

# 藥液注入工法の 最近動向

千 柄 植\*

## 1. 序 論

藥液注入이란 注入材(化學藥液)를 所定の 地盤 속의 空隙에 壓送, 充填시켜 地盤의 不透水化(遮水), 또는 地盤의 強度를 增大시키는 것을 말한다. 注入材는 grout 라 불리우는 것으로서 流動性을 갖고 있고 注入 Pump에 의하여 地盤 內空隙에 壓送된 후 일정한 時間(Gel time 또는 Setting time 이라 함)이 經過한 후 凝結 또는 硬化되는 性質을 갖고 있다.

藥液注入工法은 機械裝置가 간단하고 小規模 이어서 地中の 매우 깊은 곳이나 터널막장같은 매우 협소한 場所에서도 施工이 可能하고 騒音·振動·交通難 등의 發生公害가 거의 없으며 더욱 工期가 짧고 他工法으로는 達成不可한 分野에서도 施工할 수 있는 特徵을 갖고 있다. 從來의 本工法은 應急對策 또는 補助的 工法으로서 쓰여왔으나 最近엔 점차 本格的, 恒久的 地盤改良工法으로 되어가고 있다.

地盤土는 本工法에 의해  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  배의 遮水效果를 볼 수 있으며, 自立性이 없는 飽和細砂의 경우  $2 \sim 5 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{cm}^2$  의 一軸壓縮強度, 變形係數는  $100 \sim 500 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{cm}^2$  으로 된다. 實際의 地下工事에서 地下水位 以下の 砂質土層의 粘着力增大目的으로 藥液注入이 有効하게 適用되어

터널 굴진시의 崩壞防止, 坑底의 Heaving 防止, 土留壁의 土壓減少 등을 목적으로 많이 쓰인다. 그러나 摩擦杭·先端支持杭·Pier 基礎의 支持力 補強·댐基礎의 止水 등을 목적으로 할 경우는 注入固結土의 耐久性 檢討가 있어야 한다.

藥液注入工法이 우리 나라에서 建設工事に 適用된 것은 서울·釜山の 地下鐵建設工事以後라 할 수 있겠다. 초창기엔 原始的 注入方法 등 그 注入效果는 크게 期待하기 어려웠으나 이젠 建設工事に 必要不可缺한 工法으로 되어 있고 工事의 工期·安全性·經濟性 등을 左右하게 되었다고 하여도 過言은 아닐 것이다. 그러나 本工法은 上述한 바와 같은 長點이 있는 反面에 아직 解決하지 못한 여러가지 問題點을 안고 있다.

本稿에서는 주로 海外에서의 注入工法の 現狀 및 最近 研究動向을 中心으로 檢討해 보고자 한다.

## 2. 海外에서의 注入工法の 發達

注入工法이 最初로 建設分野에서 쓰인 것은 佛 C. Berigny 가 1802年 洗掘된 石造水門基礎 補修工事に 粘土와 石灰를 Slurry 상태로한 不安定性注入材를 使用한 것으로 傳해지고 있다.<sup>1)</sup>

岩盤균열의 止水用으로 시멘트 注入의 適用은 1870年代 英國 炭鑛에서 始作되었고 今世紀初

\* 正會員·漢陽大學校 工科大學 副敎授·工學博士

歐美諸國에서 댐의 Curtain Grout 에 많이 使用되었다. 더욱 시멘트 注入目的이 岩盤의 強度增大로 擴大된 것은 1933~5年 피사의 斜塔 基礎補修工事が 그 代表的 例라고 볼 수 있다.

물유리와 염화칼슘을 사용한 珪化法을 最初로 考案해 낸 것은 1887年 獨 Jeziorsky 이며, 그 후 계속해서 改良이 시도되어 1907年 벨기에의 L. Dumont 이 1 Shot System 을 開發하기에 이르렀다.

그러나 細砂層에서 確實하게 注入possible한 溶液型 注入材의 實際活用은 和蘭의 鑛山技師 H.J. Joosten 의 1925年의 特許以後라 할 수 있다. 물유리와 염화칼슘 2液의 瞬結性 注入材를 使用하여 2 Shot System 으로 30~50 kg·f/cm<sup>2</sup>의 壓縮強度를 얻었다. 이 Joosten 工法은 그 후 獨·英 등에서 특히 砂層中에서의 地下鐵工事に 많이 쓰였고 1930年代에는 1.5 Shot System 型 藥液 注入에 의한 地盤 注入에 關心이 모아지기 始作하였다. 드디어는 佛 Soletanche 社가 開發한 Manjet tube 法(Double Packer 法)에 의한 注入方法이 實用化되고 이 工法은 現在도 歐美에 있어서 가장 보편화된 二重管方式의 壓力 注入工法으로서 널리 쓰이고 있다. 日本의 경우 今年 3月에 開通된 新幹線 建設工事(大宮-上野)에서 本工法에 의해 큰 效果를 보았다고 한다.

1950年代에는 高分子化學의 急速한 進歩의 結果, Acrylamide, Chromelignin, Urea 系 등 1.5 Shot System 型 藥液이 開發되더니 드디어 美 American Cyanamid 社가 1953年에 特許를 얻은 Acrylamide 를 主劑로 한 “AM-9”은 물에 가까운 低粘性이고 Gel time 調節이 容易한 藥液으로서, 이의 開發은 藥液 注入의 黃金時代突入의 계기가 되었다. 그러나 20여년의 成長期가 지나자 이 藥液은 그 毒性으로 인한 公害 때문에 1974年頃 製造禁止가 되어 現在에 이르고 있으며 지금은 물유리계 藥液이 이를 代身하여 美國의 注入工事に 활발히 쓰여지고 있다. 그 例<sup>2)</sup>로서, 1983年에 砂礫地盤에 施工된 Pittsburgh 의 地下鐵工事(圖-1 參照)에서는 10 種以上の 基礎補強工法이 出品, 比較檢討되었으나 結局 本工法이 採用되었다. 地盤의 透水係數가 10<sup>1</sup>~10<sup>-2</sup> cm/sec 로서 總연장 6.5 km 의 Manjet tube 로

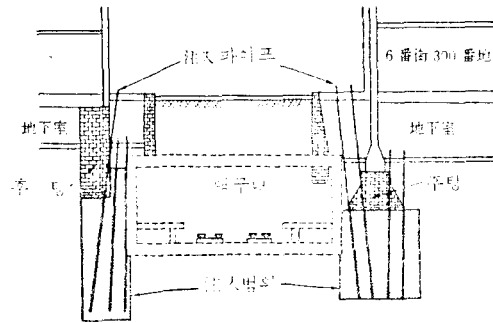


그림 1. 美 Pittsburgh 地下鐵工事に 있어서 藥液 注入부터 380만리터의 물유리계 藥液이 注入되어 7 kg·f/cm<sup>2</sup> 以上の 一軸壓縮強度를 얻을 수 있어 道路沿邊建物の Underpinning 에 成功하였다.

한편 日本에서는 1915年頃 炭鑛, tunnel 工事 등에서 止水用으로 시멘트와 물유리가 쓰였다는 기록이 있을 뿐 藥液 注入의 廣範圍한 實用化는 1950年代 以後라 할 수 있다. 岩盤에 대한 시멘트 注入 技術은 急激히 發達하여 最近엔 Micro Cement 開發로 인해 靑函海底터널의 建設에 매우 큰 役割을 하고 있다.

물유리계 藥液을 本格的으로 使用하게 된 것은 1951年 丸安·今岡에 의해 開發된 MI 工法(물유리와 알루미늄산소다), 1961年에 樋口에 의해 L·W 工法이 開發되어 이들이 日本에서의 注入工法 發展의 基礎가 되었고 그 후 酸類, 金屬鹽類, 알칼리계에 속하는 各種 注入材가 實用化되는 등 1960年代는 日本 藥液 注入界의 急成長期라 볼 수 있다.

그러나 1970年代로 되면서 各種 藥液이 開發되고 그 性能을 過信한 나머지 盲目的인 地盤 注入을 행한 結果 地下水汚染事故가 發生하여 급기야는 1974年 建設省의 暫定指針<sup>3)</sup>이 制定되면서 本工法은 크게 制約을 받게 되었다. 그러나 사실은 注入工法이 本格的인 地盤改良工法으로서 깊게 研究 開發되기는 이 暫定指針以後부터라 할 수 있다. 使用될 수 있는 藥液이 물유리계로 한정된 結果 注入業界는 注入材料의 質的 向上과 注入 施工技術面에서 심각한 對策이 檢討되고 研究開發面에서도 民間主導型으로 부터 官民協同으로 바뀌게 되었다. 그 結果 最初로 등장한 作品이 瞬結性 二重管 注入法이며 最近엔 이의 短點을 補

強하여 瞬粘性藥液과 緩結性藥液을 交代로 注入하는 複合注入工法이 研究開發되고 있다. 또 Column Jet Grout 등의 高壓噴射注入工法이 開發되고, 岩盤注入에서 實績이 있는 Packer를 地盤注入에서도 利用할 수 있는 工法이 注目되고 있다.

日本の 藥液注入工法の 發達狀況을 다른 側面에서 살펴보기로 하자. 日本藥液注入協會의 調査<sup>4)</sup>에 의하면, 1963年頃の Peak 時期엔 年間約 6억리터의 藥液이 使用되었고 暫定指針 以後 1980年度엔 한 해 동안에 물유리계만도 10억 리터를 상회하고 있다. 現在 市販되고 있는 물유리계 藥液만도 40여개 會社에서 150여종에 이르고 있으며 1978년부터 日本藥液注入協會의 주관하에 藥液注入技士資格檢定試驗이 實施되고 더욱 1984年 부터는 國家試驗制로 바뀌는 등 本工法의 重要性 및 役割은 가히 짐작할 수 있다.

圖-2 및 寫眞-1은 現在 東京電力에서 施工中

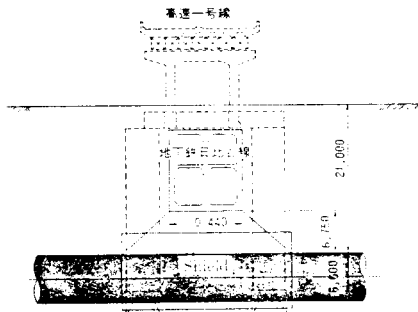


그림-2. Shield의 日比谷線·高速 1號線 交差部

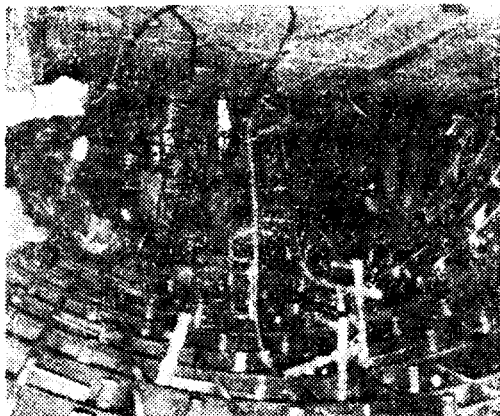


사진-1. 自動制御 System에 의한 Shield 機內에서의 裏込背面注入光景

인(1983. 5~1987. 4) 超高壓地中送電線工事中에 擴大 Shield 工法을 適用한 例로서 瞬結性 및 緩結性溶液型 물유리계 藥液과 CB를 併用하여 큰 注入效果를 보고 있다.

### 3. 注入材의 土中에서의 舉動

藥液의 注入形態로서 가장 理想的인 形은 浸透注入이다. 그러나 實際 注入에서는 土中の 弱線이나 土層境界에 沿하여 藥液이 흠을 割裂하면서 들어가게 되는 소위 脈狀注入으로 되기 쉽다. 細砂以下の 細粒土層에서는 脈狀注入이 一般的 패턴이다. 이와 같은 경우의 藥液注入에 의한 改良理論은 現在 研究中이며, 이러한 注入은 어떤 경우는 오히려 부작용이 생길 수도 있다. 割裂한다는 것은 注入壓이 地盤의 割裂抵抗壓以上으로 되기 때문이다. 즉, 割裂注入은 地盤을 注入壓으로 割裂하여 소위 水壓破碎現象 (Hydraulic Fracturing)이 생기며 이 때 割裂部分에 注入材가 들어감으로 인해 흠이 흐트러지는 것은 자명한 사실이다. 따라서 割裂注入에 의한 脈狀部의 들어가는 方向, 分布狀態, Homogel 強度 등이 問題로 된다. 즉, 注入材가 設計範圍를 훨씬 넘어 注入되고 目的範圍에 그다지 注入되지 않는 경우는 改良效果는 없고 오히려 마이너스효과를 자초하게 된다. 그러나 最近에 瞬結性注入材의 二重管單相注入 등에 의해 상당히 效果를 높이는 例가 증가하고 있으며 割裂注入에 의한 地盤改良理論도 점차 確立되어 가고 있다.

水壓破碎現象은 割裂現象이라고도 하는 데 이러한 現象은 藥液注入時 뿐만 아니라 杭打 또는 Sand drain의 Casing 打設時 또는 現場透水試驗時에 높은 注入壓에 의하여도 發生한다. 筆者는<sup>5)</sup> 最近 우리 나라 地下鐵工事現場에서 地中 約 12m 지점에서 上向式 藥液注入時에 Hydraulic Fracturing에 의해 約 50여 cm의 地盤隆起 또는 局部地盤破碎現象을 目擊한 바 있다. 이와같은 水壓破碎現象은 특히 1976년의 Teton Dam<sup>6)</sup>의 破壞以後 世人의 많은 關心을 모으게 되었다.

Maag의 理論에 의하면 實用的 注入速度로서 割裂하지 않고 浸透가 되기 위해서는 地盤의 透

水係數(大略  $10^{-3}\text{cm/sec}$  以上일 것), 注入壓(割裂破壞가 생기지 않을 정도), 使用注入材의 Gel time(緩結性일 것) 등의 要件이 必要하다. 따라서 Gel time 이 길 경우는 浸透注入이 될 要件이 된다. 또 注入材의 粘性을 될 수 있는 한 작게 하는 것도 注入壓低下效果가 있기 때문에 이것 역시 한 要件이 될 수 있다. 그러나 溶液型 물유리계 注入材는 粘性이 2~4 cps 이므로 물과 같은 1 cps 로 低下시키는 어렵다. 注入壓을 될 수 있는 한 작게 하는 方法을 택한다 하더라도 그 注入壓으로 割裂破壞가 생긴다면 흙의 割裂 低抗도 重要要因이 된다. 現場觀察에 의하면 強度가 큰 洪積砂層쪽이 強度가 작은 沖積砂層보다 浸透注入으로 되기 쉬운 傾向이 있다.

割裂注入에 의해 發生하는 脈狀의 Homogel 分布狀態는 注入壓, 注入方法 및 Gel time 에 의해 큰 差가 있다. 過大注入壓으로서 Gel time 이 긴 경우는 一般的으로 注入材가 地盤을 割裂하여 進行하는 距離가 길게 되고 멀리까지 散逸하여 脈狀 Homogel 의 分布密度가 低下한다. 따라서 設計範圍內에 殘留할 확율은 매우 작다. 여기에 대하여 二重管單相注入方式 등으로 Gel time 이 짧은 瞬結性注入材를 사용할 경우는 大略 脈狀 Homogel 分布密度가 높고 設計範圍內殘留率도 크다. 이 경우도 注入壓이 過大하면 割裂發生距離가 크게 되어 脈狀部의 分布密度를 低下시키는 結果가 된다.

割裂注入의 發生機構에 대해서는 아직 充分히 研究되어 있지는 않으나 大略 彈性解에 의해 水平割裂時와 鉛直割裂時 흙의 引張抵抗을 0으로 보아 理論上 注入壓力이  $\gamma h$  以上으로 행해질 경우 割裂發生의 可能性은 크다. Morgenstern 등<sup>7)</sup>은 많은 實驗을 바탕으로 水壓破碎概念을 導入하여 限界注入壓力의 算出式을 提示한 바 있다.

砂質地盤과 粘性土地盤의 割裂發生範圍의 相違에 대해 檢討해 보면, 모래지반은 透水性이 커서 割裂時 그 面이 注入材의 새로운 浸透通路가 된다. 實用的 注入速度로서 浸透注入될 수 있는 限界로서  $k=10^{-3}\text{cm/sec}$ , 또 注入口附近의 注入材의 浸透面積을 A라 하면, k가  $10^{-4}\text{cm/sec}$  인 경우 同一注入速度로 注入하면 割裂面은 10A 로 되며 割裂은 停止한다고 計算된다. 즉,

割裂面의 發生量은 k가 작을 수록, Gel time 이 짧을수록 크게 된다. 또 한 개의 割裂線의 길이는 Gel time 이 짧을수록 작게 된다. 따라서 瞬結性注入材를 注入하면 짧은 割裂이 많게 되고 Gel time 이 길 경우는 割裂數가 작아서 그 길이는 길게 된다.

#### 4. 注入工法の 課題 및 最近研究動向

本工法の 必要性이 急増하고 있는 것은 世界的 趨勢이나 아직 未解決의 重大한 問題點들을 안고 있다. 즉, 地盤改良의 確實性, 藥液의 正確한 注入範圍, 注入固結土의 強度增大 및 固結 地盤의 壽命 즉 注入材의 耐久性 등이 바로 그것이다.

모래地盤의 密度가 매우 큰 경우 藥液注入을 하게 되면 排水狀態에서 非排水狀態로 되므로 空隙水壓이 높아져 모래의 摩擦抵抗이 減少하게 되고 剪斷強度는 Gel 強度가 主體로 되기 때문에 藥液注入에 의해 오히려 그 強度가 원래의 排水剪斷強度보다 작게 될 경우도 있다.

自然地盤土는 매우 不均質하기 때문에 設計時 注入範圍를 定한다 하더라도 實際 目的한 範圍에 充分히 注入되지 않은 경우가 허다하다. 防止 對策으로서 注入方法 또는 施工에 自動制御 System 을 導入하는 등 많은 努力이 계속되어 實用化 되고는 있으나 아직도 많은 問題點을 內包하고 있다.

물유리계 藥液은 시멘터시스現象 등으로 注入了後 그 效果는 時間이 흐를수록 상당히 떨어지게 된다. 그러나 構造物基礎의 Underpinning 이나 膜基礎의 Curtain Grout 등 耐久性이 要望되는 경우는 얼마든지 있다. 從來 Curtain Grout 材로는 시멘트가 主로 쓰여 왔으나 最近엔 注入材의 改善으로 藥液의 使用에 대한 研究가 進行中이다.<sup>8)</sup> Bordon,<sup>9)</sup> 米倉,<sup>10)</sup> 楡垣<sup>11)</sup> 등은 특히 固結土의 長期耐久性 내지는 Homogel 의 溶脫現象 등의 研究에 主力하고 있다. 中性藥液은 從來의 물유리계에 비해 耐久性面에서 월등하다. 水中注入時 水中汚濁을 防止하기 위해 시멘트 大部分을 Slag 로 置換하고 더욱 中性領域에서 固結化하는 물유리의 실리카졸을 가한 저알카리성 물탈이 研究<sup>12)</sup>되고 있다.

注入範圍, 注入效果를 確認할 目的으로 電氣抵抗, 彈性波, 中性子水分計,  $\gamma$ 線密度計 等에 의한 藥液注入效果判定方法에 대한 새로운 研究<sup>13)</sup>가 進行되고 있다. 最近 日本建設省土木研究所<sup>14)</sup>에서는 CO<sub>2</sub> 가스工法, 土研式複合注入工法 등 各種藥液注入工法 및 管理手法開發을 目的으로 한 實驗研究를 實施한 바 있다.

藥液注入工法の 가장 큰 課題인 Hydraulic Fracturing에 관한 研究는 最近 世界的 關心이 되어 各國에서 앞을 다투어 研究<sup>15)</sup>되고 있다. 早稻田大<sup>16)</sup>에서는 透水性地盤과 不透水性地盤의 水壓破碎에 대해 多年間 集中 研究를 하고 있다. 垂直 Borehole의 경우 Crack發生에 必要한 壓力은 B.Haimson<sup>17)</sup>의 應力解析과 M.K.Hubbert<sup>18)</sup>의 破壞條件式을 組合하여 割裂發生時의 注入壓과 地盤條件을 適用함으로써 說明될 수 있다. 또한 Borehole 周邊의 應力分布는 두꺼운 Pipe의 直徑과 여기에 作用하는 壓力, Pipe材 彈性特性에 의한 彈性論<sup>19)</sup>을 適用하여 解析될 수 있다.

Hydraulic Fracturing의 防止對策이 研究되고 있는가 하면 오히려 이 현상을 建設工事に 適用하여 보려는 研究<sup>20)</sup>도 進行中이다. 그 適用例를 들면, 傾斜 또는 不等沈下한 建物の 복구를 위해 粘性이 매우 큰 注入材를 多數의 注入口로부터 注入시키는 소위 Compaction Grouting工法이 美國에서 實用化 되고, 이터리 베니스에서는 主要建造物을 高潮로부터 保護하기 위해 平均 20cm의 地盤隆起를 目的으로 強制로 割裂注入시킨 바 있다. 또 日本에서는 地中에서 高壓噴射에 의한 不等沈下한 建物を 水平으로 바로 잡기 위한 施工例가 있다.

藥液注入의 發展狀에 대해 다른 側面에서 고찰해 보면 1963年 英國 土質工學會가 주최한 "Grouts & Drilling Muds in Engineering Practice"를 主題로 한 國際 Symposium이 열렸고 1982년에는 美國土木學會後援의 "Grouting in Geotechnical Engineering"을 主題로 한 國際 Symposium이 열렸다. 이 兩 Symposium 20年사이의 注入工法の 飛躍的 發展은 이들 會議의 Proceedings에 登載된 論文을 보면 잘 알 수 있다. 1975년에 發刊된 基礎工學 Hand Book

에 보면 注入工法이 獨立되어 한 章을 차지하고 있어 本工法の 重要性和 普及度를 잘 말해주고 있다. 英國土木學會가 1972년에 制定하여 國家基準으로 되어 있는 "CD 2004: 1972 Foundations"의 內容을 檢討해 보면, 地盤注入이 한 補助工法으로 취급되던 時代는 이미 지났음을 시사해 주고 있다. 今年度 日本土木學會(第40回, '85.9.11~14, 仙台)와 土質工學會(第20回, '85.6.10~13, 名古屋)의 研究發表會에 地盤注入關係論文만도 70여편에 달하고 있는 사실만을 보아도 注入工法の 重要性은 가히 짐작할 수 있다.

## 5. 結 論

藥液注入工法은 施工性이 월등하고 더욱, 有効한 地盤改良工法으로서 遮水 또는 強度增大의 目的으로 널리 쓰이고 있는 국제적 추세이다.

本工法은 不均質한 地盤을 對象으로 하기 때문에 相當한 熟練과 經驗을 要하고 있으며 그 成果는 注入技術者의 技量과 誠意에 依지 않게 影響을 받고 있는 것이 事實이다.

그러나 本工法이 아직 解決하지 못한 여러 가지 問題點들이 各國에서 앞을 다투어 研究되고 있어 점차 解決되어 가고 있는 現狀으로 여겨져 從來의 補助的 地盤改良工法으로부터 本格的 工法으로 될 것을 期待한다.

過去 本工法은 그 注入效果를 過信한 나머지 단순히 注入材의 使用量에만 의존하여 事實상 不必要한 注入을 한 例도 적지 않다. 今後は 本工法の 注入效果가 充分히 期待될 수 있도록 本工法이 안고 있는 問題點解決을 위해 努力하여야 할 것이다. 例를 들면 터널굴진을 위해 질래 부족한 地盤強度의 強化, 飽和粘性 土地盤에서의 地盤注入의 改良效果 增大, 水壓破碎現象에 의한 地盤隆起 내지는 局部地盤破壞現象에 對한 防止對策, 파일기초나 피아기초의 支持力補強 등에 本工法을 적용하였을 경우 注入固結土에 대한 耐久性問題 등이 바로 그러한 것들이다.

最近 서울·釜山 등 大都市에서의 國土開發事業에서 급격히 增大되어 가고 있는 本工法の 時急性, 必要性을 감안하여 볼 때, 本工法の 國內에서의 원활한 適用과 信賴性·迅速性·經濟性

面에서 자신있게 廣範圍한 活用을 하여 當面한 國家事業을 성공리에 수행하기 위해서는 注入業界는 勿論 大學 등 各研究機關에서의 부단한 研究가 先行되어야 할 것이다.

(筆者는 현재 日本 早稻田大學에서 客員教授로 研究中 1984.12~1985.12)

### 參 考 文 獻

- 1) Glossop, R., "The Invention and Development of Injection Process", *Geotechnique*, Vol.11, No.4, 1961.
- 2) Parish, W.C.P. et al, "Underpinning with Chemical Grout", *Civil Eng. ASCE*, Aug. 1983.
- 3) 日本建設省, "藥液注入工法による建設工事の 施工に關する暫定指針", 1974.7.10.
- 4) 日本藥液注入協會, "協會のあゆみ", 1976.4.
- 5) 千柄植, "藥液注入工法에 關한 研究報告書", 釜山地下鐵建設本部報告書, 1984.
- 6) Independent Panel to Review Cause of Teton Dam Failure, "Failure of Teton Dam", Report to U.S. Department of the Interior and State of Idaho, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., Dec. 1976.
- 7) Morgenstern, N.R. and Vaughan, P.R., "Some Observations on Allowable Grouting Pressure", *Grouts & Drilling Muds in Engineering Practice*, London, Butterworths, 1963.
- 8) 村上省一, "沖積層基礎地盤への 注入工法", *土木學會誌*, Vol.62, No.5, 1977.
- 9) Bordon, "Creep Behavior of Silicate Grouted Sand", *Proceedings of Conference on Grout, Engineering*, 1982.
- 10) 例, 米倉外, "サンドゲルの 耐久性", 第19回 土質工學會研究發表會, 1984.
- 11) 例, 楢垣外, "藥液注入材の 長期耐久性について", 第18回 土質工學會研究發表會, 1983.
- 12) 三木五三郎, "施工管理と効果測定", *土木學會關東支部講習會*, 藥液注入工法教材, 1978.
- 13) 例, 鈴木, "電氣抵抗による注入效果の 判定について", *土木學會 第40回 年次學術講演會*, 1985.9.
- 14) 日本建設省總合技術開發 Project, "新地盤改良技術の 開發報告書", 1980.3.
- 15) e.g., H. Samol, H. Priebe, "Soil Fracturing-An Injection Method for Improvement", *Proceedings of the 11th ICSMFE*, 1985.9.
- 16) 例, 森嶽, 千柄植, "藥液注入における 割裂注入帯について", *土木學會 第40回 年次學術講演會*, 1985.9.
- 17) B. Haimson, "In-Situ Stress Determination at Great Depth by means of Hydraulic Fracturing", *Rock Mechanics-Theory and Practice, Proc. 11th Symposium on Rock Mechanics*, 1969.
- 18) M.K. Hubbert and D.G. Willis, *Trans. AIME* Vol.210, 1957.
- 19) H. Kastner, "Statik des Tunnel-und Stollenbaues", Charles E. Tuttle Co., 1971.
- 20) 例, 嘉門, Massarsch, "Hydraulic Fracturingの 土質安定への 應用について", 第17回 土質工學研究發表會, 1982.

(원고접수 1985.10.)