水ガラス系薬液注入固結砂の強度の耐久性 と浸透水圧の影響

加賀 宗彦¹

¹ 正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)
E-mail: kaga@toyo.jp

これまで著者は、静水養生した水ガラス系注入固結砂の経時的強度の予測に関して成果を上げてきた。しかし、実際の注入改良地盤では浸透水圧や外力が作用した場合も想定され、これまでの予測は実務面で適用できない場合も考えられる。そこで、本論文は浸透水圧を作用させた状態で供試体を養生できる試験装置を作製し、注入固結砂の強度の経時変化を調査した。浸透水圧の影響は注入材の種類で異なった。またメスフラスコでゲル化した注入材を養生して物理、化学的安定性に関連する注入材そのものの体積変化とシリカの溶脱を約 9000 日(25 年)間調査した。その結果、体積変化やシリカの溶脱は一定期間を経過するとほぼ停止した。また、少なくとも 25 年間はゲルの解重合はなかった。

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

1. はじめに

薬液注入による地盤改良は仮設工事などの短期的用途から液状化防止工法など長期的用途へと使用範囲が拡大してきた。しかし、水ガラス系薬液注入固結砂は長期用途に使用できるかどうかの耐久性に関し評価が定まっていない。また注入固結砂の耐久性などに直接影響を与えるゲル化した注入材(ホモゲル)そのものの体積変化やシリカの溶脱などの物理・化学的な調査も少ない。そこで著者は、種類の異なる 3 種類の水ガラス系薬液注入材を使用して上述の課題に関する研究を継続している。使用している注入材はアルカリ領域でゲル化する有機系注入材、有機系とは反対の酸性領域でゲル化する酸性シリカゾル系注入材およびシリカ粒径に特徴のあるコロイダルシリカゾル系注入材である。本論文の理解を得るため最初にこれまでの成果を簡単に述べる^{1)~4)}。一般的に注入固結砂の劣化は、シリカの溶脱が主な原因であると解釈されることが多い。しかしゲル化した注入材(ホモゲル)そのものの物理・化学的な調査をした研究はほとんどなかった。当研究室は、弱いゲルでも移動しないで体積変化やシリカの溶脱を測定できるメスフラスコ法を考案して研究に着手した。約 4500 日までの調査で、ゲル化した注入材(ホモゲル)そのものの体積変化やシリカの溶脱は注入材の種類によって大きく異なる事を明らかにした。また、各注入材のゲル構造も明らかでなかった。そこで研究に用いた 3 種類の注入材のゲル構造も明らかにした。これらの結果を利用してグリフスの理論をベース

に準理論的に注入固結砂強度の経時変化のメカニズムも検討した³⁾。また、注入固結砂に関しては、長期強度の予測¹⁾をして強度の耐久性も検討した^{2)~4)}。長期強度はアレニウスの式を利用した外挿法で予測し検討した。その結果、有機系注入固結砂と酸性シリカゾル系注入固結砂は経時的に強度減少をする。しかし、約 3000 日経過では強度減少が止まりその後ほぼ一定の強度を保持することを予測できた。コロイダルシリカ注入固結砂は、他の注入固結砂と異なり経時的に強度増加をする大きな特徴を把握した。以上がこれまでの結果であるが、ゲル化した注入材(ホモゲル)の最大養生日数は約 4500 日であった。この時点では、いずれの注入材も体積変化とシリカの溶脱は停止し安定していた。しかし、さらに長期にわたりゲル化した注入材(ホモゲル)が安定するかどうかの確信は得られていない。そこでゲル化した注入材(ホモゲル)の調査を継続した。本論文は、約 9,000 日目(25 年)の測定を行いそのデータを得た。前回報告した期間 4500 日の 2 倍である。結果として調査した注入材 3 種類のゲルの体積変化とシリカの溶脱はほぼ終息していることがわかった。この結果、静水養生条件であれば少なくとも 25 年間はゲルの解重合がないことを結論できた。次に、注入固結砂に関する検討をした。その研究課題の一つは、追実験による長期強度予測の検証である。結果は予測の傾向とほぼ一致した。しかし、これまでの注入固結砂強度の経時変化は、静水養生による実験結果である。実際の注入改良地盤では浸透水圧や外力が作用した場合も想定され、静水養生による実験結果は実務面で適用できな

い場合も考えられる。そこで、注入固結砂に浸透水圧を作用させた場合の経時的強度変化に関するデータ⁵⁾の蓄積を行い、その評価をした。浸透水圧は動水勾配 $i=1$ と 10 の浸透水圧を注入固結砂供試体に作用させた。通常の現場では見られない過酷な動水勾配である。結果は、注入材の種類によって浸透水圧の影響で強度の劣化が進行するタイプと影響を受けないタイプがあった。本論文の一連の研究結果は次の手順で報告する。最初にゲル化した注入材(ホモゲル)に関する検討。続いて、注入固結砂の長期強度予測の検証。最後に浸透水圧が作用した注入固結砂の耐久性に関する検討をする。

2. 使用材料の物性と実験方法

(1) 使用材料の物性および供試体作製と養生方法

注入固結砂供試体の作製には豊浦砂を使用した。砂の土粒子密度(ρ_s)は 2.667g/cm^3 である。使用した注入材はゲル化の pH 領域および構造²⁾が異なる 3 種類を使用した。アルカリ領域でゲル化する注入材はグリオキザールを反応材とした有機系注入材、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、シリカ粒子を重合で約 100 倍(直径約 10nm)大きく成長させたシリカ粒子に特徴のあるコロイダルシリカゾル系注入材を用いた。それぞれの注入材の呼び名と物性を表-1 に示す。なお、詳しい砂および注入材の物性については文献3)を参照されたい。注入固結砂供試体の作製は内径 5cm、高さ 10cm の透明アクリル円筒モールドを注入孔の付いた底板上に載せ、円筒内には乾燥密度が 1.50g/cm^3 となるように砂を入れて、その後、排水孔のある上板で密閉した。次に、水を下方から浸透させ砂の間隙を飽和した。その後、水を注入材に切替えて注入材が砂の間隙量の 2 倍排水されるまで圧力浸透を続けた。水は、注入材でほぼ 100%置換されている³⁾。上下板に設置されている排水孔のバルブを閉めこの状態で 2 日間 20°C の室内で養生をした。その後脱型してサランラップで包み供試体を水中養生した。養生温度は 20°C 、 40°C 、 55°C 、 65°C である。室内養生は、 20°C 恒温恒湿室で養生をした。 40°C 、 55°C 、 65°C 養生は温度制御のできる水槽で養生した。なお、注入固結砂供試体作製方法の詳細は文献 1)~4)を参照されたい。

(2) 浸透水圧養生実験装置と実験方法

注入固結砂供試体に浸透水圧を作用させた状態で養生できるように、注入固結砂供試体は図-1 に示すモールドの中央に置き、その周りにはベントナイトを隙間がないように詰めた。隙間が生じないようにベントナイトを詰めるには、多少のテクニックが必要である。その方法を簡単に説明する。水を混ぜたベントナイトの硬さは、市

表-1 注入材の種類の呼び名とその物性

注入材の種類	呼び名	SiO ₂ /体積 (g/cm ³)	ゲルタイム (min)
有機系	A20	0.203	10
	A15	0.152	20
	A06	0.060	120
酸性シリカゾル系	CH	0.114	240
コロイダルシリカゾル系	CSN	0.323	90

図-1 供試体の設置

図-2 浸透水圧養生槽

販の工作用粘土とほぼ同じ状態にする。次に注入固結砂供試体とモールド間の隙間幅とほぼ太さが同じベントナイトのロープを作る。このロープを注入供試体とモールド間にとぐろを巻いて詰める。高さが 3~4cm 程度になったら、ドライバーの柄などを利用してとぐろ状に入れたベントナイトを締め付け、隙間がないようにする。この操作を注入固結砂供試体の上部まで繰り返す。なお、モールド底面と上面には、浸透水が分散して給排水できるように粒径約 2mm の砂利を敷いた。モールドを組み立てた後、図-2 に示す養生水槽に設置した。この水槽は、モールド注水孔と連結して浸透水圧がかけられるように工夫してある。浸透水圧は注入固結砂供試体の下方から作用させた。水圧は動水勾配 i が 1 および 10 となるような 2 通りで行った。それぞれの水圧は 0.98kPa 、 9.8kPa である。動水勾配 $i=10$ は大深度地下⁶⁾では実際に遭遇するが、一般の耐久性を目的とした注入改良地盤では過大と考えられる。それでも耐久性に関する浸透水圧の影響の把握は必要と考え実施した。なお、養生水槽の水温は

70℃まで上昇させることができるので、促進養生も行った。温度は20℃, 40℃, 55℃, 65℃の4通りで行った。以前の促進養生¹⁾では、最大温度70℃を採用していたが、今回は養生水槽が大きいので大量の水が蒸発し、水の補給に要する労働負担が大きいので養生水槽の水温を5℃下げて65℃とした。所定の養生日数に達した供試体はモールドから取外し一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験はJIS A1216:1998に準じて行った。注入固結砂供試体からの浸透水量は測定していない。なお、静水で養生したものを静水養生、浸透水压を加えて養生したものを浸透水压養生と呼ぶ。また、20℃で養生したものを標準養生と呼ぶ。20℃以上の温度で養生したものを促進養生と呼ぶ。呼び名は組み合わせて促進浸透水压養生などと呼ぶ。

(2) ゲル化した注入材(ホモゲル)の経時的体積変化とシリカの溶脱

ゲル化した注入材(ホモゲル)そのものの化学・物理的变化は注入固結砂の強度に影響を及ぼすと考えられる。そこでゲル化した注入材(ホモゲル)の経時的体積変化とシリカの溶脱を調査した。この実験にはメスフラスコによる測定方法を考案した。理由は、ゲル化した注入材(ホモゲル)が体積減少をした場合、ゲルに含まれている水は表面から排水される。そのため最初に表面から収縮し内部はもとのままの状態の場合、ゲルは表面から割れてくる。したがって通常のノギス法や浸水させる浮力方法で体積を測定するのは困難であった。メスフラスコによる方法で既に4500日(12年)まで測定した結果は文献1)で発表した。今回はその後も供試体を保管し約9000日(約25年)の測定を行いその結果について述べる。実験に用いたメスフラスコはガラス製で体積は300mlである。このメスフラスコに注入材を約160ml入れゲル化後メスフラスコ300mlの目盛りまで蒸留水を満たし、20℃恒温恒湿室で養生した。ゲルの体積は次のようにして求めた。

$$V_G = 300 - (m_{GV} - m_G) / \rho_w$$

V_G : ゲルの体積(cm^3)

m_G : ゲル+メスフラスコの質量(g)

m_{GV} : m_G +300ml までの水の質量(g)

ρ_w : 水の密度(g/cm^3)

300mlの目盛りまで入れた蒸留水は所定の日数になった時、取り替えた。取り替えのため取り出した蒸留水からは、溶脱したシリカ量を測定した。シリカ量の測定はモリブデン酸黄法で測定した。ただし4500日測定のみパックテストでシリカ量を測定した。パックテストの最小読み取り値は 2mg/l で水道水に含まれるシリカ量も読み取れる。したがって溶脱シリカ量の判定に大きな障害がないと判断した。今回の約9000日測定は、シリカの溶脱がほとんどないものと推測し、100倍測定精度をあげて 0.02mg/l まで測定できるモリブデン酸青法測定器を使用

写真-1 約9000日養生の有機および酸性シリカゾル系注入材

した。なお、本論文のメスフラスコによる測定法は、ゲル強度が弱く移動できない場合でもゲルの体積変化ができる方法として考案したものである。ただ、この方法はゲルと水の接触面積が変われば溶脱の量も変化するものと考えられる。したがって、同じ実験を実施しても接触面積が異なった場合、経時的シリカ溶脱のグラフは変わるかもしれない。ただし、約9000日の測定で、ゲル化した注入材(ホモゲル)の解重合の兆候は見られない。この状態で溶脱量がほぼ一定になるまで測定している。したがって全溶脱量はほぼ正しいものと推定できる。なお、酸性シリカゾルのゲルは4500日以前に写真-1に示すように2つのブロック状になった。それ以後は形状に変化がなく、9000日経過現在も同じ2つ割れの状態である。なお、写真-1は養生水取り替えのため養生水を排出した時の写真である。参考までに有機系注入材の様子も同写真に示す。

3. ゲル化した注入材(ホモゲル)の経時的体積変化

約9000日養生したゲル化した注入材(ホモゲル)の体積変化を、4500日間調査した文献1)のデータに追加した。それを図-3～5に示す。それぞれの図の最終測点が今回測定した約9000日(正確には9305日～9669日)の測点である。最初に有機系注入材で SiO_2 濃度の大きいA20注入材およびA20注入材に比較して濃度がやや小さいA15注入材の体積変化を考察すると、ともに約40日経過後までに約5～6%の体積変化をして、その後ほぼ一定となる。40日までの変化量は9000日の体積変化の約90%である。今回の測点は4500日経過測点とほぼ同じ値で変化がなかった。有機系注入材とは反対の酸性領域でゲル化するシリカゾル系注入材は、収縮期間が長く1000日までに約

図-3 有機系注入材の体積変化

図-4 酸性シリカゾル系注入材の体積変化

図-5 コロイダルシリカゾル系注入材の体積変化

23%の体積減少をする。この体積変化は9000日の体積変化の95%である。1000日以後4500日間は約5%の体積変化をする。その後9000日間までの体積変化はほぼゼロとなる。酸性シリカゾル系注入材の体積変化は終息したと考えることができる。ただ酸性シリカゾル系注入材の体積変化は有機系注入材に比較して大きい。文献2)によれば有機系注入材のゲルの構造は短鎖状ゲルのからみ合いで、シリカゾル系注入材はガラス状である。体積変化の違いはゲル構造に関連しているものと推測できる。最後に図-5のコロイダルシリカゾル系注入材の体積変化を考察する。この注入材の経時的な体積変化は図-5に示

されるように9000日(25年)経過後もほぼゼロである。コロイダルシリカゾル系注入材のゲル構造は粒状体が蜂の巣状の間隙を持った構造²⁾となっている。粒子に力が作用した場合アーチ作用で簡単に変形できない構造になっているので、体積変化が少ないものと考えられる。なお、体積変化の詳細なメカニズムは文献3)を参照されたい。これらの結果からゲルの安定性を推測する。温度が一定で物理的な変化が無い静水状態でゲルを養生した場合、体積変化が大きい有機系、シリカゾル系注入材でも少なくとも9000日(25年)経過後も安定を保つ。また酸性シリカゾル系注入材のゲルは2つ割れをしたがその後の割れは見られない。今回の実験から3種類の注入材は目視によるゲルの解重合が無い事も明らかになった。ゲルの安定性は今後もさらに継続するものと判断できる。

4. ゲル化した注入材(ホモゲル)からの溶脱シリカ

ゲル化した注入材(ホモゲル)からの長期的なシリカの溶脱の測定は、化学的安定性を判定する一つの手段となる。この安定性を見るためシリカの溶脱を約4500日間経時的に調査し、そのデータを文献1)で報告した。今回は9000日(25年)経過のデータを得た。最初にメスフラスコ養生液に溶脱したシリカ濃度と溶脱率で表した値を表-2に示す。この表に示されるシリカ濃度と溶脱率は次に示す値である。

シリカ濃度 (g/ml) = メスフラスコ養生液 1ml 当りの溶脱シリカ量

シリカ溶脱率(%) = (全溶脱シリカ量) / (メスフラスコに入れた全注入材シリカ量)

測定期間は前回測定した4500日から今回の9000日までの約4500日ある。結果は、表に示すようにシリカ溶脱率は、注入材の種類によらず0.02~0.05%の極微量な溶脱である。溶脱濃度でみると同表に示すように飲料用ミネラルウォーター程度のシリカ濃度である。このシリカの溶解は、ゲルが蒸留水で養生されているため溶媒の溶解力による影響と考えられる。文献1)に示した4500日溶脱率に9000日のデータを加算した累積溶脱率の結果を図-6に示す。同図に示す縦軸はシリカの累積溶脱率である。また、横軸は養生経過日数である。最終測点が、今回の測定した値である。コロイダルシリカ系注入材は、9000日経過後もシリカの溶脱率はほぼゼロである。コロイダルシリカの直径は、他の注入材に比べて大きいので比表面積が小さくなり、水との接触面積も小さくなる。これが溶脱の少ない理由の一つと言える。比表面積と溶脱率の関係について詳しくは文献3)を参照されたい。酸性シリカゾル系注入材の溶脱率は1000日経過で約2%で

表-2 注入材の種類と 4500 日から 9000 日間のシリカ溶脱量

	注入材の種類			
	A20	A15	CH	CSN
SiO ₂ 濃度(mg/l)	110.3	105.7	85.6	75.5
SiO ₂ 溶脱率%	0.044	0.045	0.042	0.018

図-6 SiO₂溶脱率の経時変化

ある。しかし、それ以降は4500日までは、ほとんど溶脱が止まる。本論文はさらに長期の約9000日の測定をした。その結果、シリカの溶脱はほぼゼロであった。ゲル化した注入材(ホモゲル)の安定性は保持されていることがわかった。その理由はシリカゾル溶液の作成は酸性領域で生成されるため未反応シリカはない。またゲル化した注入材(ホモゲル)の解重合も生じていないためと考えられる。有機注入材をみるとシリカ濃度の大きいA20で23%、A20に比べて濃度の小さいA15は20%の溶脱をして、その後の9000日の測定ではほぼ終息しているのがわかる。有機系の未反応シリカは約40%あることは文献1)で調べられている。有機系注入材の溶脱率はこの未反応シリカ40%を超えていない。したがって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。シリカ濃度が極端に小さいA06は、100日前後で小さな粒状態に分解して測定不可能となる。この時点までのシリカ溶脱の経時変化はA15注入材と同じパターンである。溶脱率はやや大きい。今回の9000日測定結果から水ガラスの配合が極端に小さいA06注入材を除いて、実験で用いた3種類のゲル化した注入材(ホモゲル)は、静水養生であれば少なくとも25年間の解重合はないと判断できる。

5. 長期予測強度の検証

著者はこれまで温度促進法による強度の経時変化をアレニウスの外挿法で予測する方法を提案した¹⁾。その手法の理解を得るためアレニウスの外挿法による予測法を簡単に説明する。化学反応の速度式は次の式(1)で示され、

図-7 アレニウスの外挿法による予測法

また反応速度定数 k は式(2)で示される^{7~9)}。

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (1)$$

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\log t = \log\left[-\frac{1}{A} \log\left(\frac{C}{C_0}\right)\right] + \frac{E}{RT} \quad (3)$$

t : 時間, k : 反応速度定数, C_0 : 初期濃度, C : 濃度

E : 活性エネルギー, R : 気体定数, T : 絶対温度

A : 度数因子

式(1), (2)から時間と反応率および温度の関係は式(3)となる。式(3)の第一項の化学反応率が一定値になる時間と温度の関係は、化学反応率を A' で表すと次のようになる。

$$\log t = A' + \frac{E}{RT} \quad (4)$$

A' : 化学反応率

この式からアレニウスの外挿法による強度予測方法を説明する。例えば温度20°C(絶対温度 $T=292.3\text{K}$)で反応率 A' を30%にするための必要な時間 t は1時間であったとする。この値は、反応率と時間の関係を示す図-7にプロットするとA点となる。温度を50°C($T=323\text{K}$)にした場合、同じ反応率30%に必要な時間 t は式(4)から小さくなり $\log(t)$ 軸上を移動した同図B点のようになる。ただし活性エネルギー E と気体定数 R は変わらないものとする。A点およびB点から同図に示す t_1 時間まで20°C, 50°Cそれぞれの温度で、時間と反応率の関係を測定してプロットすれば実線および点線のようにになる。次に点線で示す測線のB点をA点まで移動し重ね合わせをすれば、重ねあわせの点線部分が20°C, t_1 時間以降の予測反応率となる。また、式(1)は化学反応に比例するものであれば体積、表面積、重量、強度変化も適用できる^{7~9)}。当研究室では注入固結砂の強度は化学変化の影響がある¹⁾と考え強度の経時変化で整理した。この方法で6,000日(16年)~

20,000日(54年)までの予測を行いその結果は2000年に報告した¹⁾。本論文は長期強度の予測値が正しいかを評価するため、促進養生および20℃標準養生による測点を追加し検証した。2000年に発表した論文1)の各日数における全データの標準偏差の平均値は64.6kPaであった。今回得た全データの標準偏差の平均値は73.7kPaであった。やや精度は低くなった。ただ、現在の注入改良地盤の設計強度は、N値に対応する統計的な図を参照して決められる場合が一般的である¹⁰⁾。さらに安全率を考慮して設計される。レベルの高い設計方法はまだ少ない。したがって上述の標準偏差でも各種注入固結砂の長期強度の動向を広義に見て、そのトレンドを把握する必要もあると考えデータの整理を進めた。次に、実際の現場では浸透水圧や外力を考慮しなければならない場合がある。そこで本論文では、浸透水圧を作用させた場合の強度の経時変化も調査した。最初に静水養生の強度の経時変化の検証について検討する。

(1) 有機系注入材

提案した強度の予測値が適切であるかどうかを調べるため、新たに供試体を作製し検証した。特に長期強度の予測値に注目した。養生温度は20℃、40℃、55℃、65℃の4種類で行った。今回得られたデータ(赤の*印)を文献1)のグラフに挿入して図-8(a)~(d)に示す。同図の●印およびアレニウスの外挿法を示す実線は文献1)で求められたものである。この実線が予測強度を示す。なお、同図(e)はすべてのデータの養生時間を20℃に換算してプロットした図である、また同図(a)~(d)には浸透水圧養生による強度の経時変化を▲、□印で示してある。この強度についての考察は6章で検討する。最初に図-8(a)に示す20℃養生結果を見てみる。20℃養生は実験担当者が変わった場合、注入固結砂供試体の作製方法や注入材に変化があるかどうかを確認するための目的もある。結果は同図(a)に示すように前回のデータと比較し200日付近でやや強度は小さい傾向を示す。実験担当者の特有の実験テクニックに依存していることも考えられるが、その

明確な理由は判然としない。強度の予測線は今回実施した40℃、55℃、65℃の促進養生強度によってもその信頼性を確かめてみた。この強度の予測線は図-8(b)(c)(d)に黒の実線で挿入されている。この実線はそれぞれの温度促進倍率に合わせて挿入してある。促進倍率は、アレニウスの外挿法と6章で後述する同形アレニウスプロットから求めた。その結果を表-3に示す。挿入方法は、例えば図-8(a)の標準養生強度の予測線は30日から始まっている。40℃の促進倍率は10倍なので30日/10で3日からスタートするように設定する。図-8(b)~(d)に示すように今回の実験で得た赤*印の測点は、予測線にほぼ沿った強度変化をしていると考える。次に同図(a)~(d)に示した全データに促進倍率を乗じて20℃に換算して整理したものを図-8(e)に示す。同図に示す青の△印は40℃、緑の□印は55℃、赤の◇印は65℃の促進試験結果である。

なお、黒の○印は20℃標準養生結果である。これらの測点はかなりのバラツキがあるが広義に解釈すれば文献1)の予測実線にそってプロットされている。この結果10,000日(約27年)後には、初期強度の1/4まで強度低下するが約500kN/m²の強度は保持していることを予測できる。実験で用いた注入固結砂供試体を観察すると、20℃最長養生日数1,000日、促進養生で10,000日にプロ

表-3 各注入材の温度と促進倍率

温度 (℃)	促進倍率 (倍)		
	A20	CH	CSN
20	1	1	1
40	10	3	10
55	30	5	30
65	36*	18*	40*

*は同形アレニウスプロットから換算

(a) A20 20℃標準養生

図-8 有機系注入材の強度の経時変化

(b) A20 40°C促進養生

(c) A20 55°C促進養生

(d) A20 65°C促進養生

(e) A20 促進養生を20°C養生に変換

図-8 有機系注入材の強度の経時変化 (つづき)

(a) CH 20°C標準養生

(b) CH 40°C促進養生

(c) CH 55°C促進養生

(d) CH 65°C促進養生

図-9 酸性シリカゾル系注入材の強度の経時変化

(e) CH 促進養生を20°C養生に変換

図-9 酸性シリカゾル系注入材の強度の経時変化(つづき)

(a) CSN 20°C標準養生

(b) CSN 40°C促進養生

(c) CSN 55°C促進養生

図-10 酸性シリカゾル系注入材の強度の経時変化

(d) CSN 65°C促進養生

(e) CSN 促進養生を 20°C養生に換算

図-10 酸性シリカゾル系注入材の強度の経時変化 (つづき)

ットされる注入固結砂供試体は、構成するゲル化した注入材(ホモゲル)に解重合の兆候は見られない。前述の3, 4章で述べたゲル化した注入材(ホモゲル)の体積変化およびシリカの溶脱は、養生40日前後までは5~6%の体積変化をする。この体積変化は、注入固結砂強度にどの程度の影響を与えるかをグリフス理論をベースに求めると、約10%の強度減少を生じることが推測された。これは既に文献3)で報告してある。今回の約9000日経過の体積変化やシリカの溶脱は4500日以降ほぼゼロである。これより前回の調査4500日から体積変化やシリカの溶脱による劣化の進行はほとんどないものと推定できる。これらの観点から本実験で使用した有機系注入材は静水の環境下で使用した場合は、約500kN/m²程度の強度を25年以上は保持できることが推定される。なお、注入材のゲル化はシロキサン結合によるものであるが、このシロキサン結合はヤング率(弾性係数)に影響を与えることもすでに文献3)で述べている。今回の実験結果を弾性係数で整理することを試みたが、パソコンのソフトの変遷などで応力-ひずみ曲線グラフのデータを見いだせず弾性

係数を求めることはできなかった。

(2) 酸性シリカゾル系注入材

酸性シリカゾル系注入固結砂の強度の経時変化は、ピークを持つ特徴がある。この特性は前述の有機系と同様にグリフス理論をベースに準理論的に検討してある。ピーク強度はヤング率に強く影響されていることなどが検討されている。詳しくは文献3)を参照されたい。このような特徴を持つ注入材の強度の経時変化を予測する手法も提案した。本論文は、データをさらに蓄積してその手法の評価をした。評価は前述の有機系と同様な方法で行なった。図-9(a)(b)(c)(d)は養生温度20, 40, 55, 65°Cの実験結果である。図中の記号は有機系を示した図-8と同じである。赤の*印は今回のデータで、●印は文献1)に示した測点である。実線は予測値である。また、同図、浸透水圧養生による強度の経時変化を示す緑の▲、青の□印の考察は、6章で検討する。図-9(a)~(d)に示す*印を検討すると、ピーク強度付近ではやや下方にプロットされる。しかしピーク強度から経過時間が長くなるに従

いデータは予測線に沿ってプロットされている。そこで全データの養生時間を 20°C に換算して検討してみた。その結果をプロットしたのが図-9(e)である。図に示す青の△は 40°C 、緑の□は 55°C 、赤の◇は 65°C の促進試験結果である。今回得られたデータはピーク強度付近で予測線に対して下方にプロットされるものが多い。しかしピーク強度以降の強度の経時変化は(ほぼ文献1)で予測した実線に沿って変化をしている。この結果、5,000 日(約13年)後には、最大強度の1/2まで低下するが 400kN/m^2 の強度は保持していることが予測できた。有機系注入材と同様に目視では、養生された注入固結砂供試体を構成するゲル化した注入材(ホモゲル)に解重合は見られない。酸性シリカゾル系注入材の体積変化とシリカの溶脱が、強度の経時変化にどのような影響を与えるかは、既に検討して報告してある³⁾。これによれば図-3に示した1000日前後で約23%の体積減少は、準理論的な検討で、約45%の強度低下になる。しかし1000日経過後の注入固結砂強度は1日養生強度に比較して逆に約1.5倍大きくなっている。この結果、体積変化は強度の経時変化に大きく影響しないことが結論された。1000日経過後から9000日までの体積変化はほぼ一定となる。また図-6に示すようにシリカの溶脱もほとんど無い。これらの結果からも本実験で使用した酸性シリカゾル系注入材は、静水の環境下で使用した場合、約 400kN/m^2 程度の強度を13年以上は保持できることが検討できる。なお、ヤング率(弾性係数)の経時変化は今回整理していない。

(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、他の注入材と異なりゲル化した注入材(ホモゲル)の体積変化は、ほぼゼロである。また、注入固結砂強度は、経時的に強度増加をする特徴がある。この予測法も文献1)で既に報告してある。本論文は、前述と同様にこの予測法の評価をした。今回の測定データを図-10(a)~(e)に示す。同図(a)~(d)は養生温度20, 40, 55, 65°C の順番で示してある。図中の記号は有機系と同様で●印は文献1)のデータ、*印は今回得られたデータである。予測線の挿入方法は前述の有機系注入材と同じである。また、同図(a)~(d)に示す▲, □印の考察は6章で検討する。図-10(a)~(d)に示す*印のデータを見ると、予測線のやや下方にプロットされる。図-10(e)は促進倍率を用いて 20°C 標準養生に換算した全測点をプロットした結果である。同図に示す記号は前述の有機系および酸性シリカゾル系と同じである。この図の測点を考察すると、本論文で示した測点は、文献1)で予測した黒の実線よりやや下方にプロットされる。その理由は、実験担当者の技術的個性の影響とも考えられるが、有機系と同様に判然としない。今回のデータから長期強度を予測すると10,000日(約27年)まで他の注入材と

は異なり、強度増加をしてその強度は約 1500kN/m^2 となる。初期強度の約5倍である。結果として、本実験で使用したコロイダルシリカゾル系注入材を静水環境で養生した場合は、経時的に強度増加をして10,000日経過で 1500kN/m^2 程度の強度となる。さらに強度増加は継続すると予測できる。長期耐久性注入材としての使用は可能であることが示唆される。

6. 浸透水圧養生による強度の経時変化

水ガラス系薬液注入による地盤改良の基本的な目的は、地盤の補強と止水である。補強に関連した論文は多数発表され成果を上げている¹¹⁾。室内実験での養生条件は室内養生か静水養生で実施されている。しかし実際の現場では浸透水圧が作用した場合も想定される。この浸透水圧が作用した場合の研究は少ないが、文献12)では懸濁系グラウトでの成果を発表している。また文献13)では、浸透水に見立てた流水中に注入固結砂供試体を置き注入固結砂供試体からシリカが溶脱して強度減少することを見だし研究を進めている。しかし実際に浸透水圧を長期的に作用させた実験例はほとんどなく成果も見られない。その理由の一つは実験の難しさがある。例えば注入固結砂供試体の止水実験は 10^{-8}cm/s 程度の透水係数下での測定が必要である。このため注入固結砂供試体と透水用モールド間の止水(密着)が不完全な場合、または経時的な注入固結砂供試体の微小な体積減少などの影響で密着が不完全になった場合、注入固結砂供試体を通過した浸透水なのか横漏れ水なのかの区別ができない。なお、接触面のパイピングは均一浸透水のパイピングに比べて2倍発生しやすいことを文献14)では、指摘している。このため、経時的な浸透水量の測定は非常に困難である。この理由から本研究は浸透水量からの透水係数の経時変化を調査するのは困難と考えた。そこで、本実験では浸透水量を測定しないが連続的に注入固結砂供試体に浸透水圧を加え所定の時間が来たとき注入固結砂供試体の強度を測定した。これによって浸透水圧が作用した場合の影響の一面は検討することができると考えた。ただし、実験中浸透水の量が急に变化したときは注入固結砂供試体側方からの漏れと考え、モールドの上板を外して注入固結砂供試体周りのベントナイトが密着するように上から押さえつける操作をした。なお、実験は特殊な装置を作製して温度促進浸透水圧養生も実施した。温度促進による養生中の注入固結砂供試体の含水比は2~3%の変化で大きな変化はなかった。その代表測定例を図-11に示す。この図に示されるように静水養生と浸透水圧養生の含水比はほぼ同じである。温度促進養生による乾燥の影響はないと判断できる。なお、本実験は浸透水の採取

図-11 CSN 浸透水圧促進養生注入固結砂供試体の含水比

をしていないので浸透水圧によるゲルの化学的解重合の分析は実施できなかった。

(1) 有機系注入材

前述の図-8(a)～(d)に浸透水圧を作用させた試験結果を追加してある。緑の▲印は動水勾配 $i=1$ 、青の□印は動水勾配 $i=10$ の浸透水圧を作用させた結果である。図に示されるように浸透水圧を作用させた注入固結砂供試体の強度は、静水養生注入固結砂供試体に比較して養生日数が同じであれば小さいことが示されている。図中の緑の点線および青の一点鎖線はそれぞれの測点を最小二乗法で整理し挿入した線である。経過日数とともに強度は減少する関係にある。これらの図から浸透水圧養生による注入固結砂強度は、標準養生に比べて小さくなることがわかる。これは浸透水圧の影響によるものと推測できる。この浸透水圧による影響を強度劣化速度の観点に立って検討するため、同形アレニウスプロットで整理してみた。前述のアレニウスの式(2)を $\log$ で表すと次のように示される。

$$\log k = \log C - \frac{E}{RT} \quad (5)$$

k : 反応速度定数, C : 定数, E : 活性エネルギー

R : 気体定数, T : 絶対温度

反応速度定数 k は、前述したように体積、重量、面積、強度など化学反応速度に比例するものであれば代用できる^{7)~9)}。本論文は、強度変化が代用できると考えて同形アレニウスプロットで整理してみた。この方法は強度の変化速度を対数表示の縦軸にとり養生温度は絶対温度に変換してその逆数($1/T$)を横軸にプロットしたものである。一般的に同形アレニウスプロットは予測法に利用される。例えば 55°C, 65°C, 75°C の促進養生で $q_u/2$ になる時間と強度の変化速度を求め対数の縦軸に強度の変化速度、横軸には絶対温度の逆数を取りそれぞれの測点をプロットする。これらの測点を直線で結びその延長線上の 20°C 標準養生での強度変化速度を読み取り、この速度から $q_u/2$ になる時間を予測することができる。このように一般に

は、ある強度の劣化または増加するまでの時間の予測に使用される。本研究は静水養生と浸透水圧養生との養生条件の違いで劣化(強度変化)速度が異なるかどうかを見るため同形アレニウスプロットを利用した。強度の変化速度は次のように求めた。

$$\text{強度の変化速度(kPa/day)} = (q_u/2)/t_{0.5}$$

q_u : 初期強度

$t_{0.5}$: $q_u/2$ になるまでの日数

この方法で静水養生および浸透水圧を作用させた養生温度 20°C, 40°C, 55°C, 65°C の強度の変化速度を求め、その結果を図-12 に示す。青の■印は文献 1) で示した 20, 40, 55, 70°C 静水養生で $q_u/2$ になった場合の測点である。図中の点線と一点鎖線は養生温度に対応する動水勾配 $i=1, 10$ を作用させて $q_u/2$ になった時の変化速度をプロットした測点を最小二乗法で整理した線である。それぞれの相関係数 R は表-4 に示す。図-12 に示されるように動水勾配が作用すると強度の変化速度が大きくなる。したがって初期一軸圧縮強度 q_u が $q_u/2$ に劣化するまでの時間は動水勾配の大きさに反比例する。この結果、動水勾配が大きくなると劣化の速度も速くなることが示唆される。これらの結果から有機系注入材の強度の劣化は、浸透水圧に影響されるものと推測できる。図-12 から動水勾配 $i=1, 10$ が作用した場合 $q_u/2$ に減少するまでの時間は、20°C 標準養生の比較で、それぞれ約 10 倍、約 50 倍速くなると予測される。

(2) 酸性シリカゾル系注入材

前述の図-9(a)～(d)には酸性シリカゾル系注入固結砂供試体に動水勾配 $i=1$ および 10 の浸透水圧養生した場合の強度の経時変化をプロットしてある。図中の記号は上述の(1)と同じである。図に示されるように浸透水圧を作用させた注入固結砂供試体の強度は、静水養生注入固結砂供試体に比較して養生日数が同じであれば有機系注入材と同じように小さくなることが示されている。これから浸透水圧は強度の劣化に影響を及ぼすものと考えられる。図中の緑の点線および青の一点鎖線はそれぞれの測点を最小二乗法で整理して挿入したものである。次に有機系注入材と同様に浸透水圧による影響を見るため同形アレニウスプロットで整理してみた。図-13 の縦軸は $q_u/2$ になるまでの強度の変化速度である。横軸は絶対温度の逆数($1/T$)である。青の■印は文献 1) で示した 20, 40, 55, 70°C 静水養生の $q_u/2$ になった時の強度の変化速度求めてその値をプロットした測点である。また図中の点線と一点鎖線は、動水勾配 $i=1, 10$ の浸透水圧を作用させ $q_u/2$ になった強度の変化速度を図-9(a)～(d)より求め、その測点をプロットして最小二乗法で整理したものである。図に示されるように動水勾配が作用すると強度の変化速度が大きくなる。20°C 標準養生と比較した場合、動水勾配

表-4 アレニウスプロットの相関係数R

R	動水勾配	A20	CH	CSN
	i=0	0.971	0.953	0.983
	i=1	0.856	0.934	0.983
	i=10	0.83	0.618	0.983

図-12 A20 同形アレニウスで整理した強度の変化速度

図-13 CH 同形アレニウスで整理した強度の変化速度

図-14 CSN 20°Cに換算した温度促進浸透水圧試験

$i=1, 10$ が作用した時, それぞれ $q_u/2$ に減少するまでの時間は, 平均で約 40 倍, 66 倍速くなる. この結果, 浸透水圧はシリカゾル系注入材の強度の劣化に影響するものと推測できる.

(3) コロイダルシリカ系注入材

前述の図-10 (a)~(d)はコロイダルシリカゾル系注入材を用いた試験結果である. 本論文は, この図に浸透水圧を作用させた試験結果をプロットした. 図中の記号は前述の(1)と同じである. 養生温度 20°C, 40°C, 55°C, 65°C のそれぞれの図を見ると予測線のやや下方に示されるが, 静水養生とほぼ同じく時間の経過とともに強度が増加する. 有機系注入材や酸性シリカゾル系注入材と異なり浸透水圧を受けても強度の劣化は見られない. 異なった温度による促進浸透水圧養生強度を連続的に見るため, 20°Cに換算して 20°C標準養生強度の予測図に全点をプロットしてみた. 促進倍率は前述の表-3 に示す通りである. 結果は, 図-14 に示す. なお, 静水での促養生 40°C, 55°C, 65°Cの測点は, 図が煩雑になるためプロットしていない. 図中の▲, ▲, ▲, ▲印は動水勾配 $i=1$ の浸透水圧が作用した 20, 40, 55, 65°Cの結果である. 動水勾配 $i=10$ を作用させた浸透水圧養生試験結果は四角印で示す. 温度の違いは色分けをして■, ■, ■, ■印で示し, それぞれ 20, 40, 55, 65°Cの結果である. 結果としてコロイダルシリカゾル系注入材は動水勾配 $i=1, 10$ の浸透水圧が作用すると予測値のやや下方にプロットされる. ただ, 経時的強度の増加は見られる. この図からコロイダルシリカゾル系注入材は, 他の注入材と異なり浸透水圧が作用しても経時的強度の劣化がない. この結果から判断すると浸透水圧が作用した実際の現場でも長期耐久性が期待できる注入材と考えられる. なお, 参考ま

図-15 CSN 同形アレニウスで整理した強度の変化速度

で有機系や酸性シリカゾル系と同様に、同型アレニウスのプロットで $2q_u$ になった強度の変化速度の測点を最小二乗法で整理した線を図-15 に示す。この図は、静水養生による実験結果である。コロイダルシリカゾル系注入材は、浸透水圧の有無に関係なくほぼ同じ強度増加を示す。したがって、浸透水圧が作用した場合の同形アレニウスのプロットもほぼ同じになる。

7. 結論

- 1) メスフラスコを使用した方法で約 9000 日経過のゲル化した注入材(ホモゲル)そのものの体積変化を測定した。有機系注入材は約 40 日経過後までに約 5~6% の体積変化をしてその後ほぼ一定となる。酸性シリカゾル系注入材は、体積収縮期間が長く 1000 日で約 23% の体積減少をする。2000 日の体積減少の 95% である。その後の体積変化はほぼ一定に値を示す。コロイダルシリカゾル系注入材の体積変化はほとんどゼロである。
- 2) 体積変化の違いはゲル構造の違いによるものと推測される。9000 日経過で 3 種類のゲル化した注入材(ホモゲル)の体積変化は終息した。また 3 種類の注入材は目視によるゲルの解重合が見られない。ゲルの安定は今後もさらに継続するものと判断できる。
- 3) 約 9000 日経過の SiO_2 の溶脱率を測定した。有機系注入材は 1000 日経過付近までの SiO_2 溶脱は約 23% であった。その後は極微量な溶脱でほぼ終息する。溶脱率は未反応シリカの 40% を超えていないことより解重合によるシリカの溶脱はないものと判断できる。酸性シリカゾル系注入材は約 2% の溶脱率で少ない。コロイダルシリカ系注入材は 9000 日経過後もシリカの溶脱率はほぼゼロである。目視による 3 種類のゲル化した注入材(ホモゲル)の解重合は見られない。今後も安定は続くものと推測される。
- 4) 本論文の各日数における全データの標準偏差の平均

値は前回の報告¹⁾より悪かったが、各種注入固結砂の長期強度の動向を広義に見てそのトレンドを知る必要もあると考えデータの整理を進めた。その結果、1000 日を越える長期強度は、3 種類の注入材とも 2000 年に発表した論文集の予測値のトレンドにほぼ一致した。

- 5) 有機系注入材注入固結砂は経時的に減少をして初期強度の約 1/4、酸性シリカゾル系はピーク強度を付けたあと 1/2 まで強度減少をするが、その後は安定を保つ。コロイダルシリカゾル系注入材固結砂は初期強度の 4 倍強度増加をする。養生条件が静水養生であれば 3 種類の注入固結砂は、本研究での最終測定強度をさらに長期間保持できるものと推測できる。
- 6) 本実験では、連続的に注入固結砂供試体に浸透水圧を加え所定の時間が来たとき注入固結砂供試体の強度を測定した。これによって浸透水圧が作用した場合の影響の一部は把握できると考えて同形アレニウス法でデータを整理した。その結果、有機系および酸性シリカゾル系注入固結砂は、静水養生に比べて強度劣化が早くなった。これより浸透水圧は強度の劣化に影響を及ぼすことが推定できた。これに対しコロイダルシリカゾル系注入材は、動水勾配 $i=1$, 10 の浸透水圧が作用しても静水養生の経時変化と同様に強度増加をした。耐久性注入材としての使用が期待できる。

参考文献

- 1) 加賀彦彦：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，土木学会論文集，No.652/III-51，pp.195-205，2000.6
- 2) 加賀彦彦：注入固結砂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
- 3) 加賀彦彦，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.31-40，1994.8
- 4) 加賀彦彦，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
- 5) 加賀彦彦，菊池康裕，大坪紘一：浸透水圧が作用する水ガラス系薬液注入固結砂の強度の耐久性，材料学会，第 5 回地盤改良シンポジウム論文集，pp.73-76，2002.11
- 6) 高レベル放射性廃棄物処分関連・地下坑道施工技術高度化開発報告書，独立行政法人日本原子力研究開発機構，2010.3
- 7) 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
- 8) 早川淳：高分子材料の寿命評価・予測法，アイピーシー，pp.183-198，1994
- 9) 慶伊富長：反応速度論 第 2 版，pp.3-11，東京化学同人，1990.
- 10) 地盤工学会：薬液注入工法の理論・設計・施工，地盤工学会，2009.6
- 11) 米倉亮三，島田俊介，木下吉：恒久グラウト注入工法，

山海堂, 2000.8

- 12) 秋田勝次, 井浦智実, 朝倉俊弘: 海底トンネルで施工されたセメント水ガラス注入材の長期材料特性と性能評価, 土木学会論文集, F1 (トンネル工学), Vol.67, No.2, pp.95-107, 2011.
- 13) 平間陽, 赤木寛一, 澤田亮: 薬液で改良した砂地盤の経時変化特性について, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2010.9
- 14) 長瀬迪夫: 浸透破壊に関する考え方と破壊発生条件(その 2), 応用地質年報, No.15, pp.1-29, 1993.
- (2012. 10. 30 受付)

DURABILITY OF THE STRENGTH OF SILICATE GROUTED SAND AND EFFECT OF SEEPAGE WATER PRESSURE

Munehiko KAGA

Until now, we have examined the prediction methods of the long term strength of silicate grouted sand. However, these methods are predictions under hydrostatic curing condition. It may not be able to apply the prediction method, when seepage water pressure worked. Then, we carried out the experiments in which the seepage water pressures worked. As a result, the seepage water pressure weakened the strength of grouted sand. Next, We measured the volume change and SiO_2 leaching of pure grout for 9000 days. Consequently, these stopped almost in the progress of time.