 SL 말뚝의 性能에는 거의 影響이 없으므로 特別한 境遇를 除外하고는 補修할 必要가 없다. 그러나, 말뚝이 서로 억눌러져 接觸되거나 銳角으로 단단한 것과 接觸하게 되어 SL Compound 層이 다음의 (A), (B)와 같은 狀態로 된 境遇에는 SL 말뚝 打入時에 SL Compound 層이 剝離하는 原因이 되어, 負摩擦力 低減效果에 支障을 주므로 반드시 補修하여야 한다.

(A) 鋼管 表面깊이까지 損傷되고, SL Comp-

ound 層이 鋼管 表面에서 들떠있는 狀態로 된 境遇

(B) 鋼管 表面 깊이까지는 損傷되지 않았으나, 그 損傷 크기의 幅 및 길이가 말뚝徑의 2分の 1 以上인 境遇.

SL Compound 의 補修 順序는 다음과 같다.

① 損傷된 部分을 칼 등으로 切取하고, 鋼管 表面을 wire brush 등을 使用하여 清掃한다.

② 鋼管表面을 gas burner 등으로 乾燥시키고 그위에 SL Primer 塗布하고, 補修用 SL Compound 를 加熱溶融시킨다.

③ SL Primer 가 乾燥한 것을 確認한 후 미리 加熱溶融된 SL Compound 를 補修 個所에 流入시켜 加熱된 鋼製 인두 등으로 平坦하게 所定의 두께로 整形한다.

## 5. 맺는말

以上으로 말뚝基礎에 作用하는 負摩擦力에 對한 對策工法中的 하나인 SL 말뚝基礎의 設計와 施工에 關하여 紹介하였다. 負摩擦力이 그다지 크게 作用하지 않는 말뚝基礎에서는 말뚝의 直徑 및 두께를 增大시키거나 材質을 높여서 어느 程度까지는 經濟的으로 解決할 수 있으나, 負摩擦力이 아주 크게 作用하는 말뚝基礎에서는 말뚝 外周面積에 比例하여 負摩擦力은 커지고 말뚝 製作上 말뚝 두께를 어느 두께 以上까지 增大시킬 수 없으므로 前述한 (1)式 및 (2)式에 依한 負摩擦力에 對한 檢討가 成立되지 않으므로 設計가 不可能하게 된다. 이러한 境遇에 있어서의 SL 말뚝은 다른 對策工法보다 優越性이 있으며 效果的이다. 光陽製鐵所에서 使用한 SL 말뚝은 1期 및 2期 設備工事に 55,700m 를 使用하였으며, 아직까지 이에 對한 問題點은 發生되지 않았다. SL 말뚝을 包含하여 瀝青材料를 塗布한 말뚝에 對한 負摩擦力의 低減效果에 對해서는 여러 研究者의 實驗結果, 80~90%의 低減效果가 있음이 立證되었으며 光陽製鐵所에서도 이를 確認하기 爲한 實驗이 實施中에 있다.

SL 말뚝의 負摩擦力 低減效果에 크게 影響을 미치는 要素는 瀝青材料의 硬度和 말뚝 取扱時의 損傷이므로 瀝青材料(SL Compound)의 品質

이 중요하고, 取扱時에는 SL Compound 塗布部가 損傷되지 않도록 充分한 配慮가 必要하다.

또한, 土層中에 모래자갈층이나 轉石 等の 단단한 土層이 있는 境遇에는 반드시 Friction cut 等の 施設을 設置하여야 하며, 5°C 以下の 溫度에서는 말뚝 打入工事を 實施하지 않는 것이 좋다. 故으로, 이 資料가 말뚝에 作用하는 負摩力때문에 苦心하고 있는 技術者들과 現場에서 SL 말뚝을 取扱하는 技術者들에게 多少의 도움이 되길 바란다.

#### 參 考 文 獻

1) 浦項綜合製鐵(株); 光陽製鐵所 基礎杭打 및 載

荷試驗報告書, 1984. 12.

2) 金明模, 李長五; 光陽工業團地造成에 關한 土木工學심포지움, 말뚝의 負摩力, 1988. 5.

3) 日本鋼管杭協會; SL ぐい製品仕様書

4) 日本鋼管杭協會; 鋼管杭, その設計と施工, 1983.

5) 日本鋼管(株)技術資料; SL パイルネガティブフリクションを低減する新しいぐい, 1977.

6) 新日本製鐵(株); SLP, ネガティブフリクション對策 鋼管 SL 杭, 1985.

7) 總合土木研究所; 基礎工, NF 低減杭の設計と施工, Vol. 11, No. 4, 1983.