The Japanese Geotechnical Society

薬液注入における長期耐久性の研究

Long Term Durability of Chemical Grouts

米倉亮三（よねくら りょうぞう）
東洋大学教授 工学部土木工学科

島田俊介（しまだ しゅんすけ）
強化土エンジニヤリング㈱代表取締役

はじめに

近年，都市土木において薬液注入してから数年後に開削したり，シールドを立坑に到達させたりする場合に，薬液注入の長期耐久性が要求されるようになった。

また，構造物の基礎の補強や，現在課題となっている大深度地下開発工事において耐久性のすぐれた薬液注入は，極めて有用なものとなろう。薬液注入における固結物の耐久性の研究は従来ほとんどなされていなかったが，筆者らは，東洋大学工業技術研究所で昭和56年以来，薬液注入の耐久性の解明と試験方法，耐久性のすぐれたグラウトの開発，耐久性に関するデータの集積を行ってきた。

その結果，耐久性のメカニズム，その実験方法等について今後参考になると考えられる事項が明白になってきたのでここに研究結果の一部を紹介する。

1. 薬液注入の耐久性についての考え方

薬液注入の耐久性という場合，注入材そのものの化学的耐久性が最も重要になるが，耐久性というものが注入地盤の強度ならびに止水性の経時的永続性を意味する以上，当然のことながら注入材の有する浸透特性ならびに注入地盤の土質条件や施工法等の施工要件もまた重要な条件となる。

このうち注入材そのものの耐久性の試験は，

① 固結土の強度と透水性の長期間の経時的測定であるが，その原因となる

② SiO_2 の溶脱やゲルの収縮等のゲルの経時的変化の測定が必要と考えられる（表—1）。

表—1 グラウトの長期耐久性試験[4]

耐久性試験		項目	試験内容
ゲル変化の長期	1	SiO_2 溶脱量	・ゲルから養生水中への溶脱量 ・加圧透水下における固結砂からの透水中への溶脱量
	2	ゲルの収縮（または膨張）	ゲルの養生水中における容積変化
固結砂の耐久性	1	強度	固結砂の一軸圧縮強度 —恒温恒湿養生 —促進試験（加温養生）
	2	透水性	・固結砂の透水係数 水中養生（供試体） ・常時加圧透水下における透水試験

2. 使用した注入薬液

以上より耐久性の優れた薬液注入の確立のためには，①長期にわたる固結効果（強度と止水性）のデータを背景にした注入材の選定，②耐久性に影響を与える要因の把握，③耐久性に及ぼす要因を配慮した現場施工法の確立が必要である。

本研究では均質に浸透し，しかも長いゲル化時間で高強度が得られる溶液型を検討の対象とした。セメントのような懸濁型は浸透性の点から除外した。実験に使用した薬液は以下の種類である。

(1) 非アルカリ性シリカゾル（CH）[6]
(2) グリオキザール系水ガラス（GS）[6]
(3) 超微粒子シリカ（CSN）[6]
(4) 重曹系水ガラス（E）

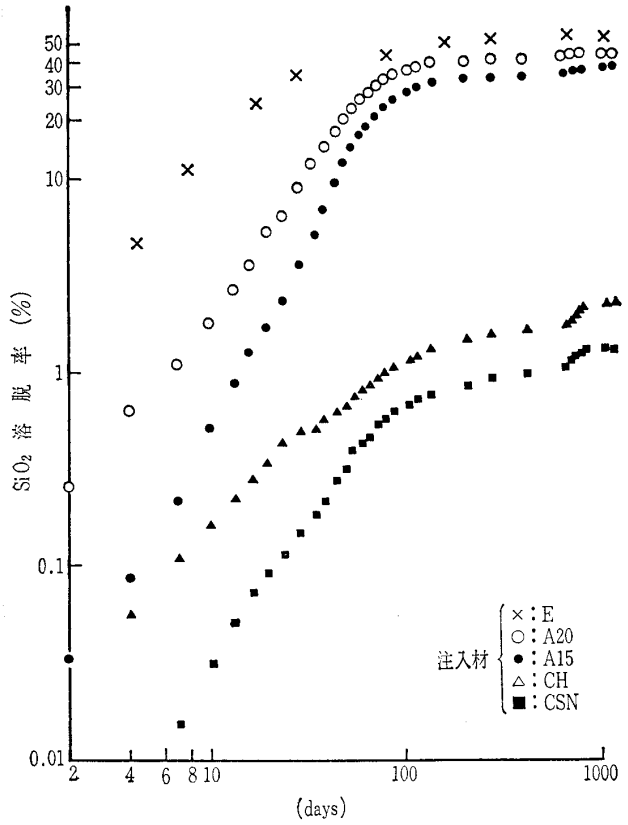
ただし，GSではシリカ（水ガラスの SiO_2）含有量の異なるA20とA15（それぞれシリカを0.20 g/cm³, 0.15 g/cm³ 含有）の2種類を選定した。

3. ホモゲルの長期的性質

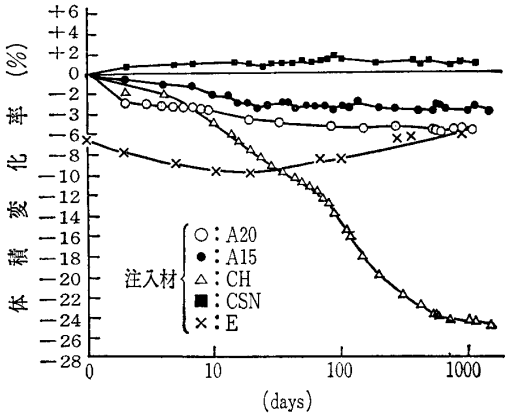
ホモゲルの経時変化は，固結砂の強度や止水になんらかの影響を与えるものと推定できる。耐久性に関する固結土のこのような特性の原因を追求するために，ホモゲルを長期間水中に保存し，ゲルの体積の変化と水中に溶出するシリカ量を測定した（図—

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図—1　ホモゲルからの SiO_2 の溶脱率[4]



図—2　ホモゲルの体積変化率[4]

1，2)。

まず，シリカの溶脱量をみると，薬液 GS は 200 日ぐらいまでは急速に溶脱が進み，その溶脱量が30および40%に達するが，その後の速度が減少し，約1 200 日後の今日ではその溶脱量が 35 および 45%となっている。これに対して CH，CSN は，いずれも溶脱量が 1～2%程度で非常に少なく，ゲルの構造は安定しているものと考えられる。

一方，薬液 E は 100 日で50～60%の溶脱量に達している。

一方，ホモゲルの体積変化をみると GS はその収縮量は 4 および 6%であまり高くはない。しかもその収縮は 1～2 か月でほぼ終了する。

一方 CH の収縮量は大きく，1 400 日程度経過したところでの収縮量は25%に達してほぼ一定になる。これに対し CSN はほとんど体積変化がない（詳細は引用文献 1)～4) 参照)。

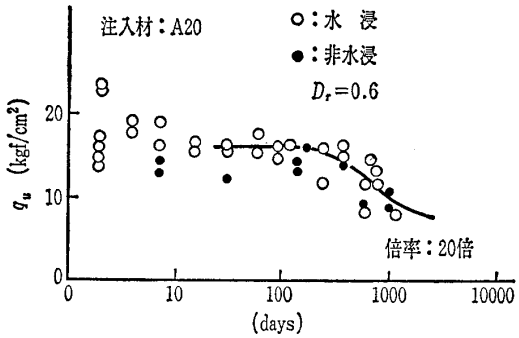
4.　固結砂の長期固結強度

薬液を注入して固結した固結土を水浸養生（水温 20℃）ならびに非水浸養生（温度20℃，湿度90%以上の恒温恒湿）で保存して（標準養生)，時間経過による強度変化を測定した。

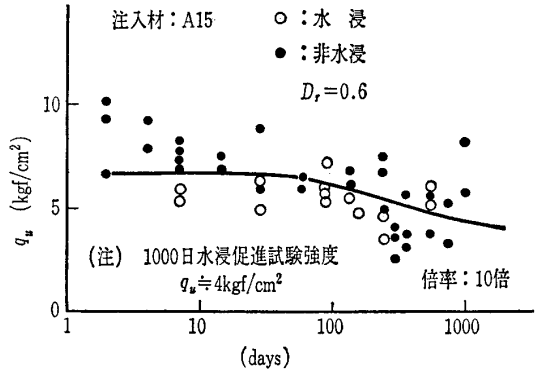
図—3，4 に示すように，GS では 300 日経過後から始まった強度低下の傾向はそのまま続いているが，約 1 100 日後においてもその一軸圧縮強度はほぼ 8 kgf/cm² を保持している。

CH は，図—5 に示すように 200 日程度までは強度が増加していくが，それ以降強度低下が始まっている。

しかし，約 1 300 日後においても 5 kgf/cm² 程度を保持している。これに対し，図—6 のように CSN は，強度増加の傾向が継続しており，約 1 000 日後において 12 kgf/cm² となっている。



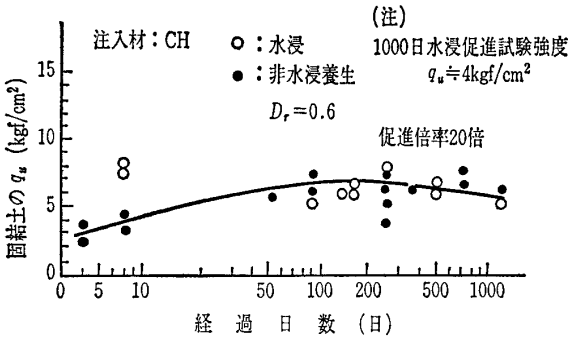
図—3　標準養生（恒温・恒湿室）による強度の経時変化[4]



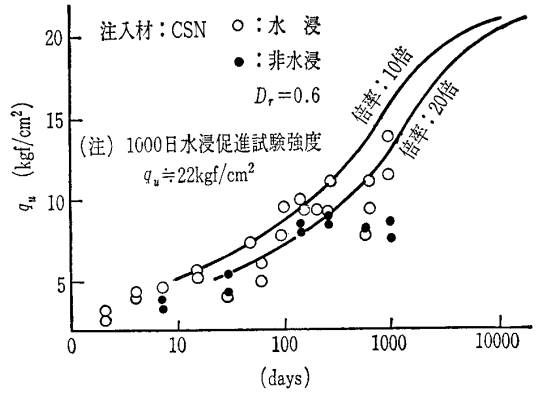
図—4　標準養生（恒温・恒湿室）による強度の経時変化[4]

NII-Electronic Library Service

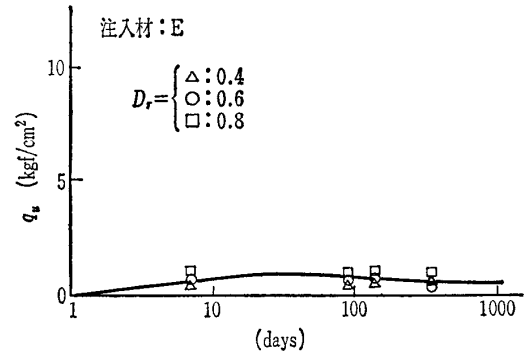
The Japanese Geotechnical Society



図—5　標準養生（恒温・恒湿養生）による強度の経時変化[4)]



図—6　標準養生（恒温・恒湿室）による強度の経時変化[4)]



図—7　標準養生（恒温・恒湿室）による強度の経時変化[4)]

なお，図—7に示すように，ゲル化時間の長い薬液Eの長期強度は0.5 kgf/cm²付近で極めて低いもののそのまま強度が継続している（詳細は引用文献1)〜5)参照)。

養生温度を上げることで，化学反応や物理的変化を促進し，少ない時間で強度の経時変化を把握できるのではないかと考えて促進試験を行った。促進養生（養生水温度：50℃）による固結砂の強度の経時変化は，標準養生の場合に比べ経過時間（横軸）が短縮された形で示され，標準養生に相似している。図—3〜図—6中の実線は，促進試験結果を図中の倍率で標準養生に挿入したものでほぼ一致した形状を示している。この倍率が，養生温度を50℃にした促進倍率と考えられる。

5.　固結砂の長期止水性

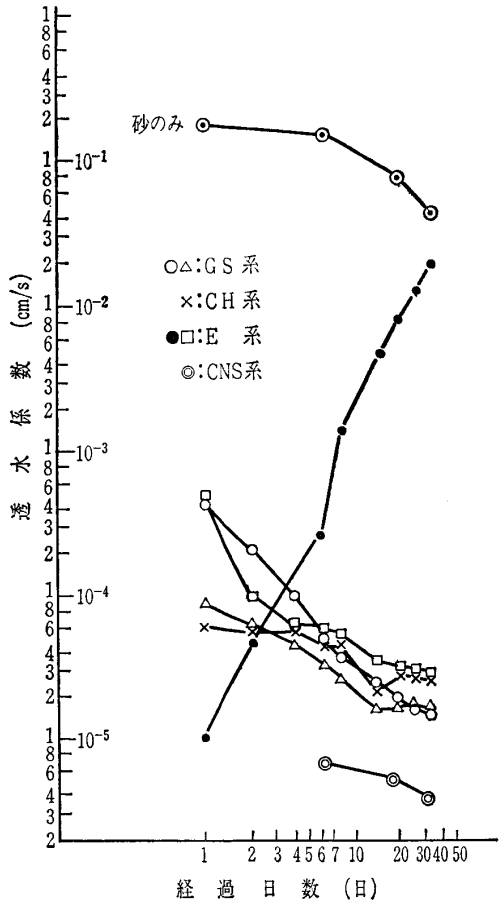
注入後開削までの間長期にわたってそのままの状態にある場合は，長期止水性は長期固結性に一致するとみなしてよい。

したがって，ここでは長期間加圧透水下にある場合の傾向を知るために，現実の可能性よりもかなり過大の動水勾配を固結体に作用させて実験を行った。

砂を薬液で固結させた供試体（ϕ=5 cm，L=10）を用いて0.5 kgf/cm²（動水勾配=50）の加圧透水圧下で長期間継続して透水試験を行い，透水係数の変化とシリカの溶脱量を測定した。

この結果，長期加圧透水下では動水勾配が大きい程，砂の粒径が粗くなる程，相対密度がゆるい程，長期止水性は低下する傾向があることが分かった。

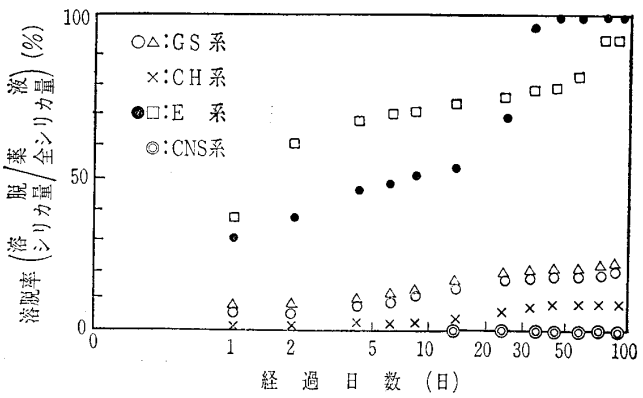
0.5 kgf/cm²（動水勾配=50）の加圧透水性下で，荒川砂を使用したときの試験結果例を図—8，9に示



図—8　各種水ガラスグラウトによる固結体の加圧透水下（透水圧0.5 kgf/cm²）における透水係数の経日変化[4)〜6)]

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図—9 各種水ガラスグラウトによる固結標準砂の加圧透水下(透水圧 0.5 kgf/cm²)における SiO_2 溶脱率 (薬液に含まれている全シリカ量に対のする溶脱シリカの累積量の比率)[4)~6)]

す。一連の試験結果より，薬液Eは加圧透水下ではシリカが容易に溶脱する。

一方，動水勾配が50の場合，CH は，1年程度の止水性は十分あり，GS および CSN は5年以上にわたって信頼性の高い止水性を示すことが分かった(詳細は引用文献1)～7)参照)。

6. 施工への対応

前述したように薬液注入の耐久性は注入地盤の強度ならびに止水性の永続性を意味する以上，薬液注入に耐久性が要求されるような現場施工の場合，注入材そのものの耐久性のほかに現場条件，施工法も重要な要件となる。

注入材に関しては浸透性が良い事が均質固結の前提条件であるから長いゲル化時間が得られ，かつ，強度，止水性の優れたものを選べばよい。

そこでここでは，今までの試験結果を考慮して現場条件，施工法について考察し，最後に現場施工例を示す。

6.1 現場条件に関して

まず，浸透性の良いグラウトを選定し，かつ，土質条件が注入可能限界にあることが前提になる。その上で今までの研究結果より，固結体に，①長期間にわたってほとんど動水勾配が作用しない場合，②長期間継続してかなりの動水勾配が作用する場合，とに区別して考慮することが必要である。

1) 固結体に長期間にわたってほとんど動水勾配が作用していない場合

一般に長期仮設のように注入後そのまま数か月から数年間放置されていて，開削時にコンクリートの打設までの比較的短期間の間固結層に動水勾配がかかるような場合，あるいは地下水流があっても固結層の周辺の土層を流れる場合等がこれに相当し，強度の長期耐久性の結果がそのまま適用されるものとみてよい。またこの場合，固結強度の持続は止水性の持続も意味するとみなしてよい。したがって，多数の施工実績ならびに上述の長期耐久性テストからみて，シリカゾル系グラウト，GS 系水ガラスグラウトは長期仮設用に用いることができる。また，超微粒子シリカグラウトは，恒久性グラウトとしてきわめて有効と思われる。

2) 固結体に長期間継続してかなりの動水勾配が作用する場合

例えば，大深度底盤注入のように周辺を連続壁で囲い，その底面に止水層を形成し，注入後掘削に長期間かかり，その間継続して大きな水圧が止水層底面に作用して固結体にかなりの動水勾配が生じている場合，①注入材の種類と特性，②土の粒度や密度，③透水圧と固結体の大きさ，すなわち固結体に作用する動水勾配等が長期耐久性に大きな影響をもつと思われる。

したがって，これらの条件に応じた注入材の選定と施工法の適用が重要であり，かつ設計に際して固結幅を大きくすることにより，動水勾配の減少をはかる等の配慮が必要である。

6.2 施工法に関して

長期耐久性に優れた注入材としては，①超微粒子シリカのように SiO_2 の溶脱量やゲルの収縮のきわめて少ないもの，②シリカゾルグラウトのようにゲルの収縮量が大きくてもシリカの溶脱がほとんどないもの，③GS 系水ガラスグラウトのようにシリカの溶脱や収縮がある程度あっても，最終的にほぼ一定するものがあげられる。しかし，SiO_2 の溶脱やゲルの収縮がおこりうる場合やホモゲル強度がそれほど大きくない場合，あるいは粗い砂，ルーズな砂や砂礫，加圧透水下にある地盤に薬液注入を適用する場合は，浸透水による悪影響を低減させる必要がある。

シリカの溶脱について考えれば，実際の現場における条件は，以下の点で室内実験とは異なっている。

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

①土中では室内実験のようにホモゲルがそのまま大量の水の中に放置されていない。②動水勾配は実際には室内実験よりかなり小さい。③水は，固結層とは透水係数が2桁以上も大きな周辺の非注入部分を流れる。④一部溶脱したシリカは土粒子表面に再吸着する。

ゲルの収縮について考えれば，水ガラスグラウトは配合濃度および反応剤の種類によって差はあるが，ゲル化後，時間とともに重縮合によって珪酸の巨大分子に発達し，その結果，ゲルが収縮して水分が外部に排除される。これが離漿と称する現象である。

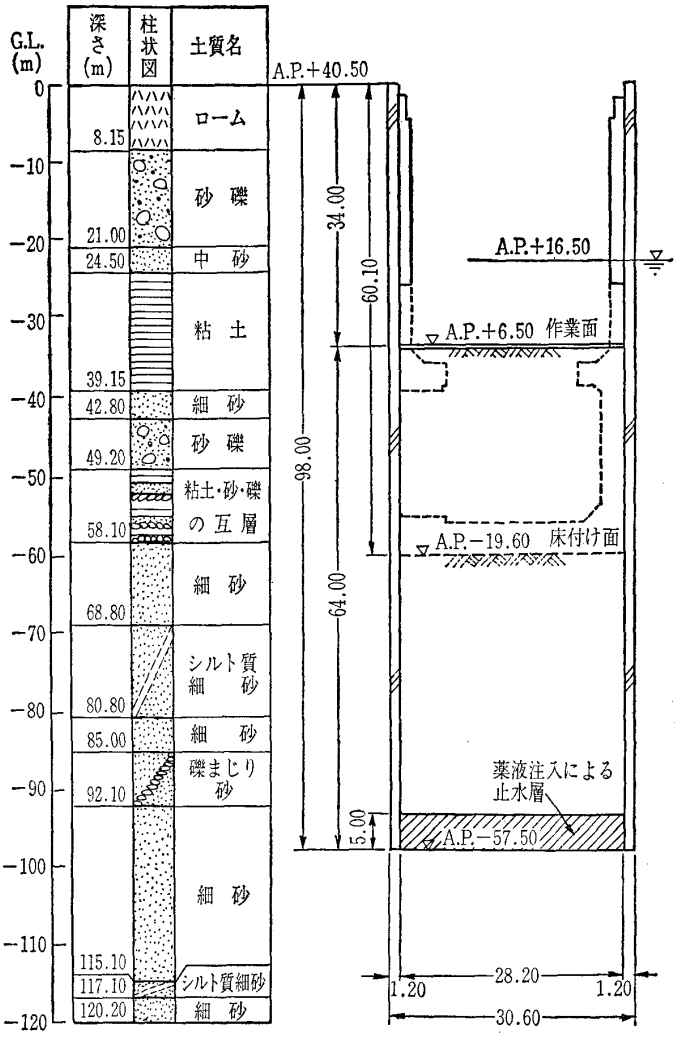
しかし，ビーカーの中のホモゲルそのものの離漿は大きくても固結した土はまったく体積変化が認められない。それは，固結土では土粒子表面を中心にしてゲルが間隙を填充しているからである。そして，土粒子の粒径が小さくなる程，また密度が大きいほど土粒子の比表面積は増大し，土粒子の間隙中の珪酸ゲルの離漿現象はそれほど問題にならなくなるであろう。したがって実際の現場では，シリカの溶脱やゲルの収縮は上述の室内実験よりも条件が緩和されたものになると考えられるが，空隙の大きい地盤，加圧透水下にある地盤への適用においては，多かれ少なかれ離漿現象によるゲルの収縮，SiO_2 の溶脱は透水係数の増加をもたらすであろうし，また弱いゲルは当然加圧透水に対する抵抗が少ないと考えられる。このためにまず懸濁型グラウトを一次注入して大きな間隙の填充をはかるとともに，かつ地下水の影響を低下せしめて，上記耐久性の優れた溶液型グラウトを二次注入する複合注入の手法を適用することが有効であろう。

6.3 現場への適用例「神田川環状七号地下調節池工事」[8)]

ここでは大深度の底盤注入で固結地盤に大きな動水勾配が作用する現地条件でシリカゾルグラウトを複合注入の手法で適用した例を取り上げる。

都内10河川の洪水時の雨水を東京湾に導くために環状七号線の地下40mに内径10.0～12.5mのトンネルを全長30kmにわたって建設する工事が進められている。このため，延長2kmの調節池の建設のために発進立坑の建設工事が行われた。

この立坑は内径28.2m，床付け面はG.L.－60mであり，厚さ1.2mの地下連続壁がG.L.－98mまで施工されている。土質は細砂層を中心として砂礫層や一部不透水性の粘土層からなり，不透水層の下には被圧水層が存在する。



図—10 立坑断面図[8)]

掘削工事において，掘削底面からの湧水と揚圧力による盤ぶくれ，周辺地盤の地下水位の低下とそれに伴う地盤沈下等を防ぐために，底盤に止水層を形成して掘削する方法がとられた（図—10）。

すなわち，G.L.－98mの連続壁の最下部から上5m厚さで薬液注入による止水ゾーンを形成することにより，湧水を防ぐと共に，床付け面から止水ゾーンまでの土の重量と止水ゾーンに作用する揚圧力をバランスさせて，盤ぶくれやボイリングを防ぐ方法をとった。

薬液注入に当たっては，かつて薬液注入が経験した事のない，G.L.－100m付近に存在する細砂層に対する均質な浸透性，強度と耐久性，止水性，これらを可能にする注入方式と注入薬液の選定が必要で

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

あった。

注入工法としては，対象地盤がN値が50以上の土層からなる点と高被圧水下という点から懸濁・溶液複合注入工法を用いることとし，二重管ダブルパッカー工法にシリカゾルグラウトを組合わせた薬液注入工法が採用された。

試験注入の結果では止水ゾーンの透水係数は，$k=10^{-6}$ cm/sec 付近を示した。

マンシェットチューブの設置長は，AP+6.50～AP−57.50 間の 64.00m であって，地下水位は AP+16.50 にある。

注入に当たっては，G.L.−98m(AP−57.50)から上17m区間はCB（セメント・ベントナイトグラウト）を一次注入し，その後G.L.−98mから上5m区間にシリカゾルグラウトを二次注入し，平成3年3月に注入完了後掘削を開始し，同年10月初めに最終床付け面であるAP−19.60mまでの掘削を完了して底面コンクリートを打設した。掘削に際して湧水は認められずドライの状態で行うことができた。

この間，3月末日～10月初めまでの6か月余の間，厚さ5mの固結層の底面にはほぼ80mの揚圧力が作用したものと考えることができ，動水勾配はほぼ$\frac{8\,000}{500}=16$とみなしてよい。

前記室内実験ではシリカゾルの場合の静水状態の地下水面下においては，長期強度から判断して耐久性は3年以上（促進試験結果からの推定では60年以上），掘削時に50程度の動水勾配がグラウトによる固結層に作用している場合は，1年程度は止水保持能力があるという結果がある。このため，当現場では十分な止水性の耐久性を期待できると推察された。

上述した条件下において，掘削工事が無事に完了したことは，前述の室内実験結果とその適用法がほぼ妥当であったとみなすことができ，今後の大深度地下開発における薬液注入の適用法を考慮するに際し，役立つものと思われる。

おわりに，最も理想的な耐久性の優れた注入薬液はゲル化時間が長く浸透性に優れて，SiO_2 の溶脱とゲルの収縮がほとんどなく，強度が高い注入材ということができる。しかしすべてを完全に満たす注入薬液を得ることはきわめて困難であり，また地盤条件の多様性を考慮すれば，すべての地盤条件に一律に適合する耐久性グラウトを開発することは事実上不可能に近い。このためこのような地盤条件の多様性をカバーするためにも，上記注入材の耐久性にかかわる特性を十分理解した上で，複合注入の手法で現場に適用することが最も現実的なものと言えよう。

おわりにあたって，本研究ならびに報告書の作成にあたって永久グラウト研究会会員である，㈱大阪防水建設社，三信建設工業㈱，日特建設㈱，日本基礎技術㈱，ライト工業㈱ならびに旭電化工業㈱，富士化学㈱より多大の協力を得たことをここに感謝いたします。また，特に現場施工例に関しては，東京都，大成・熊谷・日本国土・大木・都中協建設共同企業体，ライト工業㈱の関係各位の御好意により記載できたことをここに感謝いたします[8]。

引 用 文 献

1) 米倉亮三・加賀宗彦：サンドゲルの耐久性，土木学会第38回学術講演会講演概要集，第3部，1983.
2) 米倉亮三・加賀宗彦：サンドゲルの耐久性(その2)，第19回土質工学研究発表会，1984.
3) 米倉亮三・加賀宗彦・島田俊介・多田修一：超微粒子シリカを用いた耐久性グラウト材の開発，第22回土質工学研究発表会，1987.
4) 米倉亮三・加賀宗彦・島田俊介：薬液注入における長期耐久性の研究，土木施工，Vol. 32，No. 2，山海堂，1991.
5) 島田俊介・佐藤　武・多久　実：最先端技術の薬液注入工法，理工図書，1989.
6) 強化土エンジニヤリング㈱：「シリカゾルグラウト；シリカライザーとハードライザー」「GSGグラウト」「パーマロック」，技術資料，1991.
7) Ryozo Yonekura, Munehiko Kaga: Current chemical grout engineering in Japan, Grouting soil improvement and geosynthetics, New Orleans, Louisiana, February 25～28, 1992.
8) 島田俊介：大深度地下開発への展開を目指す薬液注入の現況，平成3年4月25日付　日刊建設工業新聞，土質，地質と基礎特集，1991.

(原稿受理　1991.12.6)

NII-Electronic Library Service