

# 물유리계 注入材를 주로 한 地盤強度增大

## Improvement of Soil Strength by Injection of Water-Glass Chemical Grout

秦	柄	益*
Jin,	Byung	Ik
千	柄	植**
Chun,	Byung	Sik

### Abstract

Engineering properties of soils is studied by permeating injection of water-glass chemical grout by use of a large sized grouting equipment of 1.5 shot system. Furthermore, the effectiveness of chemical grouting by taking water-glass chemical grout combined with portland-cement for the purpose of improving the soil strength is confirmed.

Relationships between main factors which cause the effectiveness of chemical grouting are described, and the factors are velocity and temperature of flowing water; grain size distribution and density of soils; density, viscosity, gel time and volume of grouts; injection pressure and grouting process.

Improvement of the effectiveness of chemical grouting in flowing water by preventing the dilution and flowing down of grouts is investigated. Moreover, local shear failures and upheaval phenomena of ground are also investigated by field measurement.

### 要 旨

本 研究는 1.5 shot system 의 大形藥液注入裝置에 의하여 물유리계 藥液을 注入시켜 固結土에 대한 工學의 特性을 究明하고 물유리계의 不足한 強度增大를 目的으로 보통포틀란트 시멘트를 併用하여 그 注入效果를 判定한 것이다.

藥液注入效果는 地下水의 流速, 溫度, 試料土의 粒度分布, 密度, 注入材의 濃度, 粘度, Gel time, 注入量, 注入壓力 및 注入方式 等に 좌우됨을 알고 이들 要素間의 相關關係를 比較分析하였다.

現場注入試驗을 通하여 流水中에서의 稀釋, 流失을 막아 注入效果의 增大, 地盤局部剪斷破壞 또는 地盤隆起現象에 대하여 檢討하였다.

\*正會員·漢陽大學校 工科大學 教授 土木工學科

\*\*正會員·漢陽大學校 工科大學 助教授 土木工學科

## 1. 序 論

國土綜合開發 等 國家發展目的에 부응하여 軟弱地盤에서의 藥液注入工法의 必要性은 날로 더해 가고 있다.

특히 서울, 釜山 등 大都市에서 既存 構造物 下部로의 터널 굴진 등 地下鐵工事, 大形建物建築에서 大規模 지반 굴착시 發生하는 地盤沈下, 構造物崩壞 등의 大形安全事故는 속출하고 있다. 이를 막기 위해 지반굴진진 터널 막장에서 또는 土留板皆面에서 藥液을 注入, 固結시켜 遮水壁을 形成 또는 地盤의 強度를 增大시킴으로서 土壓을 激減시키고 發破로 인한 振動 및 굴착으로 인한 地下水位低下를 막아 構造物工事を 安全하고 신속하게 할 수 있는 것이다. 더욱 遮水目的의 물유리게 藥液에 不足한 強度增大를 위하여 시멘트를 併用함으로서 높은 注入效果를 볼 수 있는 것이다.

室內實驗用 大形藥液注入裝置를 設計製作하여 그라우트 펌프에 의하여 1.5 shot system 으로 물드에 注入固結시켜 固結土에 대한 剪斷試驗, 壓密試驗 등 諸土質力學試驗을 행하여 흙의 強度增大 및 遮水效果를 檢討하였다.

藥液注入工의 本施工을 위해서는 土質 및 工法實績에 대한 事前調査, 概略檢討, 試驗注入, 注入效果判定 등을 거쳐야 한다. 또한 注入效果判定時에도 注入施工狀況, 原位置試驗, 注入地盤觀察, 周邊環境에 미치는 影響 등을 고려하여 統合의으로 判斷하여야 한다. 現場注入時는 最近 強度增大用으로 各광을 받고 있는 濕式마이크로 시멘트(Ultra Fine Grouting Material, MC)를 사용하여 強度增大效果를 檢討하였다.

藥液注入工은 一般的으로 shot 방식에 따라 1 shot, 1.5 shot, 2.0 shot system 으로 分類하며 注入裝置에 의하여 Rod 注入, Strainer 注入, 二重管注入 등으로 分類한다. 上向式, 下向式等 注入管의 操作에 의하여 또는 注入管의 配置에 따라 單列注入과 複列注入, 注入管의 設置에 따라 jet 방식, 打入方式, 回轉보오링식으로 나누기도 한다. 本 研究에서는 1.5 shot system 에 의하여 二重管注入 및 上向式을 채택하였다.

## 2. 藥液의 地盤注入機構

### 2.1. 注入範圍와 Gel time

藥液의 注入範圍는 注入孔의 間隔을 決定하는데 있어서 重要한 事項이나 地盤條件, 注入液의 性質, 注入孔의 型, 注入狀況 등이 相互關聯하여 엄밀하게 數式化하기는 어렵다. 室內注入試驗, 現場試驗注入을 通하여 檢討하여야 할 것이다.

浸透注入의 경우 藥液이 土中을 흐르는 速度  $v_r$ (cm/sec)는 一般的으로 層流의 경우에 대한 Darcy의 法則에 따르는 것으로 보아 다음과 같이 나타낼 수 있다. <sup>(1)</sup>

$$v_r = k_g i = k \frac{\gamma_g / \gamma_w}{\mu_g / \mu_w} i \quad (2-1)$$

여기서,

$k$ : 흙의 透水係數(cm/sec)

$k_g$ : 藥液의 透過係數(cm/sec)

$\gamma_g, \gamma_w$ : 藥液 및 물의 單位體積重量(g/cm<sup>3</sup>)

$\mu_g, \mu_w$ : 藥液 및 물의 粘度(cps)

$i$ : 注入壓力을 動水勾配로 表示한 값

Maag<sup>(2)</sup>는 注入時間을 다음과 같이 나타내었다.

$$t = \frac{nr^2}{kh} \left[ \frac{\mu}{3} \left( \frac{R^3}{r^3} - 1 \right) - \frac{\mu-1}{2} \left( \frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \right] \quad (2-2)$$

$$\text{또는 } t = \frac{\mu n}{3khr} (R^3 - r^3) \quad (2-3)$$

여기서,

$t$ : 注入所要時間(sec)

$n$ : 空隙率

$k$ : 透水係數(cm/sec)

$h$ : 水頭(注入壓)(cm)

$\mu$ : 물과 藥液의 粘度比

$R$ : 注入有効半徑(cm)

$r$ : 注入孔半徑(cm)

그러나 Maag의 式은 Gel time, 空隙充填率, 注入管의 形式과의 關係가 없기 때문에 島田 등<sup>(3)</sup>은 注入特性을 나타내는 定數를 設定하여 Maag의 式을 간단히 하여 다음과 같은 實用式을 提示한 바 있다.

$$t = \frac{an\beta}{3Akh r} (R^3 - r^3) \quad (2-4)$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{3ACkhr}{\alpha\beta n} t} \quad (2-5)$$

여기서,  $R$ : 浸透距離(cm)

$t$ : 浸透時間(sec)

$n$ : 空隙率

$k$ : 地盤의 透水係數(cm/sec)

$h$ : 注入壓力(cm)

$\beta$ : 藥液의 動粘性係數

$r$ : 注入孔의 半徑(cm)

$T$ : Gel time(sec)

$A\left(=\frac{r'}{r}\right)$ : 有效注入孔徑係數

$r'$ : 實際浸透源半徑

$\alpha$ : 空隙充填率

$C(=t/T=aT+b)$ : Gel time—浸透時間係數

$a, b$ : 定數

R.H. Karol 은 溶液型 藥液의 注入範圍를 半徑  $R$ (cm)로서 다음과 같이 나타내었다. (4)

$$R = 2\pi \sqrt[3]{\frac{Qt}{\mu n}} \quad (2-6)$$

여기서,  $Q$ : 單位注入量( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )

$t$ : 注入所要時間(sec)

$\mu$ : 藥液에 대한 물의 比粘度

$n$ : 흙의 空隙率(小數)

한편, 懸濁液型 藥液의 注入範圍는 다음과 같다.

$$R = \frac{\gamma_w g h r_c}{2S} + r_0 \quad (2-7)$$

여기서,  $\gamma_w$ : 물의 單位體積重量( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$g$ : 重力加速度( $\text{cm}/\text{sec}^2$ )

$h$ : 水頭(注入壓)(cm)

$r_c$ : 空隙의 等值半徑(cm)

$r_0$ : 注入孔의 半徑(cm)

$S$ : 藥液의 固強結度( $\text{dyne}/\text{cm}^2$ )

藥液의 注入浸透에 關係가 있는 地盤土의 性狀으로는 一般의으로 그 透水性和 土中水의 狀態가 問題로 되는 데 여기서 前者는 주로 그 構成土의 粘度뿐 아니라 그 다짐 程度에 따라 支配되며 後者는 飽和度와 土中에서 물이 흐르고 있는 程度에 따라 影響을 받는다. 특히 土中을 물이 흐르고 있는 경우에는 藥液의 浸透自體에 는 問題가 없으나 藥液의 流水 등으로 인한 固結

特性이나 固結位置에 影響을 받게 되므로 注意를 要한다.

Scott<sup>(5)</sup>, Karol<sup>(4)</sup>, Mitchel<sup>(6)</sup>, Caron<sup>(7)</sup> 및 三木<sup>(1)</sup> 등은 藥液의 流動性和 浸透性과의 關係를 알 수 있는 藥液의 土質에 따른 適用 또는 浸透 限界를 實驗的으로 研究報告한 바 있다.

## 2.2. 注入壓力

Morgenstern 등<sup>(8)</sup>은 많은 實驗을 바탕으로 hydraulic fracture 概念을 導入하여 다음과 같은 注入壓力(限界注入壓力)算出式을 提示하였다.

$$P = \frac{(\gamma h - \gamma_w h_w)(1+K)}{2} - \frac{(\gamma h - \gamma_w h_w)(1-K)}{2} + c' \cot \phi' \quad (2-8)$$

여기서,  $P$ : 限界注入壓

$\sigma_1'$ (= $\gamma h - \gamma_w h_w - P$ ): 注入孔先端의 地盤內鉛直有效應力

$\sigma_3'$ (= $K(\gamma h - \gamma_w h_w) - P$ ): 注入孔先端의 地盤內水平有效應力

$K$ : 靜止土壓係數

$c'$ : Mohr-Coulomb의 包絡線에 의한 粘着力

$\phi'$ : Mohr-Coulomb의 包絡線에 의한 內部摩擦角

$\gamma$ : 흙의 濕潤單位體積重量

$\gamma_w$ : 물의 單位體積重量

$h$ : 土被두께

$h_w$ : 地下水의 水頭

## 2.3 注入量과 注入率

注入量<sup>(9,10)</sup>은 대개 다음과 같이 구하고 있으나 不確定要素에 左右되는 일이 많으므로 注意하여야 한다.

$$Q = V \cdot \frac{G_s}{1+e} (w-w_p) \quad (2-9)$$

여기서,  $Q$ : 注入量( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )

$V$ : 注入對象土量( $\text{cm}^3$ )

$G_s$ : 土粒子比重

$e$ : 土粒子空隙比

$w$ : 自然含水比(小數)

$w_p$ : 塑性限界(小數)

$$\text{또는, } Q = R^2 \pi n \alpha (1+\beta) \quad (2-10)$$

여기서,  $R$ : 注入有效半徑(cm)

$n$ : 흙의 空隙率(小數)

$\alpha$ : 土質에 따른 注入率(0.6~1.0)

$1+\beta$ : 安全率

注入率<sup>(11)</sup>은 溶液型注入材의 경우 注入對象地盤의 空隙를 崩소(B)수용액으로 完全飽和시켜 B濃도와 中性子水分計의 計數率의 相對比와의 關係를 미리 구하고, 注入材에 B를 一定量 混入하여 이것을 地盤에 注入하여 다음과 같이 구한다.

$$\alpha = \frac{B''}{B'} (\%) \quad (2-11)$$

여기서,  $\alpha$ : 注入率

$B'$ : 注入材의 B濃도(g/l)

$B''$ : 注入後 地盤에 대한 B濃도(g/l)

또한 懸濁液型注入材의 경우는 注入對象의 空隙率과 注入材의 密度를 미리 測定하고  $\gamma$ 線密度計에 의해 注入前後의 密度變化를 測定하여 다음과 같이 구한다.

$$\alpha = \frac{4\gamma \times 100}{n \left( \gamma_s - \frac{S_r}{100} \cdot \gamma_w \right)} (\%) \quad (2-12)$$

여기서,  $n$ : 空隙率(小數)

$\gamma_s$ : 注入材의 密度(g/cm<sup>3</sup>)

$4\gamma$ : 注入前後의 密度增加量(g/cm<sup>3</sup>)

$S_r$ : 飽和度(%)

$\gamma_w$ : 空隙水의 密度(g/cm<sup>3</sup>)

## 2.4. 注入比

注入材에 含有된 粒子의 크기는 흙의 空隙를 거침없이 通過하기 위해서는 充分히 작지 않으면 안된다.

J.C.King 등<sup>(12)</sup>에 의하면, Frazer<sup>(13)</sup> Craton<sup>(14)</sup> Wadell<sup>(15)</sup>은 同一粒徑(D)의 球로 된 土粒子의 空隙率(n)과 이때 空隙의 粒徑(d)와의 關係를 구한 結果, 가장 조밀하게 다졌을 때의 空隙率  $n=26\%$ 에 대해서  $d=0.15D$ , 가장 느슨하게 다졌을 때의 空隙率  $n=48\%$ 에 대해서  $d=0.41D$ 임을 보였다.

King 등<sup>(12)</sup>은 무수히 많은 土質에 대한 空隙徑을 統計의으로 調査한 結果  $d=0.2D$ 의 頻도가 가장 컸다. 그러나 實際로는 흙의 空隙의 크기를 測定한다는 것은 쉬운 일이 아니다.

空隙徑  $d$ 는 藥液의 微粒子徑( $D'$ )의 3倍 以上

이어야 하므로<sup>(6)</sup>  $d=0.2D$ 에서  $3D'=0.2D$ , 따라서 注入比  $N=D/D'=15$ 이다.

그는 또한 粘土系의  $D_{15}$ 와  $D_{85}'$  및  $D_{10}$ 와  $D_{95}'$ 와의 關係를 밝히고, 아래式(2-13), (2-14)과 같은 藥液이 土粒子의 空隙를 쉽게 통과할 수 있는 注入比와의 關係도 報告한 바 있다.

G.A. Kravetz<sup>(16)</sup>은 各種藥液 및 注入可能한 土粒子에 대한 浸透性 實驗結果로부터  $D_{15}$  및  $D_{85}'$ 의 關係를 報告한 바 있다.

$$N_1 = \frac{D_{15}}{D_{85}'} \geq 15 \quad (2-13)$$

$$\text{또는, } N_2 = \frac{D_{10}}{D_{95}'} \geq 8 \quad (2-14)$$

여기서,  $N_1, N_2$ : 注入比(Groutability Ratio)

$D_{15}, D_{10}$ : 土粒子의 粒徑加積曲線의 15%, 10%徑

$D_{85}', D_{95}'$ : 藥液의 粒徑加積曲線의 85%, 95%徑

한편 J.K. Mitchel<sup>(6)</sup>에 의하면 岩盤 균열에 注入시킬 수 있는 注入比는 다음과 같다.

$$N = \frac{D_{\text{fissure}}}{D'_{\text{max}}} > 3 \quad (2-15)$$

여기서,  $D_{\text{fissure}}$ : 岩盤 균열 幅

$D'_{\text{max}}$ : 注入材 粒子의 最大 粒徑

## 3. 室內實驗

### 3.1. 試料土 및 注入材

試料土로서 한강모래 그리고 한양대학 부근의 풍화토를 採取하였으며 注入比를 2.4의 (2-13)式에 의하여 30, 20, 15가 되도록 하여 각각 No. I, No. II, No. III로 명명하였다.

注入材로는 물유리( $\text{Na}_2\text{OSiO}_3$ )를 주로 하여 濃도를 20%, 25%, 30%로 조절하였다. 不足한 물유리의 強度增大를 目的으로 보통포틀란트 시멘트를 併用하였다.

試料土의 物理的 性質은 표 1과 같고 注入材의 配合示方例는 표 2, 표 3과 같다.

### 3.2 試驗種類 및 方法

No. I, No. II, No. III의 試料土에 대하여 密度를 느슨한 상태와 조밀한 상태로 變化시켜 물드에 試料土를 채우고 1.5 shot system의 注入裝

표 1. 試料土의 物理的 性質

區 分		試料土		
		No. I	No. II	No. III
比 重		2.62	2.57	2.52
粒 度	最大粒徑(mm)	0.71	0.64	0.58
	D <sub>60</sub>	0.39	0.28	0.17
	D <sub>10</sub>	0.13	0.025	0.018
	Cu	3.0	11.2	9.4
	No.4 체 통과량(%)	100	100	100
	No.200 체 통과량(%)	3	24	36
三 角 分 類		Sand	Sandy Loam	Sandy Loam
透 水 係 數 (cm/sec)	느슨한상태	$3.14 \times 10^{-2}$	$2.4 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-5}$
	조밀한상태	$6.7 \times 10^{-2}$	$8.9 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-6}$

표 2. 물유리系 藥液의 配合示方例

구 분		약액농도(%)			
		20	25	30	35
A 액	물유리 (cc)	80	100	120	140
	물 (cc)	120	100	80	60
B <sub>1</sub> 액	경화제 (g)	16	20	24	28
	물 (cc)	194	192	190	188
B <sub>2</sub> 액	경화제 (g)	18.4	23	27.6	32.2
	물 (cc)	193	191	189	187

표 3. 물유리系+시멘트(농도25%)의 配合示方例

A 액	물유리 (cc)	100	B <sub>1</sub> 액	경화제 (g)	20
			시멘트 (g)	60	
B <sub>2</sub> 액	물 (cc)	100	B <sub>2</sub> 액	경화제 (g)	23
			시멘트 (g)	60	
			물 (cc)	168	



사진 1. 室內藥液注入試驗 全景

置(사진 1, 그림 1, 사진 2, 사진3)에 의해 注入, 固結시켜 固結土에 대한 一軸壓縮試驗, 直接剪斷試驗 및 壓密試驗을 행하여 一軸壓縮強度,  $q_w$ , 粘動力  $c$  内部摩擦角  $\phi$  및 透水係數  $k$  등의 土質定數를 구하였다.

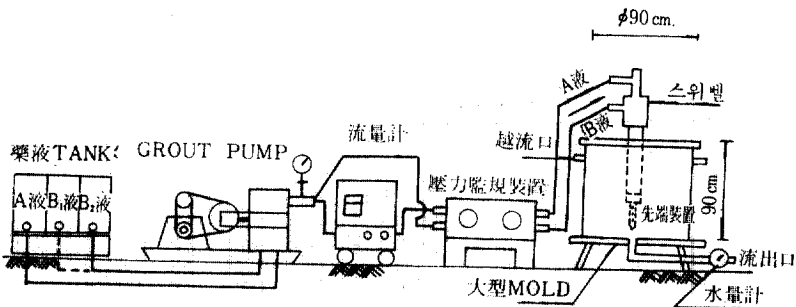


그림 1. 室內大形 藥液注入裝置

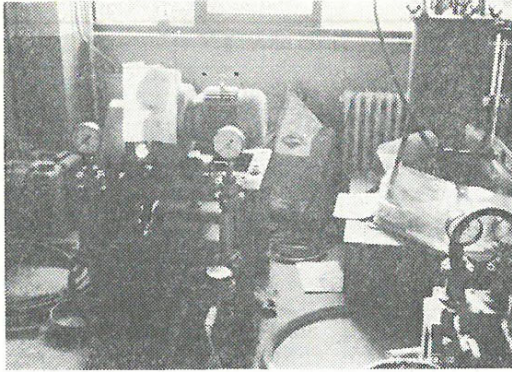


사진 2. 注入裝備(注入펌프)

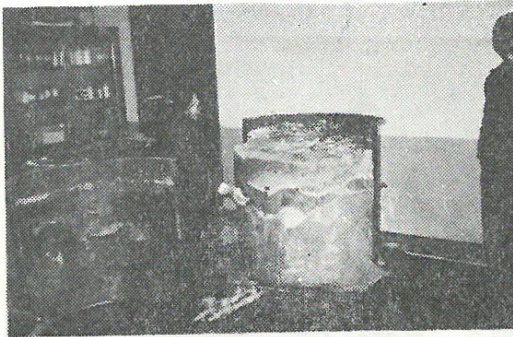


사진 3. 藥液注入固結土(脫型後의 狀態)

Gel time 은 2.1의 式(2-4)에 의하여 구하여,  $B_1$ (속결제)은 10 초내의,  $B_2$ (완결제)는 75초 전후로 하여 複合注入을 하였다.

注入壓은 2.2의 式(2-8)에 의하여  $2 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ 로 하여 注入時期와 注入土層의 位置에 따라 變化시켰다.

注入量은 2.3의 式(2-10)에 의하여 算定하였다.

### 3.3 實驗結果 및 分析

上記 各種 土質力學試驗中<sup>(17)</sup> 紙面關係上 藥液濃度 25% 경우의 透水係數  $k$ 와 一軸壓縮強度만 나타내면 표 4, 표 5와 같다.

표 4. 壓密試驗에 의한 透水係數  $k(\text{cm/sec})$

試料	注入前	물유리系	물유리系 + 시멘트
No. I	$7.52 \times 10^{-2}$	$5.10 \times 10^{-6}$	$9.70 \times 10^{-6}$
No. II	$2.51 \times 10^{-3}$	$2.35 \times 10^{-6}$	$5.52 \times 10^{-6}$
No. III	$3.43 \times 10^{-3}$	$5.23 \times 10^{-6}$	$7.30 \times 10^{-6}$

#### 3.3.1. 遮水效果

壓密試驗에 의한 透水係數를 비교해 보면 표 4에서와 같이 試料 No. I은 大略 注入前의  $10^{-2}$ 에서 注入后  $10^{-6}$ 으로, 試料 No. II, No. III은  $10^{-3}$ 에서  $10^{-6}$ 으로 감소하는 등 約  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 배의 매우 높은 遮水效果가 있음을 알 수 있다.

여기에서, 물유리系에 시멘트를 併用하여도 물유리系만 사용하는 경우에 비해 거의 비슷한 遮水效果가 있음도 알 수 있다.

#### 3.3.2. 強度增大

물유리系만에 의한 경우와 시멘트를 併用할 경우의 密度變化에 따른 一軸壓縮強度를 비교해 보면 藥液濃度 25%, 養生日數 3日의 경우 표 5에서와 같이 一軸壓縮強度는 시멘트를 併用함으로써 물유리系만 사용할 경우에 비해 2배 내지 3배의 強度 增加가 있음을 알 수 있다.

實驗<sup>(18)</sup>에 의하면 물유리系의 경우 約 3倍로, 시멘트와 併用하면 約 10倍에까지 剪斷強度가 增大되는 것으로 나타났다.

藥液注入 固結土가 이와 같이 剪斷強度가 增大되는 것은 粘着力  $C$ 의 增加때문이며 內部摩擦角  $\phi$ 는 試料土가 느슨한 경우는 약간 減少, 조

표 5. 固結土의 一軸壓縮強度  $q_u(\text{kg/cm}^2)$

약액종류 試料 No. 試料상태 양생일수	물 유 리 系						물 유 리 系 + 시 멘 트					
	No. I		No. II		No. III		No. I		No. II		No. III	
	Loose	Dense	Loose	Dense	Loose	Dense	Loose	Dense	Loose	Dense	Loose	Dense
1 日	0.53	0.70	0.63	0.88	0.70	0.85	1.65	0.94	2.13	1.50	2.9	1.80
3 日	0.63	0.85	2.13	2.55	2.39	2.61	2.20	1.90	3.59	2.59	4.9	3.17

밀한 경우는 약간 增加하는 경향을 보이는 등 거의 變化가 없다. (2) 一軸壓縮強度가 試料 No. I, No. II, No. III 순으로 平均粒徑이 작을수록 큰 값이 얻어진 것은 膜의 두께 指數  $H^{(10)}$ 에 의해 설명될 수 있다.

즉 平均粒徑  $d$ 가 작을수록 膜의 두께 指數  $H$ 가 작아지므로 薄膜粘着力은 커져서 결국 剪斷強度는 커지기 때문이다(그림 2 참조).

또한 물유리계만 사용하였을 경우 試料土가 조밀한 경우가 느슨한 경우보다 強度가 크게 얻어진 이유는 조밀할수록 土粒子 자신의 特性으로 인한 構造性 粘着力<sup>(6)</sup>이 커지기 때문인 것으로 보인다.

그러나 표 5에서와 같이 시멘트가 併用될 경우는 이와 반대로 느슨한 경우가 조밀한 경우보다 強度가 더 큰 이유는 固結土가 含水 Gel의 상태가 아니며 시멘트로 인해 構造性 粘着力보다 薄膜粘着力의 영향이 더 크기 때문인 것으로 생각된다.

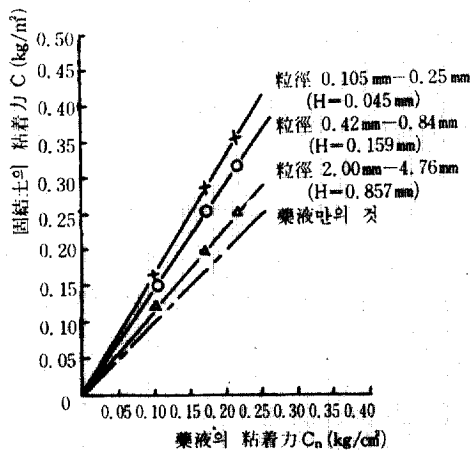


그림 2. 藥液의 粘着力  $C_n$ 와 固結土의 粘着力  $C$ 와의 關係

#### 4. 現場試驗

##### 4.1. 注入對象地域 및 注入材

試驗의 便宜性으로 보아 現在 施工中인 地下 鐵工事場을 對象地域으로 하였다.

注入材는 물유리를 주로 하고 不足한 強度增

大를 目的으로 濕式 마이크로 시멘트를 병용하였다(사진 4). 즉, 표 6에서와 같이 물유리(A) + 급결제( $B_1$ )과 A+완결제( $B_2$ )를 低壓複合注入하며 Gel time은 A+ $B_1$ 은 10초 전후, A+ $B_2$ 는 地盤隆起現象을 고려하여 30초 전후로 조절하였다. 最大注入壓力은  $10 \text{ kg/cm}^2$ 以下로 하고 注入速度는  $6 \text{ l/min}$ 로 하였다(사진 5 注入試驗 光景參照).

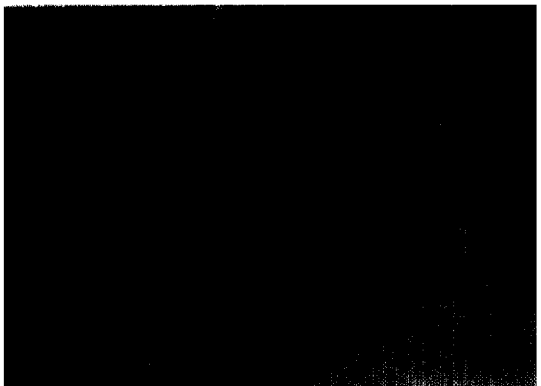


사진 4. 濕式 MC의 製造光景

표 6. 注入材 標準配合

구 분	규산소 다 3호	水	혼 화 제		마이크로 시멘트	비 고
			C제	D제		
규산소다 수용액 (A)	100l	100l	—	—	—	200l
급 결 제 ( $B_1$ )	—	168l	24kg	—	60kg	200l
완 결 제 ( $B_2$ )	—	169l	—	23kg	60kg	200l

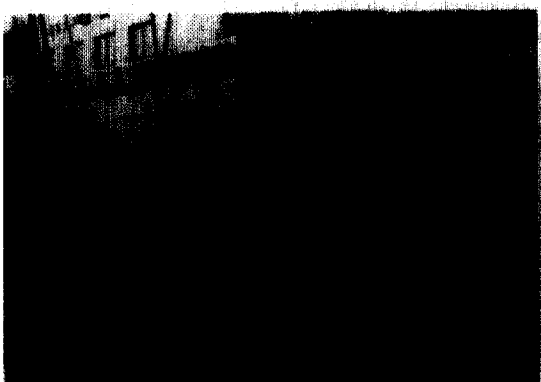


사진 5. 現場注入試驗光景

#### 4.2. 注入試驗

注入試驗前 注入對象土에 대한 地盤調查 및 土質試驗을 實施하였다. 또한 各 土層別 注入率을 算定하였다.

現場注入試驗을 위하여 그림 3에서와 같이 19개의 注入孔을 圓형으로 鑿공하고 注入深度는 -3.0 m에서 -15.0 m까지로 하였다. 19개孔中 確認孔으로서 中央에  $\phi 120$  cm의 우물통을 굴착하여 -3.0 m, -6.0 m, -9.0 m, -12.0 m에서 固結土에 대한 標準貫入試驗, 콘 貫入試驗 및 水位降下法에 의한 現場透水試驗을 실시하였다.

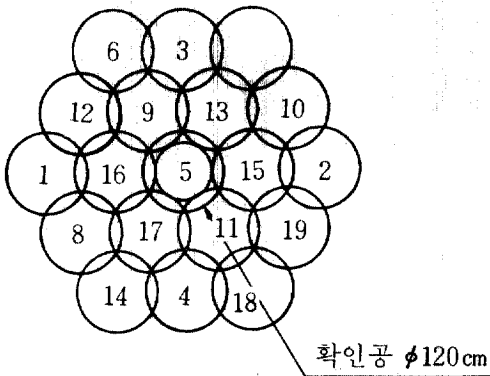


그림 3. 現場藥液注入孔 및 確認孔(우물통) 配置圖

#### 4.3. 藥液注入固結土의 試料採取 및 室內試驗

上記 各 깊이別로 Box Core에 의한 試料採取를 하였고 注入狀態를 確認하기 위하여 페놀프탈렌 反應을 실시하였다. 藥液注入效果를 判定하기 위하여 一軸壓縮試驗과 直接剪斷試驗을 하였다.

#### 4.4. 實驗結果 및 分析

實驗結果中<sup>(17)</sup> 紙面關係上 一軸壓縮強度  $q_u$ , 콘指數  $q_c$  및 強度定數( $c$  와  $\phi$ )만을 나타내면 표 7과 같다.

現場試驗結果에 의하면 遮水用 물유리계 注入材에 마이크로 시멘트<sup>(20)</sup>를 併用함으로써 매우 높은 強度增大가 있었다. 즉, 粘着力은 10倍以上으로 增加한 반면 內部摩擦角은 오히려 減少한 傾向을 보였다.

一般的으로 地盤注入에 의하여 흙의 剪斷強度는 매우 增加되는 데 이것은 주로 흙의 粘着力 增大에 의한 것으로서 內部摩擦角은 느슨한 경우는 약간 減少, 조밀한 경우는 약간 增加 또는 거의 一定하다.<sup>(2,19)</sup>

Level 測量에 의하면 地盤의 局部剪斷破壞 또는 地盤隆起現象을 發見할 수 있었다. 地盤隆起<sup>(8)</sup>는 隣接構造物의 崩壞를 초래하게 될 수도 있으므로 특히 주의를 요한다. 이를 막기 위해서는 注入壓力이 全土被壓( $rh$ )의 1.2~2.4 배 이하가 되도록 하여야 하며 더욱 限界注入壓(2.2의 (2-8)式)이 되지 않도록 하여야 한다.

### 5. 考 察

#### 5.1. 흙의 剪斷強度 및 遮水效果 增大

藥液注入의 主目的은 藥液을 對象地盤에 注入固結시켜 地盤의 遮水效果 또는 強度를 增大시키는 데에 있으며 시멘트를 併用함으로써 不足한 強度를 높이기도 한다.

더욱, 最近엔 地下鐵建設現場에서 遮水目的의 물유리계 注入材에 보통 포틀랜드 시멘트 대신 濕式 또는 乾式 Micro Cement를 使用함으로써 보다 細粒土에의 浸透注入<sup>(2)</sup>은 물론 높은 強度

표 7. 現場試驗結果

深 度	土 質	粘 着 力 $c$	內部摩擦角 $\phi$	$q_c$	$q_u$
-3.0 m	silty clay	3.6 t/m <sup>2</sup>	7°30'	4.92 kg/cm <sup>2</sup>	8.2 t/m <sup>2</sup>
-6.0 m	silty sand	2.2 t/m <sup>2</sup>	20°8'	8.20 kg/cm <sup>2</sup>	6.3 t/m <sup>2</sup>
-9.0 m	sand	21.0 t/m <sup>2</sup>	40°	—	—
-12.0 m	coarse sand	15.0 t/m <sup>2</sup>	45°	—	—



增大效果를 보고 있다. Micro Cement는 粉末度 즉, 比表面積이 8,000 cm<sup>2</sup>/g 정도까지 되어 보통 포틀랜드 시멘트의 2,600 cm<sup>2</sup>/g에 비해 3배 이상이 되며 따라서 水和作用이 매우 빠르고 強度增大 效果도 매우 큰 것이다.

이와 같이 藥液注入에 의하여 흙의 強度는 매우 증가되며 흙의 強度를 剪斷強度로 보아 다음과 같이 強度定數  $c$ 와  $\phi$ 로서 나타낸다. 즉,

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (5-1)$$

단,  $\tau$ : 흙의 剪斷強度(t/m<sup>2</sup>)

$c$ : 흙의 粘着力(t/m<sup>2</sup>)

$\sigma$ : 흙의 垂直應力(t/m<sup>2</sup>)

$\phi$ : 흙의 內部摩擦角(°)

윗식에서 藥液注入에 의하여 흙의 內部摩擦角  $\phi$ 는 研究<sup>(3,19)</sup>에 의하면 거의 變化는 없으나 보다 正確히 表現하면 注入對象土가 매우 느슨하면 약간 減少, 조밀하면 약간 증가 또는 거의 一定한 경향이므로 結局 藥液注入에 의하여  $\phi$ 는 흙의 剪斷強度增大에 別 影響이 없다고 보아도 좋을 것이다. 그러나 粘着力  $\phi$ 는 藥液注入에 의하여 數倍 내지는 10 餘倍에까지 增加될 수도 있다. 또한 垂直應力  $\sigma (= \gamma \cdot h)$ 는 藥液注入에 의해 흙의 單位體積 重量  $\gamma$ 는 다소 增加될 것으로 보인다.  $\gamma$ 를 적용함에 있어 흙이 濕潤狀態일 때는  $\gamma_s$ , 水中에서는  $\gamma_b (= \gamma_s - \gamma_w)$ 를 적용해야 하나 경우에 따라서는  $\gamma_s$  대신  $\gamma_b$ 를 쓸 수도 있다. 室內實驗結果에 의하면 注入前에 비하여 10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup> 배 以上の 遮水效果가 있음을 알 수 있으며 시멘트를 併用하여도 이와 비슷한 效果가 있었으며 水位降下式에 의한 現場透水試驗에서도 注入前의 10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup> cm/sec에서 10<sup>-7</sup>cm/sec로 되어 10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup> 배의 注入效果가 있었음을 확인할 수 있었다.

## 5.2. 地盤隆起 原因 및 對策

藥液의 注入 途中 약간의 地盤隆起 現象을 볼 수 있었다. 이와 같은 現象은 一般的으로 粘性土層에서 많이 發生하는 것으로 藥液注入 成敗를 左右하는 重大한 問題가 될 수 있다. 따라서 現場 注入施工時는 建物, 地盤, 道路, 地下構造物 등 인접구조물의 異常 有無를 確認하고 地盤隆起가 發生하지 않도록 注意를 기해야 한다.

이와 같은 隆起現象은 大體로 注入壓力, 注入量(注入率), 脈狀注入으로 인한 過剩空隙水壓, 施工方法 등에 의해 發生된다.

Morgenstern 등<sup>(9)</sup>의 現場觀測에 의하면 地盤破壞를 일으키는 注入壓은 全土被壓( $\gamma h$ )의 1.2~2.4倍로 되는 경우가 많다고 한다. 더욱 그는 비록 藥液이 均等한 注入을 한다 하더라도 높은 注入壓을 使用하게 되면 地盤破壞가 發生되므로 이를 防止하기 위한 注入壓을 水壓破壞現象 概念을 利用하여 2.2의 式(2-8)과 같이 提案한 바 있다. 注入施工時는 過剩注入壓이 되지 않도록 주의하여야 한다.

注入率은 對象地盤의 土性和 注入材의 浸透性에 따라 달라진다.

더욱, 注入對象土는 不規則하고 複雜하므로 이를 決定하기 위해서는 많은 經驗과 熟練을 要한다.

空隙率  $n$ 은 土質에 따라 다짐程度에 따라 매우 可變的이고 注入充填率  $\alpha$ 도 土質의 粒度, 密度, 空隙率, 注入材의 粘性, 浸透性, 注入工의 熟練度에 따라 變動하는 등 不確定 要素가 많기 때문에 이를 定量的으로 決定한다는 것은 매우 어려워서 現場試驗의 경우 대부분 實績資料와 經驗으로 決定하고 있는 實情이다. 그러나 2.3, 的 式(2-11), (2-12)의 注入率 算定方式을 잘 活用하면 比較的 現實에 가까울 것으로 보인다.

## 5.3. 注入形態

藥液注入 對象地盤이 透水性이 良好한 砂質土일 경우는 土粒子의 配列을 變化시키지 않고 土粒子의 空隙에 藥液을 注入하여 空隙속의 물 또는 空氣를 밀어내는 浸透注入이 된다. 따라서 注入材는 浸透性이 좋은 低粘性이어야 하며 注入作業中 粘性變化가 작은 藥液이어야 한다.

그러나 이와는 反對로 透水性이 나쁜 粘性土일 경우는 藥液을 土粒子空隙에 浸透시키는 것은 不可能하기 때문에 homogel 強度가 높은 藥液을 脈狀으로 注入하여 地盤全體를 改良하는 脈狀注入 또는 割裂注入<sup>(2)</sup>을 함이 타당할 것이다. 이때 藥液의 注入으로 인하여 Pore pressure가 上昇하여 local shear를 유발하게 된다. 또한 脈狀注入으로 인하여 粘性土 特有的 蜂巢構造가

破壞되어 粒子配列은 grain to grain 狀態로 되어 남은 部分은 매우 큰 空隙으로 되고 注入材가 單體로 占有하게 된다. 이때 空隙은 注入前 單體空隙과는 比較가 안될 정도로 커서 注入材가 低粘性일 必要는 없고 粘性이 크더라도 hom-ogel 強度가 클 것이 要望된다.

#### 5. 4. 流水中에서의 注入效果

금번 現場試驗은 地下水位 -1.40 m 以下에서 注入이 實施되었다. 地下水位以下の 流水中<sup>(2)</sup>에서는 藥液이 稀釋 또는 流失될 염려가 매우 크다. 따라서 계획한 注入效果를 얻기 위해서는 신중을 기해야 한다. 따라서 藥液의 粘性과의 關係, 觸媒添加量과 Gel Time, 流速과 藥液의 注入速度·固結土의 形狀·固結量·固結土의 移動距離와의 關係, 流速에 따른 藥液注入量·固結土의 剪斷強度의 變化·有効固結率과의 關係 등을 고려하여야 한다.

藥液注入 固結土의 強度는 注入材, 土粒子, 空隙水의 物理化學의 性質, 土粒子의 空隙特性 등에도 關係되며, 土粒子의 界面이나 空隙水의 化學的作用이 原因으로 되어 Gelling에 문제가 되기도 하므로 注入設計時 반드시 注入對象土 및 地下水에 대한 化學實驗이 先行되어 注入材와의 關係를 면밀히 檢討해야 한다.

### 6. 結 論

遮水目的의 물유리계 注入材에 포틀랜드 시멘트를 併用하여 1.5 shot system의 設計製作한 室內大形藥液注入裝置에 의한 注入試驗 및 現場試驗結果를 綜合 分析하면 大略 다음과 같은 結論을 내릴 수 있다.

#### (1) 藥液의 地盤으로의 浸透性

i) 注入時間 및 注入範圍; 注入材의 Gel time, 注入壓力, 注入量, 注入速度, 地盤의 透水係數 및 空隙에 關係된다.

ii) 注入壓 및 注入量; 注入材의 透過係數, 注入孔의 半徑, 影響半徑, 對象土量, 土粒子의 比重, 自然含水比 및 注入比에 關係된다.

iii) 따라서 注入浸透不良으로 인한 地盤隆起, 局部剪斷破壞를 막기 위해서는 注入壓이 全土被

壓보다 작고, 더욱 限界注入壓이 되지 않도록 하여야 한다.

iv) 注入率은 土質의 粒度, 密度, 空隙率, 注入材의 粘性, 浸透性에 좌우되므로 특히 注意를 요하며 2.3의 式(2-11) 또는 式(2-12)에 따름이 效率的이다.

#### (2) 遮水效果 및 地盤強度增大

i) 물유리계에 의한 遮水效果는 매우 커서 약  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  배의 透水係數低下를 보였으며 시멘트를 併用하여도 거의 비슷한 傾向임을 알 수 있었다.

ii) 흙의 剪斷強度는 물유리계만 사용할 경우 注入前에 비해 약 3배의 增大, 시멘트를 併用할 경우 다시 이것의 2~3배의 強度增大效果를 볼 수 있었고 MC에 의하여 더욱 큰 強度를 早期에 볼 수 있어서 결국 注入前에 비해 6~9배 以上の 強度增大가 있음을 확인할 수 있었다.

iii) 이와 같은 強度增大는 試料土가 느슨한 상태에서는 주로 藥液自身의 作用에 의한 薄膜粘着力에 의해서, 조밀한 상태에서는 이와 함께 土粒子의 特性에 의한 構造性粘着力에 의해 增大된다.

iv) 이와 같이 固結土의 剪斷強度는 注入材의 濃度, 粘性, 注入量, 注入速度, Gel time, 土粒子의 粒徑, 含水比, 密度, 形狀 및 養生日數 등에 따라 크게 좌우된다.

(3) 優秀한 浸透성과 높은 注入效果를 낼 수 있는 注入材

地盤條件에 따라 浸透注入, 脈狀注入 등으로 注入形態가 바뀌므로 토질의 特性에 맞게 注入材의 特性(粘性, 濃度, Gel time,.....)을 조절하여야 한다.

遮水效果目的의 注入材에 不足한 強度를 增大시킬 目的으로 시멘트를 併用할 수도 있으며 MC의 併用으로 더욱 큰 強度를 早期에 期待할 수 있다.

#### (4) 注入方式, 注入方法 및 注入裝置

現場土質條件, 地下水의 狀態(溫度, 流速, 酸度,.....), 注入材의 物理化學의 特性 등을 複合的으로 判斷하여 注入方法 및 合理的이고 效率的인 注入機構를 選擇하여야 한다.

以上과 같이 藥液注入은 複雜하고 不規則한 地盤을 對象으로 하기 때문에 高度의 技術과 經驗을 要한다. 따라서 地盤條件, 現場施工與件에 맞게 注入材의 溫度, 濃度, 粘度, Gel time, 注入速度, 注入壓力, 注入量, 注入率, 注入孔의 配置 등을 항상 주도면밀하게 綜合判斷하여야만 地盤의 局部剪斷破壞, 地盤隆起, 流水中에서의 稀釋, 流失 등을 막고 所期의 注入效果를 볼 수 있을 것이다.

### 謝 辭

本 研究는 1983年度 韓國科學財團의 研究費支援으로 이루어졌음을 밝히며 深甚한 感謝의 뜻을 표한다.

### 參 考 文 獻

- (1) 三木五三郎, "土質と注入施工", 土木學會關東支部講習會 講演集, 日本下水道事業團, pp. 31~39, 1978.
- (2) 千柄植, "藥液의 浸透注入에 의한 土質性狀變化," 大韓土木學會論文集, Vol.2, No.4, pp. 1~9, 1982. 12.
- (3) 島田俊介外, "最新の地盤注入工法", 理工圖書, pp. 130~134, 1977.
- (4) Karol, R.H., "Soil & Soil Engineering, Chap. 17(Chemical Grouting)", Prentice-Hall Eng. and Eng. Mechanics Series, Englewood Cliffs, N.Y., 1960.
- (5) Scott, R.A., "Fundamental Considerations Governing the penetrability of Grouts and their Ultimate Resistance to Displacement", Grout and Drilling Muds in Engineering Practice, Butterworths, 1963.
- (6) Mitchel, J.K., "In place treatment of foundation soils," P. of ASCE, J. of SMFE, Vol. 96, SM1, pp. 73~110, 1970.
- (7) Caron, C. and Cattin, P., "Foundation Engineering Handbook, Chap. 9 (Injection).", Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1975.
- (8) Morgenstern, N.R., and Vaughan, P.R., "Some Observations on Allowable Grouting Pressure," Grouts & Drilling Muds in Engineering Practice, London, Butterworths, pp. 36~42, 1963.
- (9) 吉田迪雄, "注入工法の合理化", 施工技術, Vol.2, No. 10, pp. 24~28, 1969. 10.
- (10) 坪井直道外, "藥液注入工法の設計", 土木施工, Vol. 12, No. 2, pp. 133~137, 1971. 2.
- (11) 坪井直道, "藥液注入工法の實際", 鹿島出版會, pp. 187, 1978. 12.
- (12) King, J.C. and Bush, E.G.W., "Symposium on Grouting: Grouting of Granular Materials," P. of ASCE, J. of SMFE, Vol. 87, SM2, pp. 1~32, April, 1961.
- (13) Frazer, H.J., "Experimental Study of Porosity and Permeability of Clastic Sediments," J. of Geology, Vol. 43, No. 8, 1935.
- (14) Gratton, I.C. and Frazer, H.J., "Systematic Packing of Spheres with Particular Relation to Porosity and Pemeability," J. of Geology, Vol. 43, No. 8, 1935.
- (15) Wadell, H., "Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles," J. of Geology Vol. 43, No. 3, 1935.
- (16) G.A. Kravetz, "Cement and Clay Grouting of Foundations: The Use of Clay in Pressure Grouting," P. of ASCE, J. of SMFE, SM1, pp. 1546-1~30, Feb., 1958.
- (17) 秦柄益, 千柄植, "藥液注入에 의한 軟弱地盤安定化에 관한 研究", 韓國科學財團研究結果報告書, pp. 14~21, 1984. 4.
- (18) 千柄植, "化學藥液에 의한 土質性狀變化에 관한 研究", 建設技術, Vol. 8, No. 4~6, 1981. 4~6.
- (19) 秦柄益, 千柄植, "藥液注入에 의한 固結土의 工學的 特性", 大韓土木學會誌, Vol. 28, No. 6, pp. 97~107, 1980. 12
- (20) Masao Shimoda, Hiroshi Ohmori, "Ultra Fine Grouting Material," Proc. of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE, pp. 77~91, 1982.

(接受: 1984. 3. 19)