

## 軟弱地盤改善工法 (I)

— paper drain 工法 —

姜 父 默\*

## I. 序 言

Paper drain工法은 Sand drain工法과 같이 軟弱地盤의 壓密을 促進시키기 爲한 것으로 1937년에 스웨덴에서 W. Kjellman에 依하여 研究開發된 Card board를 使用한 壓密排水工法을 말한다. 그 後 이 工法은 벨기에 에서 施工한 例가 있었으나 別로 使用되지 않고 約 30年이 經過하였다. 最近에는 臨海工業團地의 軟弱地盤安定處理에서 Sand drain用의 모래를 入手하기 固難하여 이 工法이 使用되고 있다. 日本에서는 1963년에 이 工法을 導入하여 實用化하고 있으며 우리나라에서는 1977년에 昌原工業團地에서 試驗施工한 記錄이 있다.

이 Paper drain 工法の 長점은 大略 다음과 같은 것들을 들 수 있다.

- (1) 打設할때 地盤을 攪亂 시키지 않는다.
- (2) 斷面은 길이에 關係없이 一定하다.
- (3) 途中에서 切斷되지 않고 有效하게 作用한다.

이 工法은 Sand drain工法과 比較하면 軟弱地盤의 壓密排水를 爲하여 鉛直drain으로서 Sand pile代身에 Card board를 使用한것으로 그의 合理性이나 經濟性으로 보아 軟弱地盤의 安定處理에 이 工法이 많이 使用될것으로 믿어진다. drain paper의 斷面形狀은 地盤의 攪亂을 可能한 限 작게하고 또 排水效果를 考慮해서 一般的으로 幅 10cm, 두께 3mm의 것이 使用되고 있다. Sand drain에서도 地盤의 攪亂을 작게 하기 爲해서는 Sand pile의 直徑을 작게 하는 것이 現想的이나 Sand pile의 直徑을 너무 작게 하면 施工中에 切斷되거나 粘土가 侵入되어 排水能力이 減소되는 것으로 實際의 問題로서 25cm以下로 하는 것은 固難하다.

幅 10cm, 두께 3mm의 Card board를 使用하던 直徑 5cm의 Sand pile에 相當하는 것으로 報告되어 있다. 特히 Sand pile의 形態를 維持하기 固難할 程度로 水分含量이 많은 超軟弱地盤에서는 이 工法이 아니고서는 確實한 施工이 어려울것으로 생각된다. 또 工程面에서도 Sand pile을 打設하는 것보다 빨리 施工할 수 있고 地盤의 攪亂도 아주 작으며 이 材料가 工場生産品이므로 品質管理가 容易하고 大量生産에 의한 原價節減이 期待되므로 이 工法の 實用化가 더욱 期待된다.

## II. Drain Paper의 特性

drain paper는 施工中 또는 施工後 地盤의 變化에도 切斷되지 않을 程度의 強度를 지니고 있어야 하며 透水性도 좋아야 한다 또한 drain paper는 濕潤狀態로 되면 그의 強度가 低下되므로 이것을 防止하기 爲하여 팔프纖維를 에폭시 樹脂, 尿素樹脂, 메라닌樹脂等の 高分子劑로 Coating해서 使用하고 있으며 地中에서 長期間 썩지 않는 材料를 使用해야 한다. 따라서 drain paper는 다음과 같은 條件을 具備해야 한다.

- (1) 周圍의 地盤보다 透水性이 커야한다.
- (2) 時間이 經過함에 따라 透水性의 變化가 없어야 한다.
- (3) 施工中 또는 打設後의 地盤變形에도 切斷되지 않을 程度의 強度를 갖어야 한다.
- (4) 地盤中에서 周圍로부터 눌려도 쭈그러지지 않아야 한다.

이와같은 條件을 具備하는 여러가지 材料가 現在도 研究考案되고 있는 實情이다. drain paper의 性質에 對하여는 數值的으로 明確한 값을 表記하는 것은 어려운 일이나 1960年代까지 使用되었던 것의

\*忠南大學校 農科大學

概略値를 들면 다음과 같은 範圍內的 것으로 되어 있다(4).

- 空氣乾燥狀態의 引張強度.....300~500kg
- 24時間 浸水時의 引張強度.....150~250kg
- 透水係數..... $10^{-5} \sim 10^{-6}$  cm/sec.
- 종이의 密度.....0.45~0.6 g/cm<sup>3</sup>

그림-1 및 그림-2에 表示한바와 같은 drain paper는 幅 10cm, 두께 1.5mm의 두터운 종이에, 幅 3mm內外, 길이 1~2mm內外의 溝를 만든 종이를

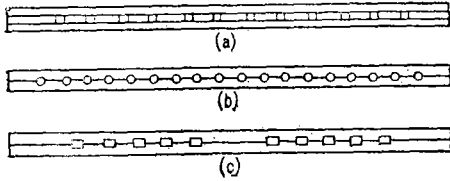


그림-1. Drain paper의 斷面

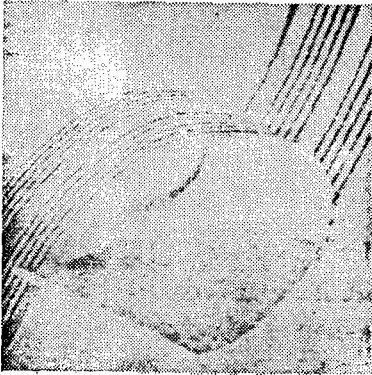


그림-2. Drain paper

Section of Castle Drain Board

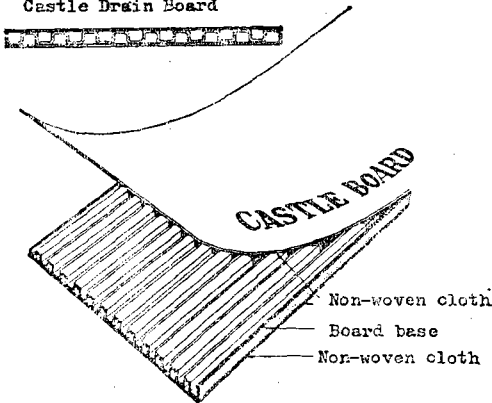


그림-3. Castle Drain Board

2枚 合쳐서 만든 것이다. 이때에 종이가 吸水膨脹하여 구멍(溝)을 메우거나 地中에서 壓力을 받아서 排水能力이 低下되고 drain中에 間隙水壓이 發生하게 되므로 吸水膨脹에 의한 排水能力 低下와 2枚의 종이를 합치는데 必要한 接着劑等에 對한 研究가 試圖되었다. 1970年代에는 팔프纖維에 의한 drain paper가 아니고 그림-3과 같은 高分子劑 製品을 使用하여 強度가 높고 耐久性이 큰 drain材料가 研究 開發되었다.

우리나라에서 1977년에 昌原 工業團地에서 施工한 drain board는 그림-4와 같은 斷面을 갖는 Castle Drain Board가 使用되었다. 이 Costle drain board의 透水係數는  $10^{-2}$ cm/sec 以上, 強度는 240kg/94mm 以上(1枚의 幅94mm), 水沒時의 強度는 240kg/94mm 以上으로 溝의 크기는 2.0mm×1.5mm×36이다.

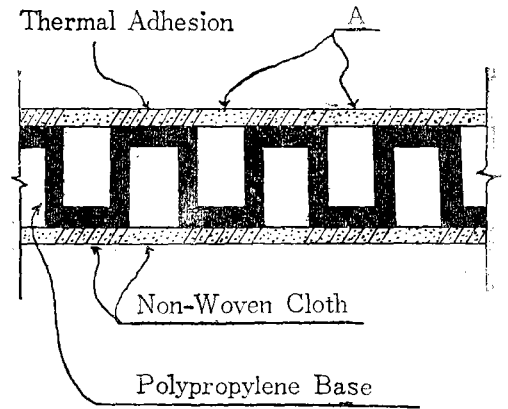


그림-4. Castle drain board의 斷面

그림-6은 castle drain board를 軟弱地盤中에 打設한 後 壓密에 의하여 沈下現象이 이러난 地層의 斷面을 나타낸 것이다.

地中에서 土壓의 變化에 따른 各種 drain paper의 透水性의 變化를 調査한 例를 들면 그림-7과 같다. 그림-7에서 나타남과 같이 Castle drain board는 壓密에 의한 壓力에 關係없이 一定한 透水係數를 나타내고 있다.

### III. Paper Drain工法の 設計

paper drain의 設計는 sand drain의 設計와 같은 方法으로 한다. 따라서 計算의 便宜上 平偏한 斷面을 갖는 drain paper를 圓形斷面을 갖는 圓柱로 假

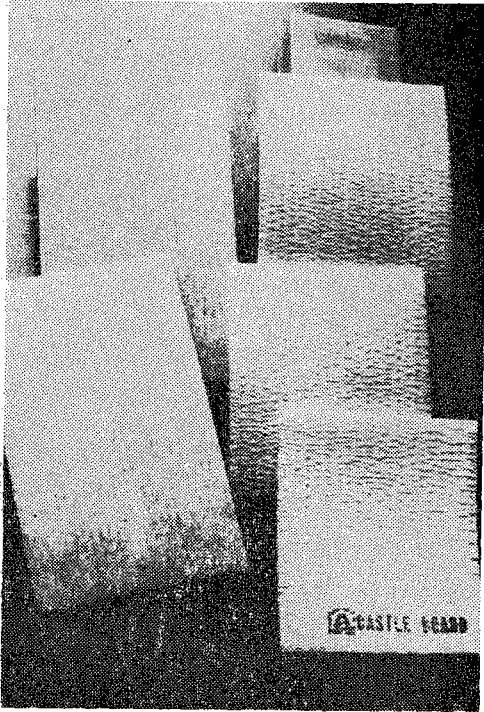
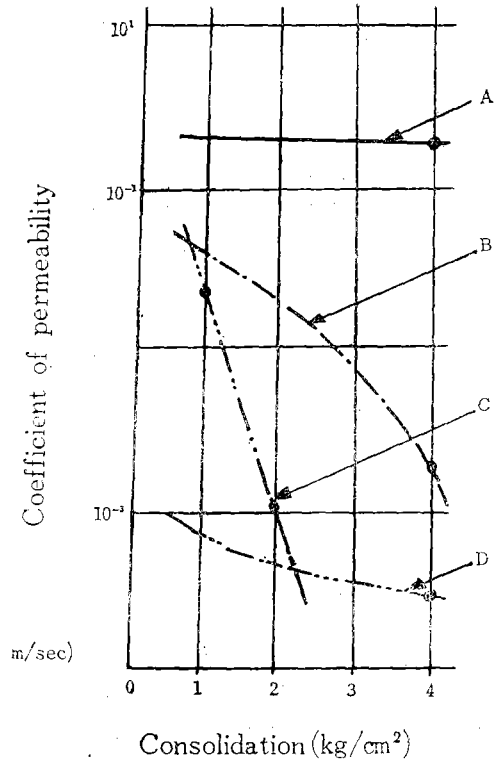


그림-5. Castle drain board



A- Castle Drain Board

The permeability does not vary even if the soil Pressure increases

B- Boards similar to Castle Boards

The permeability decreases as the soil pressure increases; the permeability becomes zero below soil pressure of 4kg/cm²

C- Drain Paper

The permeability decreases rapidly with increase in soil pressure.

D- Cotton drain material

The permeability is too low.

그림-7. Drain paper의 透水係數



그림-6. 地중에 打設된 Castle board의 斷面

定하여 設計한다. kjellman이나 kallstenius는 實驗과 經驗으로부터 다음과 같은 換算式을 提案하고 있다. 即 drain paper의 等價換算圓의 直徑을  $D$ 라고 하면 drain paper의 幅  $A$  및 두께  $B$ 로부터 다음과 같은 等價換算圓의 지름이 計算된다.

$$D = d \frac{2A + 2B}{\pi} \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 形狀係數로서 Kallstenius는  $\alpha=0.75$ 를 使用하였다.

現在使用되고 있는 drain paper는 大略  $A=10\text{cm}$   $B=0.3\text{cm}$ 이므로 다음과 같이 直徑 5cm의 sand drain과 같은 排水效果가 있는것으로 생각할 수 있다.

$$D=0.75(20+0.6)/3.14 \div 5(\text{cm})$$

따라서 paper drain을 設計할때는 Sand drain工法에서 使用한 Barron의 圖表<sup>(6)</sup>를 使用해서 容易하게 設計되나 普通 Sand drain의 경우는 排水의 有效徑  $d_e$ 와 Sand pile의 直徑  $d_w$ 의 比가  $n = \frac{d_e}{d_w} = 20$ 까지는 圖表에 되어 있으므로 幅 10cm, 두께 3mm의 paper drain을 1m間隔으로 配置할때는 計算이 可能하나 paper drain을 1m以上の 間隔으로 配置할때는 Barron의 圖表는 使用할 수 없다. 따라서 paper drain의 設計에서 쉽게 使用할 수 있는 設計圖表를 Kallstenius가 式을 誘導하여 作成한것이 있다<sup>(6)</sup>, 壓密度  $u$ 는 다음과 같이 表示된다.

$$U=1-e^{-\frac{C_v}{m} \cdot t} = 1-e^{-g \cdot t} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{여기서 } m = \frac{d^2}{2\pi} \left\{ \log \frac{d}{(d_w/2)\sqrt{\pi}} - \frac{3}{4} \right\} \dots\dots(3)$$

$$g = \frac{m}{C_v} \dots\dots\dots(4)$$

$C_v$ : 壓密係數,  $d$ : drain paper의 間隔

$t$ : 時間,  $d_w$ : drain의 直徑.

그림-8은  $d_w=5\text{cm}$ 일때 drain의 間隔  $d(\text{m})$ 와  $m$ 과의 關係를 나타내고 그림-9는 여러가지 壓密度에 對한  $g$ 와  $t$ 의 關係를 나타낸것이다.

따라서 時間  $t$ 에 對한 所要壓密度  $u$ 가 주어지면 그림-9에서  $t$ 와  $u$ 에 對應하는  $g$ 를 求하게 되고 試驗에서 얻어진  $C_v$ 와  $g$ 를 (4)式에 代入하여  $m$ 을 求할 수 있다.

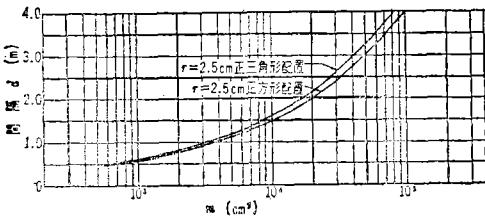


그림-8. paper drain의 間隔 ( $d$ )와  $m$ 와의 關係

그림-8에서 이  $m$ 의 값을 使用하여 正方形配置 혹은 正三角形配置에 對한 paper drain의 間隔  $d(\text{m})$

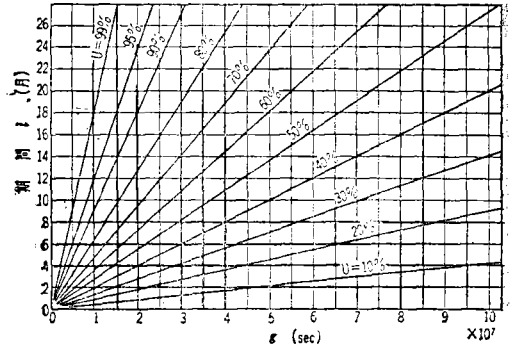


그림-9. 壓密度에 對한  $g$ 와  $t$ 의 關係

를 求하게 된다. 例를 들면 地盤의 壓密係數가  $C_{vh} = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 일때  $t=7$ 個月間에 80%의 壓密을 이르기려면 paper drain의 間隔은  $d=2.3\text{m}$ 로서 足함을 나타낸다.

前述한 바와같이  $10\text{cm} \times 0.3\text{cm}$ 의 drain paper는 直徑 5cm의 Sand drain과 거의 같은 排水效果를 갖이고 있는 것으로 paper drain 工法의 設計에서는  $d_w=5\text{cm}$ 로 놓고 計算할 수 있다. 一般的으로 採擇되어온 paper drain의 間隔은  $d=1.0 \sim 1.8\text{m}$ 이고 그의 길이는 最大 20m程度까지 있다.

그림-10은 Sand drain과 같은 排水效果를 갖는 paper drain의 間隔  $d$ 를 求하는 圖表이다. 例를 들면  $d=2.5\text{m}$ ,  $\phi=50\text{cm}$ 의 Sand drain이 80% 壓密되는 時間은  $d=1.5\text{m}$ 의 paper drain을 設置한 경우와 같은 것을 表示하고 있다.

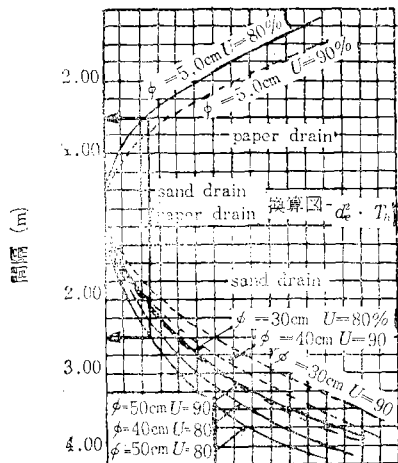


그림-10. Sand drain과 paper drain의  $d$ 比較

## IV. Paper Drain의 施工法

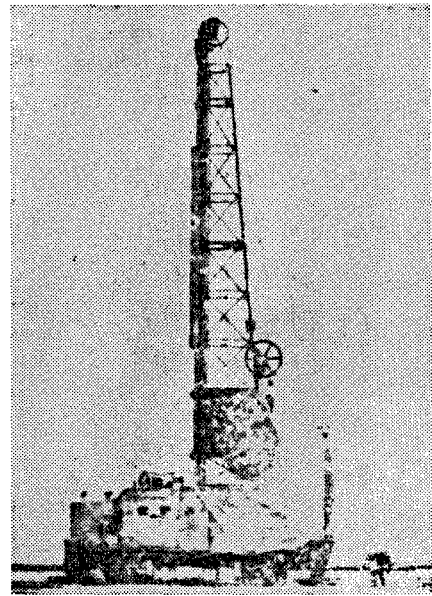
paper drain의 打設은 周圍의 地盤을 攪亂시키지 않도록 drain paper를 地中에 確實하게 挿入하던 된다. 여기서 地盤의 堅固性이나 機械의 走行性의 難易에 의하여 이에 適合한 여러가지 方法이 考案되어 있다.

### 1. TD型 打設機

스웨덴에서 考案된後 Kallstenius의 指導를 받아 벨기에의 Franki社에서 開發한 것으로 剛製의 mandrel속에 drain paper를 內裝시킨채로 地中에 挿入하고 mandrel단을 뽑아 올리는 方式이다. mandrel을 挿入하거나 引拔하는 것은 그림-11과 같이 mandrel의 上端에 wire rope를 固定해놓고 이것을 감았다 풀었다 하면서 조작한다. 이와같은 Franki 方式을 1963년에 日本에서 導入하여 製作한 것이 TD型 打設機이다. 日本에서 이것을 製作할때는 타이어식이었던 것을 크로우리식으로 바꾸고 wire rope로서 mandrel을 작동하던것을 chain으로 바꾸고 機構를 自動化로 改良하였다.

機械는 每分 40m의 速度로 drain paper를 地中에 挿入하고 最大 20m까지 施工이 可能하다. 施工 深度 및 間隔을 調節해 놓으면 打設作業이 繼續된다.

가. mandrel上端에서 작크로 drain paper의 先



(b) TD型 打設機

그림-11. TD型打設機

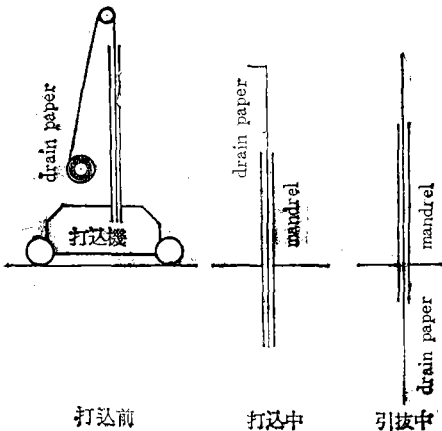
端을 물고 所要의 깊이까지 地中에 挿入한다.

나. 작크를 풀어서 drain paper를 地中에 놓아두고 mandrel을 뽑아 올린다.

다. 地上에서 drain paper를 자른다.

라. 機械에 調節된 間隔으로 機械가 自定하여 移動한다.

이와 같은 4個의 操作을 스위치를 끝때까지 自動으로 繼續된다.



(a) 打入機의 說明圖

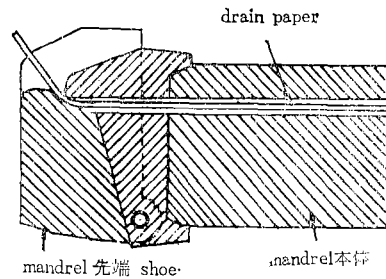


그림-12. Kallstenius-Franki식의 mandrel 先端

Kallstenius-Franki의 方式에서는 그림-12와 같이 打設中에는 mandrel先端的의 뚜껑이 drain paper를 누르고 引拔할때는 自動적으로 열려서 drain

paper 를 띠어 놓게 되었다.

이때에 가장 問題로 된것은 mandrel이 drain paper를 確實하게 地中에 남기고 나오는 것으로 mandrel안에서 drain paper와의 摩擦抵抗을 작게하고 drain paper는 多少의 剛性を 갖게 하였으며 특히 mandrel 先端에 壓縮空氣를 보내서 挿入時에 mandrel 內에 粘土의 侵入을 防止하여 mandrel이 drain paper를 容易하게 地中에 띠어 놓고 나오도록 되어 있다.

TD型 打設機의 諸元은 表-1과 같다.

여기서 알 수 있는바와 같이 TD型 打設機는 相當히 大型이기 때문에 軟弱地盤에서 走行이 困難한 때가 많다.

表-1. TD型 打設機의 主要諸元

型 式	TD 20型	TD 12型
全 長 (m)	9.06	8.00
全 高 (m)	26,315	16,555
全 幅 (m)	3.80	3.30
mandrel全長(m)	23.89	14,602
全重量 (t)	4.30	30.0
動 力 (HP)	200HP, 1,800rpm	200,HP, 1800rpm
打設深 (m)	20.0	12.0

2. PDW型 PDC型 打設機

TD型 打設機는 重量이 過大하므로 軟弱한 地盤에서는 輕量의 打設機로 쉽게 打設이 可能하도록 New Jae Buldozer Co.에서 研究開發한 것이다.

PDW型은 6~9kg의 rail에 車臺를 올려놓고 그 위에서 打設機構를 쏘고 다니며 rod로 drain paper를 打設하는 것이다. 打設方法은 drain paper를 접어곱혀서 rod 先端에 붙인 打入棒으로 누르고 그대로 rod를 눌러내리는 것이다. 따라서 drain paper는 힘에 對하여 多少 強한것이 要求된다. rod의 挿入機構는 기계의 安定을 維持하기 爲하여 그림-13

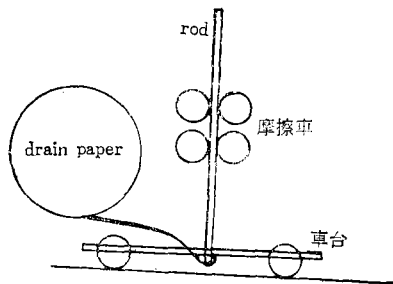


그림-13. PDW型 打設機

과같이 摩擦輪을 使用하고 있다.

PDW型은 重量이 매우 가볍기 때문에 極히 軟弱한 地盤에서도 打設이 可能하다. 그러나 N值가 5以上的 砂層이 介在되어 있을때는 打設이 困難하다. 이 打設機의 主要諸元을 들면 表-2와 같다.

PDC型은 打設能力을 增大시키기 爲해서 소벨을 붙인 것으로 그의 裝置는 PDW型과 같으며 打設깊이는 25m까지 可能하다.

表-2. PDW型의 主要諸元

型 式	PDW 151型	PDW 152型
全 長 (m)	3.70	4.54
全 幅 (m)	1,235	1.54
全 高 (m)	6.40	6,354
量 (t)	2	3.5
動 力 (HP)	11	15
打設깊이(m)	10~20	10~20

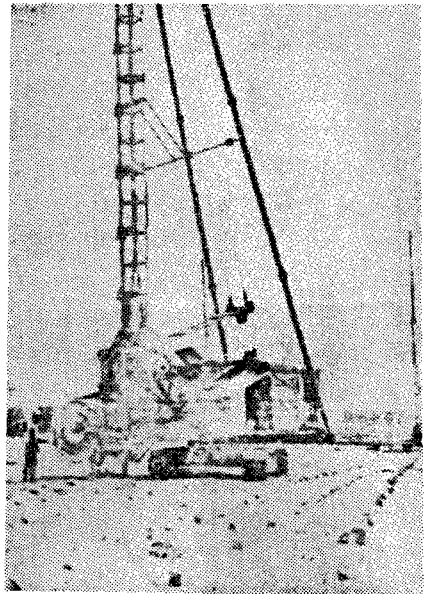


그림-14. PDC型 打設機

그림-16은 1977년에 우리나라에서 Castle drain borda를 打設한 機械를 나타낸 것이다.

그림-17은 軟弱地盤에 Castle drain board를 打設한 것을 나타낸 것이다.

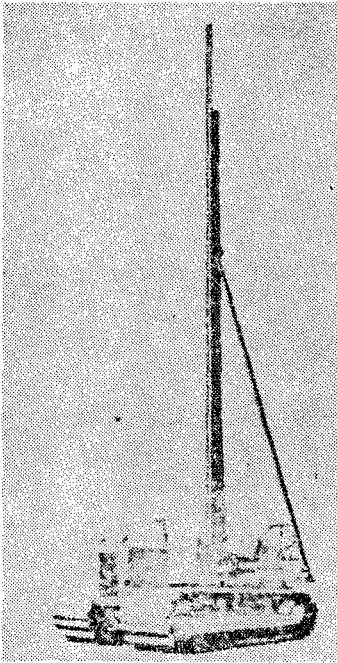


그림-15. IHI式 打設機

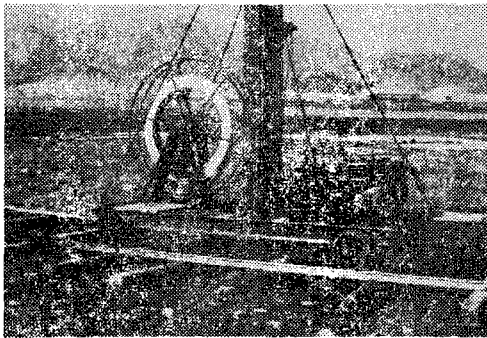


그림-16. Castle drain board 打設機

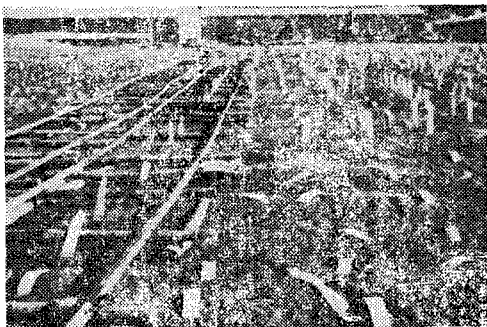


그림-17. Castle drain board를 打設한 軟弱 地盤

## V. Sand Drain 工法과의比較

Paper drain 工法의 特徵은 打設할때 周邊의 地盤을 攪亂시키지 않고 drain의 斷面이 깊이 方向에 걸쳐 一定하고 施工速度가 빠르며 工費가 싸다는 것을 들수 있다.

### 1. 打設에 의한 周邊地盤에의 影響

直徑 40cm, 길이 8.8m, Sand pile의 間隔 1.6m의 正三角形 配置에서 Sand pile을 打設할때 周邊地盤에 미치는 影響은 周邊地盤의 上下向 變位에 對하여 測定한 一例를 들면 打設한 pile에 가까운 곳에서는 15~20mm程度의 地盤表面이 올라왔고 이에 의하여 地表面의 變位가 일어난 거리는 pile로부터 7~8m에 미치고 있다. 이에 反하여 paper drain을 打設했을때는 거의 無視할 만큼 地表面의 變位가 없는것으로 報告되어 있다.

正三角形配置에서 直徑 40cm의 Sand pile을 打設하였을때의 PDW型에 의하여 Paper drain을 打設한 경우의 Sand pile과 paper drain의 中央에서 間隙水壓을 測定한 結果 表-3에서 와 같이 paper drain에서 間隙水壓의 變化가 작게 나타났다.

표-3. Sand pile과 paper drain을 打設하였을때의 間隙水壓의 變化

區 分	徑(cm)	길이(m)	間隔(m)	間隙水壓(kg/cm <sup>2</sup> )
Sand pile	40	8.5	1.6	0.30
	40	8.5	1.6	0.25
	40	8.3	1.6	0.40
	40	8.3	1.6	0.30
	40	22.0	2.4	0.25
paper drain		8	0.8	0.10
		5	0.86	0.10

### 2. 壓密現象에 미치는 影響

Sand drain과 paper drain을 施工한 後 壓密沈下 現象에 對한 測定值를 檢討한 結果를 다음과 같이 報告된바 있다.

가. 壓密係數( $C_v$ )

壓密係數는 一般的으로 水平方向의 壓密係數( $C_{vh}$ )와 垂直方向의 壓密係數( $C_{vz}$ )로 區分되고  $C_{vh} > C_{vz}$ 인것이 普通이다. Sand drain을 打設하면 地盤이 攪亂되어 相當한 範圍에 걸쳐서  $C_{vh} = C_{vz}$ 로 되고 水平方向의 排水에도  $C_{vz}$ 의 값을 使用하여 計算

하는 것이 實測値에 가깝다.

그러나 paper drain의 경우는 地盤의 攪亂이 작은 것으로 水平方向의 排水에는  $C_{vh}$ 를 사용하는 것이 實測値에 가깝다. 一般적으로 水平方向의 壓密係數는  $C_{vh}=(2\sim4)C_{vo}$ 인 경우가 많다.

나. 地盤中에 얇은 砂層이 있는 경우 Sand drain을 施工하지 않는 地域에서는 5cm程度의 모래層도 排水層으로 作用을 크게 하고 있으나 Sand drain을 設置할 경우는 이層이 攪亂되어서 排水層으로 作用하지 않는 경우가 많다. 그러나 paper drain의 경우는 10cm以上の 砂層에서만이 排水層으로서 作用하는 것으로 考慮해도 좋을것이다.

다. 地盤의 強度

Sand drain을 打設하여 多少 強度는 低下되나 鋭敏比가 큰 特殊한 地盤을 除하고는 어떠한 方法을 適用해도 實用的인 面에서는 考慮할 必要는 없는 것으로 생각된다.

3. 施工管理

drain paper는 工場製品이므로 그의 形狀, 斷面品質等이 均一하므로 現場에서는 drain paper의 挿入狀況을 自己記錄計에 의하여 容易하게 記錄되므로 施工管理를 確實히 할 수 있다.

4. 經濟性

paper drain은 前述한바와 같이 換算徑이 5cm이므로, 30~50cm徑을 갖는 Sand drain과 同一한 效果를 얻기 爲해서는 paper drain의 打設數를 늘이고 間隔을 좁게 取해야 한다. 90%의 壓密度에 達하는데 要하는 時間을 同一하게 한 경우 40cm의 Sand drain과 paper drain의 打設間隔과의 關係는 그림-18에 表示한 바와 같이 2~3倍로 paper drain의 打設數를 增加시켜야 한다.

한편 Sand drain의 直徑  $d_w=40$ cm, drain의 間隔  $d=2$ m,  $n=5$ , drain의 길이 18m로 Sand drain을 設置했을때 이와 同一한 壓密效果를 얻는데 paper drain에서는 그림-10에 의하여  $d=1.2$ m로 打設하면 된다.

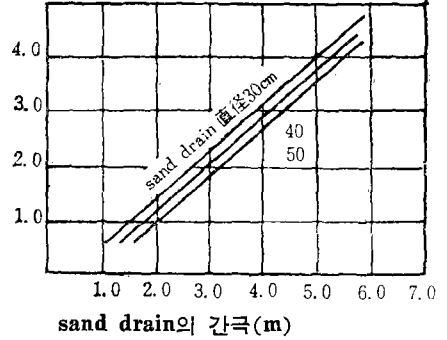


그림-18. 90% 壓密을 同一時間에 達하는데 Sand drain과 paper drain의 打設 間隔의 比較

同一面積을 施工하는데 必要한 paper drain의 數는 Sand drain 1個에 對하여 paper drain은  $2^2/1.2^2 = 2.78$ 個가 된다.

그러나 paper drain이 sand drain에 比하여 4~5倍의 速度로 打設할수 있으므로 打設費는 1m當 1/4~1/5程度이므로 Sand drain에 比하여 經濟的이다.

參考文獻

1. 土質工學會編, 土と基礎·最新の工法(1967)
2. 土質工學會編, 軟弱地盤의 調査·設計·施工法(1966)
3. W. Kjellman. Accelerating Consolidation of Fine Grained Soils by means of Card Board Wicks. Proc. 2nd Int. Conf. S.M.F.E. Vol. II (1948) pp. 302. quoted by Ref. (2)
4. Industrial Site and Water Resources Development Corporation. Report of Soil Improvement at Zuck Hyun Seaside Industrial Site.
5. 米倉亮三, スウェーデンにおけるペーパードレーンの設計圖表 土と基礎 Vol. 13 No. 8 (1965) pp. 45~46.
6. 高木俊介, サンドバイル排水工のためのグラフとその使用例 土と基礎 Vol. 3. No. 12. (1955) pp. 8~14