The Japanese Geotechnical Society

報文—2301

# 薬液注入における効果判定法（化学分析の利用）

Evaluation of the Effect of Grouting Using Chemical Analysis

海野隆哉（かいの　たかや）
東日本旅客鉄道㈱構造技術P．T．担当部長

藤沢　一（ふじさわ　はじめ）
東日本旅客鉄道㈱上信越工事事務所総務課システム係長

奥村興平（おくむら　こうへい）
応用地質㈱東京事業本部応用化学部　部長

## 1. まえがき

工事に使われる薬液注入は，注入に適した地質に適切な工法で行えば，明白な効果が期待できるが，薬液注入は補助工法として位置づけられているため，そのような理想的な条件にない場合でも適用されることが多い。そして，工事が無事完成できれば，注入がどのように効いたのか解明されずに終わってしまう。これらは，実用的な効果の確認方法が確立されていないことに原因があり，経済的，かつ，信頼度の高い注入効果の確認方法の確立が必要とされるゆえんである。

良く用いられる注入効果の確認方法としては，①改良体を掘り出して，目視により確認したり，pH指示薬を散布する方法，②標準貫入試験等のサウンディング，③現場透水試験，④一軸圧縮・三軸圧縮試験等がある。①は改良範囲の特定等に特に有効であるが，改良体の掘出しは開削工事等の場合を除き大がかりとなる。②は利用しやすいが，締まった地盤などでは注入効果が数値に表れにくい。③は透水性の大きな地盤において止水注入を行う場合には，有効な判定方法である。しかし，透水係数の低下状況がはっきり出にくい細粒分を多く含む砂層などでは，むしろ地盤強化の程度から判断せざるを得ない場合もある。④は強度定数を直接求めるので信頼度が高いのは当然であるが，乱さない試料の採取が必要であり，サンプリング数に限りがあったり，整形しにくい試料が捨てられるなどデータに片寄りがでる恐れがある。以上の問題点を解決するため，乱さない試料の採取を必要としない化学分析法を用いて薬液の地盤中の含有量を計る方法について検討を加えるとともに，含有率と圧縮強度の関係等について考察した。

## 2. 化学分析の方法

### 2.1 方法の選定

水ガラス系注入材の主剤である水ガラスは$Na_2O$と$SiO_2$が主成分であり，最も良く使われる珪酸ソーダJIS 3号は$Na_2O \cdot 3SiO_2 \cdot nH_2O$の化学式で表される。薬液注入は，所定の濃度の水ガラスと反応剤を混合し，それを地盤に注入しゲル化させるものである。ゲルは珪酸が脱水重合したもので三次元的網目構造を持つといわれているが，その中でシリカ($SiO_2$)はアルカリにより溶解しやすい性質の非晶質シリカと呼ばれるものとして存在している。また，ナトリウムはゲルの構成に関与せずゲルの中に閉じ込められ，一部はゲルや土粒子の表面に吸着したり，離しょう水の中に含まれる。

注入量は，土壌中のシリカとナトリウムの増加量の定量により求めることができるが，土には本来珪酸塩鉱物に代表される結晶化したシリカを多量に含んでいるため，これらを溶解しないで非晶質シリカを選択的に溶解する方法が必要である。今までは，土壌学の分野で用いられているJackson（ジャクソン）・Hashimoto[1]法を適用している例[2]があるが，加熱するための操作が煩雑であり，土粒子からのシリカ溶出量も多い。

ここでは，より簡単な方法で非晶質シリカを効率よく溶出する条件について検討した。

### 2.2 溶出液の濃度と溶出時間の検討

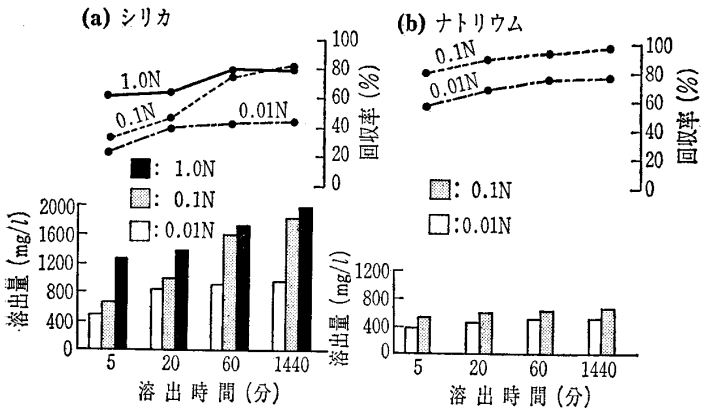
非晶質シリカの溶出は，主にアルカリの濃度と溶出時間に影響される。そこで最適溶出条件を把握す



NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society






図—1　溶出量，回収率

るため，水酸化カリウム濃度と溶出時間を変化させシリカとナトリウムの溶出性を検討した。

(1)　模型注入土の作成

模型注入土はスチロール棒瓶（容量 20 m$l$，平均内径 24 mm，高さ 55 mm）に湿潤土（洪積層（東京）砂）を20.0 g取り，湿潤密度約 1.5 g/cm$^3$ になるように詰め，そこに注入材（水ガラス50%と反応剤（$NaHCO_3$ 系）の 1：1 混合物）を 4.0 m$l$ 注入（注入率約30%）し硬化させ，約 10 日間密封放置したものを用いた。

(2)　溶出量と回収率

**図—1** に示すとおり，シリカとナトリウムの溶出量および回収率は水酸化カリウム濃度が高いほど，また溶出時間が長いほど多くなった。

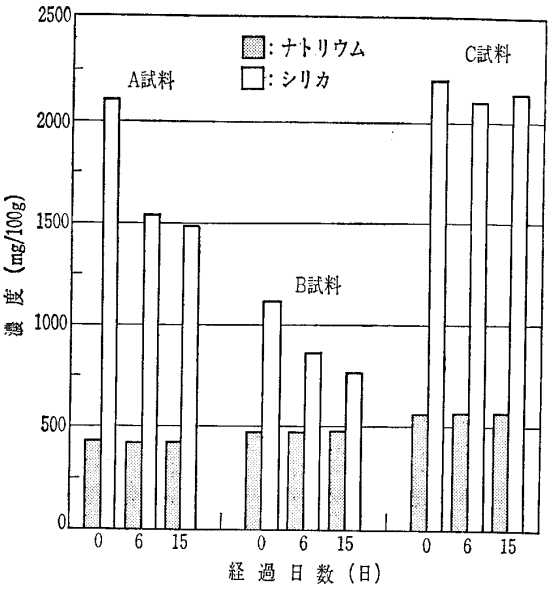
① シリカは，水酸化カリウム濃度が 0.01mol/$l$ の場合には，回収率が低くアルカリ分が不足していることがわかる。また，別途未注入の試料の溶出試験を行ったところ，水酸化カリウム濃度が 1 mol/$l$（溶出時間24時間）の場合は，土粒子からのシリカの溶出量が全溶出量の15%にも達する。

② ナトリウムは，水酸化カリウム濃度 0.1 mol/$l$ で20分以上溶出すると90%以上の回収率が得られる。

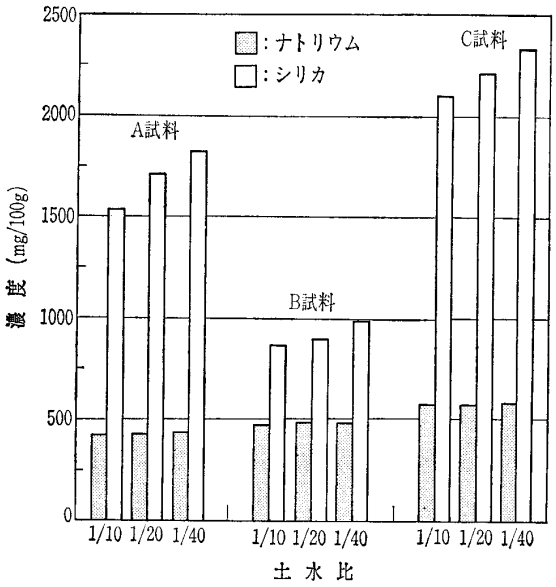
③ 以上の結果から，水酸化カリウム濃度 0.25 mol/$l$，溶出時間 2 時間を選定し，確認試験を行った結果，シリカ回収率84%を得た。

### 2.3　注入土の放置時間と溶出量の検討

シリカ溶出量は，注入土の乾湿状況による影響も受けやすいため，某駅工事で注入した地盤（中砂～細砂）から採取したブロック試料を 2 mm 程度にときほぐした調整試料をポリ袋に入れ密封保管し，放置時間と溶出量の関係について検討した。




図—2　調整試料の溶出量変化




図—3　土水比による溶出量変化

**図—2** に示すとおり，シリカの溶出量は，A，B の試料において初期溶出量に比べて 6 日後には約25%減少し，15日後には約30%の減少が見られた。C 試料ではほとんど減少しなかった。減少割合の差は，薬液の浸透状況と関係していると思われる。一方，3 試料ともナトリウムには変化が見られなかった。このことから調整した試料はすみやかに溶出操作を行う必要のあることが分かった。

### 2.4　注入土と溶出液の割合の検討

注入土と溶出液の割合（以下土水比という）による溶出量の変化について検討した。

**図—3** に示すとおり，ナトリウムの溶出量は 3 試



NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



料とも変化は見られないが，シリカの溶出量は溶出液の量が増せば増加し，土水比1：10に比べ1：40では10～20%程度増加している。しかし，試料量を少なくするとばらつきが大きくなり，また溶出液を多くすると作業性が悪くなることから土水比は1：10とした。

**図—1，2，3**よりナトリウムは溶出条件による溶出量の変化を受けにくく，注入量の判定にはシリカより良いように見えるが，ナトリウムは土中水と移動しやすいこと，海水の影響をうける地域では使えないこと等から，化学成分分析による注入量の判定はシリカを中心に検討すべきである。

### 2.5 注入土の化学分析方法

**2.2～2.4**の検討結果をもとに得られた土中の薬液注入量を求めるための化学分析方法を以下に示す。

(1) 試料

① 試料は湿潤状態で，10mm 以上の粒子を除いたものとする。

② 試験に使用する試料量は20ｇであるが，ホモゲルの脈や土質の変化に対応するため300～1 000ｇの注入土を用意し，十分に塊をほぐし均一になるよう調整する。また，乱れた試料の場合はすみやかに試験する。

(2) 溶出方法

① 溶出液は精密分析用水酸化カリウム56.1ｇを蒸留水に溶かし1 $l$ にし(1 mol/$l$)，使用時に4倍に希釈する。

② 300 m$l$ ビーカーに試料土を20.0ｇはかり取り，0.25 mol/$l$ の水酸化カリウム溶液をメスシリンダーで200 m$l$ 加える。

③ マグネチックスターラーで2時間攪拌する。

④ 2時間後，溶液を遠心管に移し3 500 rpm で10分間遠心分離，上澄水をNo.5Ｃの沪紙で沪過する。

⑤ 50m$l$ 以上の沪液を採取し，シリカとナトリウムの分析に用いる。

ここで使用する，ビーカー，遠心管，ロートはプラスチック製を用いる。

(3) 定量方法

シリカとナトリウムの定量方法は，

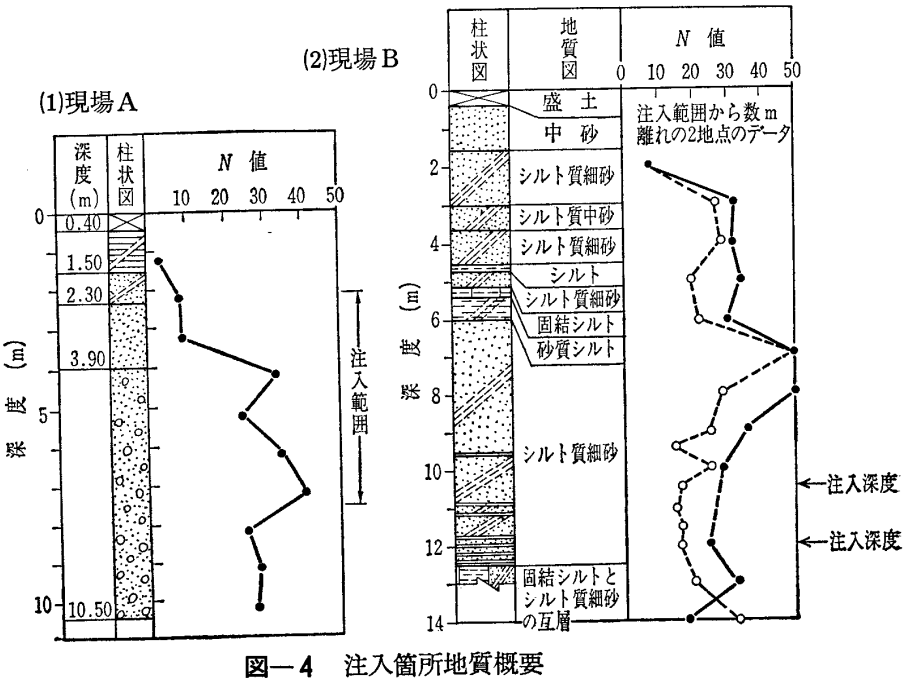
シリカ：JIS K0101 44.1.1 モリブデン黄吸光光度法

ナトリウム：JIS K0102 48.1 フレーム光度法により行う。

## 3. 注入率と化学分析結果

試料採取を行い，化学分析試験等の調査を行った注入施工現場の一覧表を**表—1**に，またそれらの箇所の地質等の概要を**図—4**(1)，(2)に示す。

現場Ａは横断地下道施工のための開削工事現場である。注入は土留め工（親杭横矢板）背面ならびに掘削底面の止水のために行っている。注入は路上からの鉛直ボーリングにより行い，注入孔の配置は縦横0.6～1.0ｍピッチで，注入ステップの間隔は50 cm である。注入速度は16 $l$/min であり，最終注入率は当初設計どおり36%である。現場Ｂは，実工事ではなく，成田砂層中に注入試験を行ったものである。注入は，地下水位が地表面下約9.5m 付近であったので，G.L.－10.67ｍと－12.0m の2深度で点注入を行った。地質は**図—4**(2)に示すように，上部の注入箇所（G.L.－10.67m）はほぼ均一な細砂層である。下部の注入箇所（G.L.－12.0m）は細砂層の間に固結シルト層（厚さ5～10 cm）が挟在している。**表—2**に粒度試験結果一覧表を，**図—5**に粒径加積




**図—4** 注入箇所地質概要



NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



表—1　注入施工箇所一覧表

| 現場 | 土質 | 透水係数（cm/s） 注水法 | 透水係数（cm/s） 回復法 | 注入工法 | 薬液 ゲルタイム | 注入率（注入量から算出） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 細砂～砂礫 | 細砂 $1.22\times10^{-3}$<br>砂礫 $2.21\sim2.73\times10^{-2}$ | | 二重管ロッド複相工法 | 溶液型水ガラス系<br>S：5～15秒<br>L：10～20分 | 36% |
| B | 上部 シルト混じり細砂<br>下部 固結シルト層を挟むシルト混じり細砂 | 上部 $8.72\times10^{-4}$<br>下部 $4.84\times10^{-5}$ | 上部 $1.2\times10^{-3}$<br>下部 $4.0\times10^{-4}$ | 二重管ロッド複相工法 | シリカゾル系<br>S：2秒<br>L：10～60分 | — |
| | | | | 二重管ダブルパッカー工法 | シリカゾル系<br>L：2～120分 | |

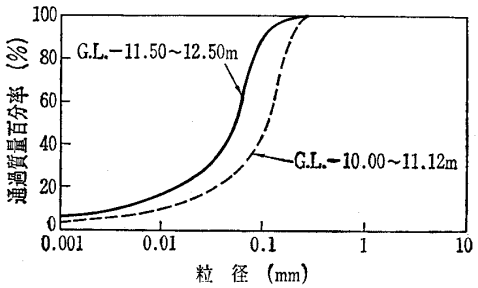
表—2　粒度試験結果一覧表（現場B）

| 試料採取深度（G.L.−m） | 粒度組成（%） 砂分 | シルト分 | 粘土分 | $D_{60}$（mm） | $D_{10}$（mm） | 均等係数 $U_c$ | 曲率係数 $U_c'$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10.00～11.12 | 66.0 | 26.0 | 8.0 | 0.13 | 0.0085 | 15 | 3.7 |
| 11.50～12.50 | 32.0 | 56.0 | 12.0 | 0.065 | 0.0028 | 23 | 4.6 |

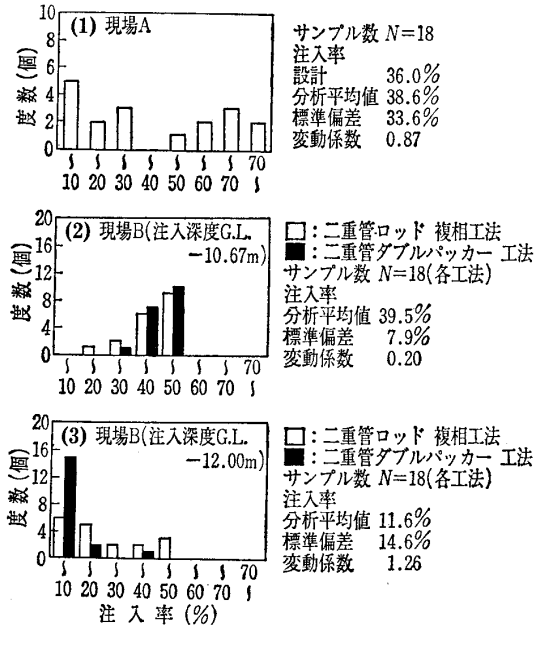
曲線を示す。注入孔の平面的配置は6列×2列＝全12箇所で，孔と孔の間は1.5～2.0m離れている。注入量は1点あたり100 $l$ である。注入速度は注入前に限界注入速度$q_{cr}$[3),4)]を測定し，その値を参考にして決定した。G.L.−10.67mで測定した$q_{cr}$は限界比（$m$）を約0.27とした場合約3.2 $l$/minとなった。このため，二重管ロッド複相工法では2, 4, 8 $l$/min，二重管ダブルパッカー工法では1, 2, 4 $l$/minの各注入速度で注入した。

各注入現場における化学分析から求めた注入率のヒストグラムを**図—6**に示す。注入率は注入材成分のシリカ（$SiO_2$）の分析値から算出し，シリカの溶出率が約80%であるので，1/0.8倍して補正している。

現場Aは，分析値の平均値が38.6%となり，設計注入率（36.0%）にほぼ等しい結果となった。しかし，分析値のばらつきをみると，平均値付近の値はなく，10%未満と60%以上の両極端に分布している。薬液が均一に浸透せず，遍在化していると考えられる。現場Bは，1点注入した各注入孔から約20cm離れた位置で試料を採取している。注入深度G.L.−10.67mの場合は比較的良好な注入固結体ができていた。注入率の分布は約40%を中心に分布し，またばらつきは非常に小さい。注入前の採取試料の間隙率は約50%であり，填充率は約80%に達している。注入速度をほぼ完全に浸透注入できる速度まで小さくしたことにより，均一な浸透注入地盤になったことがこの注入率のばらつきからわかる。工法を比較すると，二重管ダブルパッカーの方が若干均一な注入地盤になっていると言える。注入深度G.L.−12.0mの場合，前述したように細砂層に固結シルト層が挟在していたために，浸透注入になりにくく，掘り起こしの際の目視ではシルト層と細砂層の境界面に薬液が割裂している箇所が多く見られた。固結体の形状も確認できず，良好な注入ができなかった




図—5　粒径加積曲線（現場B）



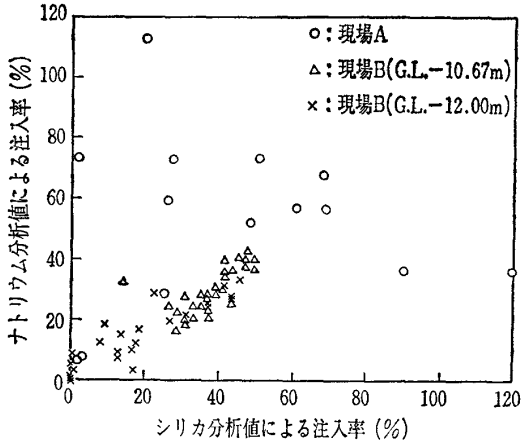

図—6　シリカ分析値による注入率ヒストグラム



NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society






**図—7** シリカ，ナトリウム分析値による注入率の相関

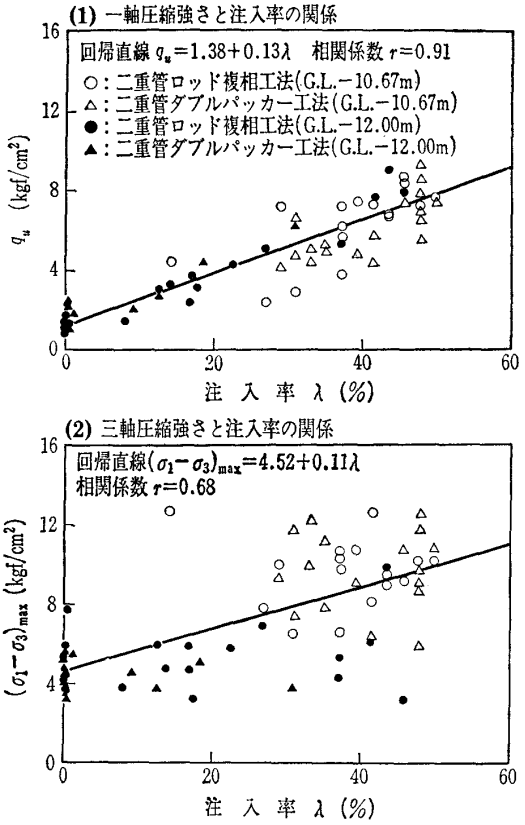
**表—3** シリカとナトリウム分析値による注入率の平均値

| 注入箇所 | サンプル数 $N$(個) | 注入率 $\lambda$ ($SiO_2$)(%) | 注入率 $\lambda$ (Na) (%) |
|---|---|---|---|
| 現場A | 18 | 38.6 | 46.7 |
| 現場B (G.L.−10.67m) | 36 | 39.4 | 31.1 |
| 現場B (G.L.−12.0m) | 36 | 11.6 | 9.7 |

箇所である。この深度の化学分析による注入率は，10%以下が多く，またばらつきも大きい。地層の影響で良好な注入ができなかったことが注入率の分布状況からもわかる。

**図—7** に各現場におけるシリカとナトリウムの分析値による注入率の相関図を示す。前述したとおり，ナトリウムイオンは水に溶脱しやすいため，同一の採取試料を分析しても，シリカとナトリウムの分析値からの注入率は必ずしも同じにはならない。**表—3** に各現場の各成分ごとの注入率の平均値を示す。現場Aは，ナトリウムによる注入率が0%程度から100% 付近までの非常に広い範囲に分布している。これは薬液が均一に浸透していないためと考えられる。またナトリウムによる注入率は，間隙率を上回る高い値を示しているデータが多く，平均値ではナトリウムの方がシリカによる注入率よりも約10%ほど大きい。現場BのG.L.−10.67mでは，シリカが約30%ほど多めであるが相関性は比較的良い。分析試料は固結体から採取しており，シリカとナトリウムの溶脱の違いから，シリカが多めに分析されたものと思われる。G.L.−12.0mは現場Aと同様シリカとナトリウムの相関性が悪い。いずれも固結状況が良くなかったことが影響していると思われる。

以上の検討結果から，化学分析結果と注入状況の関係を以下のように推察できると考えられる。




**図—8** 圧縮強さと注入率の関係

① 理想的に近い浸透注入と思われる固結体の化学分析の結果から間隙率の80%に相当する注入率が得られた。

② 良好な固結体であれば，ナトリウムとシリカ分析値はシリカ成分の方が多めに出てくるが，その相関性はより良くなる。

③ シリカとナトリウムの分析状況から注入固結状況が推察検討できる。

## 4. 分析値と改良体の強度の関係

現場Bにおいては，掘り起こして採取した試料で一軸圧縮強度試験，三軸圧縮(CD)強度試験を行い，それらの試料の整形時の削りくずで化学分析を行った。一軸圧縮強さ $q_u$，ならびに三軸圧縮強さ $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ と注入率の関係を**図—8** (1)，(2)に示す。$\sigma_3$ は有効上載圧相当の 1.7 kgf/cm² である。注入部分の強度は，シリカゲルの填充状態に支配されると考えられる。このため，**図—8** の注入率はシリカの分析値から計算した。ただし，今回の試料ではナトリウムの分析値から計算した注入率と一軸圧縮強さ等の強度定数との相関性も，シリカによるものと大きな差はなかった。原地盤のシルト質細砂の強度は，



NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



$q_u$=0.78～2.0 kgf/cm² (平均 1.32 kgf/cm²), $c_d$=0.56 kgf/cm², $\phi_d$=32.2° である。図—8(1)の一軸圧縮強さの場合，注入率 $\lambda$ (%) と一軸圧縮強さ $q_u$ (kgf/cm²) の関係は $q_u$=1.38+0.13$\lambda$ である。今回，現場Bは地盤の透水性に対応した小さい注入速度で注入しているが，注入深度 G.L.−12.0m の場合，地層の影響で良好な固結体ができなかった部分があり，それらの一軸圧縮強さは原地盤の強さとほぼ同じである。しかし，G.L.−10.67m は浸透注入により改良されている。注入率と一軸圧縮強さの間の相関はかなり高い ($r$=0.91)。良好な固結体では，強度定数の相関性が高いことを示唆しているように思われる。二重管ロッド複相工法，二重管ダブルパッカー工法ともに注入率の増加に伴い $q_u$ は大きくなっている。理想的な浸透注入に近い場合は，薬液が地盤を割裂せずに間隙に充填される。そのために土粒子間の結合力が乱されないので，粘着力成分の影響が大きい一軸圧縮強さは，注入率の増加に伴い地盤の強度が比例的に増加する。一方，図—8(2)の三軸圧縮試験の場合，有効土被り圧に相当する拘束圧を加えており，モールクーロンの応力円から

$$\sigma_1-\sigma_3=q_u+2\sigma_3\cdot\sin\phi/(1-\sin\phi)$$

の関係があり，$\sigma_3$=1.7 kgf/cm², $\phi$=32.2° であることから $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ と $q_u$ との間は，3.9 kgf/cm² の差が出るはずであるが，実際は 3.1 kgf/cm² 程度の差であった。

以上の分析値と改良体強度の関係から「地盤の透水性に見合った注入速度で注入した場合，薬液の充填により地盤の粘着力は増大し，一軸圧縮強さと化学分析で求められた注入率は正の高い相関を示す。」といえる。

## 5. まとめ

現場Bでは，薬液注入の効果的判定法の評価を行うため，化学分析・一軸圧縮試験・三軸圧縮試験のほかに，①標準貫入試験・②エンパソル・③ロータリーサウンディング・④孔内水平載荷試験・⑤電気検層（同一孔内）・⑥孔間比抵抗測定・⑦比抵抗トモグラフィー・⑧弾性波トモグラフィーを行った。また，各種試験終了後注入した地盤を掘り起こし，固結体を目視確認後，乱さない試料を採取しての上記の室内試験を行っている。①～⑧の試験方法は固結体との比較など総合的に判断すると今一つ信頼性に欠けている。一方，成田砂層という限られた地盤ではあるが，注入率と圧縮強さの間に一定の関係が得られたという点で，化学分析による注入率の推定は，単なる注入量の確認にとどまらず，改良地盤の強度確認の補助手段としてもきわめて有用であると考えられる。今後，さらにほかの種類の地盤・工事等で，注入率と圧縮強さ（粘着力）の関係が明らかにされ，設計・施工管理に活用されることを望む次第である。

最後に，現場Bの注入試験は，「建設工事の合理的品質管理・施工技術研究委員会」の「薬液注入工小委員会（委員長：森　麟早稲田大学教授）」の指導助言により行われたものであり，ここに，誌面を借りて委員・関係者各位に深謝申し上げます。

### 参考文献

1) Hashimoto, I. and Jackson, M.L.: Clays and Clay Minerals, 7, 102, 1960.
2) 川地・喜田：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，Vol. 35, No. 5, pp. 45～50, 1987.
3) 森　麟ほか：割裂浸透注入で有効な固結形状を得るための限界注入速度の予測方法について，土木学会第47回年次学術講演会，1992.
4) 土質工学会編：薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム，pp. 4～20, 1993.

(原稿受理　1993. 10. 6)



NII-Electronic Library Service