

# 藥液注入條件에 의한 充填率分布에 관한 研究

柳澤榮司\* 千柄植\*\* 崔允吉\*\*\*

## 1. 序論

### 1.1 本 研究의 目的

藥液注入工法의 信賴性을 높이기 위해서는 計劃段階부터 對象地盤의 土質條件을 충분히 考慮하여 適切한 注入條件으로 注入範圍를 全體的으로 빠짐없이 理想的인 固結形이 될 수 있도록 設計하기 위하여서는 아직 解決 하여야 할 問題가 많다. 지금까지의 研究는 藥液의 많은 注入條件에 의한 注入效果의 차이(점)에 대하여 有機的인 檢討가 없고 一般的인 注入條件 중, 한가지를 上程하여 注入效果를 判斷하여 버리는 일이 많다. 예를 들면 深度에 의한 注入效果, 注入形態, 흙의 密度에 의한 固結體의 形狀이나 體積間의 差, 充填率  $\alpha$ 의 分布, 強度, P~q 曲線 등에 대하여 實際面에서의 檢討가 되고 있지 않다.

이와같은 觀點으로부터 본 論文에는 藥液注入에 의한 改良效果를 上質定數나 注入效果의 關係를 考慮하여 評價하는 方法에 대하여, 基礎的인 研究를 하고 있다. 上載壓  $\sigma_v$ , 느슨한 供試體, 조밀한 供試體나 藥液의 Gel-time을 緩結·瞬結로 바꾸어 注入함에 의하여 浸透注入과 割裂注入의 두가지 形狀을 재현하여, 注入條件에 의한 固結體의 形狀이나 體積間의 差, 充填率  $\alpha$ 의 分布, 強度, P~q 曲線關係에 관한 研究를 하고 있다.

---

\* 日本 東北大學 工科大學 土木工學科 教授

\*\* 漢陽大學校 工科大學 土木工學科 教授

\*\*\* 日本 東北大學 大學院 博士課程

## 2. 實驗概要

### 2.1 序論

藥液注入의 많은 注入條件에 의한 注入效果의 差異點에 대하여 有機的인 檢討를 위하여 直徑 300mm×높이 300mm의 圓筒型 Mold내의 砂質土에 대하여 上載壓을 加한 狀態로 Gel-time을 緩結·瞬結로 變更함에 의하여 實驗을 하였다. 實驗에 이용한 모래는 硃砂 6호, 硃砂 7호, 阿武畏川砂의 3種類이다. 供試體의 다짐은 느슨한 供試體, 조밀한 供試體의 2種類로 上載壓은 0.5, 1.0, 2.0kg/cm<sup>2</sup>의 3種類로 藥液의 Gel-time은 5秒, 5分の 2種類로서 注入速度 q는 500cc/min, 1000cc/min, 1500cc/min, 2000cc/min의 4種類로서 注入量은 每回 1200cc(A液 600cc, B液 600cc)이다.

### 2.2 試料의 物理諸量과 使用藥液의 物性

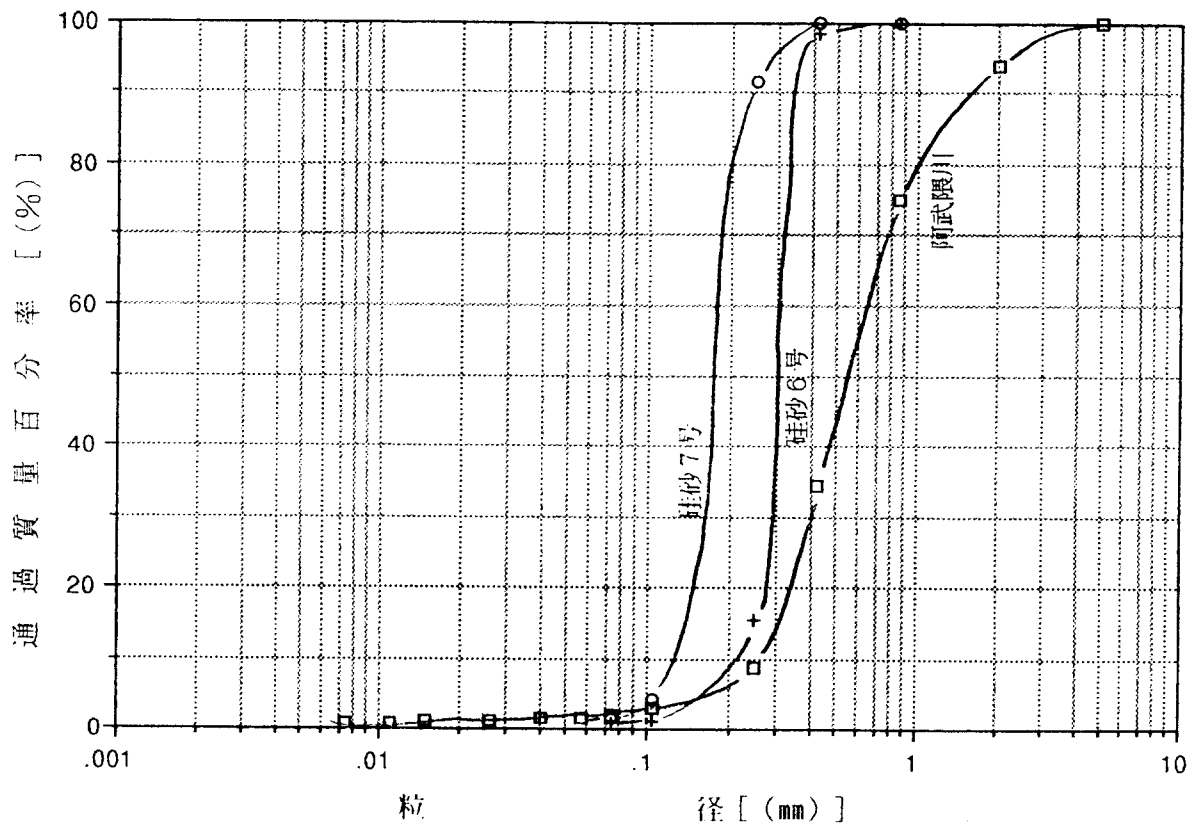
#### 2.2.1 試料의 物理諸量

實驗에 이용한 硃砂 6호, 硃砂 7호, 阿武畏川砂의 粒徑加積曲線을 그림 2.1에 나타내었다. 또한 表 2.2에 物理諸量을 표시하였다. 最適含水比를 구하기 위한 다짐試驗은 반복법을 이용하였다.

#### 2.2.2 使用藥液의 物性

實驗에 利用한 藥液은 注入材의 分類上 藥液係-水Grass係-비알칼리계-溶液型-실리카졸+Gel化促進材로서 主劑로서는 3호케이산 소다이고 有機反應劑의 硬化劑로서는 SR-Hi 急結材로서는 Aron, SR-B을 使用했다. 藥液의 性狀은 表 2.3에 表示하였다.

즉, A液은 主劑+水, B液은 硬化劑+急結材+水이다. 藥液의 配合基準은 表2.4에 나타내었다. 注入量은 각각 藥液 1000cc중 100cc는 Gel-time 測定用으로 900cc를 탱크에 넣어서 그중 600cc로서, A, B液을 합쳐 1200cc 定量注入을 한다.



粘	土	シ	ル	ト	細	砂	粗	砂	細	礫	礫
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

그림 2.1 試料砂의 粒徑加積曲線

### 2.3 供試體의 製作方法

供試體의 치수는 內徑 300mm, 外徑 307mm, 높이 300mm의 中空圓筒形을 利用했다. 供試體의 形態를 그림 2.2에 나타낸다. 供試體의 製作方法는 Mold를 넣어서 底部中央으로부터 注入管(內徑 D=6mm, 外徑 D=10mm, 二重管 룯드)를 넣어서 設置한다. 注入管 先端에 Line Mixer(D=7.62mm L=35.56mm)를 테이프로 싸서 넣는다. 그 다음 試料의 砂를 각각 最適含水比의 狀態로 하여  $\phi$ 300몰드내에서 느슨한 供試體는 2.5kg람마를 利用하여 5層에 걸쳐 각각 50회 조밀한 供試體는 2.5kg람마를 利用하여 10層에 걸쳐 각각 50회로 다짐한다.

또한 느슨한 供試體의 경우는 3층(조밀한 供試體의 경우는 6층) 다짐後에 砂의 注入管内로의 流入을 防止하기 위하여 룯드 先端部에 金網의 cap을 씌우는 한편 그 주위에 粒徑 2~4.75mm의 적은 粒子의 자갈을 濾材로 삽입한다. 또한 供試體의 頂部 및 底部에는 供試體 上下의 porus stone의 막힘을 防止하기 위하여 不織布를 挿入하여 設置했다.

### 2.4 實驗裝置의 概要

本 實驗에 利用하는 實驗裝置의 概略圖를 그림2.3에 나타낸다. 實驗器上部의 壓密탱크에 의해 고무주머니에 물을 注入하여 供試體에 上載壓을 加한다. 또한 注入壓 變化의 變化狀態를 디지털 指示計로 確認하면서 인텔리전트 레코더로 記錄하였다.

表 2.2 各試料의 物理諸量

內 容	單 位	硅砂 6호	硅砂 7호	阿武?川砂
土粒子의 密度 $\rho_s$ (비 중) $G_s$	$g/cm^3$	2.637	2.640	2.715
最適 含水比 $W_{opt}$	%	14	19	14.5
最大乾燥密度 $\gamma_{dmax}$	$g/cm^3$	1.573	1.483	1.654
最大 密度 $\rho_{dmax}$	$g/cm^3$	1.608	1.512	1.686
最 小 密度 $\rho_{dmin}$	$g/cm^3$	1.279	1.171	1.379
均 等 係 數 $U_c$	—	1.36	1.46	2.33
曲 率 係 數 $U_c'$	—	1.10	1.04	0.94

表 2.3 藥液의 性狀

區 分	外 觀	比 重	臭	PH
3호 규산소다 (主劑)	液體	1.4	없음	12
Aron SR-Hi (硬化劑)	白色의 粒 flake狀	부피 比重 0.7	芳香	7
Aron SR-B (硬化劑)	白色의 粉末	부피 比重 1.4	없음	8

表 2.4 藥液의 配合基準

區分	品名	計	5秒	5分
主劑	3호 규산소다	1000cc	700cc + 水300cc	700cc + 水 300cc
硬化劑	Aron SR-Hi	1000cc	$\frac{30g}{110g}$ + 水 (殘)	$\frac{60g}{35g}$ + 水 (殘)
急結劑	Aron SR-B			
計		2000cc	1000cc	1000cc
Gel-time 測定水溫은 20℃ 基準이다. Gel-time의 基準은 5秒±2秒, 5分±30秒				

實驗의 順序는 밸브를 開閉하는 要領에 의거 이하와 같은 段階를 거쳐 進行된다.

- 제 1 段階 : 供試體( $\varphi$  300) 製作
- 제 2 段階 : 上載壓의 加壓
- 제 3 段階 : 試料飽和를 위한 通水
- 제 4 段階 : 藥液配合 및 Gel-time 測定
- 제 5 段階 : 透水試驗
- 제 6 段階 : 藥液의 注入
- 제 7 段階 : 上載壓의 除荷
- 제 8 段階 : 養生 (24시간후)
- 제 9 段階 : 注入固結體의 觀察
- 제 10段階 : 強度試驗 및 充填率  $\alpha$  測定

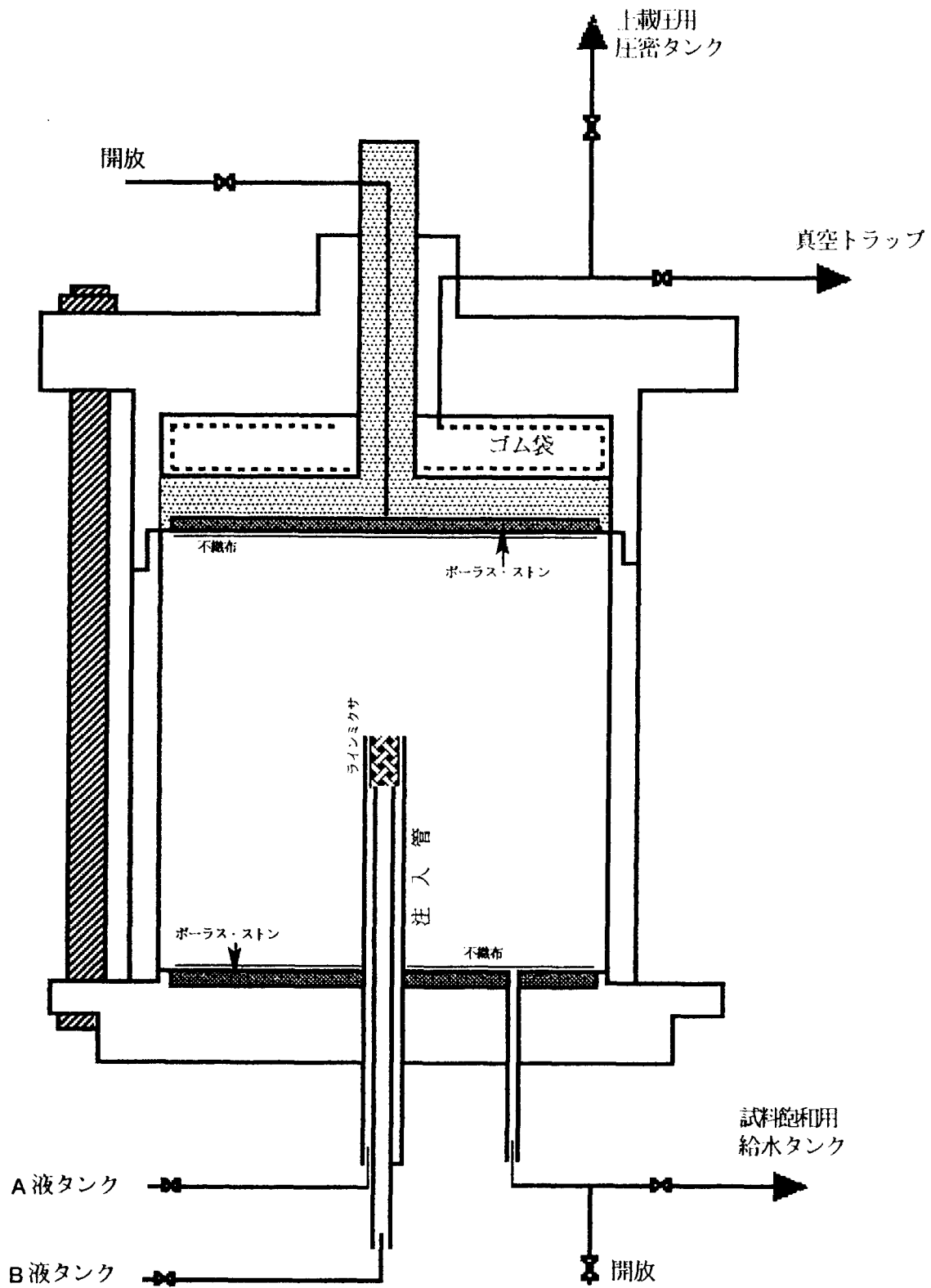


그림 2.2 Mold의 概要圖

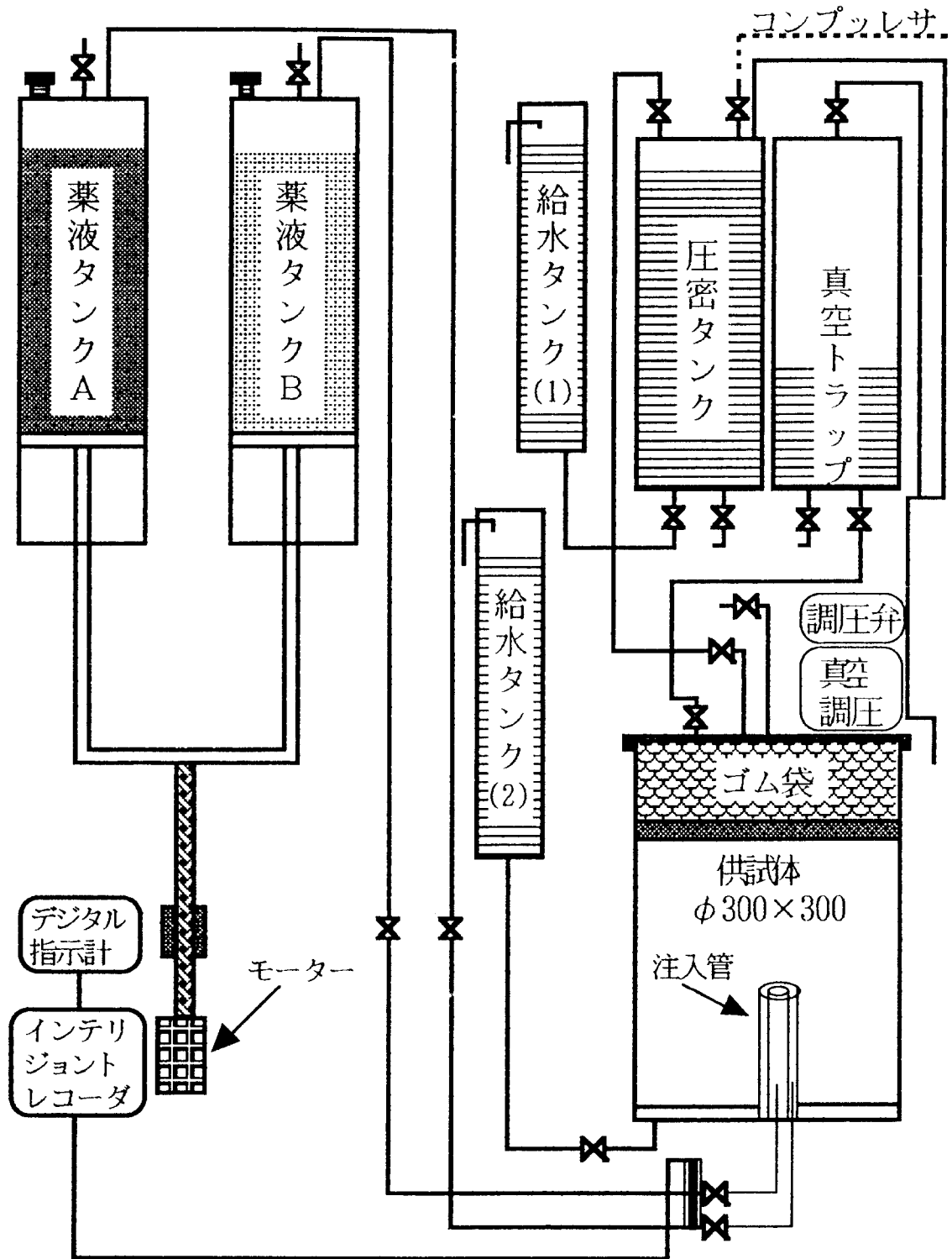


그림 2.3 實驗裝置 概要圖

### 3. 藥液注入條件에 따른 注入效果에 관한 室內實驗 結果의 考察

#### 3.1 固結體의 形狀

寫眞 3.1과 3.2는 硃砂 6호에 Gel-time 5分の 緩結性 藥液을 注入했을때의 固結體의 形狀이다. 上載壓  $\sigma_v$ 가  $0.5\text{kgf/cm}^2$ ,  $1.0\text{kgf/cm}^2$ ,  $2.0\text{kgf/cm}^2$ 의 條件에서의 注入速度  $q=500\text{cc/min}$ ,  $q=1000\text{cc/min}$ ,  $q=1500\text{cc/min}$ ,  $q=2000\text{cc/min}$ 의 경우 固結體 形狀인 바 體積(平均  $2790\text{cm}^3$ )間的 差( $240\text{cm}^3 \sim 410\text{cm}^3$ )는 있지만 거의 完全한 球狀이 되고 있다. 이 경우 理想的인 浸透注入이 되었다고 여겨진다.

寫眞 3.3과 3.4는 硃砂6호에 Gel-time 5秒의 瞬結性藥液을 注入했을때의 固結體의 形狀이다. 上載壓  $\sigma_v$ 가  $0.5\text{kgf/cm}^2$ 부터  $1.0\text{kgf/cm}^2$ 까지는 不規則한 일그러진 形狀이 되고 있다. 그 形狀은 조밀한 供試體보다 느슨한 供試體에 注入했을때가 심하다. 그러나 上載壓  $\sigma_v$ 가  $2.0\text{kgf/cm}^2$ , 注入速度  $q=2000\text{cc/min}$ 의 경우 固結體는 거의 球狀에 가까운 모양이다. 즉, Gel-time 5秒의 瞬結性藥液을 注入했을때 固結體도 上載壓  $\sigma_v$ 이 크게됨과 동시에 또한 注入速度  $q$ 가 빠를수록 球狀에 가까운 形態가 되고 있다. 모든 條件에서의 體積은 平均  $2610\text{cm}^3$ 로서 條件에 의하여 體積間的 差는 約  $250\text{cm}^3 \sim 280\text{cm}^3$ 이다.

寫眞 3.5는 硃砂7호와 阿武畏川砂에 上載壓  $\sigma_v$ 이  $1.0\text{kgf/cm}^2$ 의 경우 Geltime 5分の 緩結性 藥液을 注入했을때의 固結體의 形狀이다. 圖上부의 硃砂7호의 경우 注入速度  $q=1000\text{cc/min}$ ,  $q=2000\text{cc/min}$ 에 의한 體積(平均  $2910\text{cm}^3$ )間的 差 ( $270\text{cm}^3 \sim 260\text{cm}^3$ )는 있지만 完全한 球狀이 되고 있다. 이 경우도 理想的인 浸透注入이 되고 있다고 생각되어진다. 圖上부의 阿武畏川砂의 경우 注入速度  $q=1000\text{cc/min}$ ,  $q=2000\text{cc/min}$ 에 의한 體積(平均  $4070\text{cm}^3$ )間的 差( $150\text{cm}^3 \sim 65\text{cm}^3$ )는 있지만 完全한 球狀이 되고 있다. 이 경우도 理想的인 浸透注入이 되고 있다고 생각되어진다.



上 載 圧	注入条件	緩	詰	密	詰
	Q=1200cc	固結体形状	実験結果	固結体形状	実験結果
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	$q=1000$ cc/min  Dr: 33 % $\kappa : 6.47 \times 10^{-3}$  Dr: 65 % $\kappa : 4.07 \times 10^{-3}$		$V=2840$ cm <sup>3</sup>  $P_{max} : 0.6$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 83$ % $q_u : 3.54$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.81$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 22.2$ %		$V=2670$ cm <sup>3</sup>  $P_{max} : 1.2$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 97$ % $q_u : 3.74$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.84$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 18.8$ %
	$q=2000$ cc/min  Dr: 35 % $\kappa : 7.02 \times 10^{-3}$  Dr: 68 % $\kappa : 4.54 \times 10^{-3}$		$V=2740$ cm <sup>3</sup>  $P_{max} : 1.1$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 86$ % $q_u : 1.92$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.72$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 22.8$ %		$V=3030$ cm <sup>3</sup>  $P_{max} : 2.4$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 97$ % $q_u : 3.94$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.84$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 19.2$ %
1.0 kg/cm <sup>2</sup>	$q=500$ cc/min  Dr: 42 % $\kappa : 6.33 \times 10^{-3}$  Dr: 71 % $\kappa : 4.16 \times 10^{-3}$		$V=2930$ cm <sup>3</sup>  $P_{max} : 0.4$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 82$ % $q_u : 3.04$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.92$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 22.0$ %		$V=2928$ cm <sup>3</sup>  $P_{max} : 0.6$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 104$ % $q_u : 3.63$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.80$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 18.9$ %
	$q=1000$ cc/min  Dr: 34 % $\kappa : 6.58 \times 10^{-3}$  Dr: 69 % $\kappa : 3.75 \times 10^{-3}$		$V=2870$ cm <sup>3</sup>  $P_{max} : 0.7$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 90$ % $q_u : 3.11$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.81$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 20.5$ %		$V=2930$ cm <sup>3</sup>  $P_{max} : 1.2$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 97$ % $q_u : 4.07$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.90$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 18.8$ %

사진 3.1 固結體의 形狀  
- 硅砂 6號 · Gel-time 5分 -

上 載 圧	注入条件	緩	詰	密	詰
	Q=1200cc	固結体形状	実験結果	固結体形状	実験結果
1.0 kg/cm <sup>2</sup>	$q=1500$ cc/min  Dr: 46 % $\kappa: 5.92 \times 10^{-3}$  Dr: 65 % $\kappa: 4.32 \times 10^{-3}$		$V=2650$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 1.0$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 85$ % $q_u: 4.02$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.75$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 20.6$ %		$V=2740$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 2.5$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 95$ % $q_u: 4.24$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.86$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 19.0$ %
	$q=2000$ cc/min  Dr: 36 % $\kappa: 6.25 \times 10^{-3}$  Dr: 69 % $\kappa: 3.88 \times 10^{-3}$		$V=2380$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 1.8$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 96$ % $q_u: 3.61$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.82$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 21.2$ %		$V=2860$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 4.0$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 107$ % $q_u: 4.11$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.83$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 18.1$ %
2.0 kg/cm <sup>2</sup>	$q=1000$ cc/min  Dr: 40 % $\kappa: 6.04 \times 10^{-3}$  Dr: 72 % $\kappa: 3.67 \times 10^{-3}$		$V=2750$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 0.8$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 87$ % $q_u: 3.61$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.82$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 21.2$ %		$V=2870$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 2.3$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 99$ % $q_u: 3.95$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.85$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 20.5$ %
	$q=2000$ cc/min  Dr: 42 % $\kappa: 6.38 \times 10^{-3}$  Dr: 71 % $\kappa: 4.80 \times 10^{-3}$		$V=2760$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 1.7$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 84$ % $q_u: 1.84$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.82$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 20.7$ %		$V=2650$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 5.4$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 82$ % $q_u: 3.45$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.82$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 19.1$ %

사진 3.2 固結體의 形狀  
- 硅砂 6號 · Gel-time 5分 -


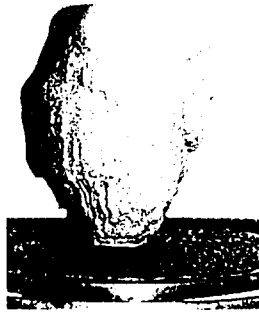
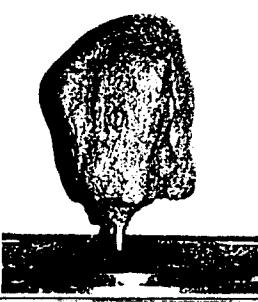
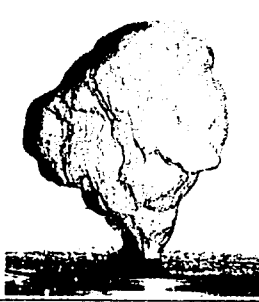




上 載 圧	注入条件	緩	詰	密	詰
	Q=1200cc	固結体形状	実験結果	固結体形状	実験結果
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	$q=1000$ cc/min  Dr: 29 % $\kappa : 8.61 \times 10^{-3}$  Dr: 72 % $\kappa : 4.30 \times 10^{-3}$		$V=2690$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max} : 1.4$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 85$ % $q_u : 1.79$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.80$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 23.7$ %		$V=2530$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max} : 3.1$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 73$ % $q_u : 2.51$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.94$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 19.9$ %
	$q=2000$ cc/min  Dr: 28 % $\kappa : 6.66 \times 10^{-3}$  Dr: 70 % $\kappa : 4.51 \times 10^{-3}$		$V=2630$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max} : 2.8$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 69$ % $q_u : 2.30$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.80$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 28.7$ %		$V=2580$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max} : 3.9$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 73$ % $q_u : 2.23$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.80$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 23.7$ %
1.0 kg/cm <sup>2</sup>	$q=500$ cc/min  Dr: 32 % $\kappa : 5.56 \times 10^{-3}$  Dr: 72 % $\kappa : 4.07 \times 10^{-3}$		$V=2680$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max} : 2.2$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 66$ % $q_u : 1.81$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.75$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 24.2$ %		$V=2780$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max} : 3.1$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 74$ % $q_u : 2.90$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.95$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 20.0$ %
	$q=1000$ cc/min  Dr: 32 % $\kappa : 7.18 \times 10^{-3}$  Dr: 73 % $\kappa : 4.09 \times 10^{-3}$		$V=2480$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max} : 2.5$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 64$ % $q_u : 2.14$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 1.80$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 24.3$ %		$V=2490$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max} : 3.5$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha : 81$ % $q_u : 2.71$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t : 2.02$ g/cm <sup>3</sup> $\omega : 19.7$ %

사진 3.3 固結體의 形状  
- 珪砂 6號 · Gel-time 5秒 -

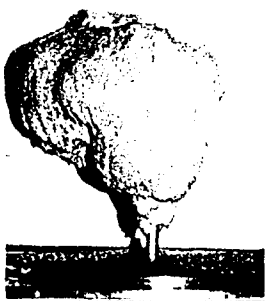
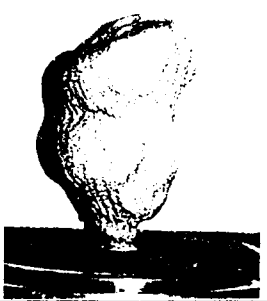
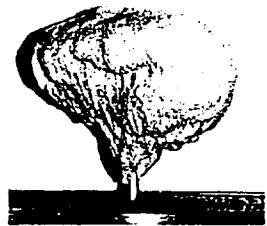
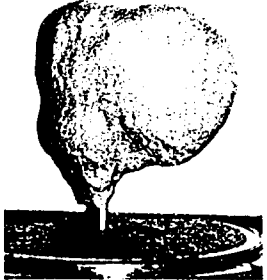
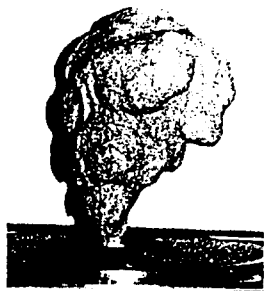
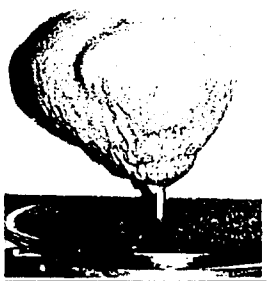
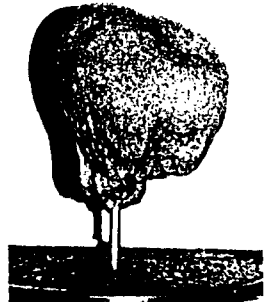
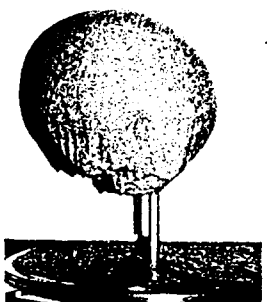
上載庄	注入条件	緩	詰	密	詰
	Q=1200cc	固結体形状	実験結果	固結体形状	実験結果
1.0 kgf/cm <sup>2</sup>	$q=1500$ cc/min  Dr: 31 % $\kappa: 6.68 \times 10^{-3}$  Dr: 70 % $\kappa: 3.49 \times 10^{-3}$		$V=2860$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 2.9$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 54$ % $q_u: 1.88$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.78$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 24.1$ %		$V=2697$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 3.8$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 84$ % $q_u: 3.62$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.93$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 20.2$ %
	$q=2000$ cc/min  Dr: 34 % $\kappa: 6.12 \times 10^{-3}$  Dr: 72 % $\kappa: 3.77 \times 10^{-3}$		$V=2610$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 3.2$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 73$ % $q_u: 1.75$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.78$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 23.3$ %		$V=2490$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 6.2$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 81$ % $q_u: 3.17$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.88$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 20.5$ %
	$q=1000$ cc/min  Dr: 33 % $\kappa: 6.91 \times 10^{-3}$  Dr: 73 % $\kappa: 4.09 \times 10^{-3}$		$V=2330$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 2.6$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 82$ % $q_u: 2.18$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.79$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 23.3$ %		$V=2610$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 4.0$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 74$ % $q_u: 2.84$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 2.05$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 20.7$ %
	$q=2000$ cc/min  Dr: 34 % $\kappa: 6.96 \times 10^{-3}$  Dr: 72 % $\kappa: 3.77 \times 10^{-3}$		$V=2720$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 3.6$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 73$ % $q_u: 2.40$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.84$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 21.2$ %		$V=2620$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 6.3$ kgf/cm <sup>2</sup> $\alpha: 88$ % $q_u: 2.93$ kgf/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.99$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 19.6$ %

사진 3.4 固結體의 形状  
- 硅砂 6號 · Gel-time 5秒 -

上 載 注	注入条件	緩	詰	密	詰
	Q=1200cc	固結体形状	実験結果	固結体形状	実験結果
1.0 kg/cm <sup>2</sup>	$q=1000$ cc/min  Dr: 65 % $\kappa: 2.39 \times 10^{-3}$  Dr: 92 % $\kappa: 2.06 \times 10^{-3}$		$V=2650$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 0.8$ kg/cm <sup>2</sup> $\alpha: 103$ % $q_u: 4.46$ kg/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.86$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 21.8$ %		$V=3120$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 1.5$ kg/cm <sup>2</sup> $\alpha: 84$ % $q_u: 5.31$ kg/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.86$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 16.4$ %
	$q=2000$ cc/min  Dr: 70 % $\kappa: 2.08 \times 10^{-3}$  Dr: 93 % $\kappa: 2.92 \times 10^{-3}$		$V=2700$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 2.2$ kg/cm <sup>2</sup> $\alpha: 91$ % $q_u: 4.41$ kg/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.88$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 21.4$ %		$V=3180$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 2.9$ kg/cm <sup>2</sup> $\alpha: 93$ % $q_u: 4.67$ kg/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 2.06$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 17.0$ %

고결체의 형상

- 珪砂 7호 · Gel-time 5秒 -

1.0 kg/cm <sup>2</sup>	$q=1000$ cc/min  Dr: 78 % $\kappa: 1.53 \times 10^{-3}$  Dr: 92 % $\kappa: 1.22 \times 10^{-3}$		$V=3920$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 0.8$ kg/cm <sup>2</sup> $\alpha: 58$ % $q_u: 2.03$ kg/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.86$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 14.0$ %		$V=4130$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 1.4$ kg/cm <sup>2</sup> $\alpha: 76$ % $q_u: 1.86$ kg/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.97$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 14.1$ %
	$q=2000$ cc/min  Dr: 78 % $\kappa: 1.58 \times 10^{-3}$  Dr: 92 % $\kappa: 1.26 \times 10^{-3}$		$V=4135$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 2.4$ kg/cm <sup>2</sup> $\alpha: 72$ % $q_u: 1.37$ kg/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.92$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 14.6$ %		$V=4090$ <sup>cm<sup>3</sup></sup>  $P_{max}: 2.6$ kg/cm <sup>2</sup> $\alpha: 64$ % $q_u: 2.15$ kg/cm <sup>2</sup> $\rho_t: 1.94$ g/cm <sup>3</sup> $\omega: 13.9$ %

사진 3.5 固結體의 形狀

- 阿武畏川砂 · Gel-time 5分 -

### 3.2 相對密度에 의한 固結砂의 體積

相對密度에 의한 固結體의 體積  $V$ 를 水中重量法으로 測定한 結果를 그림 3.1에 나타낸다. 藥液이 間隙을 完全히 充填했을때의 體積의 計算置를 圖中에 點線으로 表示하고 있다. 圖左側의 緩結性藥液의 경우는 느슨한 供試體, 조밀한 供試體 어느 경우도 體積이 計算置와 거의 同一하던가 그 보다 큰 體積을 보이고 있다.

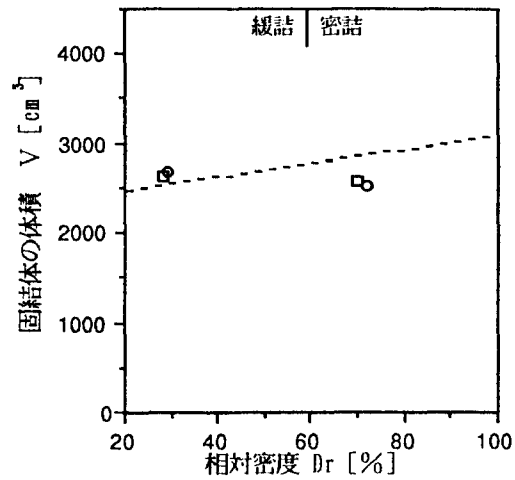
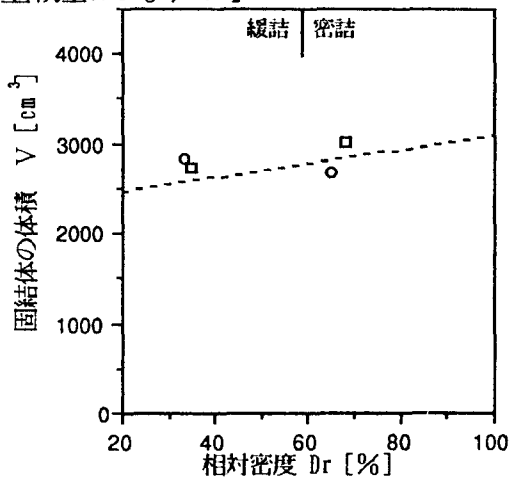
그러나 注入速度  $q$ , 相對密度나 上載壓  $\sigma_v$ 에 의하여 적은 경우도 보인다. 그림 右側의 瞬結性藥液으로는 計算置를 基準으로 固結體의 體積  $V$ 는 注入速度  $q$ 에 의하여 差는 있으며, 한편 計算置보다 多少 적다. 이것은 割裂注入의 경우에는 品質管理上 問題가 될 可能性이 있다고 생각되어진다.

### 3.3 注入固結砂의 一軸壓縮 強度와 體積

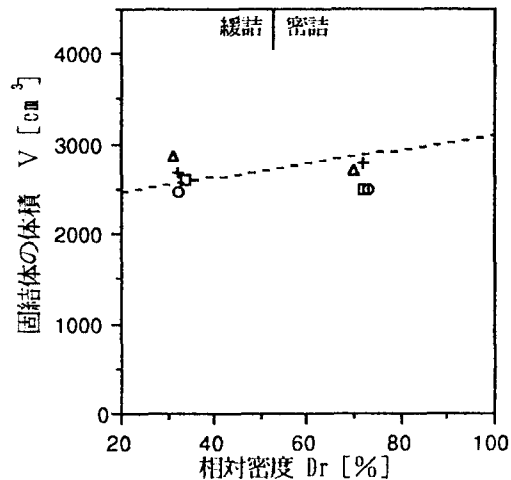
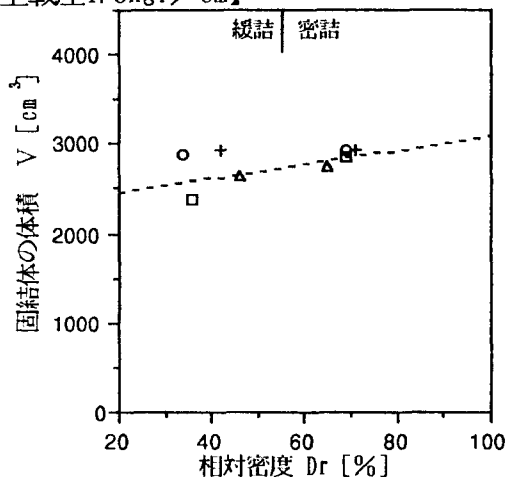
上載壓  $\sigma_v$ 에 의해 Gellime 5分の 緩結性藥液과 Gellime 5秒의 瞬結性藥液을 注入했을때의 供試體의 固結體의 體積  $V$ 와 一軸壓縮強度와의 關係를 그림-3.2에 나타낸다. 全般的인 傾向으로서 體積이 클수록 強度가 크다고 하는 傾向이 보인다. 즉 理想的인 浸透注入이 行하여진 편이 強度의 差가 적다고 생각되어진다.

緩結性薬液 ← ● → 瞬結性薬液

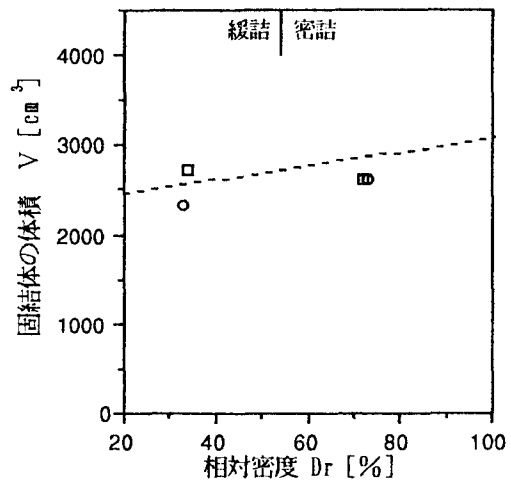
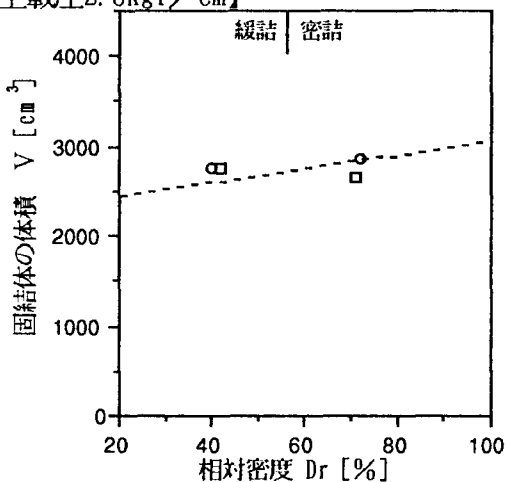
【上載圧0.5kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧1.0kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧2.0kgf/cm<sup>2</sup>】

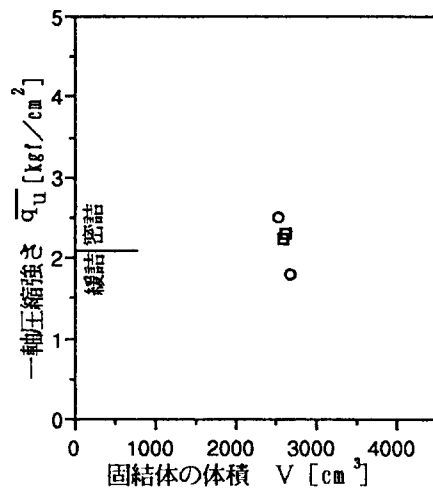
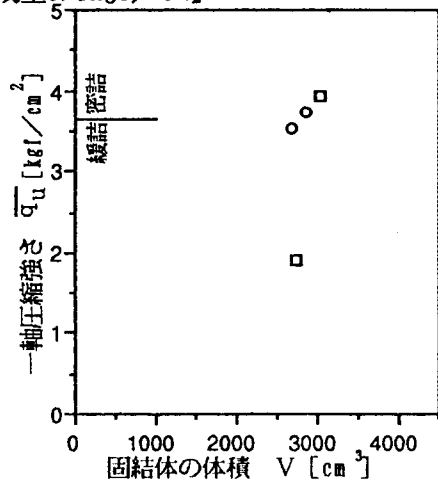


+ q = 500cc/min, ○ q = 1000cc/min, △ q = 1500cc/min, □ q = 2000cc/min

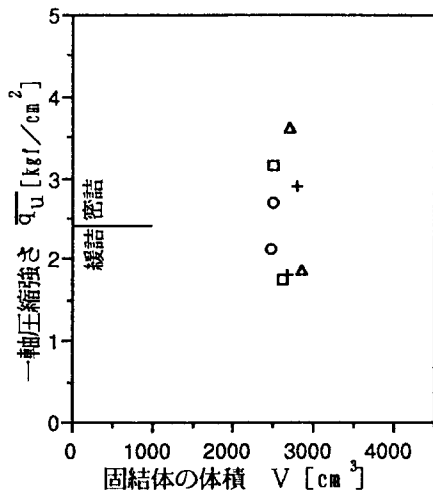
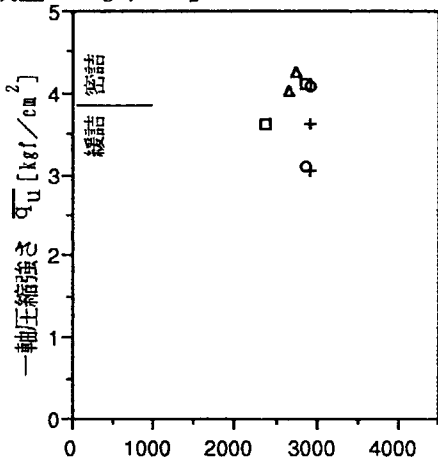
그림 3.1 相對密度와 固結體의 體積

緩結性薬液 ← ● → 瞬結性薬液

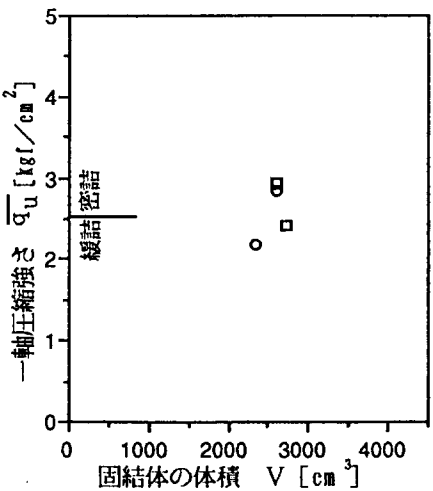
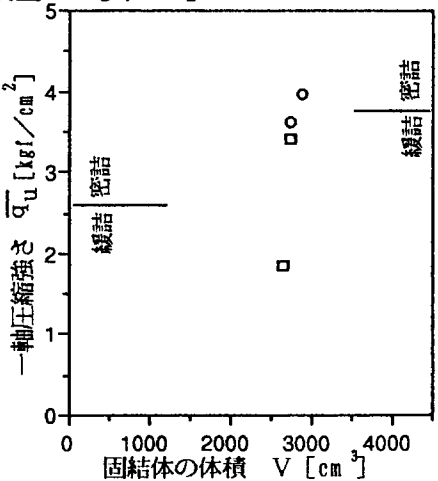
【上載圧0.5kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧1.0kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧2.0kgf/cm<sup>2</sup>】



+ q = 500cc/min, ○ q = 1000cc/min, △ q = 1500cc/min, □ q = 2000cc/min

그림 3.2 固結體의 體積과 一軸壓縮強度



### 3.4 相對密度와 最大注入壓의 關係

각각 上載壓  $\sigma_v$ 에 의하여 緩結性藥液과 瞬結性藥液을 注入했을때 供試體의 相對密度와 注入壓 P의 關係를 그림 3.3에 나타낸다. 緩結性藥液의 경우 相對密度가 크게 됨과 동시에 注入速度 q와 上載壓  $\sigma_v$ 이 클수록 急上昇하고 있다. 瞬結性藥液의 注入壓 P는 緩結性藥液보다도 훨씬 크다. 주된 原因은 藥液의 Gel化에 따른 透水性의 低下에 있다고 생각되어진다.

모든 條件의 注入速度 q 및 緩結性藥液·瞬結性藥液에 있어서 조밀한 供試體의 注入壓 P는 느슨한 모래의 注入壓 P를 초과하고 있다. 注入壓 P의 傾斜(기울기)는 上載壓  $\sigma_v$ 가 클수록 또한 Geltime이 짧을수록 경사가 급하게 變化하고 있다. 相對密度가 注入壓 P에 미치는 影響은 豫想하였던 것보다 훨씬 顯著한 것으로 여겨진다. 이 顯著한 效果는 조밀한 모래일수록 透水性이 낮기때문이라고 생각할 수 있다.

### 3.5 注入壓과 注入速度의 關係

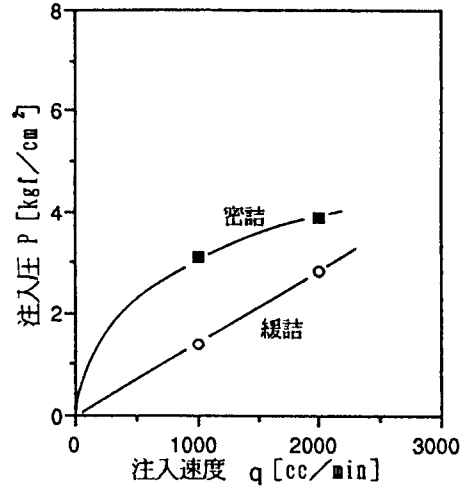
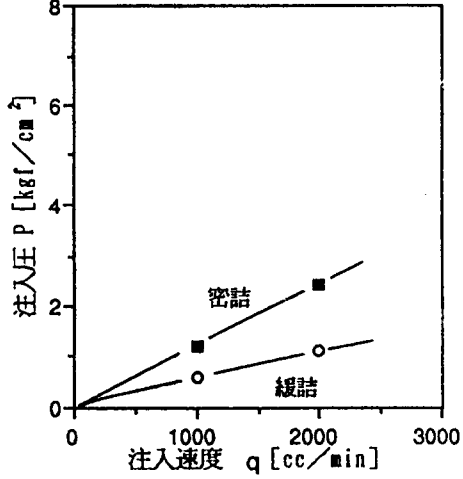
각각의 上載壓  $\sigma_v$ 에 의해 緩結性藥液 및 瞬結性藥液 注入에 의하여 얻어진 P~q曲線을 그림 3.4에 표시한다. 注入壓P는 注入速度 q가 크게됨에 따라서 높게 되는 바 그림 右側의 注入中에 Gel化가 생기지 않은 緩結性藥液의 上載壓  $\sigma_v$ 이 0.5kgf/cm<sup>2</sup>의 경우 注入壓 P는 거의 완만한 上昇傾向을 보이고 있다.

한편 上載壓  $\sigma_v$ 가 1.0kgf/cm<sup>2</sup>의 경우 q=1500cc/min부터 線形이 조금 이탈되어 上昇하고 있다. 上載壓  $\sigma_v$ 가 2.0kgf/cm<sup>2</sup>의 경우는 上載壓  $\sigma_v$ =0.5kgf/cm<sup>2</sup>보다 다짐정도에 의한 注入壓 P의 差가 큰 바, 이것은 上載壓  $\sigma_v$ 의 影響에 의한 것이라고 생각되어진다.

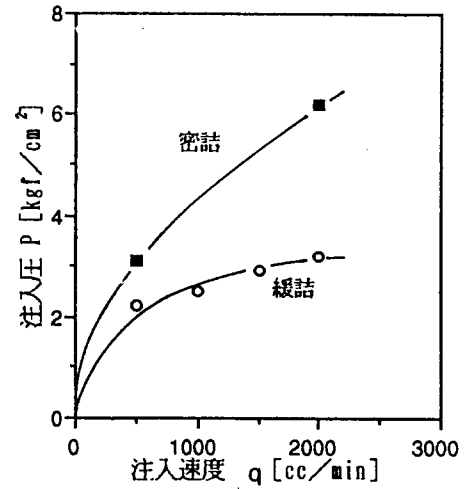
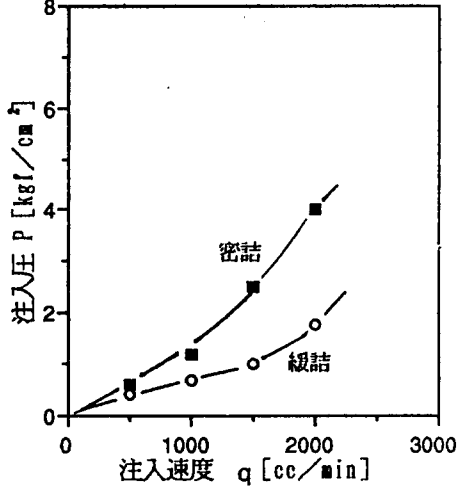
그림 右側의 注入中에 Gel化가 생기는 瞬結性藥液의 注入에 있어서는 上載壓  $\sigma_v$ 가 0.5kgf/cm<sup>2</sup>의 느슨한 供試體만이 注入壓 P가 線形성을 나타내고 있는 바 그외의 경우는 注入速度 q=1000cc/min까지는 急上昇하여 線形으로부터 크게 이탈하고 있다.

緩結性薬液 ← ● → 瞬結性薬液

【上載圧0.5kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧1.0kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧2.0kgf/cm<sup>2</sup>】

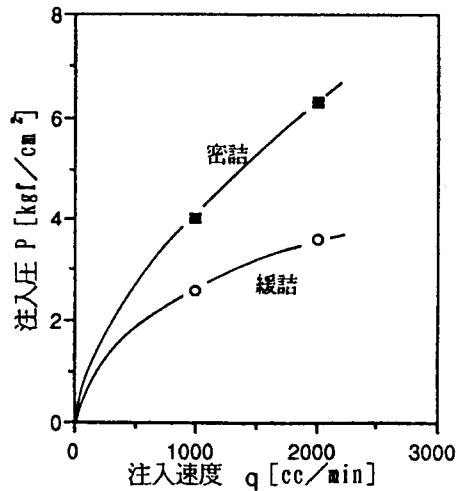
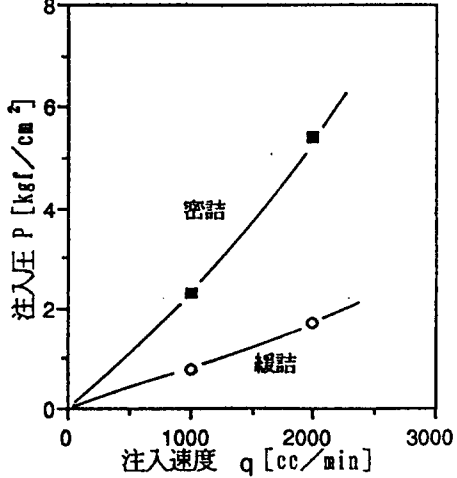
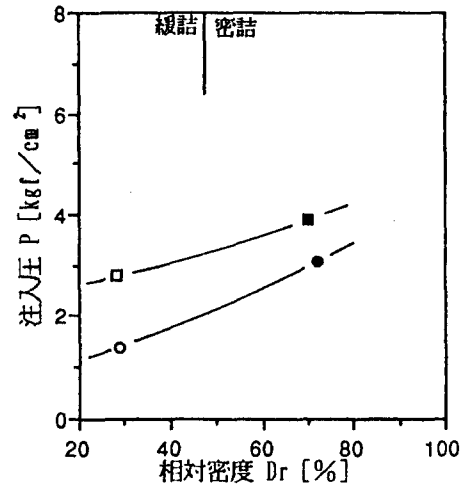
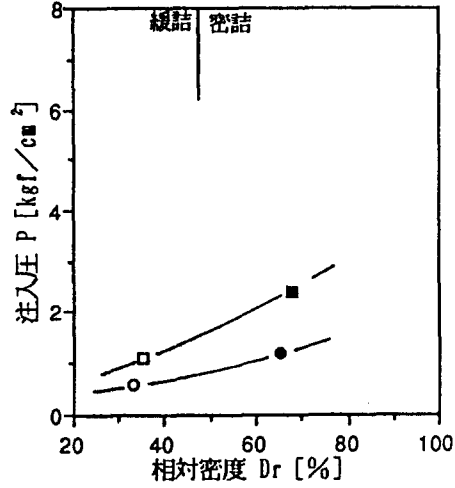


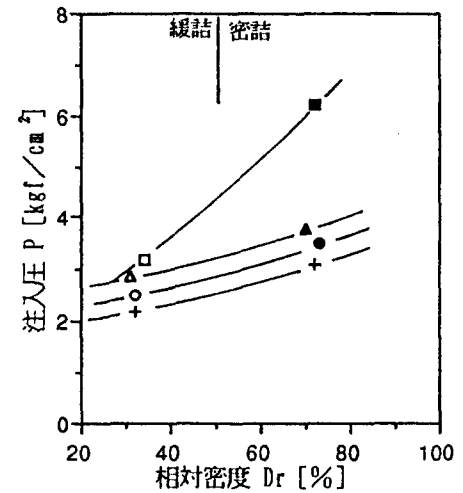
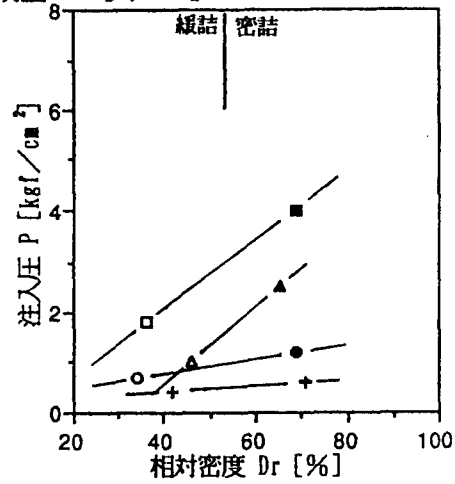
그림 3.3 相對密度와 注入壓

緩結性薬液 ← ● → 瞬結性薬液

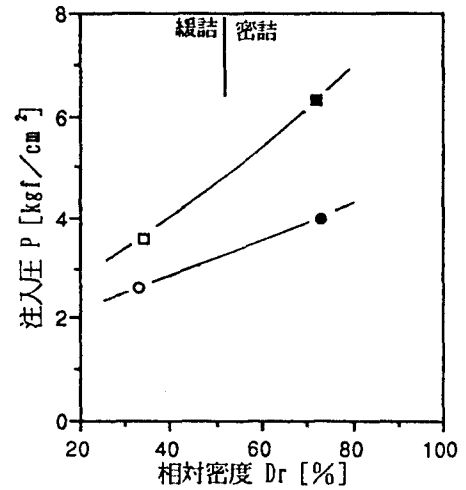
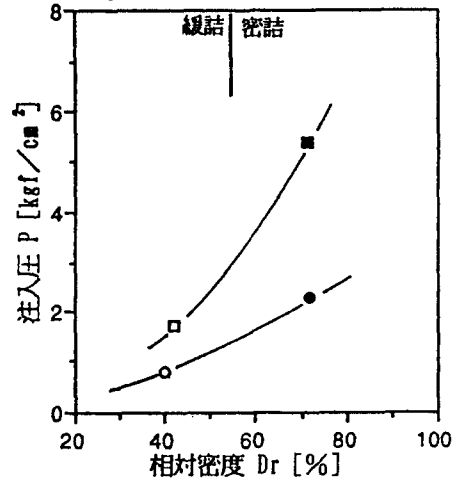
【上載圧0.5kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧1.0kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧2.0kgf/cm<sup>2</sup>】



+ q = 500cc/min, ○ q = 1000cc/min, △ q = 1500cc/min, □ q = 2000cc/min

그림 3.4 注入速度와 注入壓

### 3.6 化學分析에 의한 充填率의 分布

充填率  $\alpha$ 의 分布를 把握하기 위하여 化學分析용 試料(約 15g)를 固結砂體의 外측의 未固結部에서 4箇所와 固結砂體를 물로 세척하여 남은 固結體의 표면으로부터 4箇所, 內部注入管의 先端部 上下部로부터 2箇所, 總 10箇所를 채취했다. 上述의 內容을 總合的으로 정리한 것이 그림 3.5, 3.6이다.

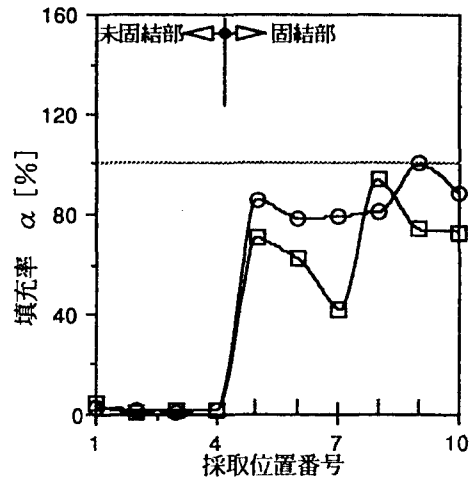
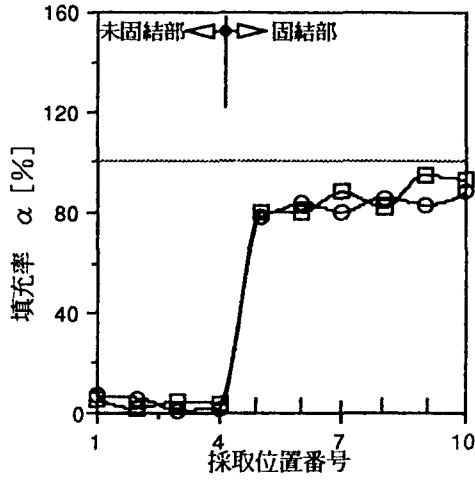
각각의 條件에 의하여 固結된 固結砂體의 形狀에 關係없이 未固結部와 固結部에서의 充填率  $\alpha$ 는 顯著한 差가 보인다. 또한 모든 固結砂內部의 充填率  $\alpha$ 에 대하여는 다소의 흠이 보이지만 全般的으로 볼때 느슨한 供試體보다 조밀한 供試體가, 瞬結性藥液보다 緩結性藥液의 充填率  $\alpha$ 가 높다.

그림 3.5左側 느슨한 供試體에의 瞬結性藥液의 注入의 경우 固結砂內部의 充填率  $\alpha$ 는 70%~110%로서 어떤 上載壓에서도 분산이 별로 없다. 그러나 그림 右側의 瞬結性藥液의 注入에 있어서는 固結砂內部의 充填率  $\alpha$ 는 거의 42%~100%로서 上載壓이 0.5의 경우 比較的 結果가 분산되어 있지만 上載壓이 크게됨에 따라서 緩結性藥液이나 瞬結性藥液과의 充填率  $\alpha$ 의 差가 적다.

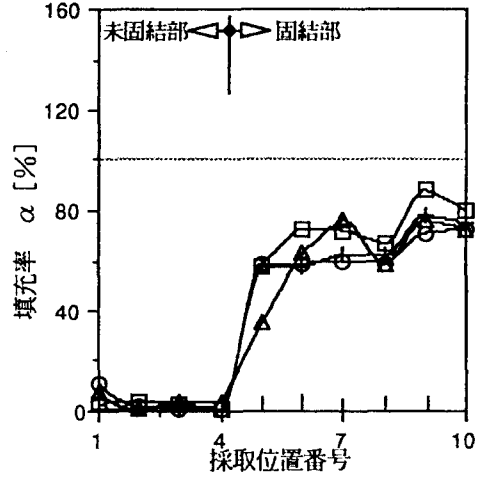
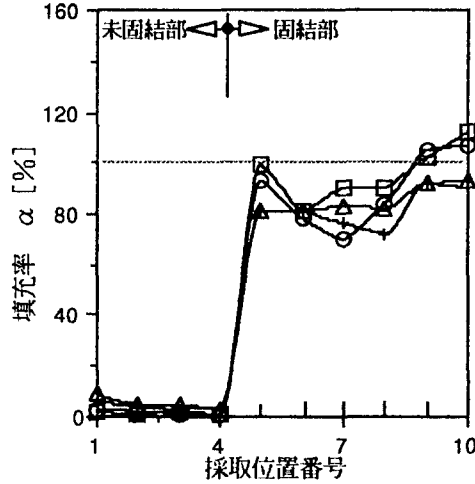
그림 3.6에서 조밀한 供試體에의 緩結性藥液의 充填率  $\alpha$ 는 70%~125%, 瞬結性藥液은 64%~99%로서 조밀한 供試體가 느슨한 供試體보다 또한 緩結性藥液이 瞬結性藥液보다 比較的 높은 수치가 나왔다. 이경우도 上載壓이 크게 됨에 따라서 緩結性藥液이나 瞬結性藥液간의 充填率  $\alpha$ 의 差는 적다. 充填率  $\alpha$ 는 100%이상인 것은 後續의 注入藥液이 固結體에 浸透시 間隙 Gel을 濃縮하기 때 문인 것으로 생각되어진다.

緩結性薬液 ← ● → 瞬結性薬液

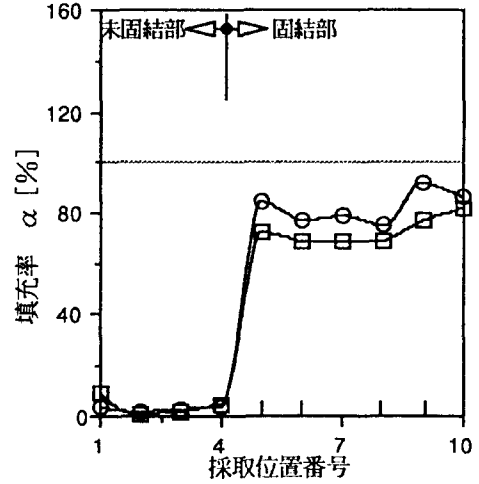
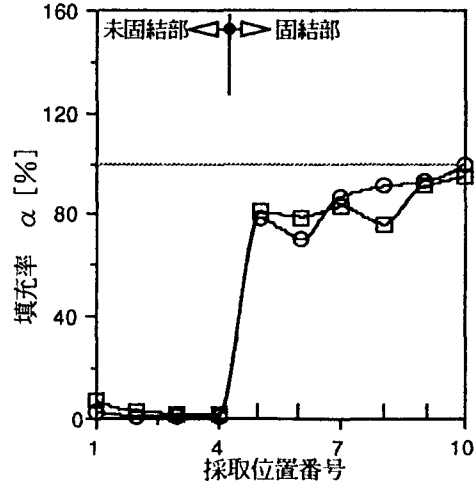
【上載圧0.5kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧1.0kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧2.0kgf/cm<sup>2</sup>】

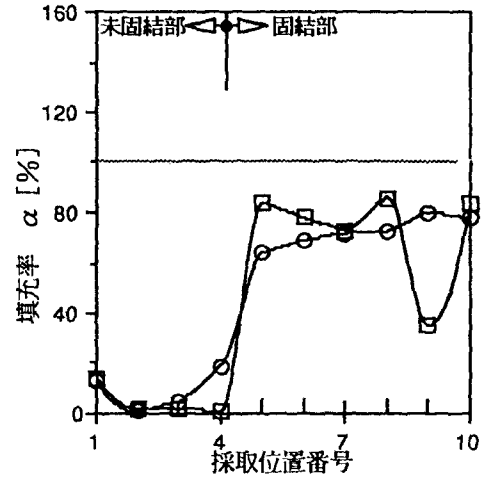
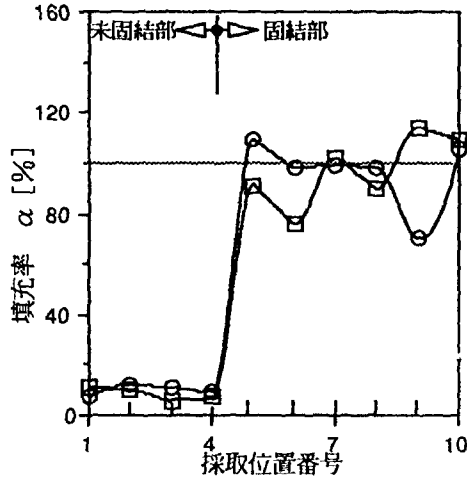


+ q = 500cc/min, ○ q = 1000cc/min, △ q = 1500cc/min, □ q = 2000cc/min

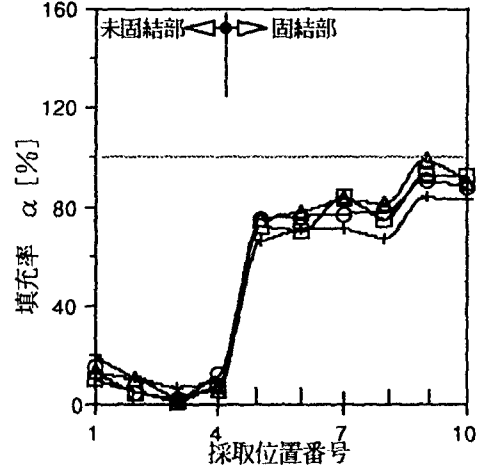
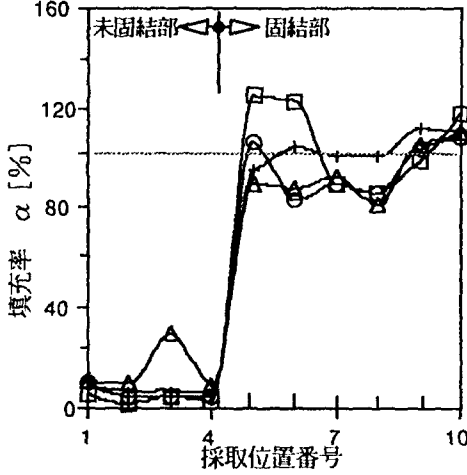
그림 3.5 充填率의 分布  
(느슨한 공시체)

緩結性薬液 ← ● → 瞬結性薬液

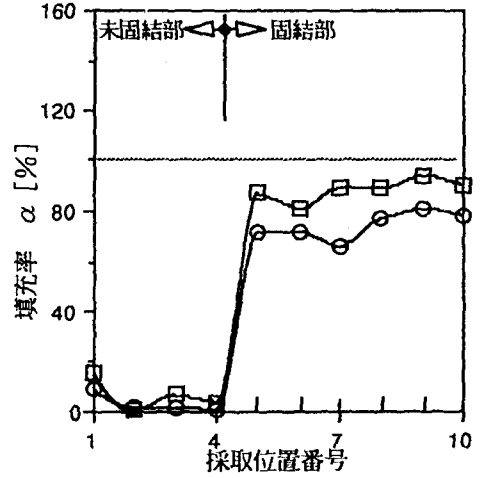
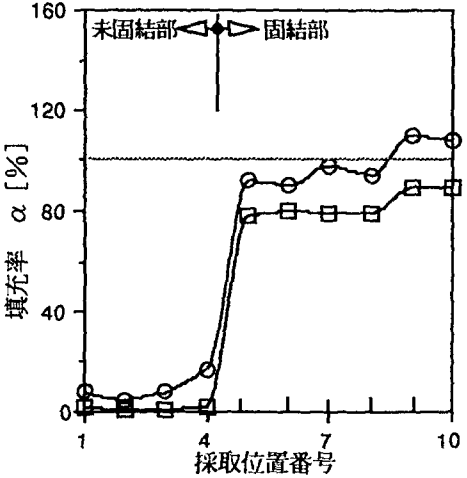
【上載圧0.5kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧1.0kgf/cm<sup>2</sup>】



【上載圧2.0kgf/cm<sup>2</sup>】



+ q = 500cc/min, ○ q = 1000cc/min, △ q = 1500cc/min, □ q = 2000cc/min

그림 3.6 充填率의 分布  
(조밀한 공시체)

## 結論

### 1) 固結體의 形狀

緩結性藥液을 注入하였을때의 固結體의 形狀은 注入條件에 의하여 體積間의 差는 있지만 거의 完全한 球狀이 되고 있다. 이경우 理想的인 浸透注入이 되고 있다고 생각되어진다.

緩結性藥液을 注入했을때의 固結體의 形狀은 不規則적인 일그러진 形狀이 되고 있다. 그러나 Gelttime 5秒의 瞬結性藥液을 注入했을때의 固結體도 上載壓  $\sigma_v$ 가 크게됨에 따라 또한 注入速度  $q$ 가 빠를수록 球狀에 가까운 모양이 되고 있다.

### 2) 注入壓과 注入速度의 關係

瞬結性藥液의 上載壓  $\sigma_v$  0.5kgf/cm<sup>2</sup>의 경우 注入壓  $P$ 는 거의 완만한 上昇傾向을 보이고 있다. 한편 上載壓  $\sigma_v$ 가 1.0kgf/cm<sup>2</sup>의 경우  $q=1500$ cc/min부터 線形이 조금 이탈하여 上昇하고 있다.

注入中에 Gel化가 생기는 瞬結性藥液의 注入에 있어서는 上載壓  $\sigma_v$ 가 0.5kgf/cm<sup>2</sup>의 느슨한 供試體는 注入壓  $P$ 는 線形성을 나타내고 있지만 그 외의 경우는 注入速度  $q=1000$ cc/min까지는 急上昇하여 線形부터 크게 이탈하고 있다.

### 3) 化學分析에 의한 充填率의 分布

緩結性藥液의 注入의 경우 固結砂內部の 充填率  $\alpha$ 는 70%~110%로서 어느 上載壓에서도 별로 홀어짐이 없다. 그러나 瞬結性藥液의 注入에 있어서는 固結砂內部の 充填率  $\alpha$ 는 거의 42%~100%이다.

## 参考文献

- 1) 土質工學會：地盤改良の調査・設計から施工まで，1981
- 2) 土質工學會：軟弱地盤対策工法―調査・設計から施工まで，1988
- 3) 土質工學會：薬液注入工法の調査・設計から施工まで，1990
- 4) 日本材料學會土質安定材料委員会：地盤改良工法便覧，1991
- 5) 日本薬液注入協會：薬液注入工法の設計・施工指針，1989
- 6) 島田俊介，佐藤武，多久質共著：最近の地盤注入工法，理工圖書，1977
- 7) 森 麟，田村昌仁，福井儀弘：ゲル化時間の短い薬液による砂地盤の割裂現象と浸透メカニズム，土木學會第43回年差學術講演會講演概要集，第Ⅲ部門，1988
- 8) 東亞合成化學：超高强度處方アロンSR-Hi,H・3-7-02-BR
- 9) 川地武，喜多大三：薬液注入地盤における注入材の分布と注入効果，土と基礎，VOL35，No5，1987
- 10) Reuben H. Karol：Chemical Grouting，1990
- 11) 垂水尚志，關根悦夫，荒木進，岩佐弘，關口智之：P～q曲線及び P～tチャートに基づく注入形態の検討，薬液注入工法における注入効果の豫測確認に関するシンポジウム，土質工學會，1993
- 12) 森麟，林忠，入谷剛：注入中の P～tチャートの壓力變化による割裂狀況豫測の可能性について薬液注入工法における注入効果の豫測確認に関するシンポジウム，土質工學會，1993
- 13) 森麟，田村昌仁，平野學：ゲル化時間の短い薬液による注入壓の特徴について，第22回土質工學研究發表會，1987