

4. 高圧注入時の浸透性能確認試験方法の検討

4.1 検討の目的

放射性廃棄物地層処分において使用されるグラウト材料は、大深度の高水圧下において、注入時に地下水により希釈されることがなく、さらに注入後も地下水圧により流亡することなく亀裂内部において安定していることが求められる。このため、人工材料、天然材料ともに、懸濁型材料を使用する場合は、水粉体比の低い高濃度の高粘性材料とすることが考えられる。さらに、グラウト材に添加する分散剤により放射性核種の溶解度が上昇することが報告されており¹⁾、その核種移行に与える影響が懸念されるため、処分坑道周辺における分散剤の使用に対しては、慎重な態度が取られている²⁾。上記より考慮すると、処分における懸濁型グラウト材料は、連絡坑道、処分坑道周辺ともに高粘性材料になる可能性が高い（図 4.1-1参照）。

一方、放射性廃棄物地層処分においては、通常のダムやトンネルにおけるグラウトに比べて、より高い止水性能が望まれているため、 $100\mu\text{m}$ 程度あるいはそれ以下の微小な亀裂まで浸透する材料が望まれるが、このような亀裂への浸透については、亀裂入口あるいは亀裂開口幅の減少部においてフィルターケーキが生成され目詰まりが生じやすい（図 4.1-2参照）。このため、放射性廃棄物地層処分において使用するグラウト材料の選定においては、亀裂入口あるいは亀裂開口幅の減少部における目詰まり特性を把握することが大変重要となる。

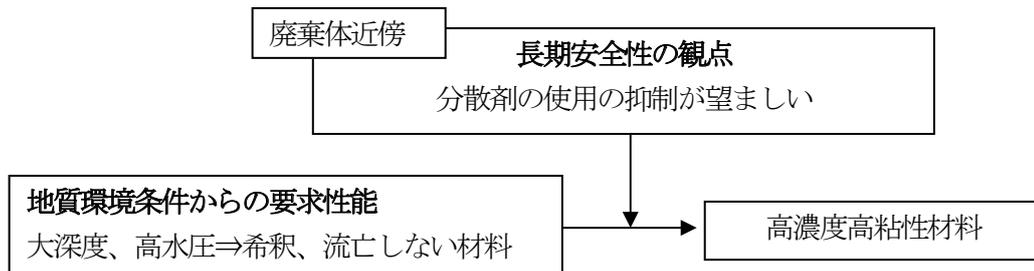


図 4.1-1 放射性廃棄物地層処分における懸濁型グラウト材料の方向性

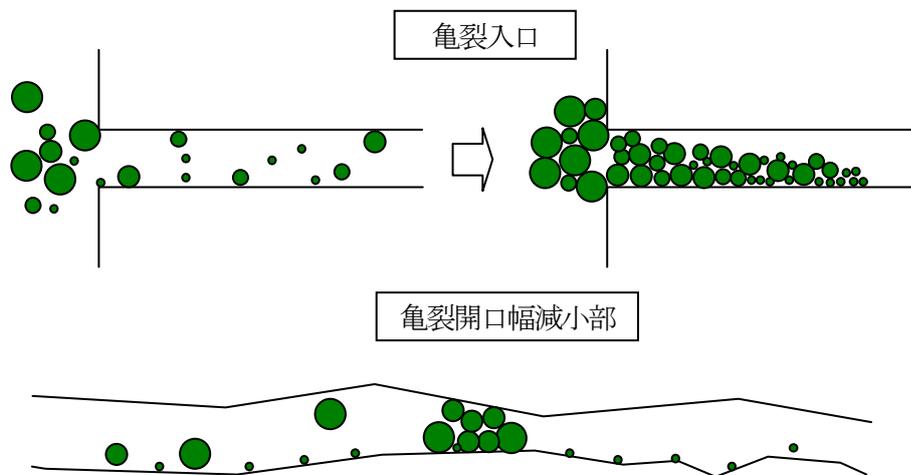


図 4.1-2 目詰まりのイメージ図

一方、西垣らの研究³⁾により、セメント系グラウト材料の目詰まり特性は主に以下の2種類の特性に大きく影響されることが明らかにされている。

- ・ 攪拌後のセメント材料の粒径分布（セメントの粒径分布、分散剤の使用）
- ・ グラウト材料の粘度（水セメント比）

図 4.1-3は、粒径の小さい超微粒子セメントに分散剤を混和した場合が最も亀裂への浸透性が良く、さらに水セメント比を高めた方がより微小な亀裂へ浸透することを示している。

他方、Hjertströmの実験⁴⁾においては、目詰まりに対する注入圧力の影響が確認されており、注入圧力が0.5MPaの場合にはフィルターケーキが発達したが、注入圧力を2MPaまで高めた場合にはフィルターケーキが発達せず、より多量のグラウト材がスリット試験装置を透過している。この実験結果は、注入圧力を高めることにより、グラウト材料の目詰まり現象を抑制する可能性があることを示唆している。

しかしながら、既存の目詰まり試験は0.1~0.2MPa程度の低圧状態において実施されており、上記の可能性を定量的に評価するための十分な研究結果は現状においては得られていない。そこで、最大10MPa程度まで注入可能となる試験装置を開発し、亀裂入口における目詰まり現象と注入圧力の関係を把握し、高粘性であっても粒径分布が十分に小さい場合は、100 μ m以下の微小な亀裂に対しても注入可能であるかどうかを確認する必要がある。

そこで、本章においては、まず既往の目詰まり試験方法に関する調査を実施する。特に、海外の放射性廃棄物地層処分研究において使用されている試験方法についてその詳細を整理する。次に、これらの知見を参考に、最大10MPa程度まで加圧可能となる試験装置を考案する。最後に、試験装置の機能を確認するために、予備試験を実施し、予備試験の結果、試験装置が所定の機能を有することが確認された場合は、試験方法を確立し、次年度以降に目詰まり現象と注入圧力に関する本実験を実施し、さらにグラウト材料選定における標準実験装置として使用することが考えられる(図 4.1-5参照)。

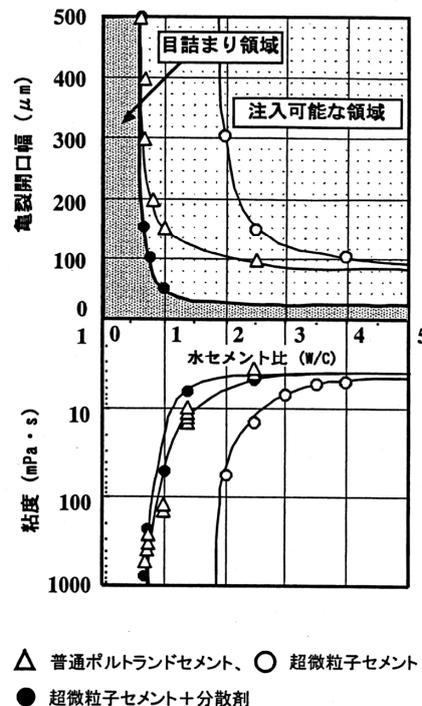
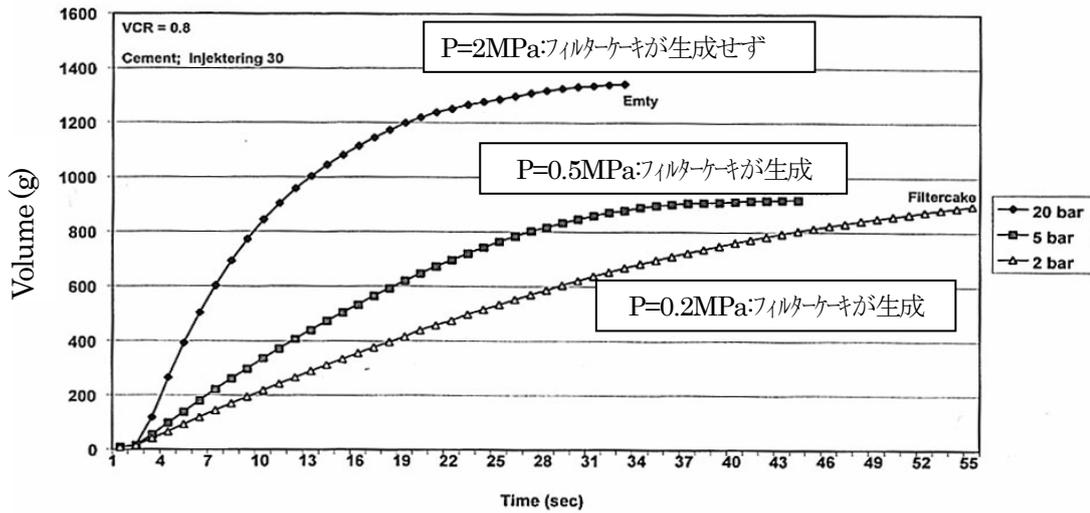


図 4.1-3 注入可能となる限界の亀裂開口幅と水セメント比の関係³⁾



- 使用セメント材料: Injektering30 (最大粒径 30 μ m)
- スリット開口幅: 100 μ

図 4.1-4 NES 試験における注入圧力の影響
(参考文献 4) に加筆)

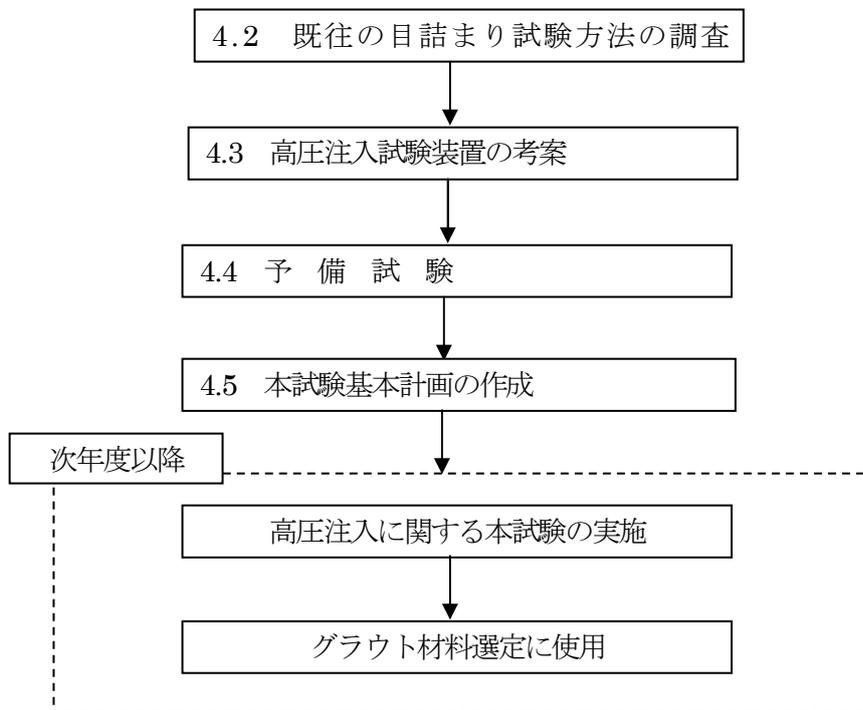


図 4.1-5 検討フロー

4.2 既往の試験方法

目詰まり特性の把握に対して、主に以下の試験方法が実施されてきた。特に、現在 Posiva において実施されている低 pH セメントグラウト研究においては、浸透性能の確認試験機としてフィルターポンプが使用されている⁵⁾。

- ・ フィルターポンプ試験
- ・ NES 試験
- ・ サンドコラム
- ・ 平行平板試験

以下に、上記の試験方法についてその概要を記述する。

4.2.1 フィルターポンプ試験

フィルターポンプ試験には、室内試験用のペネトラビリティメーターと、主に現場における適用を目指した簡易フィルターポンプの2種類がある。ペネトラビリティメーターは以下の2種類のパラメーターを算定することにより、グラウト材料の浸透特性を評価するものである。

- ・ b_{\min} : グラウト材が全く浸透しない最小の亀裂開口幅
- ・ b_{critical} : グラウト材がすべて浸透する最小の亀裂開口幅

(1) ペネトラビリティメーター

本試験装置は、タンク下部の蛇口に取り付けた鋼製フィルターメッシュ（メッシュ幅：35、43、54、61、77、90、104、122、144 μm 、図 4.2-1 参照）を通過するグラウト量を測定することで、 b_{\min} と b_{critical} を測定する装置である。

具体的な測定は、タンク内（図 4.2-2 参照）にグラウト材を投入し、次にタンク内に圧縮空気を送ってタンク内の圧力を 0.1MPa に設定する（通常 0.1~0.2MPa 程度の低圧状態で実施）。タンク下部の蛇口にフィルターをセットし、コックを空けて 10 秒間に通過するグラウト材の容積を測定する。この作業をフィルターを換えて繰り返す。測定結果より図 4.2-3 に示すようにフィルターサイズ（亀裂開口幅）と通過グラウト材量（浸透流量）の関係図を描く。次に同図において、浸透流量が 10mL、1000mL となる亀裂開口幅をそれぞれ b_{\min} と b_{critical} と設定している。

b_{critical} 以下のフィルターサイズの場合には、図 4.2-4 に示すようなフィルターケーキ（濾し取られたグラウト材料の堆積物）が発生する。



図 4.2-1 鋼製フィルターメッシュ



図 4.2-2 ペネトラビリティメーター

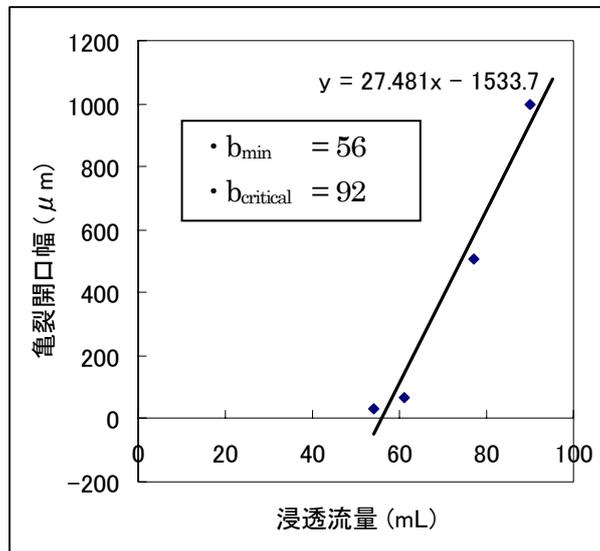


図 4.2-3 b_{min} と $b_{critical}$ の算定方法



図 4.2-4 フィルターケーキ

(2) 簡易フィルターポンプ

スウェーデンの Vattenfall 社により開発されたグラウト材の浸透性能を測定する簡易試験装置である。主に施工現場で混練りされたグラウト材の浸透性能の判定に用いられている。測定は筒先に鋼製フィルターメッシュを設置し、ポンプを手動で5秒間引いて、その時にポンプ内に流入する材料の体積を測定する。(図 4.2-6参照)。メッシュ幅は、125、100、75、45 μm が用いられている。

なお、本装置はその機構が簡便であり試験がスピーディーに行えることが長所であるが、手動で行うゆえに試験結果にバラツキが大きく、あくまで簡易試験装置である。

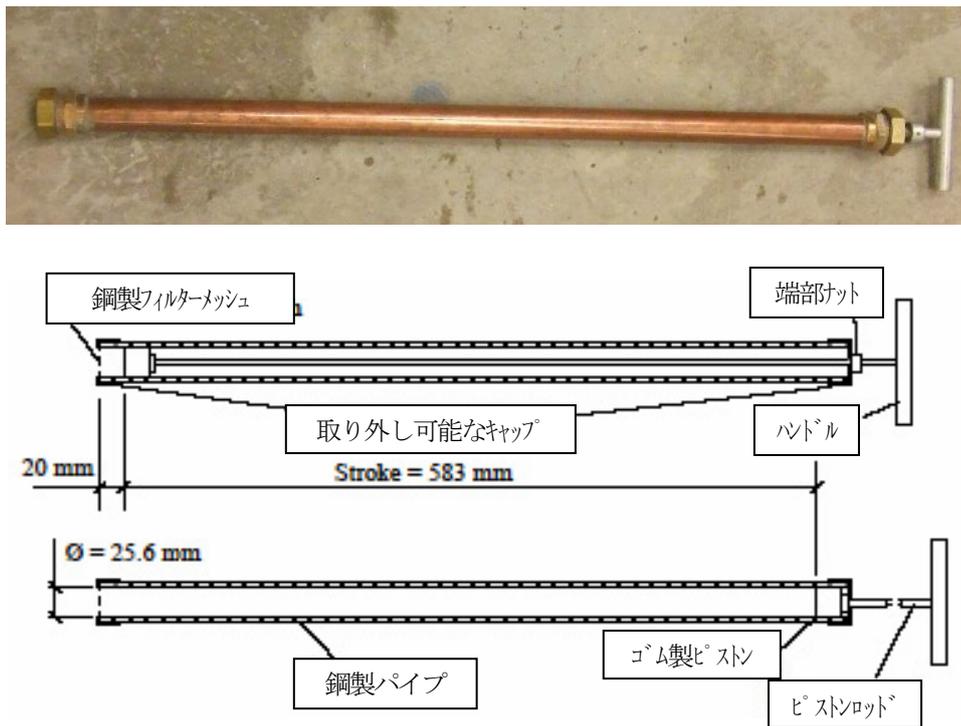


図 4.2-5 フィルターポンプ



図 4.2-6 簡易フィルターポンプによる試験状況

4.2.2 NES 試験

ペネトラビリティメーターと同様に、圧力容器内にグラウト材を入れ、容器内を空気で一定加圧 (0.1～0.2MPa 程度) した際に流出するグラウト材の容積を測定し、浸透性能を評価するものである。室内試験用フィルターポンプとの相違はグラウト材の流出口の形状にあり、前者はワイヤーメッシュであるのに対し、後者はスリットを切削した鋼製円盤を2枚重ねてつくられており、岩盤亀裂を鋼製スリットによりモデル化している (図 4.2-7)。

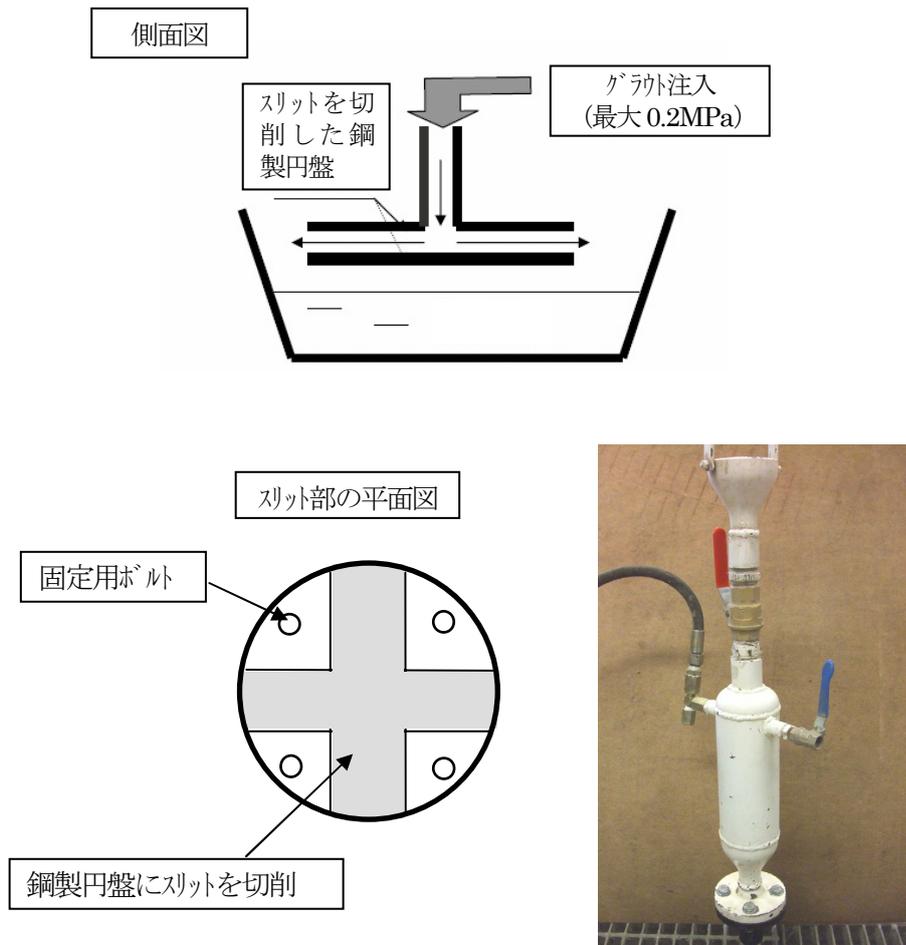


図 4.2-7 NES 試験 (浸透性試験) のイメージ図

4.2.3 サンドコラム

定圧加圧によるサンドコラム（長さ 90cm）への浸透長さを測定することでグラウト材の浸透性を評価する試験方法である（図 4.2-8）。浸透長さが長い程、浸透性に優れていることになる。

日本においては薬液系の注入材料等、砂地盤の改良を目的とするグラウト材料に用いられることが多い。

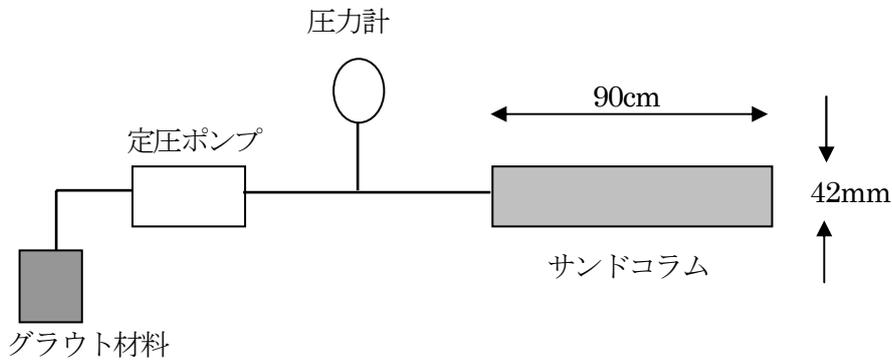


図 4.2-8 サンドコラム試験⁶⁾
 (参考文献 6) に基づき作成

4.2.4 平行平板試験

アクリル板、パイレックスガラス、鋼製鉄板等の 2 枚の平板の間に微小な隙間を設けることで岩盤亀裂をモデル化している。微小な隙間の設け方としては、図 4.2-9 のように 2 枚の平板の間にスペーサーを挟みこむ場合と、鋼製鉄板の表面に微小な深さを有する窪みを切削する場合の 2 種類がある。スペーサーを挟み込む場合は、スペーサーの厚みが亀裂開口幅に相当する。

平行平板試験装置では、岩盤亀裂入り口での目詰まり特性試験の他に、岩盤亀裂内部におけるグラウト材の浸透特性に関する試験にも用いられている。但し、目詰まり試験を実施する場合には、注入孔から平板間の隙間へと流れ込む入り口の加工精度に注意を要する。

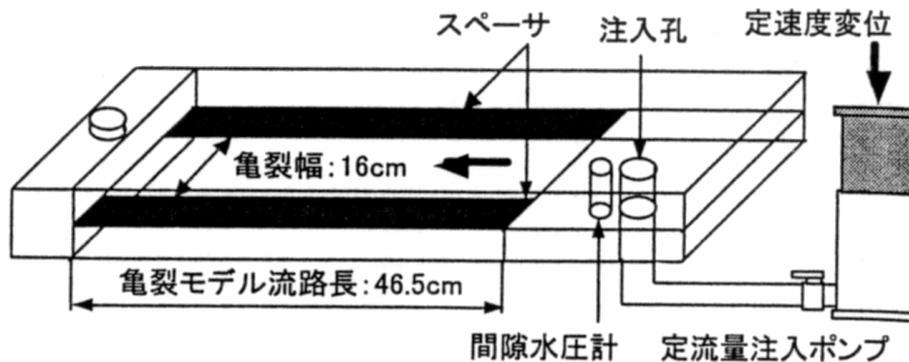


図 4.2-9 平行平板試験装置の例⁷⁾

4.3 高圧目詰まり試験装置の考案

4.3.1 要求仕様

3章におけるグラウト実績調査の結果、実際のグラウト工事における注入圧は以下の通りであった。

- ・ 国内のトンネル工事：グラウト注入圧力は、水圧の2～3倍に設定されることが一般的であり、青函トンネルにおいては湧水圧力(2.4～2.7MPa)の3倍として最大7.5MPaの注入圧力が載荷されている
- ・ 海外のトンネル工事：土被り厚さの薄いスウェーデンの環境配慮型トンネルにおいては、地上の隆起等を懸念して、注入圧力を地下水圧+2.5MPa程度に抑えているが、ノルウェーにおいては良好な岩盤条件の場合は最大10MPaの注入圧力が載荷されている。

基本的に、湧水圧とグラウト注入圧との差圧を高く設定する方が、グラウトの浸透性という観点からは優れている。高レベル放射性廃棄物地層処分施設は、地下300m以深の深部に構築されるため地上の隆起等を懸念する必要が無い。そこで、結晶質岩等の硬岩においては施工時の切羽周辺岩盤の安定性が高いことを利用して、ノルウェーにおいて実績のある10MPa程度の注入圧を載荷することが可能になるものと思われる。一方、地下深部の坑道周辺の水圧は、岩盤の透水性に大きく影響されるものと考えられるが、最大数MPa程度が作用することを考慮すると、現段階においては注入圧と地下水圧の差圧としては数MPa程度を考慮しておくことが現実的である。そこで、高圧目詰まり試験装置としてはある程度の余裕を考慮して最大10MPaまでの注入圧(差圧)に載荷可能としておけば十分であると言える。

一方、考慮すべき亀裂開口幅に関しては高レベル放射性廃棄物処分施設においては、100 μ m以下の微小亀裂まで改良する必要があるものと考えられている。また、超微粒子セメントを理想的に分散させた場合には、一般的に50 μ mまで浸透可能であると言われている。このため、50 μ m前後をカバーするために、最小スリット開口幅を30 μ m、最大スリット開口幅を100 μ mに設定する。

上記より、高圧注入試験装置の要求仕様を以下のように設定した。

- ・ 最大注入圧力(差圧)：10MPaに設定
- ・ スリット開口幅：30、50、80、100 μ m

4.3.2 試験装置

スリット開口幅を正確に加工するために、試験装置は金属製とした。形状に関しては、試験終了後にスリット上に堆積したフィルターケーキを観察しやすくするために、スリット(幅40mm、長さ100mm)を有する鋼柱(図4.3-1参照)とそれを設置する容器部分からなり、スリットの上下端は上下に設けたフランジによりはさみ込み、スリット中央部はボルトにより組み立てる構造とした(図4.3-2参照)。この結果、試験終了後にボルトを外し、上下のフランジを取り外すことにより、フィルターケーキを壊すことなくスリット入り鋼柱を取り出すことが可能となる。

本装置は特に高圧での注入を考慮して、強度的には10MPaの注入圧に耐えられる仕様になっており、材質はすべてSUS304を使用している。特に、亀裂入口を模擬しているスリット上端は厚さ15mmのフランジにより十分な剛性を確保している。

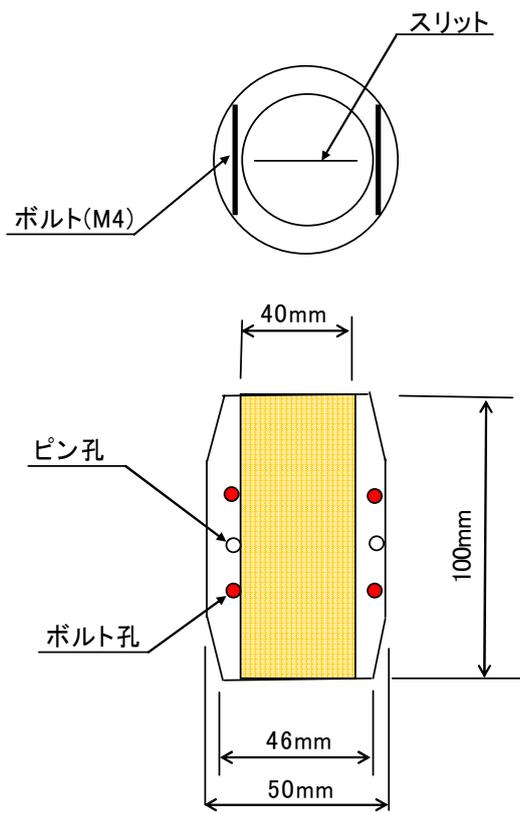


図 4.3-1 スリット入り鋼柱

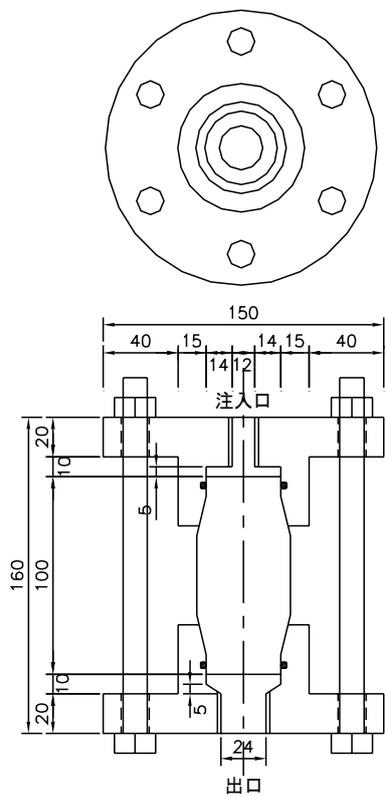


図 4.3-2 高圧目詰まり試験装置の全体図

4.4 予備試験の実施

4.4.1 予備試験全体フロー

考案した試験装置の機能を確認し、さらに注入圧力と目詰まり特性の関係を把握するために、以下のフローに従って予備試験を実施した。

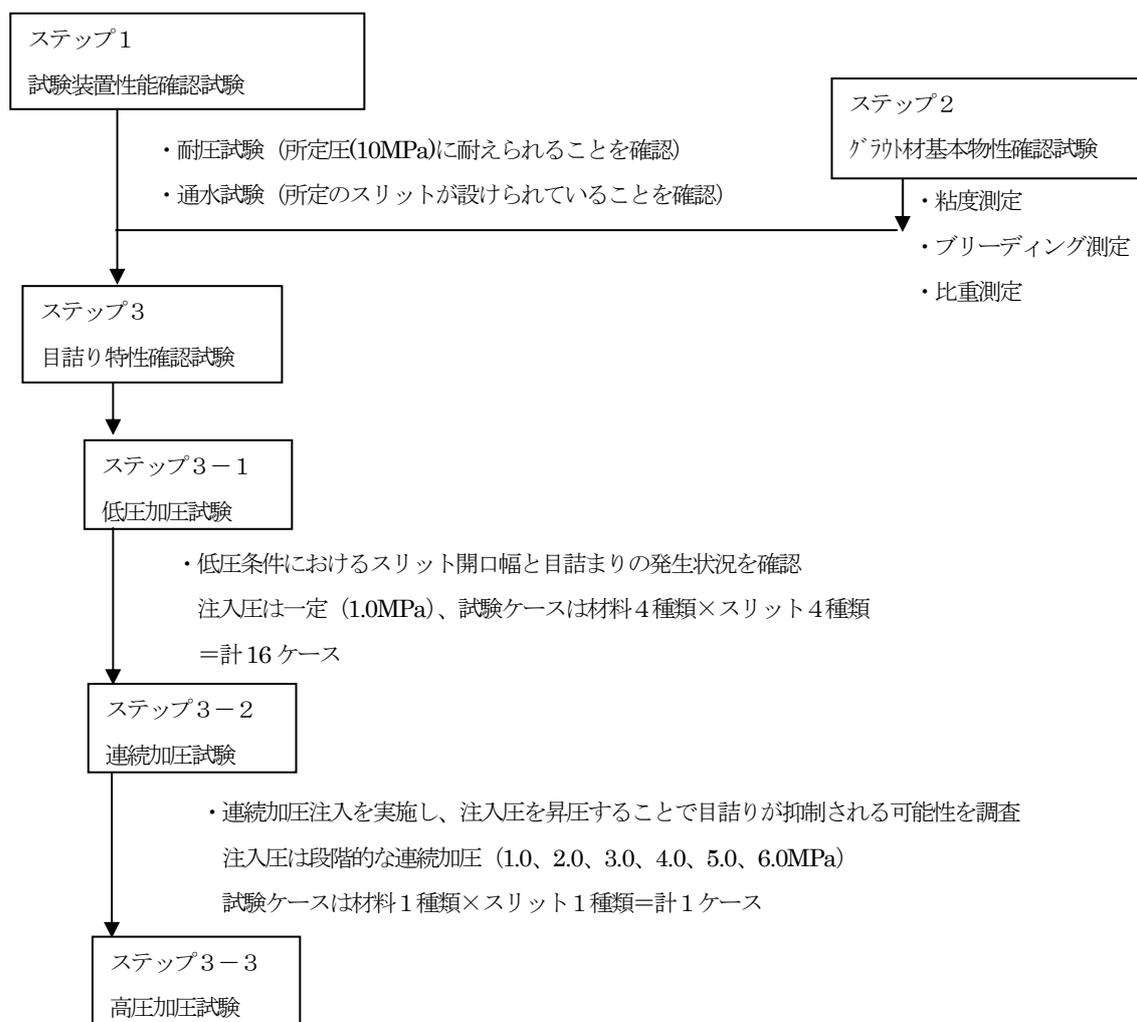


図 4.4-1 予備試験全体フロー図

4.4.2 試験材料及び試験装置、機器

(1) 試験材料

試験材料としてはシリカフェウムスラリー（商品名グラウトエイド、3.3.2 項参照）を添加した超微粒子セメント（日鉄スーパーファイン）による高濃度のセメント懸濁型グラウトを選定した。配合は、グラウトエイドの製造メーカーであるエルケム社が推奨している標準配合（表 4.4-2参照）を参考に設定した（表 4.4-1参照）。なお、配合4は現在、NUMO-SKB-Posiva の共同研究において Posiva が Onkalo で使用している配合を模擬したものである。

表 4.4-1 配合表

	単位	配合 1	配合 2	配合 3	配合 4 *
		w/c=1.0 (GA : 5%)	w/c=1.6 (GA : 0%)	w/c=1.6 (GA : 10%)	w/c=1.6 (GA : 41%)
超微粒子セメント	kg	20.000	20.000	20.000	20.000
グラウトエイト [®] (スラリー)	kg	2.105	0.000	4.444	27.797
水	kg	20.000	32.000	33.333	40.339
分散剤 (マイティー150R)	kg	0.589	0.560	0.622	0.678
体 積	L	28.651	39.123	43.682	67.413
単位重量	kg/m ³	1490	1343	1337	1317

*) Posiva が Onkalo の原位置試験において使用している配合を模擬。

表 4.4-2 グラウトエイトを使用したセメントグラウトの標準配合(メーカー推奨配合)⁸⁾

Ultrafine Cement Grouts ("Ultrafin 12")											
1. Mixes with UF12 + GroutAid					Typical range for soil grouting applications						
water/binder ratio	0.7	0.9	1.0	1.3	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
% GroutAid (solids as % total binder)	5%	5%	5%	10%	30%	35%	40%	40%	45%	45%	50%
% SP40 (as % total binder)	2.8%	2.8%	2.8%	2.8%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%
UF12 Cement (kg)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
GroutAid (kg of slurry)	2	2	2	4	17	22	27	27	33	33	40
Water (kg)	14	18	20	27	77	97	120	137	165	184	220
SP40 (kg)	0.589	0.589	0.589	0.622	0.714	0.769	0.833	0.833	0.909	0.909	1.000
Theoretical Batch Volume (L)	22	26	28	37	96	119	146	163	196	214	256
Theoretical grout density (kg/m ³)	1653	1548	1507	1410	1194	1167	1147	1132	1118	1108	1099
Mix Cost	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Grout cost \$/litre	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00

Notes : GroutAid is 50% solids of superfine condensed microsilica which has very high pozzolanic value and therefore is counted as part of the binder component. Remaining 50% is water, counted in calculation of w/b ratio. So for calculation of w/b ratio, binder content = cement plus 50% by weight of GroutAid, total water content = water plus 50% by weight of GroutAid. GroutAid SG = 1.4 UF12 SG = 3.15 SP40 SG = 1.25

注) ・グラウトエイト (比重 1.4) は 50%がマイクロシリカの微粒子であり、残り 50%が水分である。

・水セメント比の計算は全水量/全粉体量である。

(水+グラウトエイト重量の 50%) / (セメント+グラウトエイト重量の 50%)

(2) 試験装置、機器

予備試験で使用した試験装置、機器は以下のとおりである。

表 4.4-3 主要機器一覧表

機器名称	規格・能力	出力	台数	摘要
目詰まり試験装置	耐圧 10MPa		1 台	4.3.2 項参照
グラウトポンプ	油圧式インジェクションポンプ RSP100×2N型 P _{max} =10MPa、 q =0~18ℓ /min	11 k w	1 台	圧送用
	2 連式複動ポンプ TOS-G10 P _{max} = 4 ~5MPa、 q =13~130ℓ /min、	7.5 k w	1 台	圧送用
アジテータ	バケツ 20ℓ (攪拌装置付)		1 台	グラウト練混ぜ攪拌
電磁流量計	圧力 0~6MPa 流量 0~120ℓ /min	0.4 k w	1 台	注入制御用
電子秤	最小目盛 1/100g 最大 4 k g		1 機	少量計量
B型粘度計			1 組	粘性測定

機械、器具の全体配置図を図 4.4-2に、また、その写真を図 4.4-3~図 4.4-5に示す。

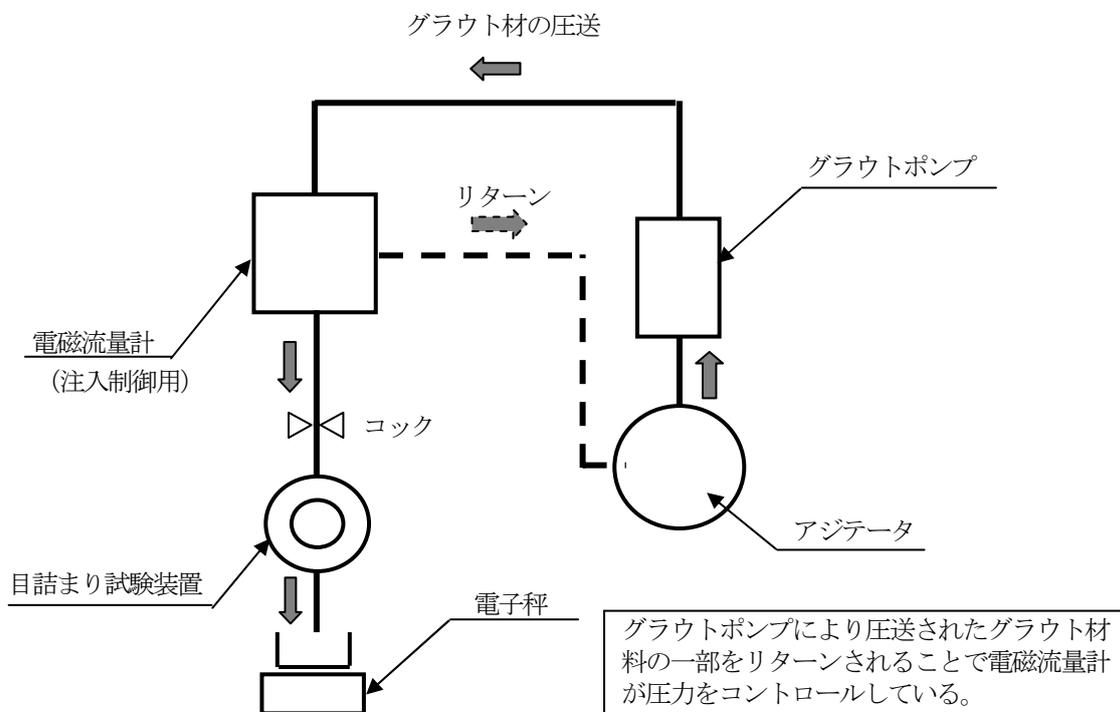


図 4.4-2 全体配置図



油圧式インジェクションポンプ (RSP-100×2N 型)



2連式複動ポンプ(TOS-G10)

図 4.4-3 グラウトポンプ



図 4.4-4 電磁流量計 (左図) 及び試験装置 (右図)



図 4.4-5 アジテータ（左図）及び電子秤（右図）

4.4.3 試験装置性能確認試験

試験装置性能確認試験においては以下の2種類の試験を実施した。

- ・通水試験：所定のスリットが設けられていることを確認
- ・耐圧試験：所定の圧力（10MPa）に耐えられることを確認

(1) 通水試験

通水試験は各スリット、圧力ごとに水による通水量を測定し、理論値と実測値を比較した。理論通水量の算出は以下に示す層流状態を仮定した平行平板モデルによる理論式で算出した。

理論式

$$\text{通水量 } Q = \frac{g \cdot t^2}{12\nu} \cdot t \cdot b \cdot \Delta h / L$$

ここに、g：重力加速度	9.8 m/s ²
ν：動粘性係数（水、9℃）	1.35×10 ⁻⁶ m ² /s
b：流路幅（スリット幅）	0.040 m
Δh：水頭差（通水圧）	m
L：流路長（スリット長）	0.10 m
t：流路厚（スリット開口幅）	m

本試験で実施した通水圧ごとの理論通水量を表 4.4-4に示す。

表 4.4-4 各スリット、通水圧ごとの理論通水量

スリット開口幅 (μm)	通水量 ($\times 10^6\text{m}^3/\text{s}$, cc/s)		
	P=0.1MPa	P=0.2MPa	P=2.5MPa
30	0.07	0.13	1.6
50	0.30	0.60	7.6
80	1.2	2.5	31.0
100	2.4	4.8	60.5

(i) 試験手順

試験は、図 4.4-6及び図 4.4-7に示す試験フロー、試験サイクルに従って実施した。

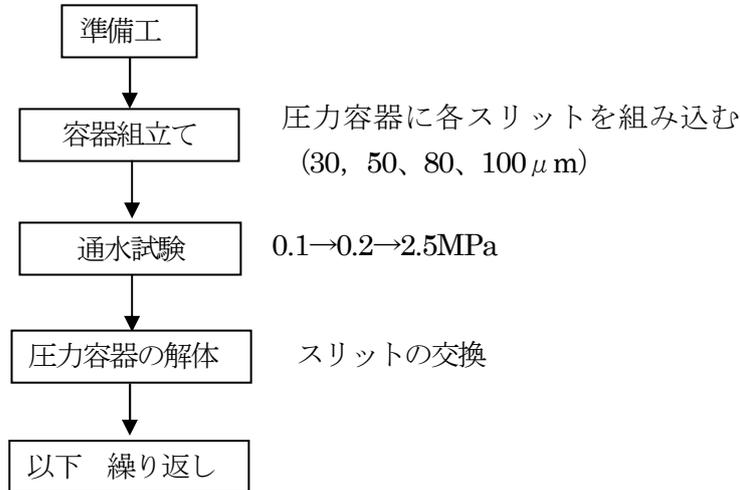


図 4.4-6 性能確認試験（通水試験）フロー図

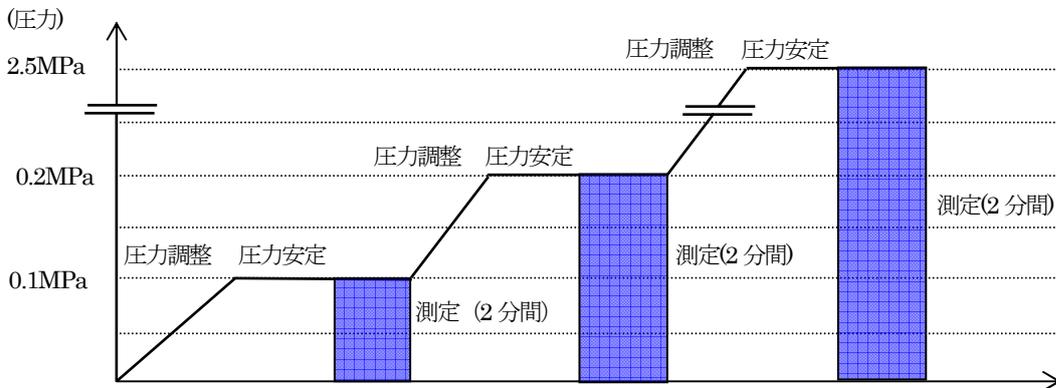


図 4.4-7 性能確認試験（通水試験）サイクル図

(ii) 試験結果および考察

測定結果を図 4.4-9に示す。なお、通水中に試験装置中央部のスリット継目よりしみ出す程度の漏水が見られたが（図 4.4-8）、測定結果には影響ないものと判断した。



図 4.4-8 スリット継ぎ目部からの漏水状況

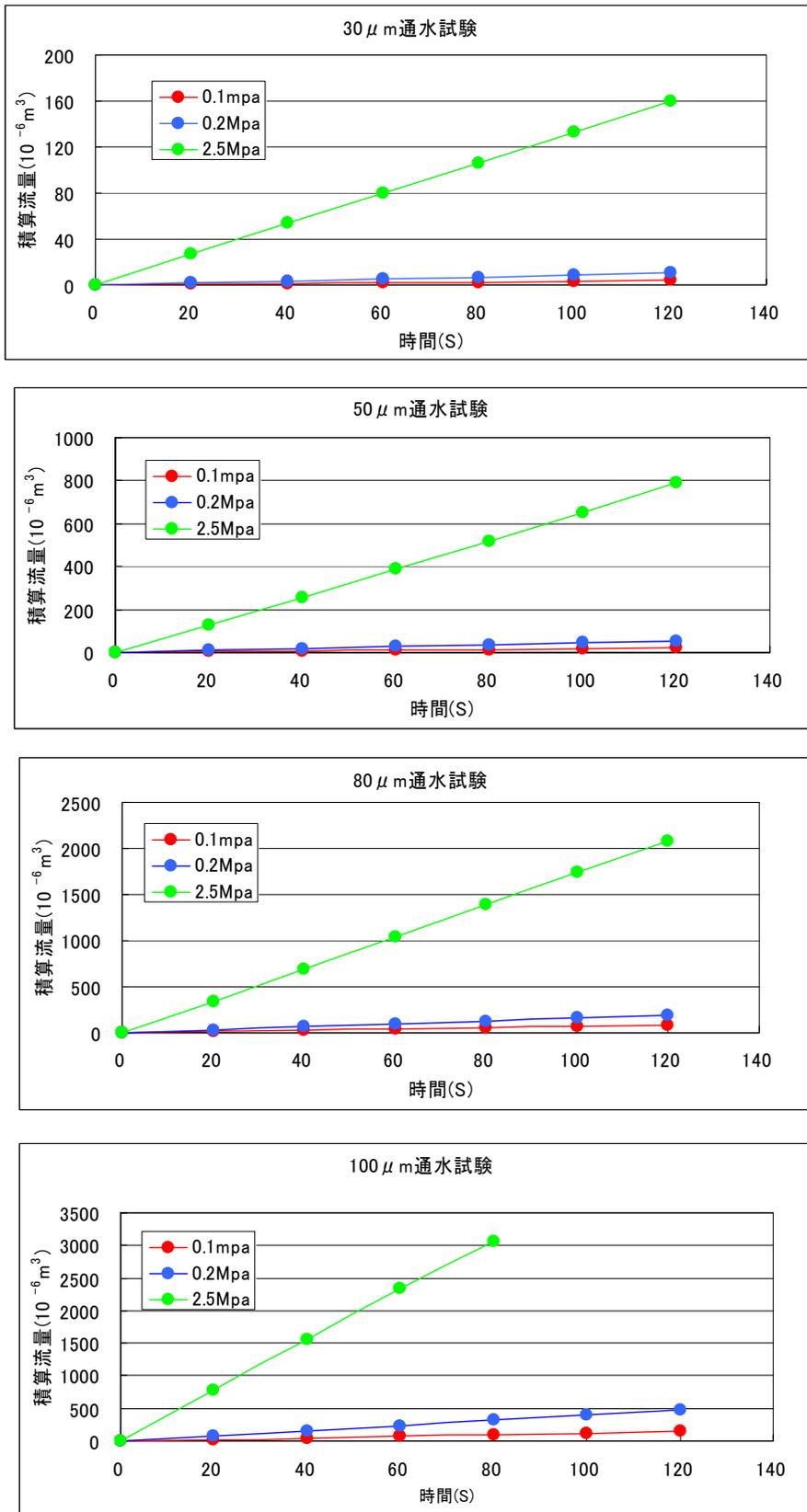


図 4.4-9 通水試験結果

測定結果より、線形近似して求めた単位通水量の実測値と理論値を比較して表 4.4-5に示す。また、理論通水量に対する実測値の比率を加えて図 4.4-10に示す。

表 4.4-5 単位通水量の理論値と実測値の比較

スリット開口幅(μm)	理論通水量 ($\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)			実測値 ($\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)		
	0.1MPa	0.2MPa	2.5MPa	0.1MPa	0.2MPa	2.5MPa
30	0.07	0.13	1.6	0.03	0.09	1.33
50	0.30	0.60	7.6	0.17	0.45	6.54
80	1.2	2.5	31.0	0.67	1.60	17.4
100	2.4	4.8	60.5	1.19	3.95	38.5

図 4.4-10より、理論通水量に対する実測値（単位通水量）は、おおむね理論値の5～9割程度と低めであったが、理論値に対する実測値の比率がある特定のスリット開口幅に対して特異な傾向が無いこと、载荷圧力の上昇に伴い通水量が極端に増加していないこと、から考えるとスリットが精度良く製作されており、さらに注入時にスリット開口幅が広がっていないことが確認された。

なお、理論値に比べて実測値が小さいのは、スリット間を通過する水が乱流状態になっているためと推察される。

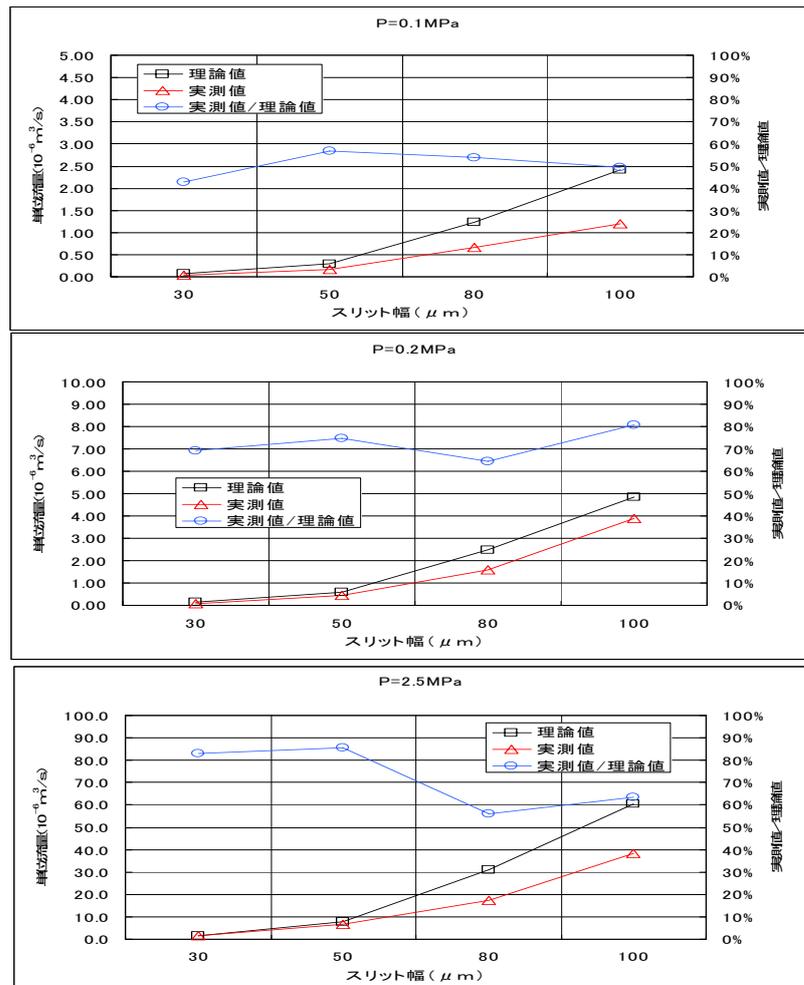


図 4.4-10 単位通水量の理論値と実測値の比較

(2) 耐圧試験

耐圧試験はスリットごとに0MPaから徐々に加圧した。

(i) 試験結果および考察

低圧条件においては、いずれのスリットも水漏れは滲む程度であったが、5MPaあたりから試験装置中央のスリット継目から水が噴出しはじめ、8MPaまで加圧した時、漏水がひどくなったため試験を中止した。一例として30 μ mスリットにおける漏水状況を図4.4-11に示す。

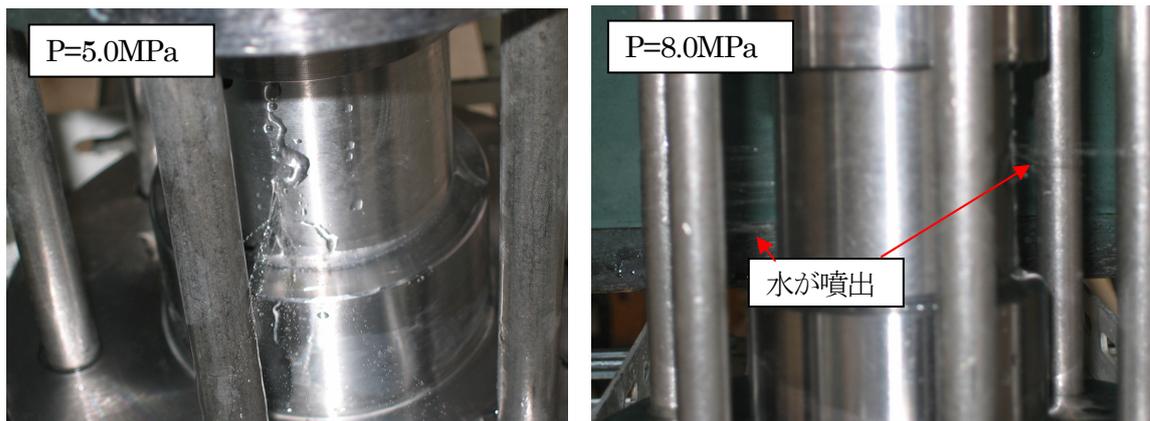


図 4.4-11 漏水状況 (スリット開口幅 30 μ m)

本試験より、当試験装置は、強度的には8MPaまでの圧力に耐えることを確認したが、5MPaあたりから漏水の問題があることが判明した。そこで、上記の結果を踏まえて、グラウト材の注入試験は6MPa以下の載荷圧で実施した。

4.4.4 グラウト材基本物性確認試験

グラウト材の基本物性確認試験として、粘性特性とブリーディング率を測定した。

(1) 粘性特性

粘性測定は、B型回転粘度計を用いて実施した。測定結果を表 4.4-6及び図 4.4-12に示す。

表 4.4-6の値は、せん断応力をせん断速度で割った見掛粘度を示している。

粘性測定の結果、以下のことが判明した。

- ・ 全ての配合において、120分間は粘性の有意な時間依存性は見られず、時間の経過に伴って見掛粘度が上昇することは無い。
- ・ 配合4については、他の3配合に比べて高粘性であり、ニュートン流体と見なせない可能性があること

そこで、配合4に関してはB型回転粘度計の回転速度を変えて5種類のせん断速度に対するせん断応力 (Pa) を測定した。測定結果を、表 4.4-7に示す。また流動曲線を図 4.4-13に示す。さらに、流動曲線を直線近似した結果を図 4.4-14に示す。同図中の直線の傾きがビンガム流体を仮定した場合の塑性粘度となる。塑性粘度の算定結果を表 4.4-7の右欄に示す。

表 4.4-6 見掛粘度の測定結果 (20°C養生)

時間	配合1 W/C=1.0 GA:5%		配合2 W/C=1.6 GA:0%		配合3 W/C=1.6 GA:10%		配合4 W/C=1.6 GA:41%	
	測定値	温度	測定値	温度	測定値	温度	測定値	温度
0分	5.7 mPa・S	12.1°C	2.5 mPa・S	18.1°C	3.1 mPa・S	17.5°C	223 mPa・S	13.3°C
30分	4.4 mPa・S	18.8°C	2.1 mPa・S	19.7°C	2.7 mPa・S	19.6°C	405 mPa・S	19.0°C
60分	4.3 mPa・S	19.1°C	1.9 mPa・S	20.0°C	2.5 mPa・S	20.0°C	560 mPa・S	19.4°C
90分	3.9 mPa・S	19.5°C	1.8 mPa・S	20.1°C	2.3 mPa・S	20.0°C	520 mPa・S	19.9°C
120分	3.7 mPa・S	19.6°C	1.7 mPa・S	20.4°C	2.2 mPa・S	20.2°C	570 mPa・S	19.9°C

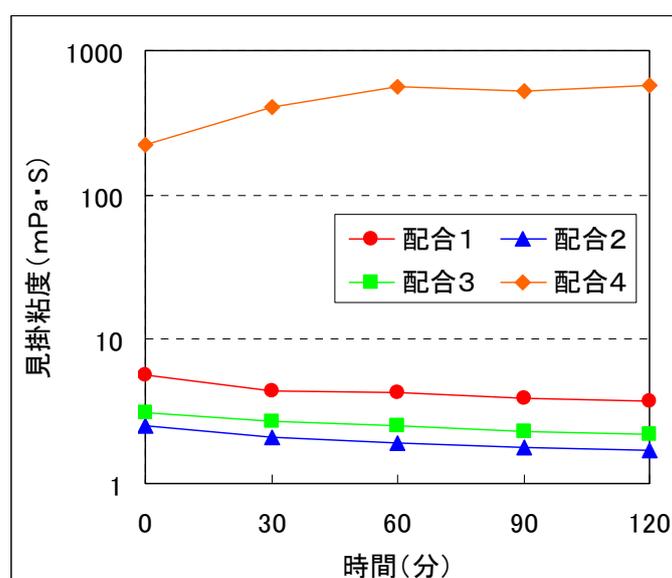


図 4.4-12 見掛粘度の測定結果 (20°C養生)

表 4.4-7 セン断応力の測定結果と塑性粘度の算出結果（配合 4）

時間[min]	温度[°C]	せん断速度[1/S]	せん断応力[Pa]	塑性粘度*[mPa・s]
0	12.8	0.86	2.25	133
		1.71	2.59	
		3.42	3.10	
		8.55	3.81	
		17.10	4.53	
30	17.8	0.86	3.54	175
		1.71	3.80	
		3.42	4.29	
		8.55	5.35	
		17.10	6.41	
60	18.3	0.86	3.95	210
		1.71	4.24	
		3.42	4.72	
		8.55	6.01	
		17.10	7.37	
90	19.4	0.86	3.59	179
		1.71	3.83	
		3.42	4.37	
		8.55	4.60	
		17.10	6.69	
120	19.0	0.86	3.84	233
		1.71	4.36	
		3.42	4.97	
		8.55	6.45	
		17.10	7.73	

*ビンガム流体を仮定して算定（図 4.4-14中の近似直線の傾き）

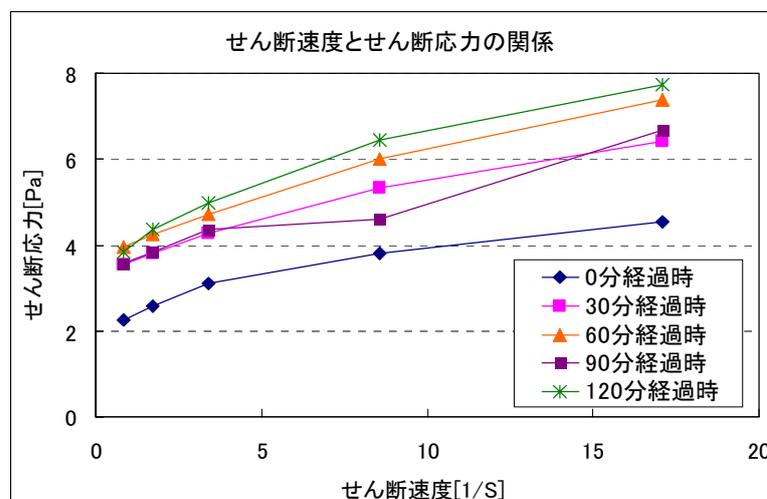


図 4.4-13 配合 4 の流動曲線（せん断速度とせん断応力の関係）

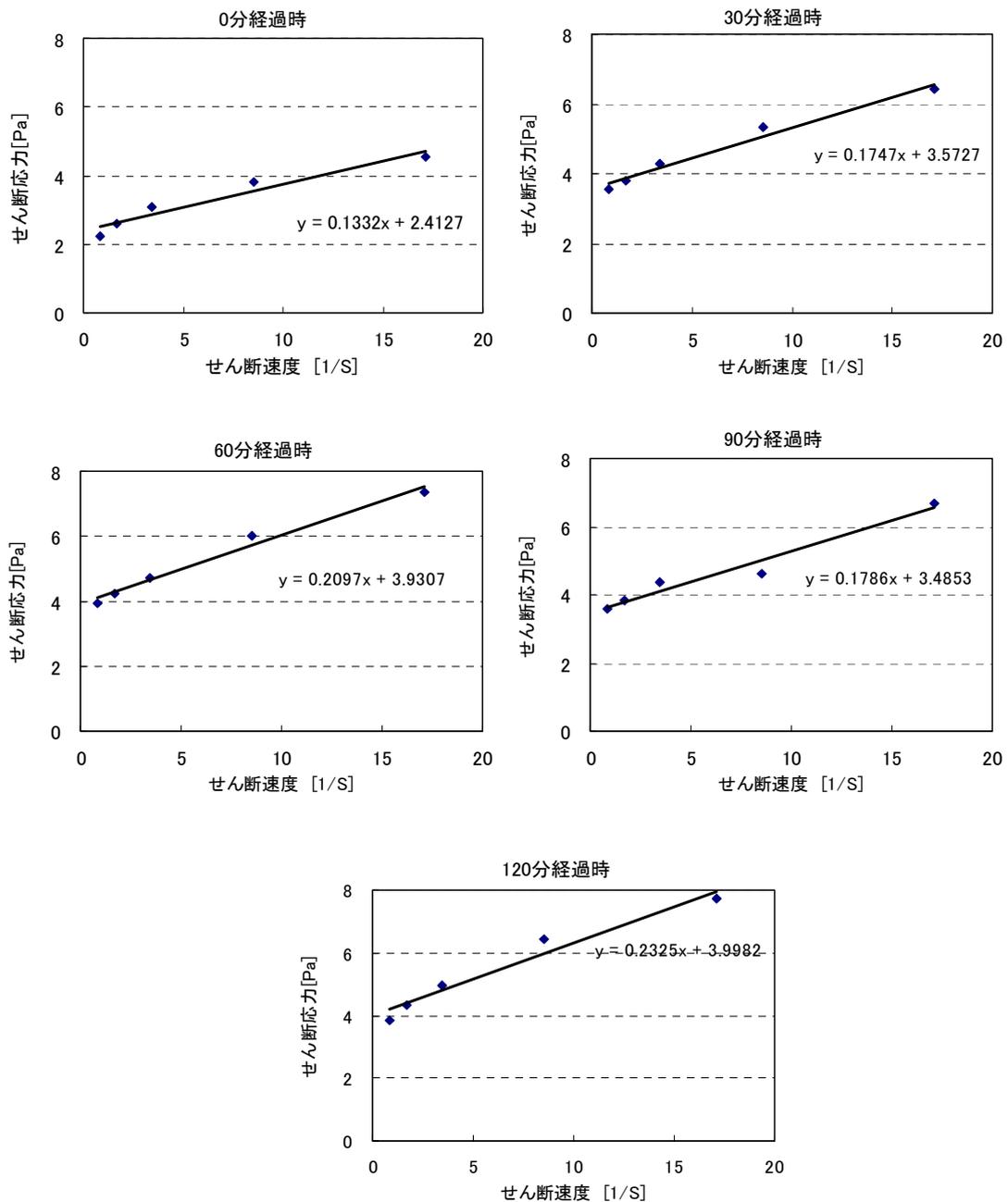


図 4.4-14 せん断速度とせん断応力の関係 (配合4)

(2) ブリーディング率

ブリーディング率の測定結果を表 4.4-8に、測定状況を図 4.4-15に示す。

エルケム社のグラウトエイドに関する技術資料より、今回グラウトエイドを添加した配合ではブリーディングはほとんど発生しないものと予想していたが、配合1、3では、予想に反して50%を超えるブリーディングが発生する結果となった。

これは、今回の配合はグラウトエイドの製造メーカーであるエルケム社が推奨している標準配合を基本としているが、他の材料については国内製のセメント及び分散剤を使用しているため、ブリーデ

イングに関しては材料間の相性が悪かったのではないかと考えられる。

今後、シリカフェームスラリーと日本の材料（セメント、分散剤）との相性について、さらなる研究が必要であると思われる。

表 4.4-8 ブリーディング率測定結果

	配合 1 W/C=1.0 GA:5%	配合 2 W/C=1.6 GA:0%	配合 3 W/C=1.6 GA:10%	配合 4 W/C=1.6 GA:41%
ブリーディング (24h)	56%	69%	75%	1%

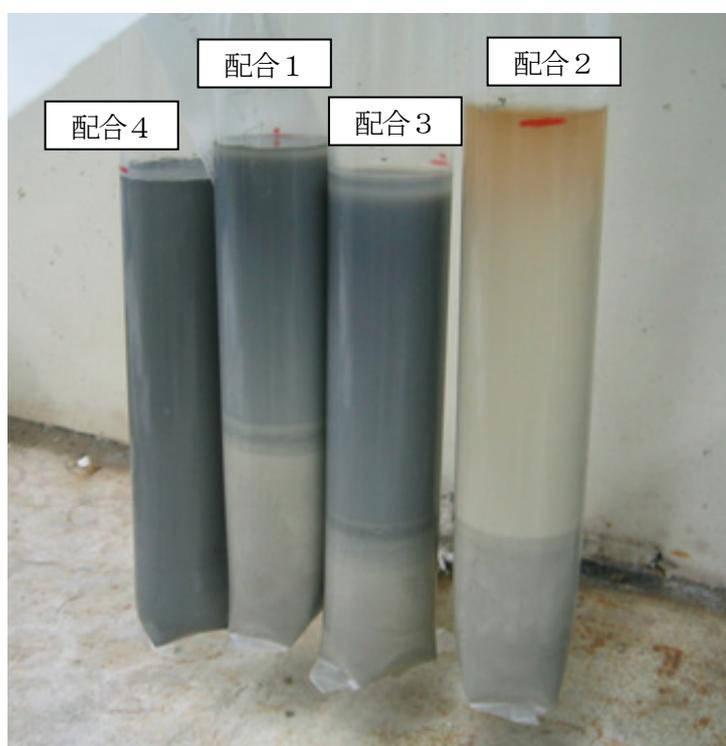


図 4.4-15 ブリーディング測定状況

4.4.5 目詰り特性確認試験

最初に、低圧加圧試験により各試験配合に対して低圧（1.0MPa）条件での、各スリット開口幅とグラウト通過重量、目詰まりの発生状況を確認する。次に、低圧加圧試験において目詰まりが発生し、スリットへグラウト材が若干量しか浸透しなかったケースを選定し、段階的に注入圧を昇圧させる連続加圧試験を実施し、注入圧力を高めることにより目詰まりを抑制できる可能性について調査する。最後に、連続加圧試験の結果の妥当性を確認するために、高圧加圧試験として、3段階の圧力を選定し、圧力を保持した条件下での目詰まり状況を確認する。

(1) 低圧加圧試験

(i) 試験方法

低圧条件において、スリット開口幅とグラウト通過量、目詰まりの発生状況を確認するために、一定圧（1.0MPa）の条件で、各配合、各スリット開口幅（30、50、80、100 μ m）に対して注入試験を実施した。ケースごとに一定の注入時間（5分間）のグラウト通過重量を測定し、注入終了後に、目詰まりの発生状況（フィルターケーキの生成）を目視により観察した。

実施した試験ケースを表 4.4-9に示す。

表 4.4-9 試験ケース（低圧加圧試験）

配合	スリット開口幅
配合1 (W/C=1.0、GA=5%)	30、50、80、100 μ m
配合2 (W/C=1.6、GA=0%)	30、50、80、100 μ m
配合3 (W/C=1.6、GA=10%)	30、50、80、100 μ m
配合4 (W/C=1.6、GA=41%)	30、50、80、100 μ m

試験は、図 4.4-16の試験フローに従って実施した。

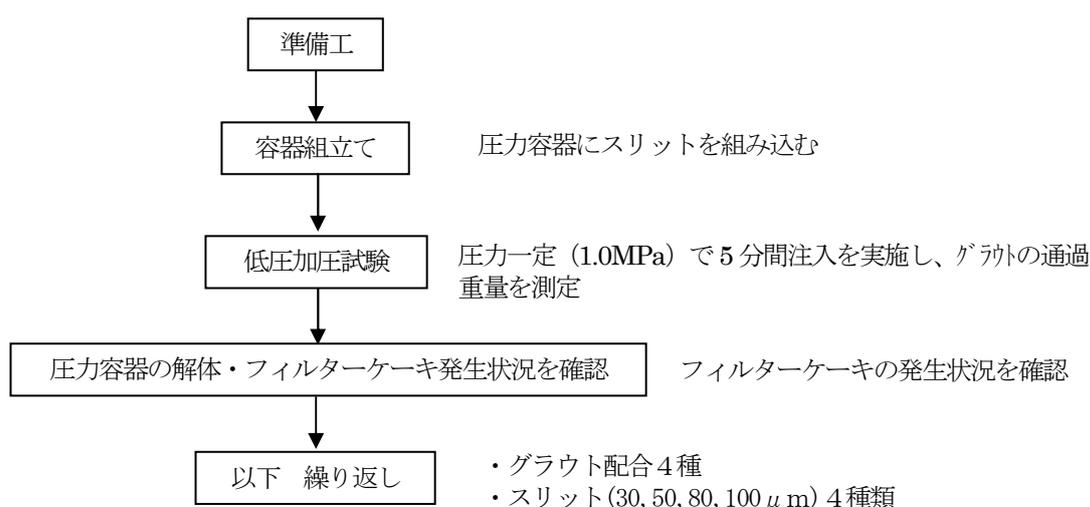


図 4.4-16 低圧加圧試験フロー図

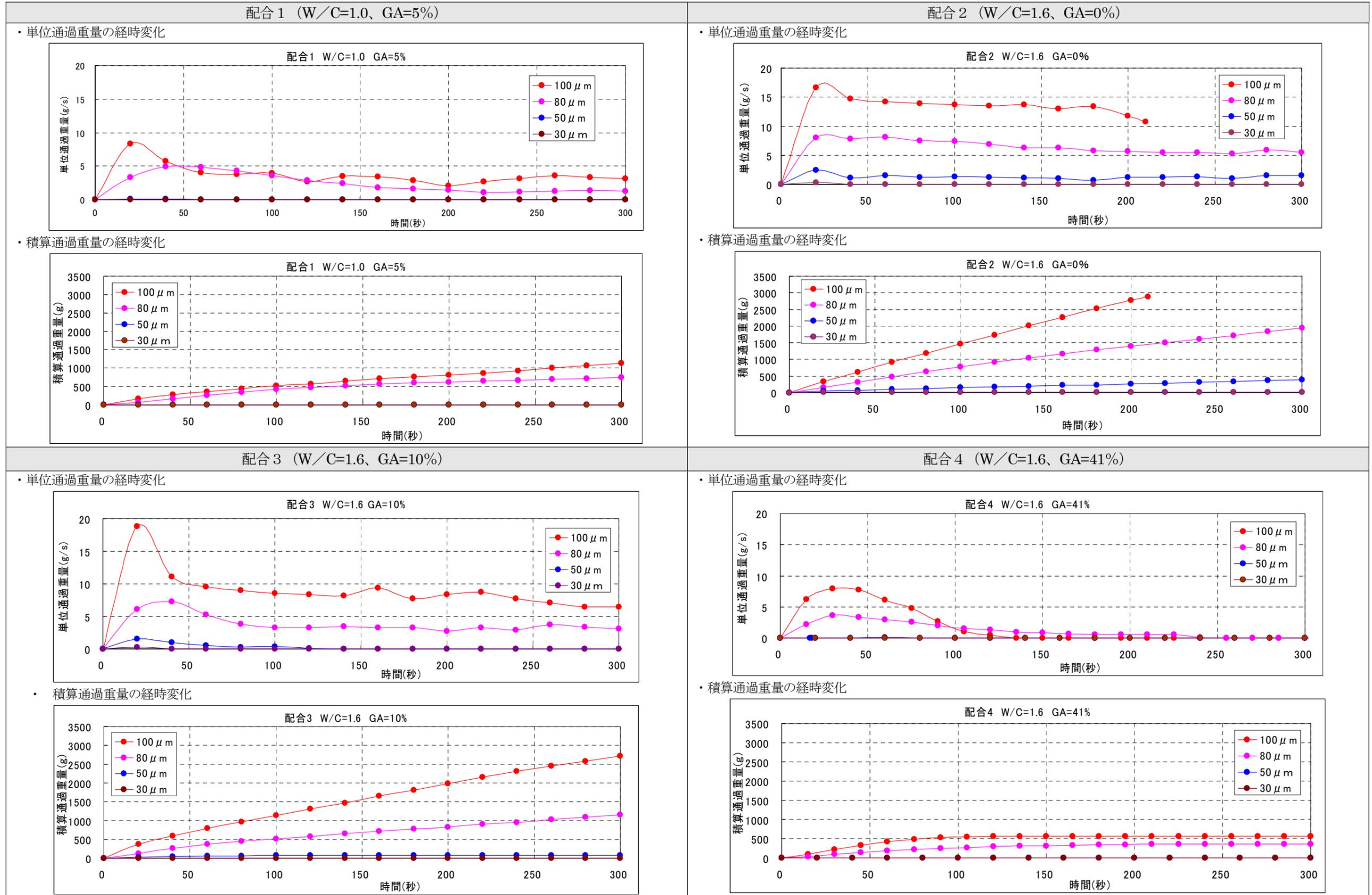
(ii) 試験結果

通過したグラウト材の重量と平均比重を表 4.4-10に、通過グラウト量（単位時間当りの通過重量と積算通過重量）の経時変化を表 4.4-11に、注入終了後に観察されたフィルターケーキの発生状況を図 4.4-17～図 4.4-20に、フィルターケーキの重量を表 4.4-12に示す。

表 4.4-10 通過したグラウト材の重量と平均比重

配合	スリット開口幅	通過したグラウト材			グラウト比重 (配合値)
		体積 (cc)	重量 (g)	比重	
配合 1 (W/C=1.0、 GA=5%)	30 μ m	通過なし	通過なし	—	1.49
	50 μ m	4	4.5	1.13	
	80 μ m	525	743.8	1.42	
	100 μ m	765	1127.4	1.47	
配合 2 (W/C=1.6、 GA=0%)	30 μ m	5.4	6.3	1.17	1.34
	50 μ m	300	395	1.32	
	80 μ m	1460	1950.5	1.34	
	100 μ m	2210	2880.1	1.30	
配合 3 (W/C=1.6、 GA=10%)	30 μ m	4.5	6.1	1.36	1.34
	50 μ m	61	78.3	1.28	
	80 μ m	869	1161.8	1.34	
	100 μ m	2051	2711.4	1.32	
配合 4 (W/C=1.6、 GA=41%)	30 μ m	5.4	6.3	1.17	1.32
	50 μ m	3	3.6	1.20	
	80 μ m	280	365.2	1.30	
	100 μ m	430	556.5	1.29	

表 4.4-11 通過グラウト量の経時変化



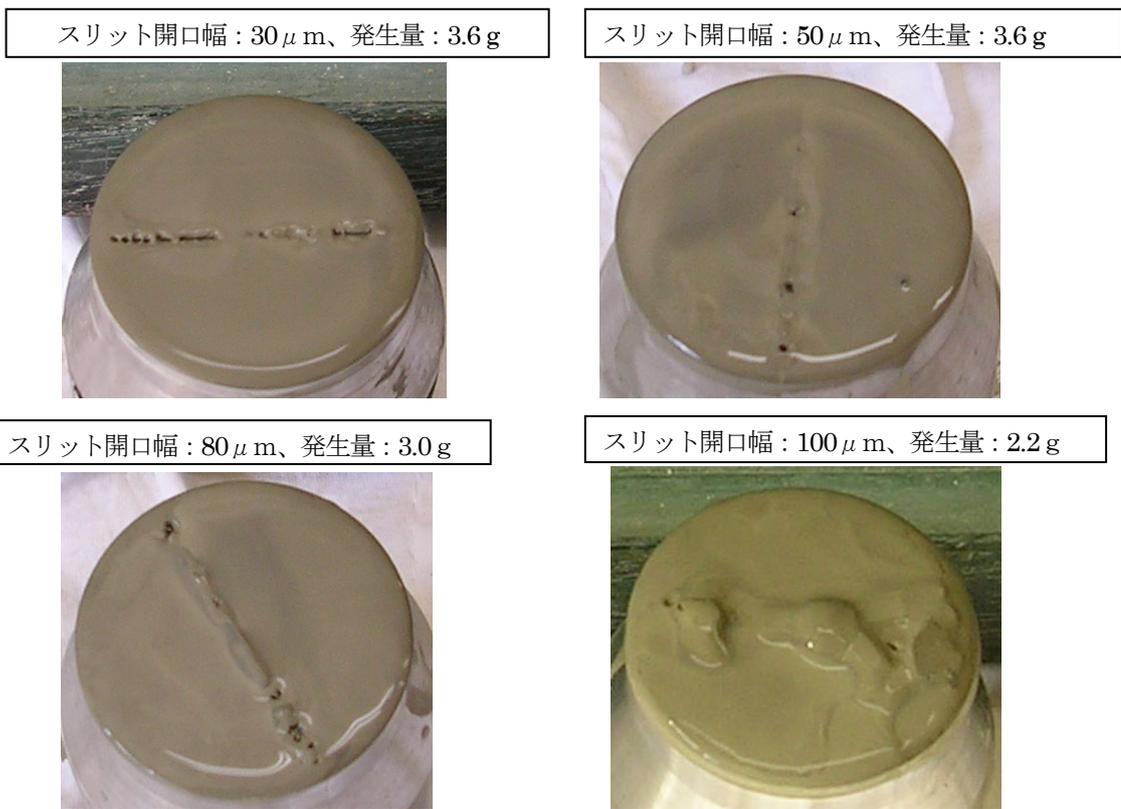


図 4.4-17 フィルターケーキ発生状況 (配合 1)

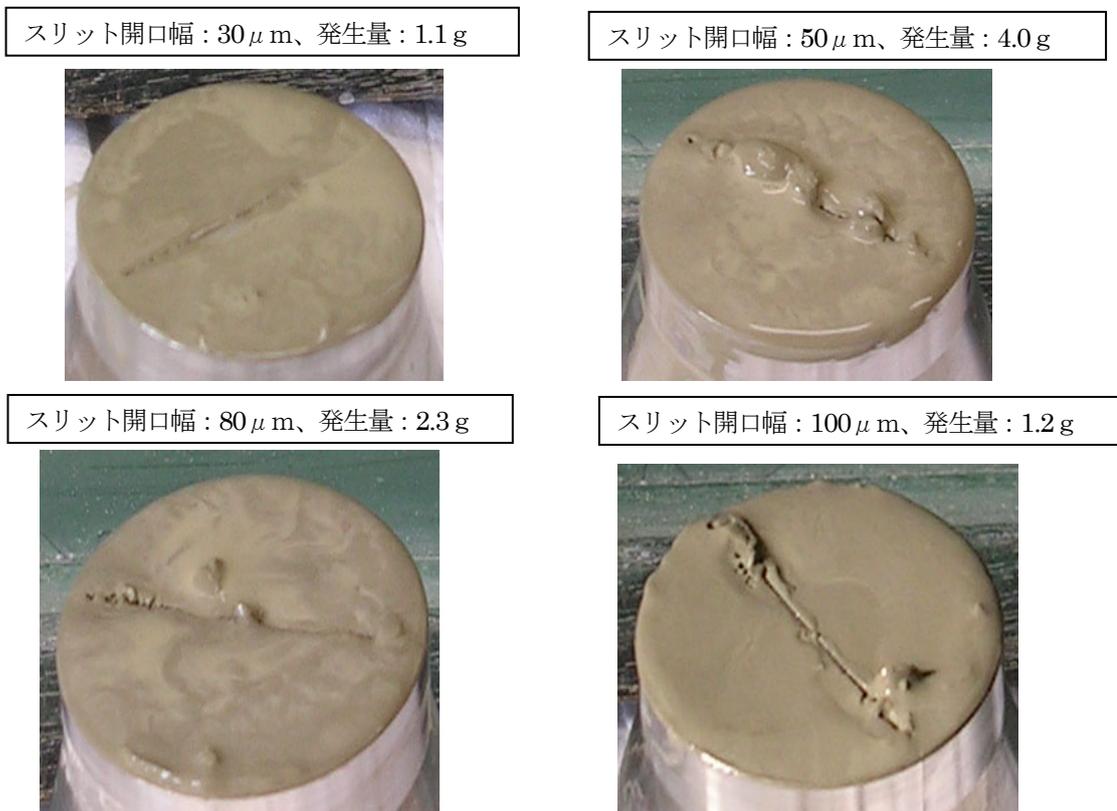


図 4.4-18 フィルターケーキの発生状況 (配合 2)

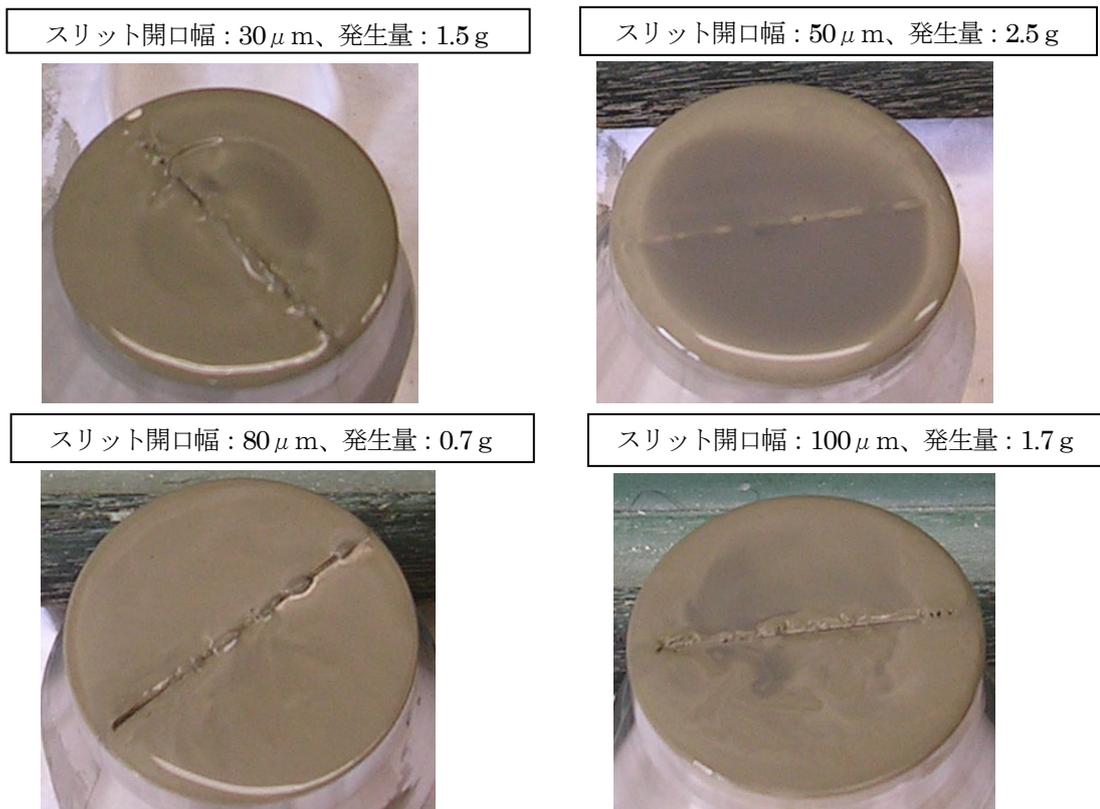


図 4.4-19 フィルターケーキの発生状況 (配合3)

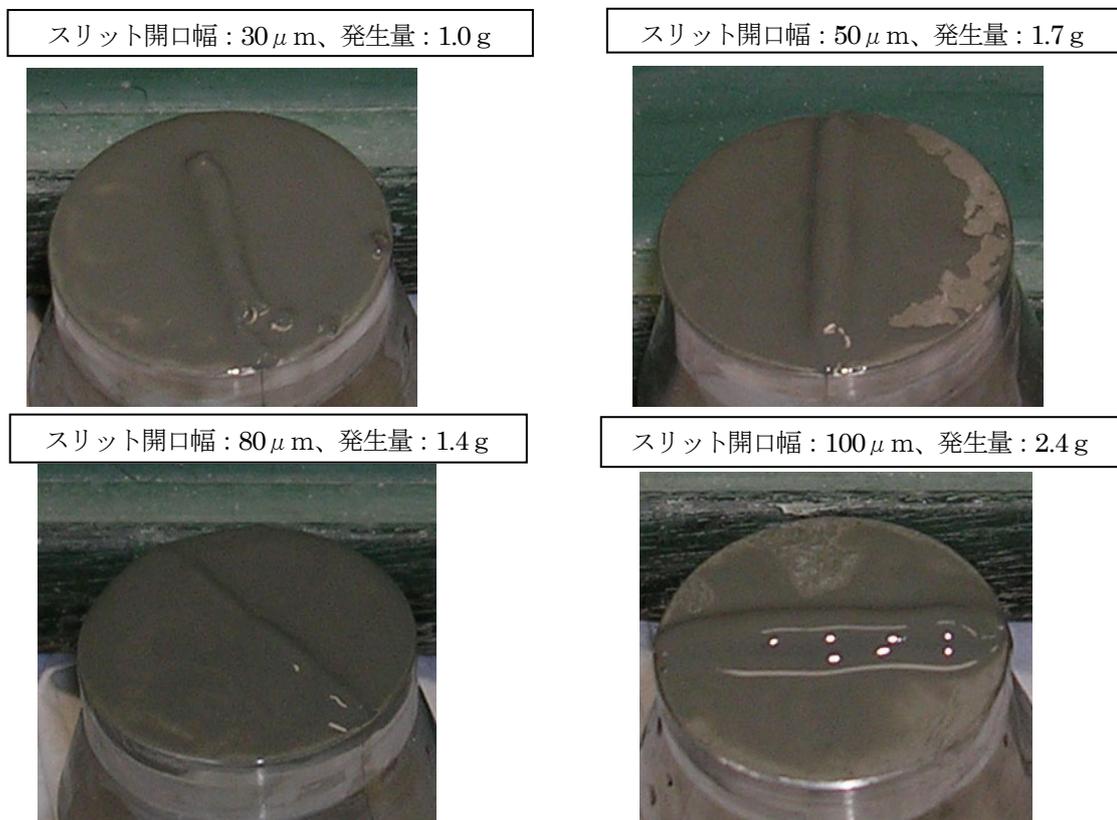


図 4.4-20 フィルターケーキの発生状況 (配合4)

表 4.4-12 フィルターケーキ重量

配合	スリット開口幅	重量 (g)
配合 1 (W/C=1.0、 GA=5%)	30 μ m	2.0
	50 μ m	3.6
	80 μ m	3.0
	100 μ m	2.2
配合 2 (W/C=1.6、 GA=0%)	30 μ m	1.1
	50 μ m	4.0
	80 μ m	2.3
	100 μ m	1.2
配合 3 (W/C=1.6、 GA=10%)	30 μ m	1.5
	50 μ m	2.5
	80 μ m	0.7
	100 μ m	1.7
配合 4 (W/C=1.6、 GA=41%)	30 μ m	1.0
	50 μ m	1.7
	80 μ m	1.4
	100 μ m	2.4

上記の試験結果を、グラウト材の単位通過流量、通過したグラウト材の比重、ケーキ発生状況について分析した結果を以下に示す。

(a) グラウト材の単位通過流量と理論値の比較

グラウト材の単位通過流量について、平行平板モデルで粘性を考慮して算出した理論値と実測値を比較した結果を図 4.4-21に示す。なお、理論値を算出する際の粘性については練混ぜ直後の見掛粘度（表 4.4-6参照）を用いた。但し、配合 4 については、明らかに降伏強度を有するため、表 4.4-7に示す塑性粘度 (133mPa \cdot S) を用いた。また、流量の算出については計測した重量を各試験ケースの通過したグラウト材全体の平均比重で除して求めた。これより以下のことがわかる。

- 配合 1、2、3 について
 - ・スリット開口幅 80、100 μ m においては、注入開始直後（1分）は、理論値の 5～8 割程度で、時間の経過とともに、やや減少する傾向にあるが、5分後でもグラウト材の通過が継続している。
 - ・スリット開口幅 30、50 μ m においては、粘性が大きい配合 1 (5.1mPa \cdot s) においては、注入開始直後（1分）からほとんど通過しない。一方、配合 3 (3.1mPa \cdot s) の場合は、理論値の 3 割程度で通過しなくなるが、配合 2 (2.5mPa \cdot s) では 5～8 割程度通過している。
- 配合 4 について
 - ・スリット開口幅 80、100 μ m においては、注入開始直後（1分）で、換算粘度を用いて算出した理論値よりも実測値の方が 5 倍程度多く浸透する結果となっている。このことは、配合 4 が擬塑性流体であり、実際の低圧加圧試験で発生しているせん断速度は粘性測定試験におけるせん断速度 (0.86～17.1 (1/s)) よりもかなり高いため、塑性粘度は逆に粘性測定試験結果よりも大幅に小さかったものと考えられる。
 - ・スリット開口幅 80、100 μ m においても、時間の経過とともに急激に減少する傾向にあり、5分

- 後はいずれも流量がゼロとなっている。
- ・スリット開口幅 30、50 μm においては、注入開始直後（1分後）からほとんど通過していない。

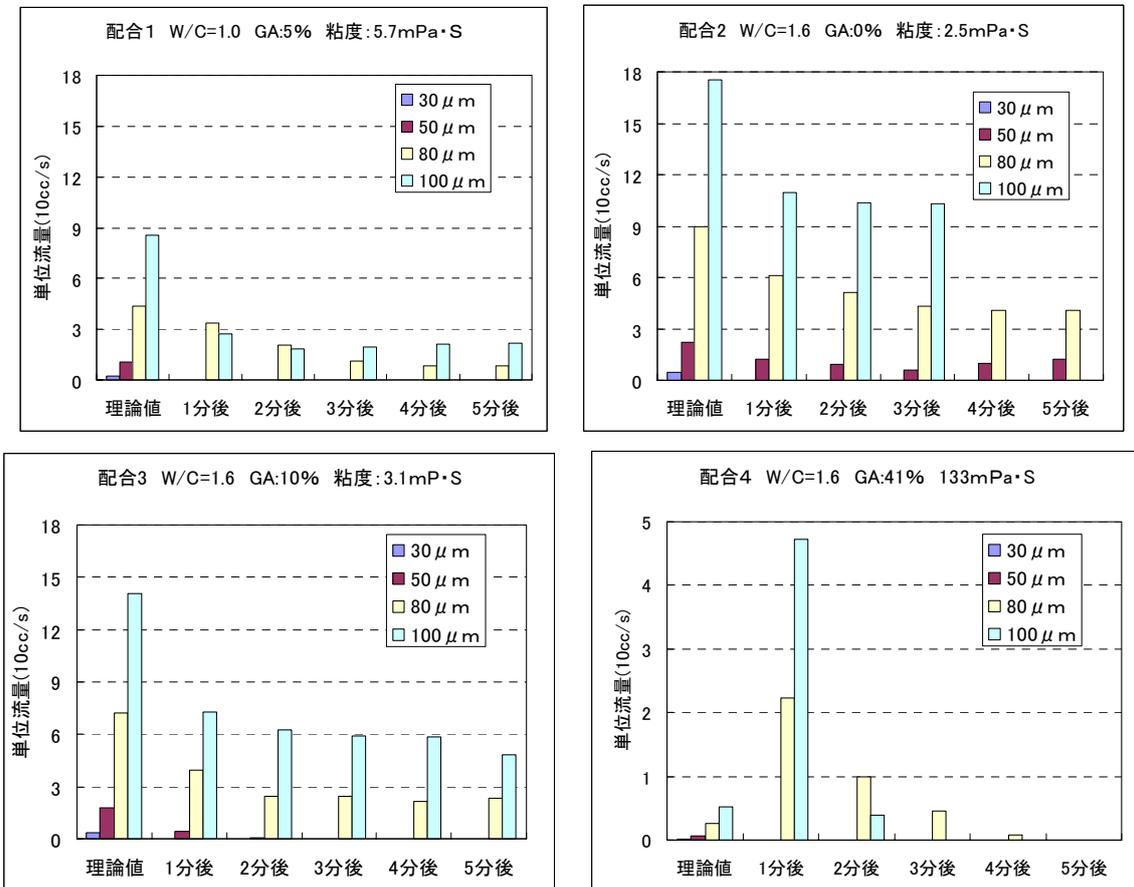


図 4.4-21 単位通過流量の理論値と実測値の比較

(左上図：配合1、右上図：配合2、左下図：配合3、右下図：配合4)

(b) 通過グラウトの比重

通過グラウトの比重を配合比重で除した値をスリット開口幅で整理したものを図 4.4-22に示す。図よりスリット開口幅 80、100 μm については、ほとんど配合時の値と変わらないが、50、30 μm となるに従って、低下する傾向にあるのがわかる。

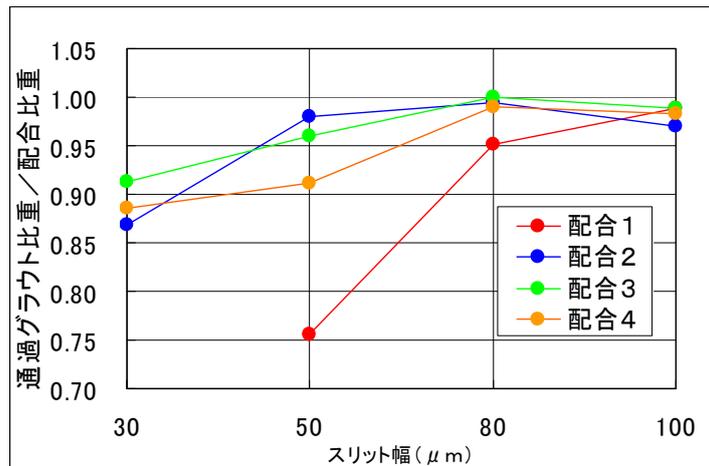


図 4.4-22 通過グラウト比重とスリット開口幅の関係

(c) フィルターケーキ発生状況

スリット上部のフィルターケーキの発生状況 (図 4.4-17~図 4.4-20) から以下の傾向があると言える。

- 配合1について：フィルターケーキ中にスリットに沿った溝が若干見られるが、グラウト通過量とフィルターケーキ発生状況の間に明確な傾向は見られない。
- 配合2について：フィルターケーキ中にスリットに沿った溝が見られ、特にスリット開口幅 100 μm の場合にこの傾向が顕著である。
- 配合3について：配合2とほぼ同様であり、特にスリット開口幅 80 μm、100 μm の場合に溝がより鮮明に残っている。
- 配合4について：いずれのスリット開口幅に対してもフィルターケーキがスリット上部に大きく盛り上がり、グラウト通過量とフィルターケーキ発生状況との間に明確な傾向は見られない。

また、図 4.4-23 に示した通過グラウト重量に対するケーキ発生重量の割合を見ると、各配合とも 50 μm 以下のスリットに対して急激に増加する傾向にあるのが分かり、グラウトがスリットを通過せずにフィルターケーキが生成されていることが分かる。

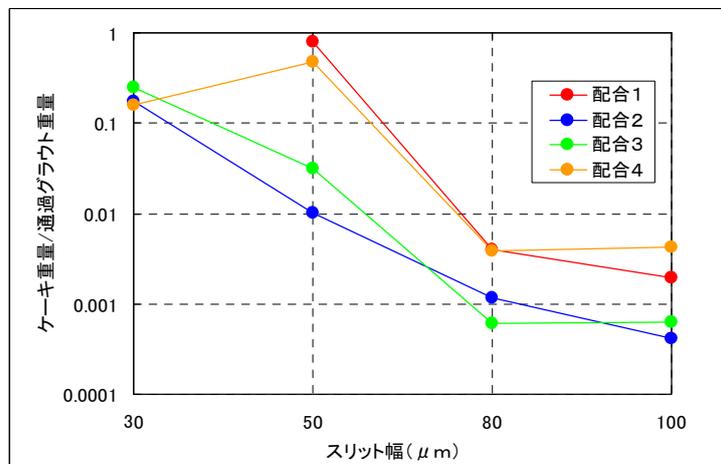


図 4.4-23 ケーキ重量/通過グラウト重量

(d) まとめ

通過したグラウト材の通過流量、比重、ケーキ発生状況から、今回使用したグラウト配合のうち、配合1、2、3は、1.0MPaの注入圧の条件では、おおむね80~100 μ mのスリットに対しては浸透可能であるが、50 μ m以下のスリットに対しては浸透性が悪く、グラウト材の通過量が少ない割にフィルターケーキ重量が大きいことから、スリットの入り口においてセメント粒子が目詰まりを起こし、濃度の薄いグラウト材が浸透したものと考えられる。また、配合4については、100 μ mのスリットに対しても、グラウト材の浸透量が少なく、浸透性がかなり悪いものと判断される。

(2) 連続加圧試験

(i) 試験方法

連続加圧試験の目的は、低圧試験では十分に浸透しない場合においても、注入圧力を高めることでグラウト材料をより大量に浸透できるかどうかを確認することにある。そこで、低圧加圧試験において目詰まりが発生し、グラウト材がほとんど浸透しなかったケースとしてグラウト配合3+スリット開口幅50 μ mの組合せを選択した。注入圧力の荷重方法は、図4.4-24に示すように段階的な連続加圧注入とし、最終的には6MPaまで荷重し、グラウト材の通過重量を測定した。

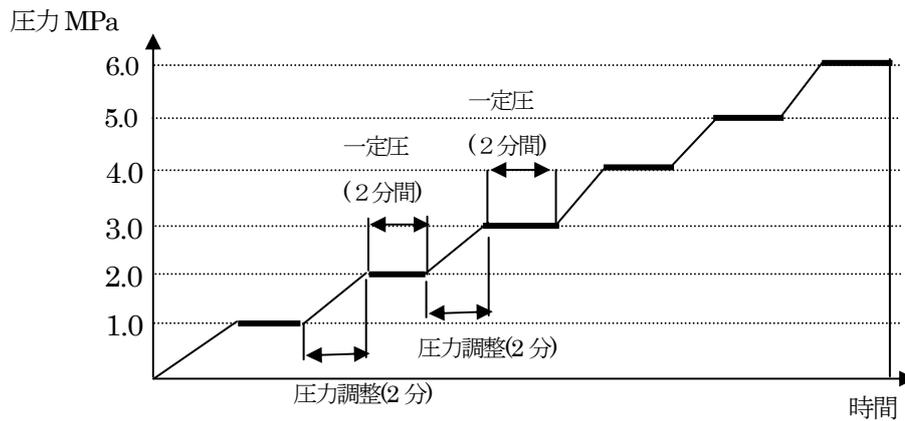


図 4.4-24 連続加圧試験の昇圧ステップ図

表 4.4-13 試験ケース (連続加圧試験)

注入材料	スリット開口幅	圧力
配合3 (W/C=1.6、GA=10%)	50 μ m	0→1.0→2.0→3.0→4.0→5.0→6.0MPa

試験は、図4.4-25に示す試験フローに従って実施した。

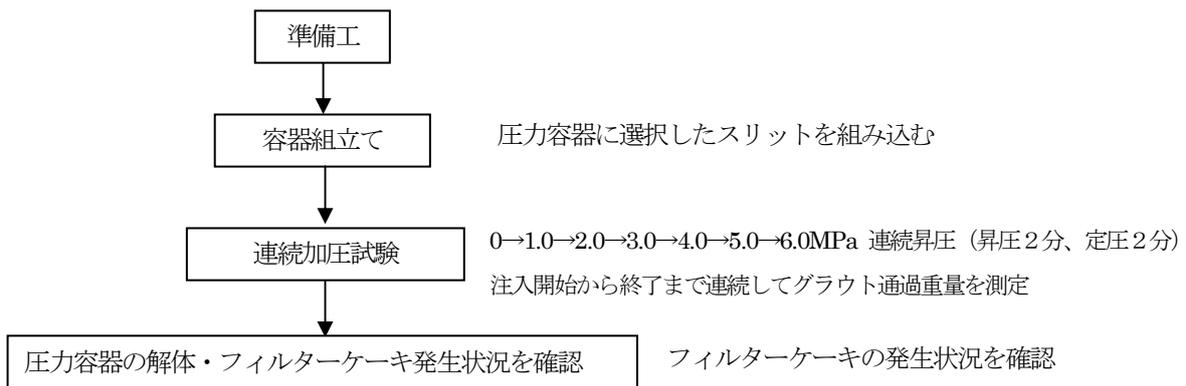


図 4.4-25 連続加圧試験フロー図

(ii) 試験結果

油圧式インジェクションポンプを使用した場合は注入圧力の脈動が激しく、特に注入圧力が 5MPa に達した辺りから脈動が極めて激しくなったため、同様の試験をより脈動の小さい 2 連式複動ポンプを用いて実施した。但し、2 連式複動ポンプでは 6MPa までの载荷が出来ないため、最大注入圧力は 5MPa に制限している。

それぞれの試験におけるグラウト通過量の経時変化を図 4.4-26及び図 4.4-27に示す。また、注入終了後に観察されたフィルターケーキの発生状況を図 4.4-28に示す。

上記の試験結果より、以下のことがわかる。

- ・ 図 4.4-26と図 4.4-27を比較すると、インジェクションポンプを使用した場合の積算通過重量が 728.9 g であるのに対して、2 連式複動ポンプの場合は 431.0 g であり、インジェクションポンプを使用した場合の方が積算流量が有意に大きいことがわかる（但し、最大注入圧力が異なることに注意）。
- ・ インジェクションポンプの場合は、4MPa 以下の注入圧段階では昇圧段階でグラウトが通過しており、注入圧力が 5MPa を超えてからは継続的にグラウトが通過している。これは、注入圧力が高まったことに加えて、注入圧の脈動が増えたことに起因している可能性がある。
- ・ 2 連式複動ポンプの場合は、注入圧力が 5MPa に達すると急にグラウトが通過し始め、60 秒間通過した後に単位通過流量が減少している。
- ・ 図 4.4-28のフィルターケーキの発生状況についてみると、注入時間が長い低圧加圧試験の際に見られた溝状のグラウトの流路跡は明確には確認されず、むしろスリット上部にグラウト材が堆積し、マウンド状の盛り上がり方が確認された。但し、盛り上がった堆積物の中にグラウトの流路跡と思われる細かい点状の隙間が確認された。特に、積算通過重量の少ない 2 連式複動ポンプを使用した場合の方が、この跡が明瞭であった。

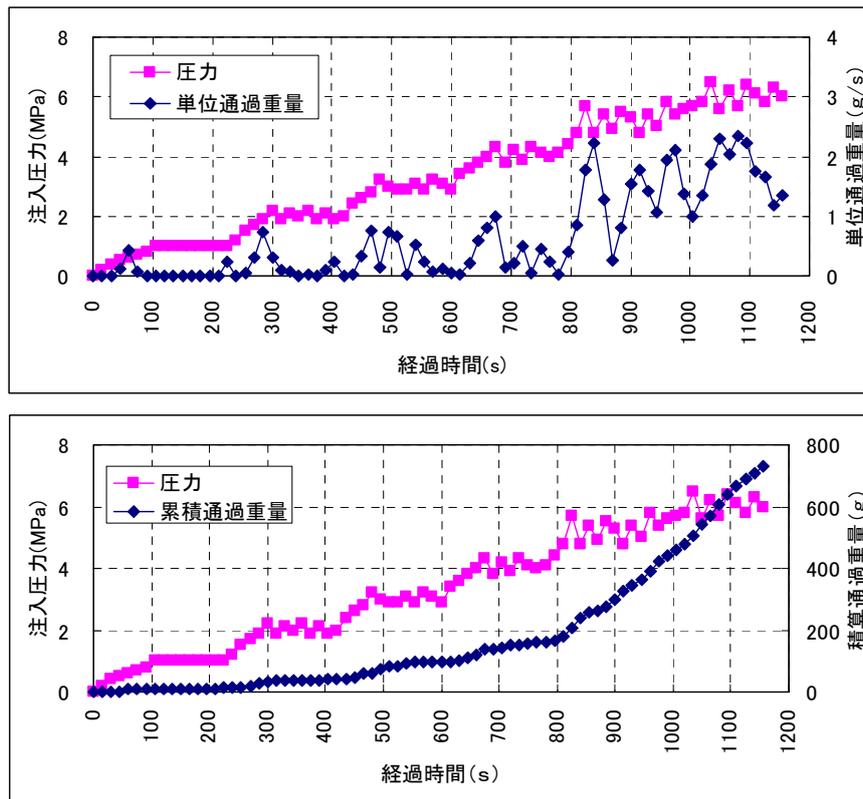


図 4.4-26 通過グラウト量の経時変化（油圧式インジェクションポンプ使用）

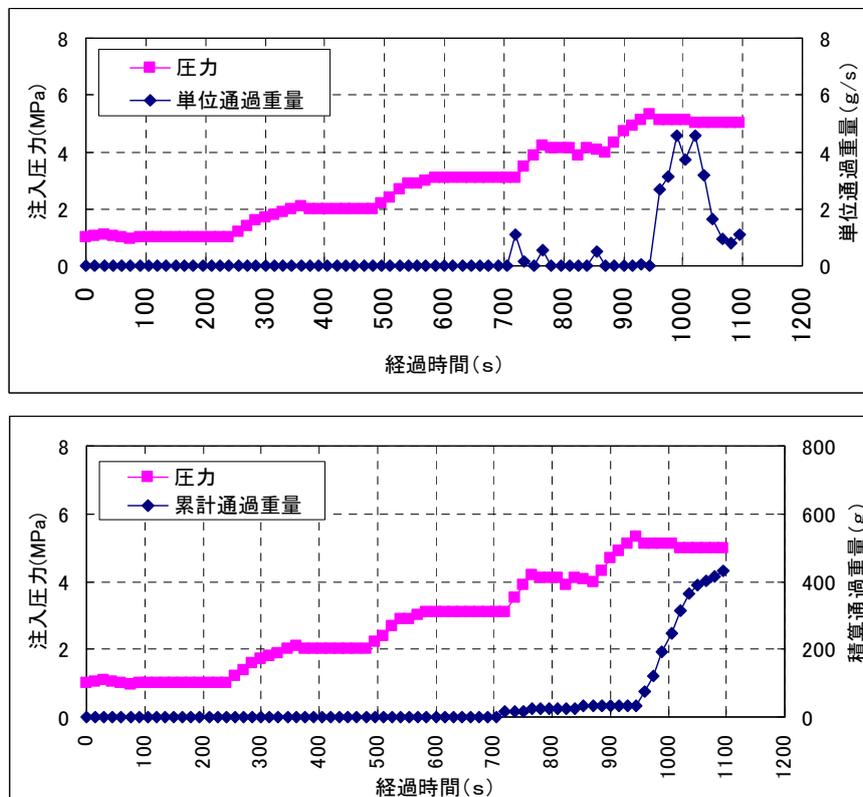


図 4.4-27 通過グラウト量の経時変化（2連式複動ポンプ）



図 4.4-28 フィルターケーキ発生状況（連続加圧）
 (左図：油圧式インジェクションポンプ、右図：2連式複動ポンプ)

(3) 高圧加圧試験

(i) 試験方法

連続加圧試験でグラウトが通過し始めた圧力（5.0MPa）及びその直近の2種類の圧力（3.0、4.0MPa）で個別の注入試験を実施した。注入材料は連続加圧試験と同様に配合3を使用した。加圧方法は低圧加圧試験と比較するために、注入圧力を1.0MPaに高めた状態から試験を開始した。その結果、注入圧力は試験スタート時点で1MPaとなっている（図 4.4-29参照）。測定は注入開始から終了まで連続してグラウト通過重量を測定し、注入終了後に目詰まりの発生状況（フィルターケーキの生成）を目視により観察した。試験フローを図 4.4-30に示す。

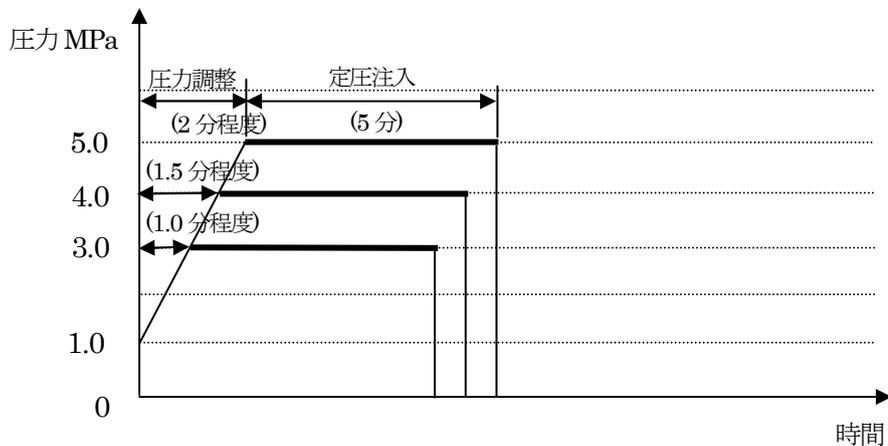


図 4.4-29 高圧加圧試験の昇圧ステップ図

表 4.4-14 試験ケース（高圧加圧試験）

グラウト配合	スリット開口幅	圧力
配合3 (W/C=1.6、GA=10%)	50 μm	1.0MPa⇒3.0MPa（5分間保持）
		1.0MPa⇒4.0MPa（5分間保持）
		1.0MPa⇒5.0MPa（5分間保持）

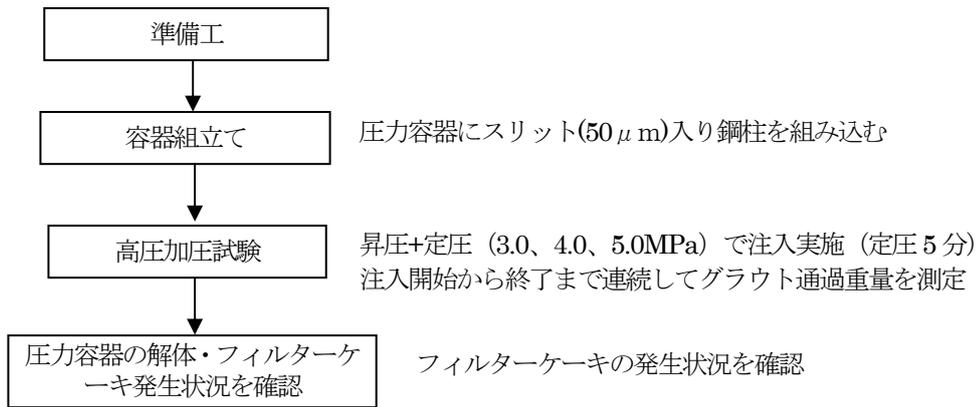


図 4.4-30 高圧加圧試験施フロー図

(ii) 試験結果

単位時間当りの通過グラウト量の経時変化を低圧加圧試験結果と比較して図 4.4-31 (3MPa 载荷時)、図 4.4-32 (4MPa 载荷時)、図 4.4-33 (5MPa 载荷時) に示す。また、累計通過量をまとめて図 4.4-34 に示す。また、通過したグラウト材の平均比重を表 4.4-15に、注入終了後に観察されたフィルターケーキの発生状況を図 4.4-35に示す。

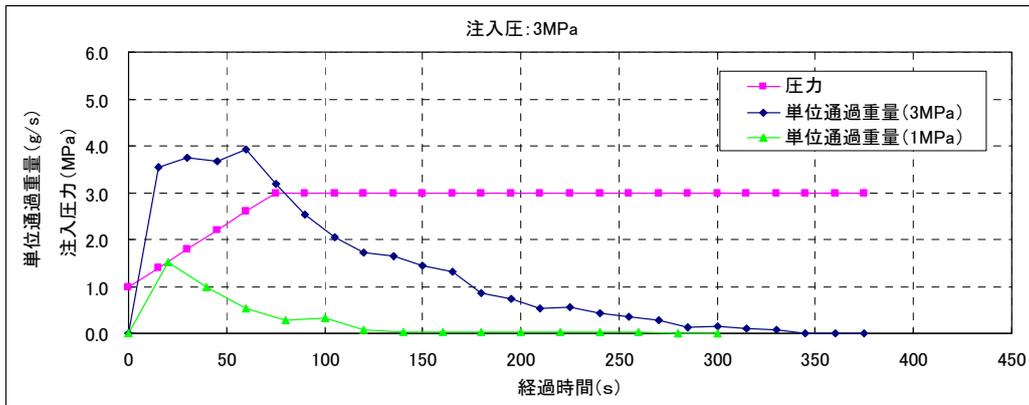


図 4.4-31 単位時間当りの通過グラウト量の経時変化 (高圧加圧試験 : 3MPa)

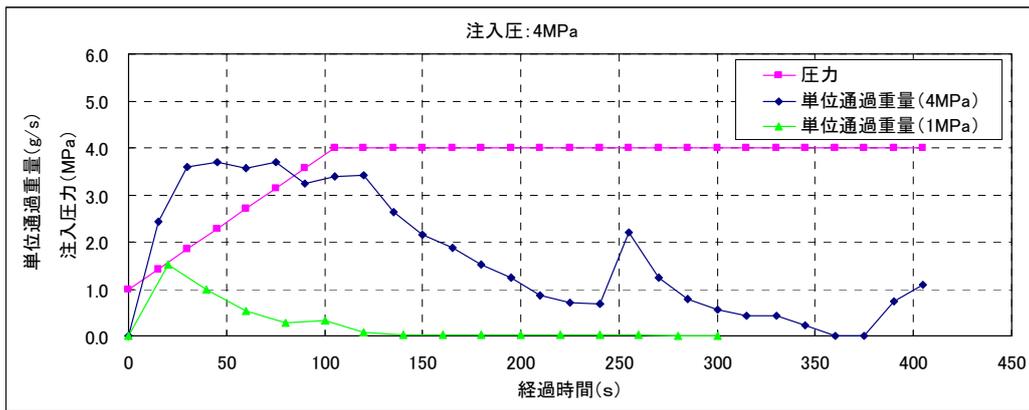


図 4.4-32 単位時間当りの通過グラウト量の経時変化（高圧加圧試験：4MPa）

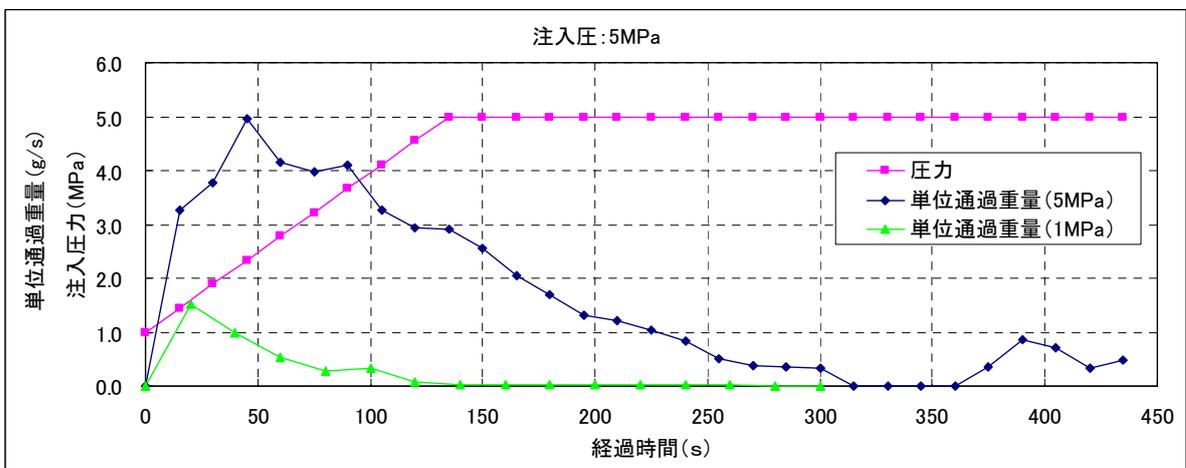


図 4.4-33 単位時間当りの通過グラウト量の経時変化（高圧加圧試験：5MPa）

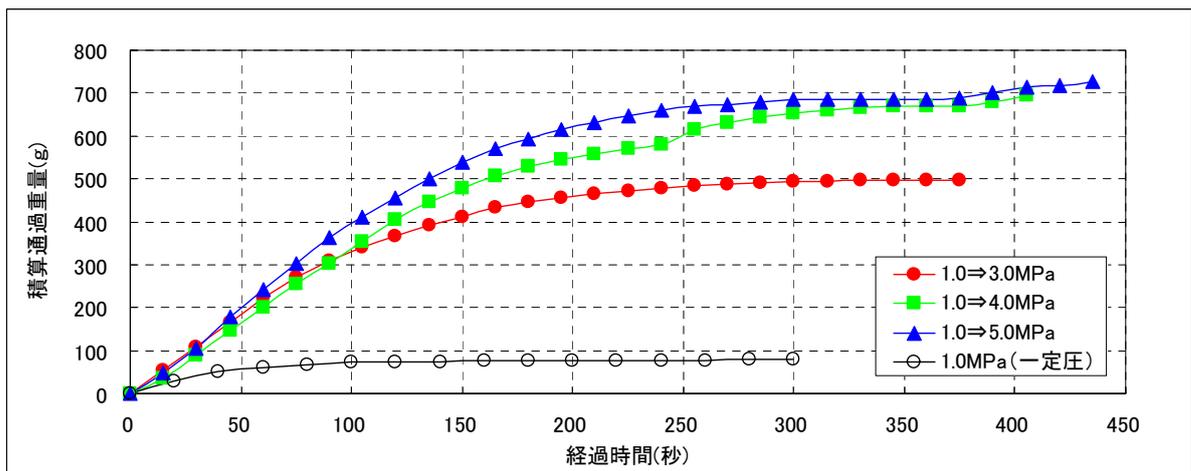


図 4.4-34 累計グラウト通過重量の経時変化

表 4.4-15 通過したグラウト材の平均比重

圧力	通過したグラウト材				グラウト比重 (配合値)
	体積 (cc)	重量 (g)	平均比重	配合値に対する割合	
1.0MPa⇒3.0MPa (5分間保持)	380	496.1	1.31	0.98	1.34
1.0MPa⇒4.0MPa (5分間保持)	550	695.5	1.26	0.94	
1.0MPa⇒5.0MPa (5分間保持)	570	725.7	1.27	0.95	
P=1.0MPa (5分間保持)	61	78.3	1.28	0.96	



図 4.4-35 フィルターケーキ発生状況

(左図：1.0⇒3.0MPa、中図：1.0⇒4.0MPa、右図：1.0⇒5.0MPa)

上記の試験結果より、以下の傾向がわかる。

- ・ 図 4.4-31～図 4.4-33より、いずれのケースにおいてもグラウトの単位通過重量は、時間の経過とともに低下する傾向にある。特に圧力の上昇過程において通過流量が多く、圧力が一定に達した後は通過流量が低下する傾向にある。
- ・ 表 4.4-15より、通過したグラウトの積算重量は、載荷圧力=3、4、5MPa に対して 496.1、695.5、725.7g となっており、1.0MPa 載荷時の 78.3g に対して、6、9、9 倍と圧力の増加割合以上に大きく増加している。
- ・ 表 4.4-15より、通過したグラウト材の比重は低圧時（1MPa）と高圧時（3、4、5MPa）において、配合値より若干低下している（0.94～0.98）程度であり、グラウト材がスリットにおいて大きく濾過されるという傾向は見られない。
- ・ 図 4.4-35より、フィルターケーキの発生状況は、いずれのケースにおいてもスリット上部の溝は確認されておらず、むしろスリット上が盛り上がった状態となっている。

以上より、3MPa 以上の高圧注入を実施した場合、低圧注入時（1.0 MPa）に比べて明らかに通過流量は増加した。しかしながら、通過流量とスリット上に形成されるフィルターケーキの関係（溝の生成）については、明確な関係は確認されなかった。

4.5 本試験基本計画の作成

前節で実施した予備試験の結果を踏まえて、次年度以降に以下の目的で実施する目詰まり試験に関して、その基本試験計画を作成する。

- 試験の目的

低圧から高圧まで载荷可能な目詰まり試験装置を用いることにより、①目詰まり発生現象と、グラウト材の粒径分布、粘性、及び圧力との関係を把握する、② $100\mu\text{m}$ 以下の微小亀裂（目標値： $50\mu\text{m}$ ）へ浸透可能となるグラウト材料の配合を選定し、将来的に瑞浪深地層研究所において実施する原位置試験に使用するグラウト材料の絞り込みを実施する。

4.5.1 予備試験における反省点

予備試験を実施した結果、試験装置、及び試験方法に関して数種類の問題点があることが判明した。そこで、以下にこれらの問題点を整理し、それぞれに対する解決方法を提示する。

- スリット試験装置

- ・ 問題点：グラウト材については、 6MPa までの载荷段階においてグラウト材の漏れは確認されなかった。しかしながら、水による通水試験及び耐圧試験時に試験装置中央部からの水の滲みだしが確認された。特に、耐圧試験時には $5\sim 8\text{MPa}$ 程度で漏水が激しくなった。
- ・ 解決方法案：今回の試験装置においてはスリット幅（ 40mm ）に比べて、スリット入り鋼柱の直径が 50mm と小さく、スリットの外側のネジの切り代が片側 5mm と狭いため、2枚の半割りした鋼柱を閉じ合わせるために小径のM4ネジしか設置するスペースが無かった。しかしながら、M4ネジは剛性が低いため、今後高圧载荷を繰り返す場合、その止水性が懸念される。そこで、図4.5-1に示すようにスリット入り鋼柱の直径を広げ、強度に余裕のあるネジを使用し、さらにスリットの両側に止水ゴムを設置することが考えられる。

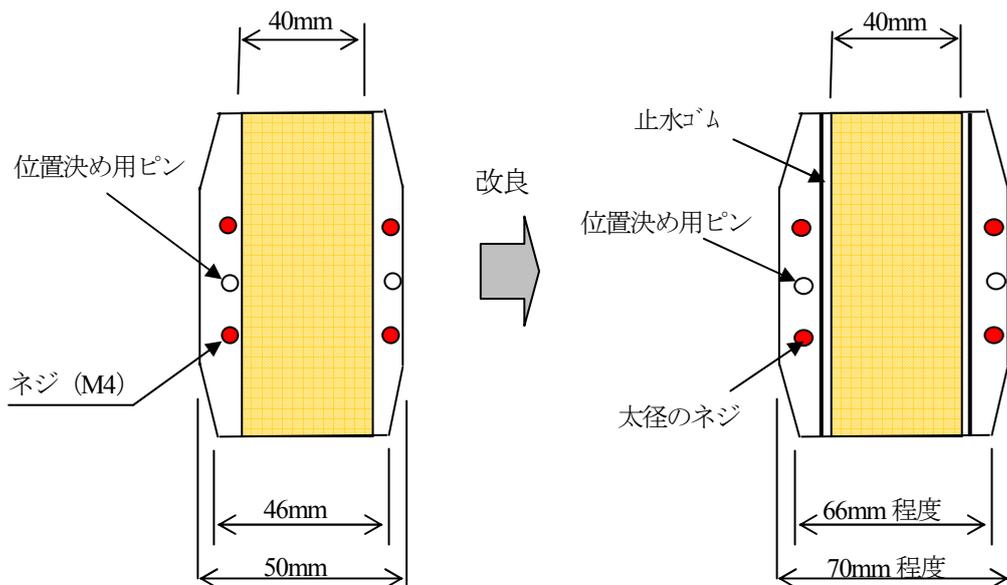


図 4.5-1 スリット入り鋼柱の改良案

● 加圧装置

- ・ 問題点：今回の試験においては、実際のグラウト工事に於いて使用する以下の2種類のポンプを利用した。
 - ・ 油圧式インジェクションポンプ
 - ・ 2連式複動ピストンポンプ（インバーター制御）

インジェクションポンプの場合、ポンプ内のピストンによる振動により荷重圧力が脈動する。ポンプと試験装置の間に、電磁流量計を入れて圧力管理を実施しているが、その制御が十分ではないため、特に5MPa程度以上の高圧荷重時では変動幅が10%以上に達する。一方、インバーター制御による2連式複動ポンプの場合は、変動幅は小さいが荷重可能な上限圧力が5MPaと低いことが問題となる。また、荷重装置に比べて加圧ポンプサイズが大き過ぎるため、ポンプから吐出されたグラウト材の大半が電磁流量計を通してアジテータにリターンされる（図4.5-2参照）という非効率な加圧方法となる。さらに、ポンプ寸法が大き過ぎるため、屋内において試験が実施出来ないという点も問題であった。

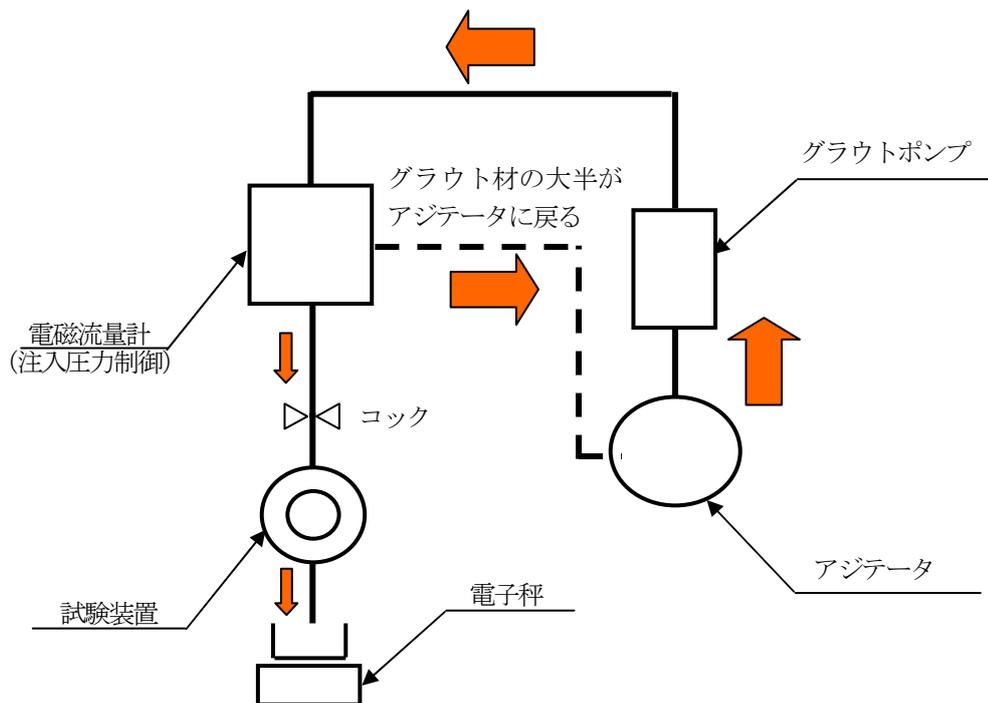


図 4.5-2 グラウト材の流れ

- ・ 解決方法案：高圧状態において一定圧の加圧を行うために、図4.5-3に示すような圧力装置を作成し、油圧ポンプ（定圧）等を組合せ、油圧により荷重圧力を一定に保つことが考えられる。この場合、試験に必要なグラウト量は数L程度であるため、内空がφ20～30cm、高さ20～30cm程度の圧力装置で十分である。

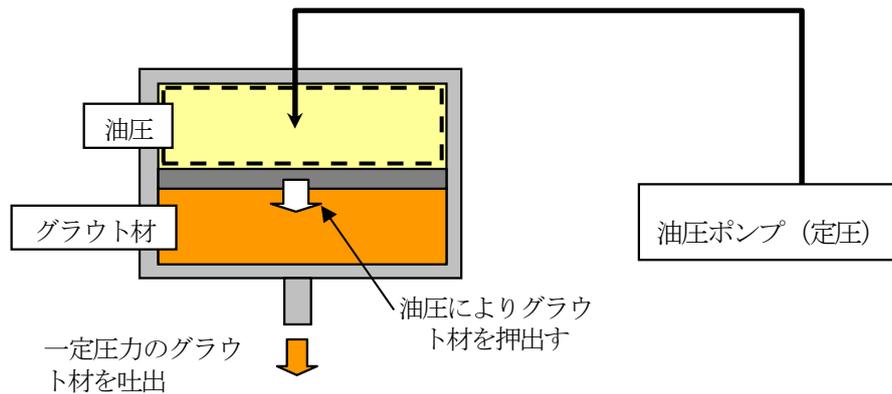


図 4.5-3 定圧ポンプのイメージ図

- 温度の影響
 - ・ 問題点：屋外で試験を実施したため、グラウト材料の温度が試験途中で変化したため、グラウト材料の経時変化特性が変化した可能性がある。
 - ・ 解決方法案：図 4.5-3に示した簡易な加圧装置を使用することにより、屋内において試験が実施出来るため、試験中の温度変動を小さく抑えることが可能となる。
- 試験装置の設置方向
 - ・ 問題点：試験装置を鉛直方向に立て、上から下向きにグラウト材を注入したため、ブリーディングにより沈降したセメント粒子がフィルターの上面に溜まりフィルターケーキとなった可能性がある。本来は、微小幅のスリット上面における加圧脱水により分離したセメント粒子によるフィルターケーキのみを測定すべきであるが、今回測定したフィルターケーキはブリーディングにより分離したセメント粒子が上乘せされた値となっている可能性がある。
 - ・ 解決方法案：試験装置は逆向きに設置し、下から上向きにグラウト材を注入し、さらに注入口とスリット入り鋼柱間の空間を広げることにによりブリーディングにより分離したセメント粒子を下側に付着させ、スリット上面にはスリットにより加圧脱水されたセメント粒子のみが付着する構造とすることが考えられる（図 4.5-4参照）。

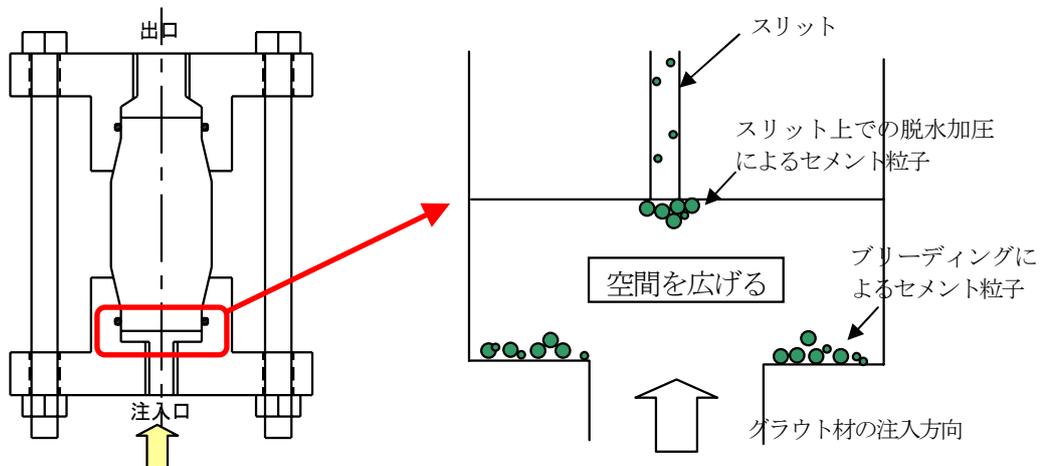


図 4.5-4 試験装置の設置方向

4.5.2 基本計画案の作成

(1) 使用材料

以下のセメント材料および懸濁型特殊シリカについて試験を実施する。

- 主材
 - ・ 普通粒径：ポルトランドセメント、高炉セメントB種（比較用として使用）
 - ・ 超微粒粒径：超微粒子セメント（複数種類を使用）、懸濁型特殊シリカ
 - ・ 超々微粒粒径：超々微粒子セメント（本年度調査結果、5章参照）
- 混和剤/材
 - ・ 分散剤：メラミン系、ナフタリン系、ポリカルボン酸系（複数種類）
 - ・ シリカフェームスラリー（グラウトエイド）

(2) 試験項目

- グラウト物性の確認試験：グラウト材料の基本性状の把握
 下記の試験を実施することにより、上記に示したセメント材料及び分散剤について、グラウトエイドと相性の良い材料を選定する。また、分散剤については適切な種類および添加量についても検討を行うものとする。
 - ・ ブリーディング試験
 - ・ 粘性試験：回転粘度計による降伏強度と粘度の測定
 - ・ 強度試験：一軸圧縮強度、初期せん断強度
- 目詰り特性確認試験：グラウト材料の目詰り特性の把握
 上記により選定された材料及び配合を用いて、圧力、水セメント比をパラメーターとした高圧目詰り試験を実施し、粘性、圧力、粒子サイズと目詰り特性の関係について検討する。

(3) 検討フロー

図 4.5-5に示すように、グラウト材料の基本特性を把握し、次に目詰り特性試験を実施し、グラウト材料の基本特性と目詰り特性の関係を把握するものとする。

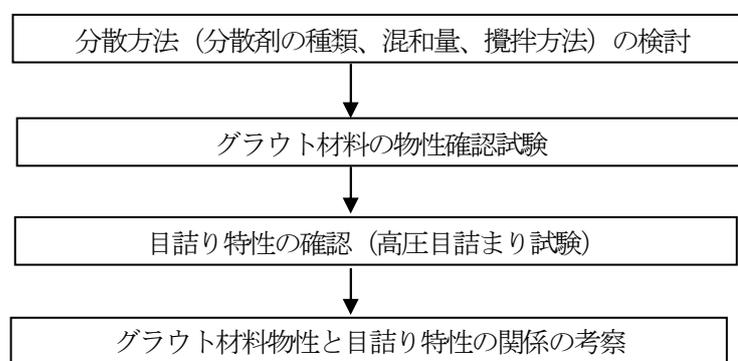


図 4.5-5 目詰り特性の検討フロー

4.6 まとめ

放射性廃棄物地層処分においては、極めて高い止水性能が望まれるため、 $100\mu\text{m}$ 程度あるいはそれ以下の微小な亀裂まで浸透改良する必要がある。このため、亀裂入口あるいは亀裂開口幅の減少部における目詰まり特性の把握が重要となる。そこで、本章においては、まず既往の目詰まり試験方法に関する調査を実施した。特に、放射性廃棄物地層処分研究において使用されている試験方法について調査した結果、いずれの試験方法においても大気圧程度の低圧状態において、実施されていることが判明した。しかしながら、放射性廃棄物地層処分において使用される材料は従来のグラウト材料と比較して粘性の高い材料になる可能性が高い。このため粒径分布のみでなく、高い粘性に起因して目詰まりが生じる可能性がある。一方、高い注入圧力を载荷した場合、目詰まりの原因となる亀裂入り口でのフィルターケーキの生成が抑制され、目詰まりが生じにくくなるという報告もなされている。そこで、最大 10MPa の差圧を载荷可能な高圧試験装置を考案し、試作機を製作した。この試作機によりシリカフェームスラリー（グラウトエイド）を混入した高濃度（水粉体比=1.0、1.6）グラウト材について予備試験を実施した。その結果、 1MPa の注入圧力では $80\mu\text{m}$ 以上のスリットしか注入できなかったが、 $3\sim 5\text{MPa}$ まで注入圧力を载荷すると、 $50\mu\text{m}$ のスリットにおいてもある程度注入可能となり、高い注入圧力の载荷により目詰まりの発生を抑えることの可能性が確認された。

しかしながら、目詰まり特性試験に関する試験装置及び試験方法について、解決すべき課題があることが判明した。そこで、これらの課題の抽出を行い、解決案を提示した。また、次年度以降実施する本格的な目詰り特性試験について、その基本計画を作成した。

第4章参考文献

- 1) Greenfield, F., Ilett, J., Ito, M., McCrohon, R., Heath, G., Tweed, J., Williams, J., Yui, M.: "The Effect of Cement Additives on Radionuclide Solubilities", *Radiochim. Acta* 82. pp.27-32 (1998)
- 2) Bodén, A., Sievänen, U.: "Low-pH injection grout for deep repositories –Summary report from a co-operation project between NUMO(Japan), Posiva(Finland), and SKB(Sweden)", SKB R-05-40, (2005)
- 3) 西垣誠、見掛信一郎、小松満、Kankam-Yeboah Kwabena : 亀裂性岩盤におけるグラウトの注入範囲と有効間隙率の評価、土木学会論文集、No.743、III-64、pp.199-212 (2003)
- 4) Hjertström, S.: "Microcement-Penetration versus particle size and time control", 4th Nordic Rock Grouting Symposium, pp.62-71(2001)
- 5) Kronlf, A.: "Injection Grout for Deep Repositories-Low-pH Cementitious Grout for Larger Fractures: Testing technical Performance of materials", Posiva working report 2004-45 (2004)
- 6) Tolppanen, P., Syrjänen, P.: "Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden, and Norway-Literature Study", Finnish Tunnelling Association (2003)
- 7) 西垣誠、小松満、山本浩志、見掛信一郎 : 亀裂性岩盤におけるグラウトの浸透挙動と目詰まり特性に関する研究、土木学会論文集 No.715/III-60、pp.311-321 (2002)
- 8) Elkem 社 : GroutAid に関するパンフレット

5. より微小な亀裂に浸透可能なグラウト材料の調査

放射性廃棄物地層処分における要求止水レベルは、建設段階における周辺地下水環境に与える擾乱の抑制、操業段階における人工バリア構築のための環境の整備、等を考慮してサイト条件に応じて決定されるものと考えられる。このため、処分候補地が決定していないわが国では、現段階において要求止水レベルを明確に決定することは出来ないが、3.3節で調査した海外の地層処分研究（スウェーデン、フィンランド等）では、 $100\mu\text{m}$ 以下の微小亀裂の改良を目標としており、わが国においてもこのような微小亀裂を改良するためのグラウト技術が将来的に必要となる可能性は否定できない。

そこで、本章においては、このような $100\mu\text{m}$ 以下の微小な亀裂に対しても浸透可能なグラウト材料の可能性について調査を実施する。

具体的には、以下に示す2種類の材料系列について調査を実施する。

- ・ 懸濁型材料：既往材料の粒径成分の調整（大粒径成分の除去）
- ・ 溶液型材料：岩盤グラウトに適用する新材料の調査

5.1 懸濁型材料

懸濁型材料としては、放射性廃棄物地層処分においてこれまで適用が検討されてきた以下の材料について、その粒径成分の調整可能性を調査する。また、Eklund¹⁾によると微小粒径成分の少ない狭い粒径分布曲線を有する材料の方が浸透性能に優れているという指摘もあるため、微小な粒径成分の除去についても検討の対象とする。

- ・ セメント
- ・ ベントナイト

5.1.1 セメント

セメント系材料の細粒化に関する研究としては、日鐵セメント株式会社による以下の「超々微粒子セメント（仮称）」の開発が挙げられる。

(1) 微小化の方法

粗粉碎した原料をミルで粉碎しながら、高性能分級機で段階的に分級することで、超微粒子部分を選別する。

(2) 微小化した材料

超々微粒子セメントの粒径加積曲線を、普通ポルトランドセメント、超微粒子セメントと比較して図 5.1-1に示す（図中の青線）。同図に示すように、超々微粒子セメントの最大粒径は $10\mu\text{m}$ 以下と微細化に成功している。さらに、セメント系グラウト材料においては、超微粒成分は、団粒化し浸透性能に悪影響を与えることがあるが、超々微粒子セメントにおいては、 $0.4\mu\text{m}$ 以下の超微粒成分を除去しているため、浸透性に優れたグラウト材料になりうる可能性があると言える。

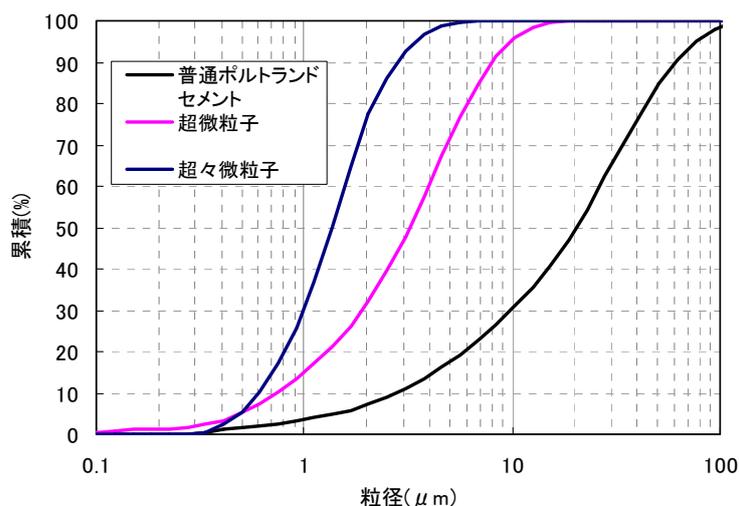


図 5.1-1 超々微粒子セメント（仮称）の粒径加積曲線

(3) コスト

- ・ 普通ポルトランドセメント (25kg 袋入り) 18円/kg
- ・ スーパーファイン (20kg 袋入り) 165円/kg
- ・ 超々微粒子セメント 400円/kg (推定概算費用)

(4) その他の留意点

- ・ 粒子が小さいため、材料の攪拌にあたっては必ず高性能分散剤を併用し、高速ミキサーで混練することが望ましい。

*資料提供：日鐵セメント株式会社

5.1.2 ベントナイト

(1) 分級方法

ベントナイトの分級方法については、鈴木²⁾により示されている。そこで、鈴木の研究を中心に、分級および合成方法について以下に整理する。

(i) 空気（風力）分級（air classification）

ベントナイト原鉱を乾燥し、微粉碎した後、空気（風力）分級機（空気中における遠心分離機）にかけて微粉を集める。

空気分級方法としては、高速回転する分級ローターで粉末粒子を高速で円運動させておき、粒子に働く遠心力とは逆方向に空気流を作用させると、粗粒子では空気流による抗力よりも遠心力を強く受け、微粒子では遠心力よりも空気流による抗力を強く受けるため、粗粒子と微粒子とを分離することが可能であるという現象を利用している。近年の進歩した空気分級機を用いることにより、分級点をサブミクロンに設定することも可能である。図 5.1-2 に日清エンジニアリング（株）の精密分級機を示す。

特徴としては、以下が挙げられる。

- ・水を使わないので乾燥コストが不要になり、安価な精製品を得ることが出来る。
- ・ベントナイトを構成している鉱物を空気中で一次粒子にまで分散させることは不可能なので、粒度による分級は出来るものの鉱物間の分離は不完全となる。

TURBO CLASSIFIER

ターボクラシファイア

TC-100II

TC-15NS

ダブル分散機構で高い精度の分級を実現します。

ターボ理論に基づく空気整流機構が、分級の精度と効率を高めました。

微粉再回収機構により粗粉分級精度と処理能力を高めました。

ローターの回転と空気量の制御により広い範囲の分級を可能にしました。

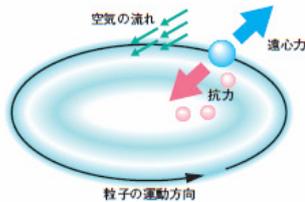
コンパクトな設計は設置場所を選ばず作業性を高めました。

コンピューター制御システムで完全自動運転を可能にしました。

※耐摩耗仕様、付着防止仕様、不活性ガス仕様等特殊仕様も用意しています。

世界ではじめてサブミクロン分級を実現。
幅広い分野の粉体を
精密に効率よく分級します。

原料投入口より供給された粉体は、空気の流れに乗った状態で分散羽根と分散円板で均一分散されながら分級室に送り込まれます。ここで粉体の各粒子は回転による遠心力と、半径方向へ流れる空気流の抗力を受け、粗粒子は遠心力により外側へ、微粒子は抗力により内側へ移動し、分級されます。



■仕様

項目 型式	分離径(μm)		処理量 (kg/h)	回転速度 (min ⁻¹)	空気量 (m ³ /min)	圧損 (kPa)	動力 (kW)	質量 (kg)
	微粉型	粗粉型						
TC-100 [※]	2~50	5~120	~8,000	200~2,000	150~300	2.5~5.0	45~75	5,000
TC-100	2~50	5~120	~4,000	300~2,500	70~120	2.5~5.0	22~37	1,500
TC-60	1.5~50	5~120	~1,000	300~5,000	30~100	2.5~5.0	7.5~75	1,000
TC-40	1~50	3~120	~200	300~6,000	15~35	2.5~5.0	3.7~15	700
TC-25 ^{※※}	0.6~30	2~100	~50	500~7,000	3~9	—	2.2 11	750
TC-15 ^{※※}	0.5~20	2~100	~10	700~11,000	1~3	—	1.5 3.4	400

[※] TC-110も用意しております。
^{※※} コンピューター運転のN型、マニュアル運転のM型があります。

■構造断面図

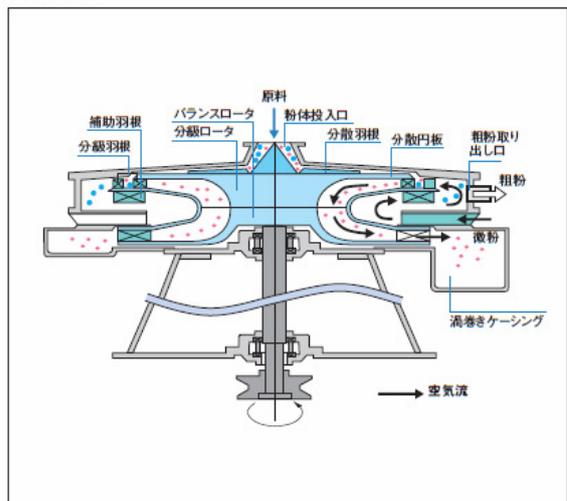


図 5.1-2 精密空気分級機
(参考文献 3) より引用)

(ii) 水簸 (すいひ : hydraulic elutriation)

スメクタイトを主成分とするベントナイトは、石英、オパール、長石、ゼオライト、カルサイト、ドロマイト等の様々な鉱物を副成分として含んでいる。これらの副成分鉱物はスメクタイトに比して粒度が粗く、形状異方性の小さい球形に近い粒子であるので、ベントナイトを水に分散させ、粒度分離により除去することが可能である。水中における粒度分離を「水簸 (すいひ)」と呼んでいる。

水簸では、以下に示すストークスの式が適用されている。

<ストークスの式>

一般的に、粒子を水中に分散させると、その粒子は粒子径に応じてストークスの式で表される沈降速度で沈降する。

$$v = \frac{(\rho - \rho_l)d^2g}{18\eta} \quad (\text{ストークスの式}) \quad \text{数式 5.1-1}$$

v : 粒子の沈降速度(cm/s)

d : 粒子の直径(cm)

ρ : 粒子の密度(g/cm³)

ρ_l : 分散液の密度(g/cm³)

g : 重力加速度(cm/s²)

η : 分散液の粘度(mPa·s)

ストークスの式より明らかなように、沈降速度 v は d の二乗に比例して小さくなるので、粒子径 d が小さくなると沈降に長時間を要することになる。工業的には粗粒子の分離に長時間を掛けることができないので、遠心分離機を利用している。遠心力 G の遠心分離機を用いることにより、沈降時間を $1/G$ に短縮することが可能となる。

また、水簸作業における注意事項としては、分離したい粗粒子はスメクタイト分散液中を沈降するため、分散液の濃度が高いと分散液の密度、粘性が高くなり分離には極めて不利な条件となることである。このため、水簸が適用できるのはかなり薄い溶液に対してのみである。

上記の水簸作業により、クニミネ工業では、クニピア F (高純度モンモリロナイト)、クニピア P (超高純度モンモリロナイト) の 2 種類の高純度スメクタイトが製品化されている。

(iii) 水熱合成

現在、スメクタイトの工業的な合成方法であり、得られるスメクタイトの粒度 (層面の広がり) は 10~100nm のオーダーとなる。

クニミネ工業の合成スメクタイト (サポナイト、商品名 : スメクトン SA) の製造方法を図 5.1-3 に示す。硫酸マグネシウム、硫酸アンモニウム、水ガラス、水酸化ナトリウムなどの工業薬品を原料として、サポナイト組成の共沈ゲルを作り、ろ過・洗浄して副成塩を除いた後にオートクレーブに仕込み、水酸化ナトリウム溶液を加えて pH 調整し、水熱処理してサポナイトを合成する。

表 5.1-1 にスメクタイト (3 種のベントナイト製品) の特性比較を示す。

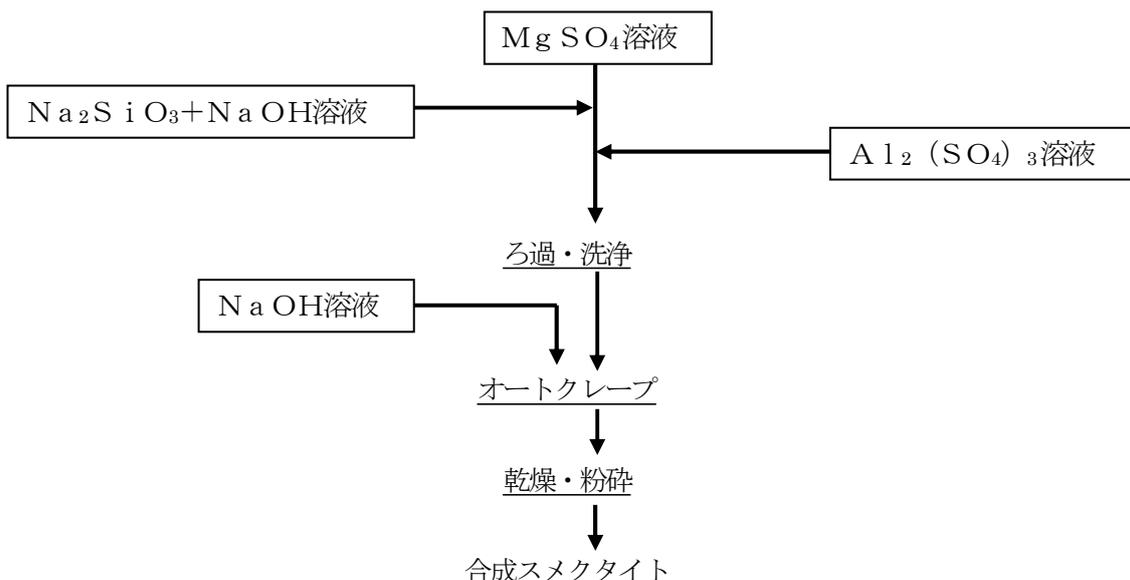


図 5.1-3 水熱合成によるスメクタイトの製造方法

表 5.1-1 スメクタイトの特性比較²⁾

銘柄		クニピア F	クニピア P	スメクトン SA
膨潤力 (ml/2 g)		65	44	62
pH (2%)		10.2	10.1	9.9
導電率 (2%, μ S/cm)		675	660	1300
4% 分散液の粘度 (mPa·s)		280	612	5500
可視光透過率 (% , 1% 分散液)		1	8	83
粉末の白色度 (%)		70	72	95
1 次粒子径 (nm)		100~2000	100~1000	10~100
比表面積 (m ² /g, N ₂ , BET)		20	3	160
MB 吸着量* (mmol/100 g)		130	130	132
陽イオン交換容量 (meq/100 g)		108.6	107.4	71.2
イ 浸 出 量 陽	Na (meq/100 g)	114.1	102.7	92.5
	K	2.8	2.3	-
	Mg	3.4	3.3	49.8
	Ca	18.2	17.1	-
化 学 組 成	SiO ₂ (%)	64.4	63.8	56.4
	Al ₂ O ₃	25.9	24.9	5.8
	Fe ₂ O ₃	3.5	2.7	<0.01
	MgO	2.4	3.6	33.2
	CaO	0.7	0.6	0.07
	Na ₂ O	2.3	3.7	2.9
	K ₂ O	0.1	0.1	0.0
ア ス ベ ク ト 比 (粒 子 数 基 準)	最 小	80	-	-
	平 均	320	-	50
	最 大	1120	-	-
石英含有率 (%)		0.5~1	<0.1	-
備 考		山形産 一般品	山形産 超高純度品	水熱合成 サボナイト

*メチレンブルー吸着量

(2) 作成した微小粒径材料

上記のように、空気分級、水簸による分級方式に加えて、工業的な合成方法が存在する。しかしながら、放射性廃棄物地層処分においてベントナイトグラウトに要求される機能は、天然バリア機能の改良、修復機能等であり、10万年間を越える極めて長期間の化学安定性が要求される。このため、人工材料よりはむしろ天然材料の方が望ましいため、以下では人工材料である合成ベントナイトは検討の対象から外し、分級製品を含めた天然材料のみについて検討を実施するものとする。

(i) 基本特性

原料ベントナイト（クニゲルV1）、空気分級材料、水簸材料（クニピアF）の3種の材料に関する基本物性を比較して表 5.1-2に示す。

表 5.1-2 ベントナイト材料の基本特性比較

試料	原料ベントナイト (クニゲルV1)	クニゲルV1の 空気分級材料	水簸材料 (クニピアF)
水分(%)	7.4	5.7	5.7
見掛け比重	0.65	0.28	0.35
pH(2wt%分散液)	9.19	9.60	10.2
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	64	70	124
粘度	4wt%60rpm cp	—	288
	FV 粘度(sec)	31.4	59.3

(ii) 粒度分布

3種類の材料を蒸留水に溶かした場合の粒度分布を比較して図 5.1-4に示す。

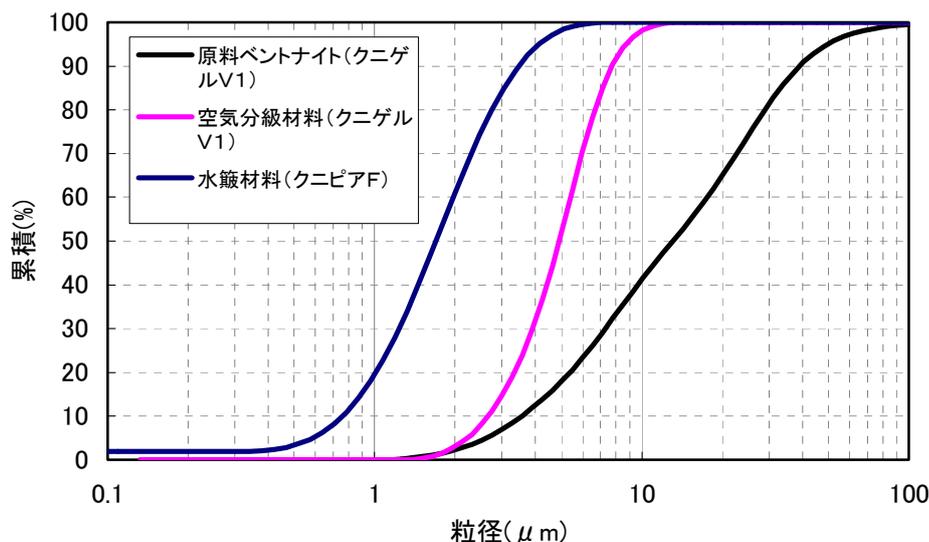


図 5.1-4 ベントナイト材料の粒度分布の比較

(iii) X線回折

図 5.1-4 に 3 種類の材料の X 線回折結果の比較を図 5.1-5 に示す。同図より、クニゲル V1 を空気分級したものは、成分は変化していないが、水簸により分級したクニピア F は成分が変化しておりモンモリロナイトの純度の高い製品となっていることが分かる。

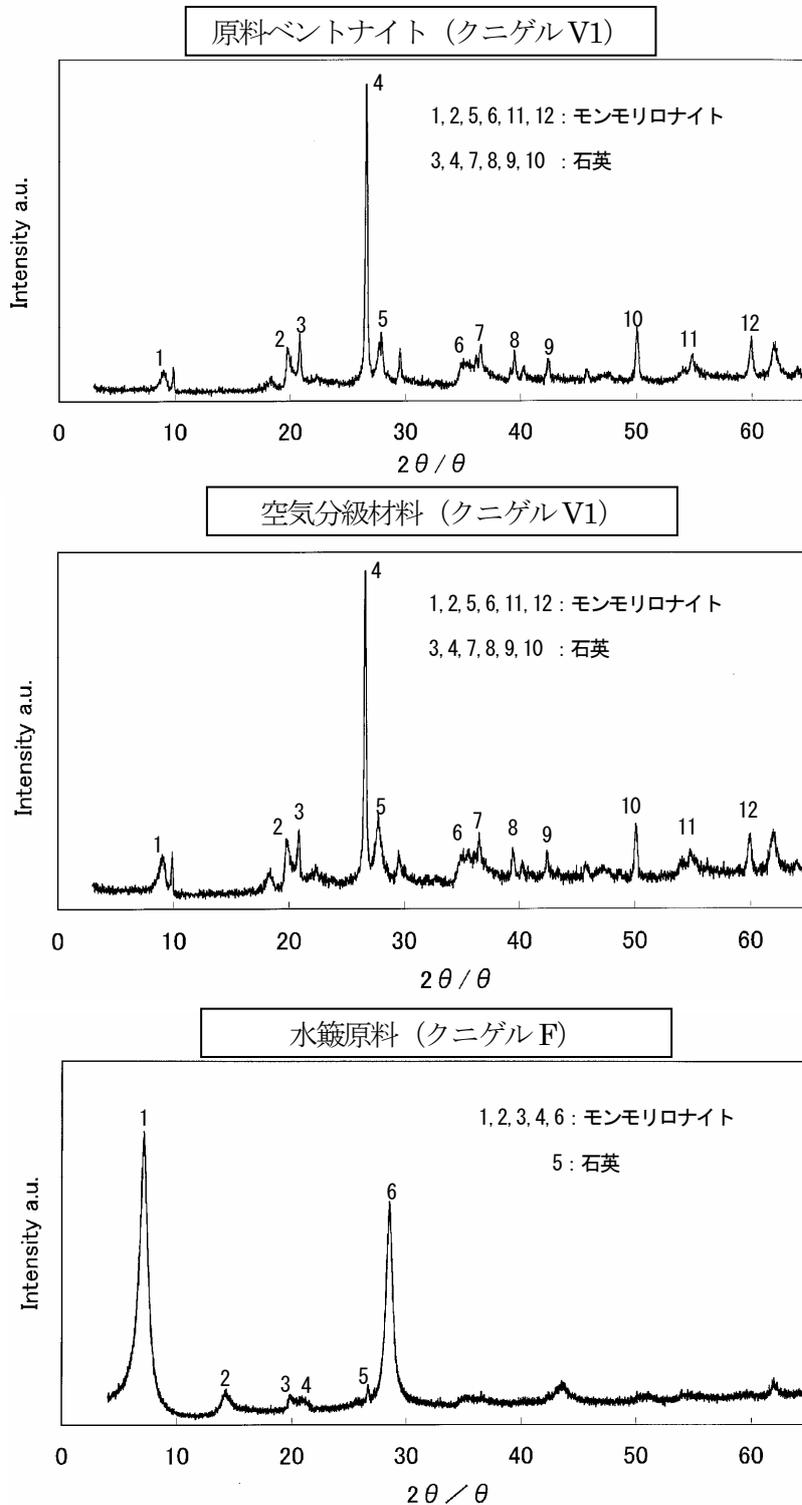


図 5.1-5 X線回折結果の比較

(3) コスト

・原料ベントナイト（クニゲルV1）	37円/kg（随時購入可能）
・空気分級材料（クニゲルV1）	5,000円/kg（100kg製造時）※
・水簾材料（クニピアF）	1,800円/kg（随時購入可能）
・水簾材料（クニピアP）	数万円/kg（受注生産品）
・合成材料（スメクトンSA）	4,500円/kg（随時購入可能）

※空気分級材料に関しては、本来コストが小さいと考えられるが、製品として製造されていないため、今回100kgの特注製造に際しての費用であることに注意。

(4) その他

スメクタイトの特徴は、①膨潤性、②陽イオン交換性、③形状異方性（大きなアスペクト比）、④コロイド性に代表される。これらの特徴から、クレー／ポリマー系ナノコンポジットの材料として利用されており、粗粒子が少ない方が好ましいことから、高純度化、合成材料が用いられている。

微粉状の材料は非常に軽く、製品の梱包の場合、通常のベントナイト（クニゲルV1）では25kgパック（セメント袋と同程度）で取り扱うことができるが、高純度モンモリロナイト（クニピアF）の場合、材料の圧縮が困難であるため、10kgの段ボール箱により出荷される。

材料自体の取り扱いに関しても、湿度条件による吸水、混練時の結合（球状）等の可能性が高く、注意を要すると考えられる。

5.2 溶液型材料

溶液型グラウト材料は、浸透性能に優れているが、懸濁型グラウト材料に比べて強度特性が劣るため、一般的には地下深部における岩盤の止水グラウト材料としては使用されていない。また、従来は耐久性が劣るため、土砂地山等における一時的な仮設の止水を目的として利用されてきた。しかしながら、最近では技術改良により、十分な耐久性を有した恒久グラウト材料が開発されており、軟弱地盤の液状化対策等に利用され始めている。そこで、本章においてはより微小な岩盤亀裂へ浸透可能なグラウト材料として、耐久性の高い以下の溶液型グラウト材料を取り上げ、その現状の技術レベルを把握することとする。

- ・ 酸性シリカゾル
- ・ 活性シリカコロイド
- ・ 低アルカリ水ガラス

5.2.1 酸性シリカゾル

日本においては、一般的に現場において水ガラスに直接酸性反応剤を添加することでアルカリを除去して、酸性シリカゾルを製造している。以下に、その特徴を示す。

- ・ 耐久性：水ガラス中の Na^+ イオンを酸性反応材で中和除去するため、薬液中には Na^+ イオンは存在しない。このため、恒久性が高く、17 年程度劣化していないという現場実績もある（但し、収縮量が大きく、耐久性に関してもセメント等のアルカリに弱い）。
- ・ 強度特性：サンドゲル強度 $0.6\text{N}/\text{mm}^2$ 程度、ホモゲル強度 $0.02\text{N}/\text{mm}^2$ 程度
- ・ コスト：50 円/L
- ・ Si 濃度：9%

5.2.2 コロイダルシリカ

水ガラスのアルカリをイオン交換法によって除去して得られた純粋なシリカからなる活性シリカを増粒して作成した大きな球状シリカ（粒径 10nm 程度）からなるシリカコロイドに、中性の塩を反応材として加えることにより硬化させる溶液型グラウトである（図 5.2-1 参照）。

また、同様な材料が SKB、Posiva、NUMO による低 pH グラウトに関する共同研究⁴⁾ においても取り上げられており、主に SKB が中心となり、現在研究中である（3 章参照）。

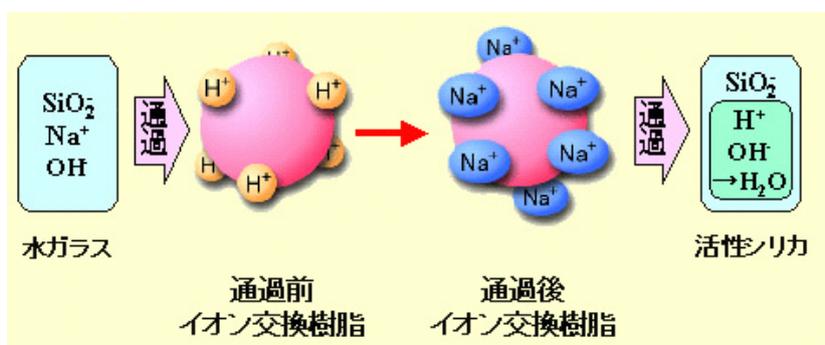


図 5.2-1 パーマロックのイオン交換法概念
(参考文献 5))

(1) 特徴

- ・ 浸透性能：溶液型グラウトであるため、懸濁型グラウト材料に比べて浸透性は非常に高い。
- ・ ゲルタイム調整性能：パーマロック（強化土エンジニアリング社による活性シリカコロイドの商品名）には用途によって数種類あり、ゲルタイムは数秒～12時間の範囲に対応可能
- ・ 長期耐久性能：ホモゲル強度は、1000日の経時変化中も強度が増加することが確認されている。実績はないが、セメント系の注入材料と同様の長期耐久性を有する可能性がある。
- ・ 低アルカリ性能：固結砂の養生水は、pHが6～7のほぼ中性値を示し、注入地盤のpHはほとんど変化しない。
- ・ 強度性能：Si濃度が高く（25%）、高強度のものについてはサンドゲル強度で1.5N/mm²、ホモゲル強度で0.1N/mm²程度
- ・ コスト：300円/L（Si濃度25%）、80円（Si濃度9%）

(2) SKB、Posiva、NUMO 共同研究

- ・ シリカゾル材料：粒径（5-100nm）のコロイダルシリカからなる低pH（<11）の溶液型グラウト材料であり、水ガラスにNaClあるいはCaCl₂を添加しゲル化させている。
- ・ 使用材料：Hallandsås Tunnel（スウェーデン）においては、商品名Cembinder U22が使用され、Äspö HRLにおいては、アルミニウムで改良した商品名Eka Gel EXP36が使用されており、現在はEka Gel EXP36を中心に研究が実施されている（詳細は、3章を参照）。
- ・ 浸透性能：粒径が14nm（±3nm）であるため、浸透性は十分に高いものと考えられ、Äspö HRLにおいては45～50μmの亀裂に浸透した実績がある。
- ・ 強度性能：温度、湿度条件によって変化するが、最終的な一軸圧縮強度は0.1N/mm²程度以上
- ・ 低アルカリ性能：pH10以下

5.2.3 低アルカリ水ガラス

水ガラスを、イオン交換膜に通すことによりNa⁺イオンを除去することで活性シリカを製造し、その後酸性反応剤を添加して酸性シリカゾルを製造する。現在、研究開発が進められている段階である*。

- ・ 耐久性：劣化成分のNa⁺をイオン交換樹脂で除去しているため、耐久性能が高いことが期待されている。
- ・ 強度特性：サンドゲル強度1.0N/mm²程度、ホモゲル強度0.1N/mm²程度
- ・ コスト：150円/L
- ・ Si濃度：20%

*資料提供：ライト工業株式会社

上記の恒久グラウト材料を、水ガラス系注入材、普通セメント、超微粒子セメントと、強度特性、コストに関して比較して表5.2-1に示す。同表より、溶液型グラウト材料は、高強度タイプのものでもホモゲル強度が0.1N/mm²程度とセメント材料に比べて1オーダー低いいため、水圧・地圧ともに高くなる地下深部における適用可能性については今後の研究が必要であると言える。

表 5.2-1 材料特性比較表

	恒久溶液型グラウト材料			比較用		
	酸性シリカゾル	コロイダルシリカ (高強度タイプ)	低アルカリ水ガラス	水ガラス系注入材	普通セメント	超微粒子セメント
特徴	水ガラスに直接酸性反応剤を添加し、酸性シリカゾルを現場において製造	水ガラスのアルカリをイオン交換法によって除去して得られた活性シリカを増粒して作成した大きな球状シリカ (粒径 10nm 程度) からなるシリカコロイドに、中性の塩を反応材として加えることにより硬化させる	水ガラスを、イオン交換膜に通すことにより Na ⁺ イオンを除去することで活性シリカを製造し、その後酸性反応剤を添加して酸性シリカゾルを製造	水ガラスに反応剤を添加し、注入薬液を製造		
強度特性	サントゲル強度： qu ≤ 0.6N/mm ² ホモゲル強度： qu ≤ 0.02N/mm ²	サントゲル強度： qu ≤ 1.5N/mm ² ホモゲル強度： qu ≤ 0.1N/mm ²	サントゲル強度： qu ≤ 1.0N/mm ² ホモゲル強度： qu ≤ 0.1N/mm ²	サントゲル強度： qu ≤ 0.5N/mm ² ホモゲル強度： qu ≤ 0.02N/mm ²	サントゲル強度： qu ≤ 3.0N/mm ² ホモゲル強度： qu ≤ 2.0N/mm ²	サントゲル強度： qu ≤ 3.0N/mm ² ホモゲル強度： qu ≤ 2.0N/mm ²
概略コスト	50 円/L	300 円/L (Si 濃度 30%)	150 円/L	40~60 円/L	2 円/L (W/C=10) 11 円/L (W/C=1)	16 円/L (W/C=10) 130 円/L (W/C=1)
備考	Si 濃度：9% (収縮量が大きく、耐久性に関してもセメント等のアルカリに弱い)	Si 濃度：30% (NUMO-SKB-Posiva の低 pH グラウト研究にて高強度な材料を研究中。)	Si 濃度：20%	Si 濃度：8%		

5.3 まとめ

より微小な亀裂へ浸透可能なグラウト材料として、以下の材料について調査を実施した。

- ・ 懸濁型グラウト材料（既往材料の粒径成分の調整）：ベントナイト、セメント
- ・ 溶液型グラウト材料（耐久性の高い新材料の調査）：酸性シリカゾル、コロイダルシリカ、低アルカリ水ガラス

その結果、以下のことが判明した。

- ・ 懸濁型グラウト材料：ベントナイト、セメントともに微粉碎した後に分級することで、 $10\mu\text{m}$ 以下の微小粒径のみからなる材料を製造することは現状で十分に可能であることが判明した。また、セメント材料に関しては、 $1\mu\text{m}$ 以下の極端な微小な成分を除去し、微小成分の団粒化を防止した材料が既に開発されており、 $50\mu\text{m}$ 程度の極めて微小な亀裂へ浸透することが期待される。しかしながら、これらの材料をグラウト材料に適用した場合の浸透性能等の諸性能については現状では不明であり、次年度以降、これらの材料のグラウト材料としての性能を評価する必要がある。
- ・ 溶液型グラウト材料：岩盤グラウトへの適用可能性がある耐久性の高い溶液型材料として、酸性シリカゾル、コロイダルシリカ（高強度タイプ）、低アルカリ水ガラスを選定し、これらの特長の概要を整理した。これらの材料のうちのいくつかは、軟弱地山の液状化対策として既に適用されており、その耐久性についてはセメント系材料とほぼ同等な耐久性を有しているものと考えられる。しかしながら、高強度タイプのものでもホモゲル強度が $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ 程度とセメント材料に比べて1オーダー以上低いため、水圧・地圧ともに高くなる地下深部における適用可能性については今後の研究が必要である。一方、高強度化を図り増粒化した活性シリカコロイドにおいても粒子径が 10nm と極めて小さいため、微小な岩盤亀裂への浸透性については、超微粒子セメント等の懸濁型グラウト材料に比べて極めて優れているものと考えられる。そこで、地下深部に打設するグラウト材料に要求される強度性能について検討を進めるとともに、これらの材料の高強度化研究の動向についても注意を払う必要があると言える。

第5章参考文献

- 1) Eklund,D.:“Penetrability due to Filtration Tendency of Cement Based Grouts”, Doctoral Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology (2005)
- 2) 鈴木敬三：粘土鉱物の特性とインタカレーション，プラスチック成形加工学会誌「成形加工」，第14巻，第4号，pp.206～212.(2002)
- 3) 日清エンジニアリング（株）カタログ
- 4) SKB：“Low-pH injection grout for deep repositories –Summary report from a co-operation project between NUMO(Japan), Posiva(Finland), and SKB(Sweden)”, (2005)
- 5) 地盤注入開発機構のホームページ:<http://www.jckk.jp/index.php> (2005.02 にダウンロード)

6. まとめ

本研究で実施した検討項目とその結果を以下に示す。

6.1 止水性能に着目したグラウト注入方法の整理

高い止水性能を確保するためのグラウト注入概念を設定するために、まず国内外の地下空洞掘削工事において実施されたグラウト施工実績を調査した。特に、北欧において近年建設されている環境配慮型トンネルにおけるグラウト実績に着目し、その注入方法について整理した。次に、わが国において実施されてきたトンネル工事における止水グラウトの注入方法と比較することで、両者の特徴を整理した。また、海外を中心に、放射性廃棄物地層処分に関連したグラウト研究の現状について調査した。次に、上記の調査結果に基づいて、放射性廃棄物地層処分の地下坑道建設工事において適用すべきプレグラウトの注入概念を作成した。さらに、作成した注入概念に関して、止水性、経済性の観点からその妥当性を評価した。その結果、放射性廃棄物地層処分が対象とするある程度良好な岩盤（特に、瑞浪深地層研究所と同様な結晶質岩）の止水性を高めるグラウト方法としては、北欧の環境配慮型トンネルにおけるプレグラウト概念が参考になり、止水性、経済性の観点からも優れている可能性が高いことが判明した。

6.2 高圧注入時の浸透性能確認試験方法の検討

放射性廃棄物地層処分においては、地下深部の高地圧・高水圧下にある微小な亀裂に対してグラウト材を注入する必要がある。さらに、高水圧下において希釈されずに施工性を向上させるためには、従来のダムグラウトで実施されているように水セメント比の高い薄い材料から順次、濃い配合に切り替えていくのではなく、初期段階から水セメント比のある程度低い濃い材料を注入する必要がある。また、放射性廃棄物地層処分においては人工バリアへの影響の低減、あるいは天然バリア機能の修復を目的としてベントナイト等の天然材料の使用が考慮されているが、ベントナイト材料は地下水による流亡の可能性があるため、ある程度粘性の高い状態で注入する必要がある。上記の理由より、地層処分におけるグラウトはある程度粘性の高い材料をかなり高い差圧をかけて注入する必要がある。

一方、微小亀裂への注入に関しては、亀裂入り口あるいは亀裂内の狭小部における目詰まりが、その浸透性能に大きく影響するが、既往の目詰まり試験方法はいずれも低圧力下において実施されてきた。そこで、高水圧下における微小亀裂への浸透性能を確認するための室内試験方法について検討し、具体的な試験装置を考案した。さらに、実際に試験装置を試作し予備実験を実施することにより、目詰まり試験方法に関する課題を抽出した。最後に、次年度以降実施する目詰まり特性の基本試験計画を作成した。

6.3 より微小な亀裂に浸透可能なグラウト材料の調査

既往の研究においては、高い止水性能を確保するためには、亀裂開口幅 $100\mu\text{m}$ 程度の微小な岩盤亀裂に浸透可能なグラウト材料を用いることが有効と考えられてきた。しかしながら、放射性廃棄物地層処分施設の設置深度は極めて深く地下水圧が高いため、極めて微小な亀裂からもある程度の湧水の発生が予想される上に、要求止水性能に関しても母岩に近い程度まで改良する必要があるため、従来よりさらに細かい亀裂まで改良する必要があることが予想される。

上記を満足するグラウト材料としては、超微粒子セメント系材料、ベントナイト系材料等の懸濁型グラウト材料や溶液型材料が候補として考えられる。そこで、これらの材料を基本として、より微小な亀裂へ浸透可能となる材料の可能性について調査した。具体的には、懸濁型材料に関しては、グラウト材の粒径成分の調整を行い、大粒径成分の除去の可能性について調査した。その結果、最大粒径が $10\mu\text{m}$ 以下のセメント、ベントナイト材料が存在することが判明した。今後は、これらの材料のグラウト材料としての性能を評価する必要がある。また、溶液型材料に関しては、恒久性を有するグラウト材料に関して現状の技術レベルを調査した。その結果、溶液型グラウト材料の強度特性はセメント系に比べて1オーダー以上低いため、土砂地山の液状化対策等に対しては適用実績があるが、地下深部の岩盤グラウトに対しては現状ではその適用性に対して今後の研究が必要であると言える。今後は、これらの材料の技術開発状況をフォローするとともに、地下深部の岩盤グラウト材料に要求される強度特性について研究する必要がある。

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ⁻¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻³ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻² ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻² ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ⁻¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ⁻¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ⁻¹ ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≙ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位系に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	lx	1 lx unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

