

水ガラス系注入材の安定性と注入固結砂の長期強度の予測

加賀 宗彦

正会員 工博 東洋大学助教授 工学部環境建設学科(〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

薬液注入材の耐久性に関して、ゲル化した注入材の物理・化学的安定性と注入固結砂の長期強度の予測法を検討した。物理・化学的安定性としては、ゲル化した注入材の体積変化と溶脱シリカを長期的に調査した。その結果、体積変化と溶脱シリカは、一定期間の経過で、ほぼ停止した。また、溶脱したシリカは未反応シリカで、化学的な分解によるシリカはないものと推測でき、少なくとも4500日間(12年)は化学的に安定していることがわかった。耐久性に関連したもう一つの研究として、長期強度の予測法についても検討を行った。その結果、外挿法による予測と、同形アレニウスプロットによる予測、2通りの方法で予測が可能であった。

Key Words: grout, durability, soil stabilization, compressive strength

1. はじめに

最近、注入工法は信頼性の向上に伴って、これまで主な用途であった仮設構造物から、地盤の液状化対策など恒久性が必要な分野にも需要が拡大されてきた。従来、恒久性を持つ注入材は、セメント系懸濁型注入材に限られていたが、10年ほど前から浸透性が溶液型注入材に近く恒久性を持ったケイ酸石灰水和結晶^{1), 2)}からなる注入材、また最近ではカルシウム-アルミニウム-シリカの結晶³⁾から成る注入材も開発され、実用化されている。このように、優れた注入材が開発されているが、その浸透性は溶液型薬液注入材と同等ではない。さらに透水性の小さい地盤の改良には、浸透性の良い溶液型の薬液注入材が必要である。

しかし、溶液型薬液注入材の耐久性に関する特性は、まだほとんど明らかにされていない。そこで、当研究室では、これまでこの耐久性について、注入材の物理・化学的安定性を調べるため性質の大きく異なる3種類の注入材を選定してゲル構造^{4), 5), 6)}、またゲル化注入材そのものの体積変化やシリカの溶脱の経時変化を約2000日の継続実験によって調査してきた⁷⁾。さらに、固結砂の耐久性に関しては、止水性や強度の経時変化を調査し、準理論的に長期安定性に対する検討を行ってきた。その結果、注入固結砂の経時的な強度変化は、ゲル化した注入材の体積変化と注入固結砂の弾性係数の変化に大きく支配されていることを明らかにした⁸⁾。これによって、注入材の

耐久性の一端を明らかにできた。さらに調査を進めるため、その後も強度の経時変化に影響をおよぼすこの体積変化とシリカの溶脱についての継続調査を行ってきた。現在、約4500日間(12年)の調査結果を得たので、注入材の物理・化学的安定性について再検討を行った。その結果、物理・化学的安定性に関係する体積変化およびシリカの溶脱は、一定の期間が経過すると、ほぼ停止する事がわかった。

また、溶脱シリカのほとんどは未反応シリカで、ゲルの化学的解重合によるシリカはないものと推測できた。この結果は、注入材の長期的な物理・化学的安定性の判定に役に立つと考えられる。

次に、注入材はゲル化後もゆっくりとした速度でsyneresis(離しょう)や硬化が続くことから、この過程でも化学反応が進行していることに着目して、養生温度を上げることで、強度の経時変化を促進できると考えた。結果として、養生温度を高くすることで強度の経時変化を促進できた。これより、耐久性に関連したもう一つの研究として長期強度の予測法についても検討を行った。その結果、長期強度は外挿法による予測と、強度変化速度を利用した同形アレニウスプロットによる予測、2通りの方法で予測が可能であった。また、この予測強度の信頼性を物理・化学的安定性の側面からも検討してみた。これらの結果は、次々と開発される注入材強度の耐久性を短時間で評価する手段に利用できる。なお、外挿法および同形アレニウスによる予測法は、20℃および55℃養生データを用いて文献7)でも報告し

Table 1 Properties of grouts

No	Grout type	Specific gravity	SiO ₂ /Volume of grout (g/cm ³)	Gel time (min)
A20	①	1.239	0.203	10
A15	①	1.181	0.152	20
A06	①	1.072	0.960	120
CH	②	1.130	0.114	240
CSN	③	1.200	0.323	30

- ① Organic reactant grout
- ② Acid silica sol grout (non-alkaline grout)
- ③ Colloidal silica sol grout

たが、本論文は養生温度の段階を増やし、また測定データ数も追加し、さらに研究を進め取りまとめたものである。

2. 使用注入材および実験方法

(1) 注入材と物性

実験に用いた水ガラス系溶液型注入材は、ゲル化領域および粒子の大きさが異なる計3種類の注入材である。アルカリ領域で固結する注入材はグリオキザールを反応剤とした有機系注入材、また非アルカリ領域からは、酸性シリカゾル系注入材を選定した。

さらにシリカ粒子を重合により大きく成長させ耐久性に優れた特性を持つコロイダルシリカゾル系注入材^{9), 9)~10)}を用いた、注入材の物性はTable 1に示す。詳しくは文献4)を参照されたい。

(2) 実験方法

a) ゲル化した注入材の経時的体積変化と溶脱シリカの測定

ゲル化した注入材の供試体は、養生中供試体が割れたり、細分したり、不規則な変形、またゲル強度の弱い供試体は、移動困難なため、ノギスなどによる通常の測定方法では不可能であった。

そのため、本研究では、ガラス製メスフラスコを用いてゲルの体積変化を測定した。この方法は供試体を移動する必要がないのでゲル強度の弱い供試体の体積変化も測定することが可能であった。

詳細は文献5)に示してあるが、体積測定条件を明確にするため、測定方法を再度説明をする。実験に用いたメスフラスコは、ガラス製で体積は、300cm³のものを使用した(ガラス製メスフラスコからのSiO₂

の溶脱はほぼゼロである)。

このメスフラスコに約160cm³の注入材を入れ、ゲル化後300cm³の目盛りの位置まで蒸留水を満たし恒温室(20℃)で養生した。

また、ホモゲルの体積(V_G)は次のようにして求めた。

$$V_G = 300 - (m_{c.w} - m_c) / \rho_w$$

m_c: (ゲル化注入材+メスフラスコ)の質量

m_{c.w}: m_c+300cm³目盛りまでの水の質量

ρ_w: 水の密度

蒸留水は10日経過までは毎日、その後100日経過までは10~40日間隔、それ以降は100~300日間隔で取り替え、基本的には経過日数が長くなれば取り替え間隔も長くした。取り替えによって新しくメスフラスコに入れる蒸留水は常に300cm³目盛りの位置までとした。取り替えのため取り出した蒸留水からはJIS K 0101-1979 モリブデン酸黄法で溶脱シリカ量を測定した。ただし、今回示した最終測定点(約4500日)の溶脱シリカ量は、バックテストで行った。

これは、モリブデン酸法に使用した吸光度計がすでに廃棄処分となったためである。ただ、バックテストの最小読みとり値は0.002mg/cm³でこの値は水道水に含まれるシリカの量も読みとることができる。

したがって溶脱シリカの測定精度は十分であると判断した。体積変化を測定する本実験方法は、ゲル強度の小さい注入材にも適応できる方法として開発したものである。

しかし、それぞれのメスフラスコ内のゲル化した注入材と蒸留水の接触面は、厳密には一定でない。

したがって、水とゲル化した注入材との接触面積が変われば経過時間と測定量の関係も変わるものと考えられる。このため、この論文で示した経過日数と体積変化や溶脱シリカの関係は、厳密には本実験の条件に限定される。ただし、シリカの溶脱量や体積変化量は一定になる状態まで測定しているの、その最大量は、正しいものと考えられる。なお、酸性シリカゾル系注入材は、現在2つのブロック状態になっているが、継続的に注意深い観察を行わなかったため、2つ割れになった明確な時期を特定することはできない。

b) 薬液注入固結砂の作成と一軸圧縮試験方法

供試体作成は室内で行なった。この間の温度管理は特に行っていない。供試体は高さ10cm、直径5cmのモールドに豊浦標準砂を入れ水で飽和した後、注入材を圧力浸透して作成した。砂の密度は、相対密度(Dr)で57.0(%)とした。Table 2に砂の物性を示す。

この表に示す砂の内部摩擦角(φ)は等体積一面せん断試験機によって求めた。注入材による飽和度は

Table 2 Physical properties of sand

Gs=2.667 Emax=0.950 Emin=0.660

Dr	0.570
ρ_s (g/cm ³)	1.5
e	0.785
ϕ (deg)	36.0

Table 3 Rate of unreaction⁵⁾

No	反応率 (%)	未反応率 (%)
A20	61.3	38.7
A15	57.4	42.6
A06	61.9	38.1

ほぼ100%であった。供試体をモールドから脱型後ポリ塩化ビニルフィルムで包み恒湿箱に入れ、供試体の乾湿がないようにしたもの、直接水中で養生したもの2通りの方法で行った。養生温度は20℃、40℃、55℃、70℃である。なお20℃養生で供試体から水の出入りがないようにビニルフィルムと袋で包んで養生したものは、物理的影響がほとんどないので便宜上標準養生と呼ぶ。これに対して、21℃以上の温度で養生した供試体を促進養生と呼ぶ。一軸圧縮試験は JIS A 1216 に準じて行った。

3. 注入材の特徴

本実験で使用した注入材の特徴を明確にするため、それぞれの注入材の特性を簡単に説明する。詳しくは文献4)~6)を参照されたい。

(1) 有機系注入材

有機系水ガラス注入材に用いられるグリオキサール反応剤が無機反応剤と大きく違うのは、酸(グリコール酸)の生成が、カニツアール反応¹¹⁾によって生ずるもので、このため高濃度の水ガラスでもゆっくりとした速度でゲル化することができる。したがって、地盤に注入材を浸透させるためには適した注入材である。しかしながら、アルカリ領域で使用するすべての注入材に見られる大きな特徴としては中和する以前にゲル化するため必ず未反応シリカが残存することになる。有機系注入材もまたアルカリ領域でゲル化するため中和状態になっていない。この未反応シリカ量を中和滴定試験で求めた結果⁵⁾をTable 3に示す。未反応シリカはおおよそ40%前後である。

(2) 酸性シリカゾル系注入材

酸性シリカゾル系注入材は、pH7以下の酸性領域でゲル化するので、水ガラスのNaイオンはすべて取り除かれている。したがって未反応シリカが無いのが大きな特徴である。ゲル化速度は、シリカ濃度が一定であれば pH の値で決まる。ゲル化時間とpHの関係は、島田によって報告されている¹²⁾。

(3) コロイダルシリカゾル系注入材

コロイダルシリカゾル系注入材は、シリカ粒子を重合により成長させて大きくしたコロイダルシリカを用いたものである。コロイダルシリカ粒子の大きさは、直径約10~20 nmで、オルトケイ酸イオン(SiO₄⁴⁻)直径の約100倍である。そのため同じシリカ濃度であれば、粒径に反比例して比表面積も小さくなる。コロイダルシリカ粒子の比表面積が小さいことはまたOH基の数も少なく、したがってOH基同士の出合う確率も少なくなり、この分SiO₂濃度を高くすることができ、高強度の注入材を作成できる特徴がある。また、コロイダルシリカゾル溶液のゲル化は、前述の化学的中和による有機系注入材や酸性シリカゾル系注入材とは異なり電気的な中和でゲル化させる。このゲル化は、凝析¹³⁾とも言われている。

4. ゲル化注入材の経時変化

これまでの研究で、注入固結砂の強度の経時変化は注入材の種類によって徐々に強度減少するもの、増加するもの、ピークを持つもの3種類のタイプがあることがわかった^{4), 5)}。さらにこの原因を準理論的に解析した結果、次の式で検討できた⁶⁾。

$$\frac{Q_{ut}}{Q_{uo}} = \sqrt{\frac{C_o}{C_t} \times \frac{E_t}{E_o} \times \frac{1}{\sqrt{n}}} \quad (1)$$

添え字0, tは初期および時間経過後を表す

Q_{ut}, Q_{uo}:一軸圧縮強度

C_o, C_t:クラックの長さ

E_o, E_t:ヤング率

n:原子間距離比

(初期原子間距離/時間経過後の原子間距離)

式(1)から、クラック(C_t)が増大すると一軸圧縮強度(Q_{ut})は減少することがわかる。このクラックの長さと同体積変化は次のように表すことができる⁵⁾。

$$\left(\frac{C_o}{C_t}\right)^{1/2} = \left(\frac{\Delta V_o}{\Delta V_t}\right)^{1/3} \quad (1)'$$

ΔV_o, ΔV_t:初期および時間経過後の体積変化
(文献5ではΔV_oを2日養生体積変化としている)

ΔV_0 の値は初期で決まり経時的に一定なので ΔV_t が大きくなれば C_0/C_t の値は小さくなり、比例して式(1)の一軸圧縮強度も減少する。これより、一軸圧縮強度は、ゲル化した注入材そのものの体積変化に大きく支配されていることがわかる。したがって、ゲル化した注入材そのものの体積変化を長期的に観察することは重要である。また、化学的安定性に関連する溶脱シリカについてもゲル化した注入材の解重合を知るための長期的調査は必要である。次に調査結果を示す。

(1) ゲル化した注入材の体積変化

経時的体積測定結果をFig. 1~Fig. 3に示す。

図中の縦軸は、ゲル化した注入材の体積変化(ΔV_t)/メスフラスコに入れた注入材体積(V)で表してある。最初にFig. 1に示すアルカリ領域でゲル化するグリオキザールを反応剤とした有機系注入材について検討してみる。前回の2000日までの調査では、最も濃度の高いA20注入材は、40日経過前後で体積変化がほぼ止まり、その体積変化率は、平均6%であった。

また、A20に比べ S_iO_2 濃度の少し小さいA15注入材もA20注入材に比較してほぼ相似的な体積変化を示し、その後ほぼ一定となり安定した。

この図に今回の調査で得た4500日(12年)経過の測定結果をプロットしてみると、A20、A15とも体積変化に変動がなく、体積は一定となっている。この結果、温度一定の養生条件では、ほぼ全体積変化の90%をゲル化初期に生じ、その後しばらくして体積変化は停止し少なくとも4500日間(12年間)、ゲルは安定していることがわかった。視覚による観察では4500日経過現在でもゲルに変化の兆候が見られない。ただ、同じ有機系注入材でも S_iO_2 濃度が $0.06g/cm^3$ と極端に小さいA06注入材は100日前後で小さな粒状体に分解し測定不能となり、結果的には、Fig. 1に示されるように膨張と測定される。これらの結果から有機系注入材の特徴を見てみると、経時的に4~6%の体積減少を生じるが、適当な S_iO_2 濃度を持った注入材であれば、ゲル化した注入材は長期的に安定する事が判明した。したがって、 S_iO_2 濃度が極端に小さく無い限り、耐久性を目的とした注入材としても使用できる可能性が示唆された。

次に、Fig. 2に示す有機系注入材とは全く異なるpH領域でゲル化する酸性シリカゾル系注入材の経時的体積変化を見てみる。この図に示されるように有機系注入材に比較して安定するまでの体積減少期間が長く、また体積変化も大きい。前回測定した2000日まで約23%の体積減少をし、その後体積は一定となり安定傾向を示した。しかし、体積一定となった期

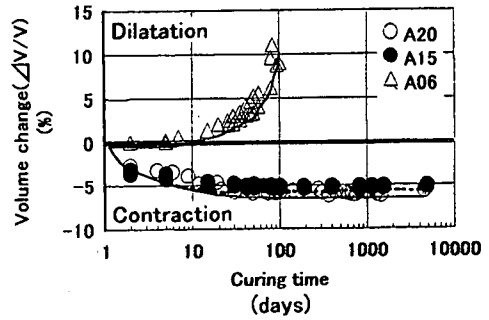


Fig. 1 Rate of volume change of pure grout used in A20

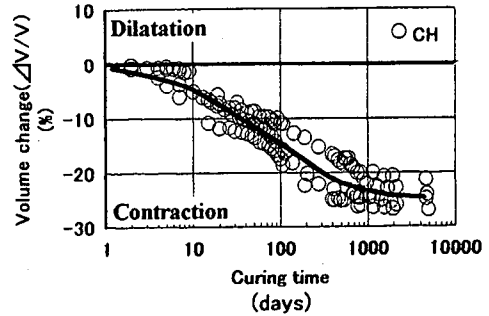


Fig. 2 Rate of volume change of pure grout used in CH

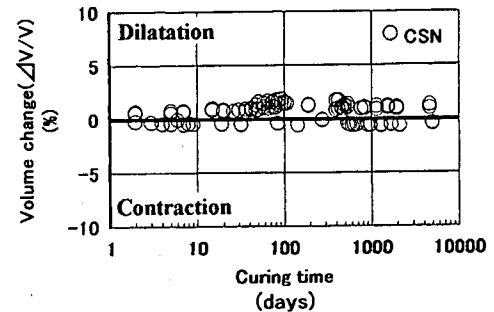


Fig. 3 Rate of volume change of pure grout used in CSN

間が短く確信はできなかった。

今回の調査で得た4500日の測定結果をプロットしてみると2000日以降も体積変化がなく一定していることがわかった。この結果、式(1)'の ΔV_t は変化しないので、 C_t (ρ_t)の増加が無く、結果として一定期間の経過で体積変化による強度減少の要因は取り除かれるものと考えられる。最後にコロイダルシリカゾル系注入材について検討してみる。この注入材の構造は粒状体モデルなどで使用されているような蜂の巣状の間隙を持った配列となっている⁴⁾。この蜂

5. 注入材の硬化過程と促進養生

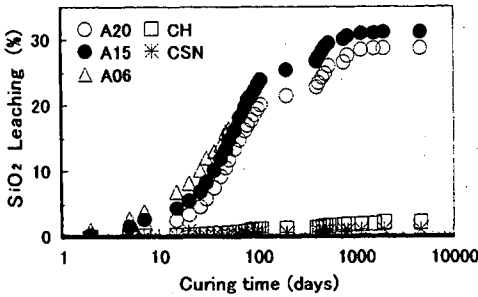


Fig. 4 SiO₂ Leaching from pure grout

の巣状構造は、アーチ作用によってある程度の力が作用しても崩れないものと考えられることができる。このため、粒子は容易に移動できない構造になっている。結果的に、Fig. 3 に示されるようにコロイダルシリカゾル系注入材は、4500日経過後も安定性を保ち、体積変化がなかった。したがって、式(1)のCt(キレツ)は増加しないのでこれによる強度の劣化はしないものと推定できる。長期的な安定性を持った注入材と考えられる。

(2) 溶脱シリカ

ゲル化した注入材が化学的に不安定であれば解重合によりシリカの溶脱は多くなることが予測される。

したがって長期間の化学的安定性を調べる一つの手段として、シリカの溶脱が、経時的にどのようになっているかを把握する必要がある。

これを検討するため、2章(2)で述べたようなメスフラスコによる測定法で長期間の調査を実施した。

測定結果を、Fig. 4 に示す。縦軸の溶脱率は、溶脱シリカ量/全シリカ量で表したものである。前回は約2000日までのデータであったが、今回は4500日の測定結果を追加してある。図に示されるように有機系注入材、コロイダルシリカゾルおよび酸性シリカゾル系注入材の溶脱シリカは、1000日以降ほとんど停止している。有機系注入材は4500日前後で約30%の溶脱をするが、中和滴定試験で求めた未反応シリカ量の推定値¹⁾は、Table 3 に示すように約40%であるので、溶脱シリカはこの量を越えていない。これより溶脱シリカは未反応シリカで、ゲルの解重合によるシリカの溶脱はないものと判断できる。この推定は、コロイダルシリカゾル系注入材、酸性シリカゾル系注入材にも適用できる。したがって、少なくとも温度一定の養生条件であれば約4500日間(12年)はゲルの解重合はなく安定しているものと判断できる。次に注入材の耐久性に関するもう一つの研究として注入固結砂強度の経時変化の予測について検討する。

酸性領域からアルカリ領域またはシリカ粒子の大きさをかえたいろいろなタイプの水ガラス系注入材が開発されている。その注入材の銘柄は、350種類以上登録¹⁴⁾されているが溶液型の基本的なゲル化反応は、水ガラスの中和によるものである。

また、そのほとんどの注入材の硬化は、液状からゲル化—syneresis(離しゅう)—硬化と一連の過程をたどる。例外として中和反応によらず凝集によってゲル化し、またsyneresisもほとんどない特殊な注入材もあるが、注入材の硬化過程を長期的な観点から分類すれば、すべての注入材は次の2段階に分けられる。

第1段階は、注入材が流動性を失ってゲル化する過程

この過程で注入材は、注入材の種類によって異なった構造を形成しながらゲル化する¹⁵⁾。有機系注入材は、短線状粒子がお互い絡み合い、酸性シリカゾル系注入材であればガラス状に3次元網目構造を形成し、またコロイダルシリカゾル系注入材は、粒子が網目構造を形成しながらゲル化する。

第2段階は、ゲル化後syneresisや硬化が続く過程

この過程は、ゲル化時間に比べるとゆっくりと、また注入材によっては、非常に長い時間継続して硬化が続く。この硬化は、シラノール結合が継続して進行しているものと考えられるが、まだ明確な結論はない。

注入工法によって地盤を改良するとき、改良範囲や改良地盤の初期強度は、上述の第一段階に支配される。これに対し、改良された地盤の強度の経時変化は、硬化過程の第2段階に大きく支配されているものと考えられる。固結砂強度の経時変化の原因を準理論的に解析した式(1)に硬化過程の第二段階を関連させて検討すれば、syneresisによる体積変化はキレツの拡大で表され、また硬化は、ヤング率の増加に相当し、強度の経時変化に關与する原因を説明できる。この第2段階のsyneresisや硬化の速度は、化学反応に基づくものと考えられるので、通常の化学反応にしたがうとすればその反応速度は、温度、表面積、濃度、触媒などによって影響される。最も一般的な温度を上げて反応を促進できることに着目すれば、養生温度を上げることで第2段階の進行を促進し短時間で長期強度の変化を把握できるのではないかと考えられる。もし、促進によって強度の経時変化を短時間で把握できれば、長期強度の予測や次々に開発される注入材の特性の判定に利用できる。

金子と小沢¹⁵⁾は絶縁材料の熟劣化をアレニウスの化学反応速度論をベースにした手法を用いて標準温度での劣化時間を推定する研究を行い成果を得ている。注入固結砂の硬化も化学反応に影響されるものと仮定すれば養生温度を変えることで、前述の手法を参考にして、強度の経時変化を推定する事が可能と考えられる。この可能性を検討するため、ここではもっと単純な化学反応速度と反応率の関係を考察してみる。

化学反応速度およびアレニウスの式は対数表示で次のように表される¹⁶⁾。

$$\log \frac{A}{A_0} = -kt \quad (2)$$

$$\log k = \log C - \frac{E}{RT} \quad (3)$$

A:濃度 A₀:初期濃度 k:速度定数 t:時間
C:定数 E:活性エネルギー R:ガス定数
T:絶対温度

温度を変化させた時、一定反応率(A/A₀)と時間の関係を式(2)から見てみる。式(2)のkは、式(3)から温度に比例することがわかる。したがって、温度が上昇すると式(2)の時間(t)は小さくなる。この関係は、異なった温度で反応率(A/A₀)とその時間(t)の関係を求め縦軸に反応率、横軸に時間を取ってそれぞれを図示すれば、時間軸上を移動する事で重ね合わせが可能と考えられる。もし重ね合わせが可能であれば標準養生強度を促進養生から予測する事が可能となる。なお、式(2)(3)は、化学反応に比例するものであれば、強度変化、質量の増加や減少などを代用として使用できる^{17)~19)}。これらの考えにしたがって、養生温度を40℃、55℃、70℃に上げて(促進養生)、強度の経時変化を調べてみた。

A20注入材の結果をFig. 5(b)(c)(d)に示す。また、促進養生と比較するため同じ図の(a)には室温20℃の標準養生結果を示す。なお、Fig. 5(a)(b)以外、Fig. 5(c)~Fig. 7(d)まではページの都合で図を縮小してある。

最初に、標準養生強度の経時変化を見てみると、図(a)に示されるように初期強度が大きく、その後緩やかな強度減少を示す。同様の傾向はFig. 5(b)~(d)の促進養生においても見られる。これより、前述の考えにしたがい異なった温度で養生した強度-経過時間の関係を示した曲線を時間軸に沿って移動させることで重ね合わせができるのではないかと考えた。

そこで、最初に促進養生では最も長期間のデータを得た55℃養生(Fig. 5(c))の平均強度-経過時間の関係を求めた。その関係は曲線で表され、同図に実

線で示す。この曲線は、各経過日数における平均一軸圧縮強度を求め、それぞれの平均点を結ぶと折線になるが連続した曲線で示すのが適切と考たので連続した曲線で示した。ただし、平均値の測点は図が複雑になるので表示していない。この曲線を標準養生(Fig. 5(a))の時間軸に沿って移動させて挿入してみた。図に点線と一点鎖線で示されるように、ある幅を持ってほぼ相似する結果を得た。この点線(内側)と一点鎖線(外側)の曲線は、55℃養生(同図(c))に示した曲線の出発点(1日養生)を標準養生の15日または50日の位置まで移動させ挿入したものである。この移動した位置の日数を促進養生の出発点、例えば上述の1日で割った値が促進倍率となる。図上にはその倍率を示してある。同じ方法で、測定期間は約100日と短いFig. 5(b)、(d)の40℃、70℃促進試験結果にも55℃促進養生(Fig. 5(c))の曲線を挿入すると、図に実線で示すようにほぼ一致することがわかる。なお、図(b)、(d)に示した曲線は同図の各経過日数における強度の平均値を求め、これらの平均値を55℃養生(同図(c))に示した曲線で連続的に評価できるように挿入した曲線である。ただ、この挿入した曲線は簡単な関数で表すことができないので、統計的手法では行っていない。なお、標準養生(Fig. 5(a))に示してある実線も同様な方法で挿入したものである。それぞれの図に実線で挿入した曲線は強度-経過時間の代表的関係を表したものと考えることができる。また、挿入した実線から促進倍率を求めたものをTable 4に示す。ただし、促進倍率は標準養生を基準に換算してある。この結果、表に示されるように有機注入材の強度の経時変化は養生温度に比例して促進されることがわかる。

次に有機系注入材とはまったく異なる酸性領域で固結する酸性シリカゾル系注入材の結果をFig. 6(a)~(d)に示す。同図(a)の標準養生強度の経時変化と1000日までの測定データがある同図(c)の55℃促進養生の経時変化は双方ともピークをもつ曲線で示されて相似している。これより、前述の有機系注入材と同じ手法で、同図(c)の55℃養生の平均強度-経過時間の関係を示した曲線を時間軸に沿って標準養生強度(同図(a))に挿入してみた。結果は、図に示されるようにほぼ一致した。同じ方法で測定データは100日までと短い40、70℃促進養生にも同様に挿入した。その結果、Fig. 6(b)(d)に示されるようにほぼ一致する。促進倍率は前述の有機系注入材と同様な方法で求めてTable 4に示す。

最後に、連続して経時的に強度増加をするコロイドゾル系注入材の促進と標準養生の結果を比較してみると、Fig. 7(a)~(d)に示すように促進養生と標

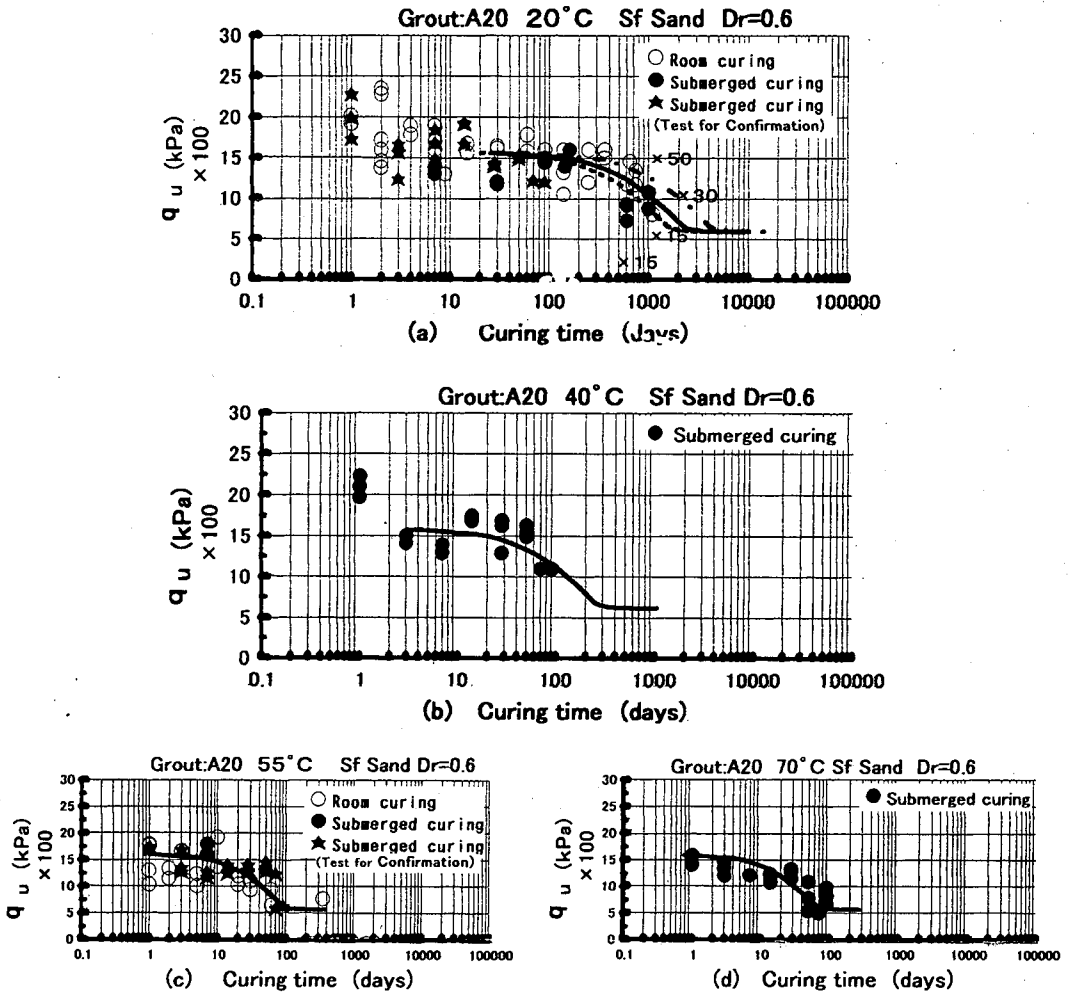


Fig. 5 Change of long-term strength of grouted sand used in A20

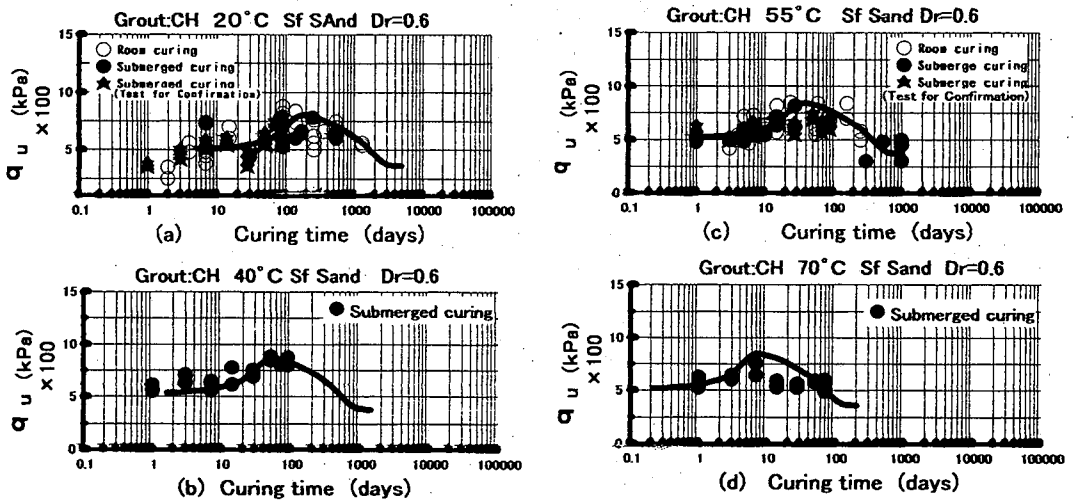


Fig. 6 Change of long-term strength of grouted sand used in CH

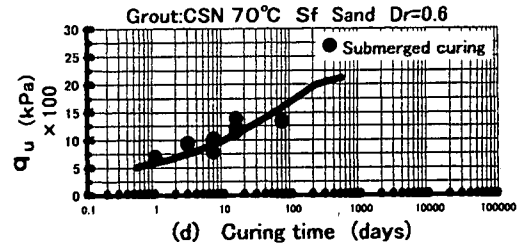
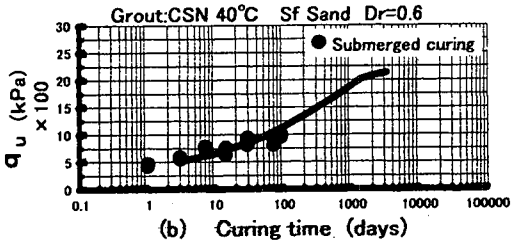
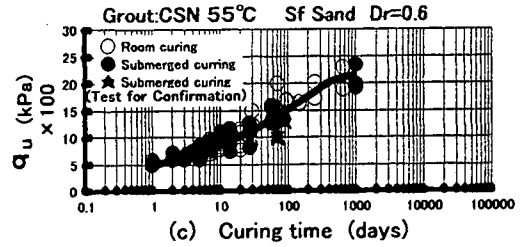
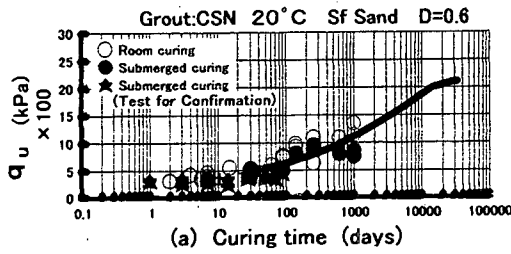


Fig. 7 Change of long-term strength of grouted sand used in CH

Table 4 Rate of acceleration obtained from accelerated curing

Temp. (°C)	Rate of acceleration (times)		
	A20	CH	CSN
20	1	1	1
40	10	3	10
55	30	5	30
70	40	25	60

Table 5 Estimation by extrapolation

Grout	Predicted time (days)	Predicted strength (kPa)	Rate of acceleration (times)
A20	10,000	600	30
CH	5,000	400	5
CSN	35,000	2000	30

標準養生は経時的に連続して強度増加を示し相似している。したがって、有機系や酸性シリカゾル系と同様に55°C促進養生の平均強度-経過時間曲線を求め、同図(a)(b)(d)に挿入しそれぞれを実線で示す。図に示されるようにほぼ一致する。これより促進倍率を求め、有機系および酸性シリカゾル系注入材と並列してTable 4に示す。

上述の結果から本実験で用いたすべての注入材で標準養生と促進養生強度の経時変化は相似おり、重ね合わせが可能であることがわかった。これより促進養生から長期強度を短時間で予測できる可能性を見いだした。

なお、養生条件の違いを見るため、浸水、非浸水の2通りの養生方法で行っているが、Fig. 5~7(a)(c)に示されるように養生(環境)条件による大きな違いはなかった。また、各経過日数における一軸圧縮強度の標準偏差を求めた結果、その全平均値は64.6(kPa)であった。長期強度特性を促進養生から予測出来る可能性が示唆されたので、次にこの予測について検討する。

6. 促進試験による長期強度の予測

前述のFig. 5~7の(a)には、標準養生による約1000日経過までの強度特性を示したが、このような長期強度を短期間で調べることができないかと考えたのが、促進養生から強度-経過時間の関係曲線を得て外挿法によって予測する方法である。これは、前述したように促進と、標準養生の相似性を利用したものである。促進養生による促進倍率はTable 4に示すように同じ注入材であれば温度に比例する。したがって、強度-経過時間曲線は温度に比例した倍率で求めることができる。本研究の40°C、70°C促進養生データは約100日と短いので、強度の経時変化を予測するためには十分でない。このため、本研究では350日以上の実測データのある55°C促進養生Fig. 5(c)~Fig. 7(c)に実線で示した平均強度-経過時間曲線を用いて標準養生Fig. 5(a)~Fig. 7(a)に挿入した曲線(実線)から、まだ求められていない長期強度を外挿法によって予測してみた。ただ、同じ注入材でも測点のばらつきのため幅を持った値で予測するのが適切な評価と考えられる。しかし、これまで長期強度を知るためには長期間の養生日数が必要であった。

これが障害となり注入材の耐久性に関する良否の判定が困難であった。したがって、前述の方法は次々と開発される注入材の長期強度の傾向を予測するためには十分目的を達成できる考えた。注入材の耐久性を評価する1つの方法として使用できる。

最初にFig. 5(a)に実線で示す曲線から、有機系注入材(A20)のまだ求められていない1100日以上強度の経時変化を予測すれば、図上の実線で示されるように、100日経過後から経時的に強度減少をするが2500日付近で止まり、その後少なくとも10,500日(28年)まで600kPaの強度で安定するものと予測される。また、前述の4章(1)(2)で述べたように、ゲル化した注入材の体積変化やシリカの溶脱は一定期間が経過すると停止する。この体積減少は式(1)からの推定で強度減少を生じさせる一つの要因が取り除かれる。また溶脱シリカの停止は化学的に安定しているとも推測できることから、少なくとも強度劣化の2つの要因が取り除かれるので、上述の予測強度は達成できる可能性が高い。

次に、経時的に強度増加をする性質のまったく異なるCSN注入固結砂は、どこまで強度増加をするかを予測してみると、Fig. 7(a)に実線(曲線)で示してあるように、少なくとも35,000日(95年)までは、強度増加が見込まれ、その推定強度は、2000kPaとなる。

この強度は、標準養生の2日強度に比べ約7倍となる。

また、Fig. 6(a)に示す実線から、経時強度にピークを持つCH注入材の強度の経時変化を予測すると、200日付近まで強度増加するが、その後2000日までゆっくりと強度減少するものと予測される。それ以降は、少なくとも5000日(13年)まで400kPaの強度で安定することが予測できる。この強度は、標準養生1日強度と比べ1.3倍の値である。

なお、上述の予測強度とその日数および促進倍率を注入材別に比較できるようにTable 5にまとめて示す。このように概算値であるが、長期の強度を促進試験で1/5~1/30の期間で予測できる方法をみいだしたことは、本研究での一つの成果と考えることができる。ただし、本実験の予測結果は、供試体の乾燥や温度変化が無い環境条件に対応するもので水圧や温度変化を受ける環境条件のもとの適用は、まだ未確定である。

7. 同形アレニウスプロット

注入固結砂の長期強度変化を短時間で予測できれば、耐久性などの判定に利用できる。その予測法の

一つとして前述した、外挿法がある。しかし、この方法による予測はある程度長期の連続した強度測定が必要となる。

しかしながらただ単に指定された強度になるまでの期間、例えば初期強度の1/2になるまでの期間を知るだけで注入材の品質の判定は可能である。したがって、耐久性の判定には必ずしも連続した測点を必要としない。そこで、強度の変化速度を考慮したもう一つの予測法を検討してみた。この方法は、強度の変化速度と養生温度の関係を検討したものである。強度の変化速度は初期強度(q_{00})から一定の割合で増加または減少した強度(Δq_u)を経過日数(Δt)で割った値($\Delta q_u / \Delta t$)である。この強度の変化速度は対数目盛で縦軸に取り、養生温度は絶対温度(T)の逆数とし横軸にと取る。ただし、強度の変化速度は絶対値を用いている。最初に、有機系注入材を検討する。この注入材の強度の変化速度はFig. 7(a)~(d)の平均強度-経過時間曲線(実線)から初期一軸圧縮強度($q_{00}=1960\text{kPa}$)の1/2および1/4変化した時の経過日数をそれぞれ求め、対応する経過日数で $q_{00}/2$ および $q_{00}/4$ の強度を割った値である。なお、初期一軸圧縮強度(q_{00})は20℃1日養生強度とした。結果は、Fig. 8(a)図に示されるように片対数で直線関係を得る。この関係は、前述の式(2)に示したアレニウスプロットと同形になる。よって、アレニウスの反応速度定数 $[k]$ を強度の速度変化に置き換えたことで、アレニウスプロットと同形の関係を得たものである。他の注入材も同様な手法で求めた結果をFig. 8(b)(c)に示すと、有機系注入材と同様にアレニウスプロットと同形となった。これより、供試体を促進養生して強度変化を促進させ、アレニウスプロットと同形の図を求めることによって指定された強度に達するまでの経過時間を任意温度対して予測することが可能である。この関係を利用すれば促進養生から標準養生強度を予測できる。例えば、Fig. 8(a)に示す $q_{00}/2$ に対する太線で示す直線が70, 55, 40℃促進養生から求められたとする。この直線から、20℃標準養生で $q_{00}/2$ の強度まで劣化する経過日数予測する。横軸の20℃に対応する図上の直線から、縦軸の値を読み取ると1.1を得る。これより、縦軸の強度変化速度($\Delta q_u / \Delta t$)は $1.1 = (q_{00}/2) / \Delta t$ となる。

q_{00} は前述した通り1960kPaなのでこれより経過日数を求めると890日となる。

20℃に対応する実測値はFig. 8(a)に●で示され、

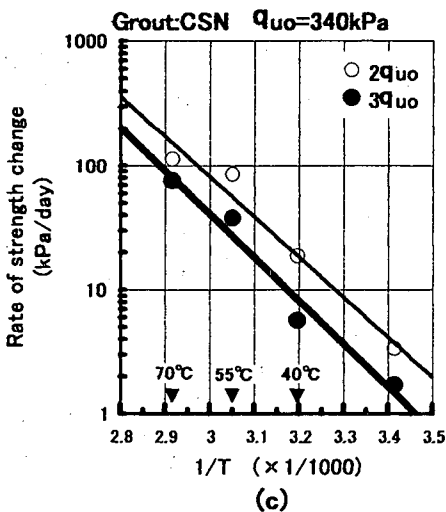
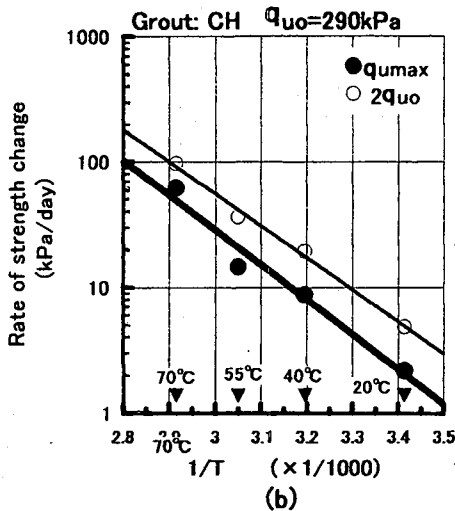
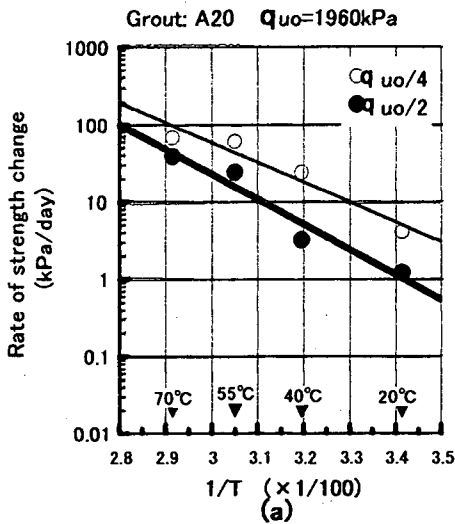


Fig. 8 Arrhenius plot of the same shape

その実測日数800日である。予測日数と約10%の誤差はあるが、この予測法は本研究のもう一つの成果と考えることができる。なお予測倍率は促進温度で異なる。

8. 結論

本研究の結果、次のことがわかった。

1) 注入固結砂強度の耐久性に関係する注入材そのものの体積変化とシリカ溶脱の経時変化を約4500日間(約12年間)調査した結果、一定期間の経過で、注入材の種類に関係なく体積変化とシリカの溶脱は停止する事がわかった。

2) 注入材はゲル化後ゆっくりとsyneresisや硬化が続くことから、化学反応はまだ進行していることに着目して、養生温度を上げることで注入固結砂強度の経時変化を促進できると考え実施した。

その結果、約5~60倍の速度で促進できることがわかった。この促進倍率は温度に比例する。また、促進養生と標準養生それぞれの強度-経過時間曲線を重ね合わせることが可能であった。この関係を利用して外挿法によって長期強度の予測が可能となった。

3) 外挿法によってまだ求められていない1100日以上強度を予測すれば、有機系でシリカ濃度の大きいA20注入固結砂は1000日付近で強度減少が止まり、その後約27年間、600kPaの強度で安定するものと予測される。これに対して、経時的に強度増加をするコロイダルシリカゾル系注入固結砂は、95年間強度増加が続き、その推定強度は2000kPaとなる。また、酸性シリカゾル系注入材は、強度減少が停止した後は400kPaの強度で少なくとも13年間の安定を保つ。

4) ゲル化した注入材の体積変化やシリカの溶脱が一定期間の経過で停止するので、注入固結砂の強度減少の要因が少なくとも2つ取り除かれる。これより上述3)の予測強度は信頼性が高いと考えられる。

5) 強度の変化速度と温度の関係を整理してみた。その結果、アレニウスプロットと同形となった。したがって、促進養生からこの同形アレニウスプロット図を求め、その延長線から標準養生強度を予測できる方法を得た。この方法は、2)の外挿法とは異なる。

今回は、養生温度一定とし静水状態で実験を行った。注入された地盤環境が同じ状態であれば、溶液注入材でも耐久性をもった注入材として使用できることが示唆された。ただし、養生環境が温度変化や

乾燥、水圧または外力が作用した過酷な条件での耐久性に関してはまだ未確定である。

謝辞：東洋大学工学部 米倉亮三名誉教授には啓発を賜り感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山門明雄, 岩佐弘：恒久性地盤改良材-シラクソル-について(上):土木施工, 26巻, 11号, pp. 72-79, 1985. 9.
- 2) 山門明雄, 岩佐弘：恒久性地盤改良材-シラクソル-について(下):土木施工, 26巻, 12号, pp. 20-25; 1985. 10.
- 3) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会：最新地盤注入工法技術総覧, 産業技術サービスセンター, pp. 111-117, 1997.
- 4) 加賀宗彦：注入固結砂特性などに関連する水ガラス系注入材のゲル構造, 土木学会論文集, No. 460/V-18, pp. 93-102, 1993. 2.
- 5) 加賀宗彦, 森 麟：薬液注入におけるゲル化した注入材の安定性と固結砂強度の耐久性に関する基礎研究, 土木学会論文集, No. 496/V-24, pp. 31-40, 1994. 2.
- 6) 加賀宗彦, 米倉亮三, Rudolf ALLMANN：水ガラス系注入材のゲルの状態と注入固結砂の凍結特性, 土木学会論文集, No. 585/V-38, pp. 3-9, 1998. 2.
- 7) 加賀宗彦：注入固結砂の長期強度の予測, 材料学会, 第3回地盤改良シンポジウム, pp. 69-76, 1998. 11.
- 8) 加賀宗彦, 米倉亮三：注入固結砂の強度の耐久性, 土木学会第42回年次講演会, pp. 770-771, 1987.
- 9) 加賀宗彦, 米倉亮三：注入固結砂の長期強度の予測, 土木学会第45回年次講演会, pp. 442-443, 1990.
- 10) 米倉亮三, 島田俊介：薬液注入による長期耐久性の研究, 土と基礎, Vol. 40, No. 12, Ser. No. 419, 1992. 12.
- 11) 小方芳郎：有機反応論 pp. 311-314, 1958.
- 12) 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, pp. 12-33, 1989.
- 13) 中垣正幸, 福田清成：コロイド化学の基礎, 大日本図書, pp. 75-79, 1983.
- 14) 太田想三：薬液注入工法・注入材の種類とその選択, 基礎工, Vol. 19, No. 3, pp. 18-25, 1991.
- 15) 金子剛, 小沢丈夫：周期的に加熱・冷却を加えた絶縁材料の劣化の化学反応速度論的取扱い, 電気学会論文誌A, 52-A14, 97巻, 2号, pp. 48-55, 1977. 2.
- 16) 慶伊富永：反応速度論第2版, 松岳社, pp. 21-33, 1990.
- 17) 富永博夫, 河本邦仁：反応速度論, 昭晃堂, pp. 8-13, 1994.
- 18) 笛野高之：化学反応論, 朝倉書店, pp. 24-30, 1975.
- 19) 原納淑郎, 鈴木啓三, 蒔田薫：応用物理化学 III 反応速度, 培風館, pp. 35-41, 1785.

(1999. 7. 9 受付)

PHYSICAL AND CHEMICAL STABILITY OF PURE SILICATE GROUT AND PREDICTION OF THE LONG-TERM STRENGTH OF GROUTED SAND

Munehiko KAGA

Concerning the durability of grouted sand of which much importance has been attached recently, we researched the physical and chemical stability of pure grout versus age and also examined the prediction method of the long-term strength of grouted sand. As a result, the volume change and SiO_2 leaching of pure grout stopped almost in the progress of time and it was clarified in this study that the cause of SiO_2 leaching is unleached SiO_2 . Further, we were able to obtain two prediction methods that estimate long-term strength of grouted sand. One is the extrapolation method, the other is the Arrhenius Plot method of the same shape. These prediction methods are useful for judging the quality and durability of grouted sand.