

耐久性に優れた溶液型グラウトの岩盤亀裂内での高水圧抵抗メカニズムに関する実験と考察

杉山 博一^{1*}・延藤 遵²

¹清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17）

²清水建設株式会社 土木事業本部（〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3シーバンスS館）

*E-mail: sugiyama.h@shimz.co.jp

高レベル放射性廃棄物等の地層処分では、許容湧水量に加えて地層処分の長期安全性も考慮してグラウト材料の研究が行われている。筆者らは微小な亀裂への浸透性や耐久性に優れている溶液型グラウト材料（コロイダルシリカ）に着目し、基礎的な物性試験を行ってきた。しかし、溶液型グラウトはホモゲルの強度が他のグラウト材料に比較して低く、高水圧への抵抗性が低いことが懸念されている。そこで、岩盤亀裂を模擬した鋼製スリット中に充填した溶液型グラウトに高水圧を作用させて押し出す実験を行ったところ、比較的高い水圧抵抗性を示すことを確認できた。また、実験結果をもとに設計水圧に対する必要注入範囲に関する簡易な試算方法を検討した。

Key Words : colloidal silica, grout, water pressure resistance, parallel plane test

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物等の地層処分における建設時・操業時の湧水抑制対策として、グラウト技術は重要な工学的対策技術である。但し、地層処分は地下300m以上の深部で地下坑道を掘削する必要があるため、グラウト材料には高水圧環境への適応が要求される。コロイダルシリカからなる溶液型グラウト材料¹⁾は、セメント系材料と比較して、他のバリア材料（ベントナイト材料）や周辺地下環境への影響が小さいことや、微小亀裂への浸透性に優れているという優位性があるため、セメント系材料を代替、或いは補完するグラウト材料として期待されている。しかし一方で、硬化後の強度が低いため高水圧に対する抵抗性が低いことが懸念される。

筆者らは溶液型グラウトの平行平板内での高水圧抵抗性を実験的に確認してきた^{2,3)}。その結果、亀裂開口幅が100 μ mの条件で浸透範囲が30cm程度あれば3MPa程度の水圧にも耐えられることが分かったが、実験結果の再現性を含め、メカニズムを十分に検討したとは言えない。そこで、本研究ではさらに同様の実験を追加して行い、高水圧抵抗性メカニズムについて検討を行った。

2. 実験の概要

(1) 溶液型グラウト

実験で用いた溶液型グラウトは、シリカ濃度が30%、

平均粒径が10~20nmのコロイダルシリカに、硬化促進剤（無機塩）を水に溶解したものを混合して作成した。溶液型グラウトの配合を表-1に示す。この配合は施工時の注入可能時間を考慮し、120分後にせん断粘度が20mPa・s程度に達する配合である。

表-1 溶液型グラウトの配合（1L配合）

	コロイダルシリカ	硬化促進材	水	合計
質量(g)	970.4	14.7	192.7	1177.8
容積(mL)	800.0	7.3	192.7	1000.0

(2) せん断強度試験

溶液型グラウトのせん断強度特性を把握するため、直径5cm、高さ10cmの供試体を作成し、材齢を1, 7, 28日として一軸圧縮試験（JIS A1216）、および三軸圧縮試験（JGS 0521）を行った。圧縮速度はいずれも1mm/minであり、三軸圧縮試験の拘束圧は50, 100, 150kPaの3条件とした。

(3) 平行平板による高水圧抵抗性実験

岩盤亀裂内の溶液型グラウトの高水圧抵抗性を評価するため、平行平板装置によって耐水圧を測定する実験を行った。図-1は平行平板装置と側面図を示す。平行平板装置は所定の深さ（以下、スリット開口幅）のスリットを有する底盤にアクリル板と蓋を載せ、ボルトにより挟んで固定する構造となっている。図から分かるように実

験中の溶液型グラウトの状態を丸窓から観察できるようになっている。

図-2は平行平板による実験装置の概要図である。溶液型グラウトを充填した平行平板装置の片側から空圧式ピストンによって水压を段階的に载荷し、ピストンと連動する変位計によりスリット内に注入される水の量をグラウト押し出し量として観測した。

表-2に実験条件を示す。平行平板のスリット幅(B)は0.05mとし、スリット開口幅呼び寸法(E)を100, 200 μ mの2条件、スリット長さ(L)を50, 100, 200mmの3条件と変化させた。溶液型グラウトは充填した後、養生圧力(P)を大気圧(0MPa)に戻し、20℃の恒温室内で24時間養生した。また、実際の注入状況を考慮して養生圧力(P)を3MPaで保持した供試体も作成した。なお、溶液型グラウトの注入に先立ち、透水試験を行って平行平板の水理学的亀裂開口幅を確認した。

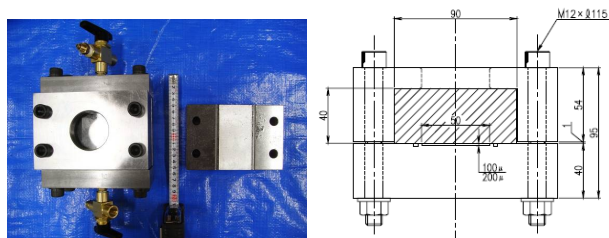


図-1 平行平板装置の写真(左)と断面図(右)

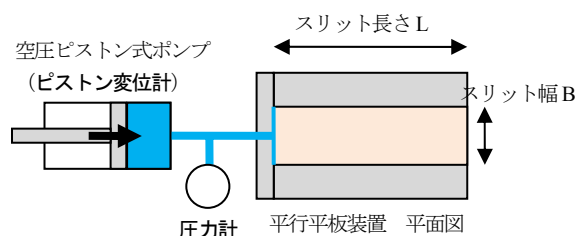


図-2 平行平板による高水压抵抗性実験の概要図

表-2 実験条件

試体名	スリット開口 幅呼び寸法	スリット長さ	養生時圧力
E-L-P	E(μ m)	L(mm)	P(MPa)
0.1-50-0	100	50	0
0.1-100-0		100	0
0.1-100-3		100	3
0.1-200-0		200	0
0.1-200-3		200	3
0.2-50-0	200	50	0
0.2-100-0		100	0
0.2-100-3		100	3
0.2-200-0		200	0
0.2-200-3		200	3

3. 実験結果

(1) 溶液型グラウトのせん断強度

図-3は一軸及び三軸圧縮試験後の供試体の破壊状態である。一軸圧縮試験では供試体が縦に裂けるような引張破壊をしており、一軸圧縮試験ではせん断強度は求められないと考える。一方、三軸圧縮試験では供試体に斜めのせん断面が見られ、せん断破壊していることが分かる。よって以下の考察では、三軸圧縮試験から得られるせん断強度と、グラウト材と模擬亀裂との付着強度の関係を考察する。

図-4は三軸圧縮試験の全データについて破壊時のモールの応力円を示したものである。材齢ごとの共通接線を引くとほぼ横軸に平行な直線となり、本実験の拘束圧の範囲においては、三軸圧縮試験によるせん断強度は拘束圧に依存しないことが分かる。また付着強度との関係を調べる時に用いるせん断強度は、試験条件を考慮して材齢1日のせん断強度の平均値(Cu_ave), 19.2kN/m²を用いる。



図-3 せん断試験後の破壊状況(左;一軸圧縮試験, 右;三軸圧縮試験)

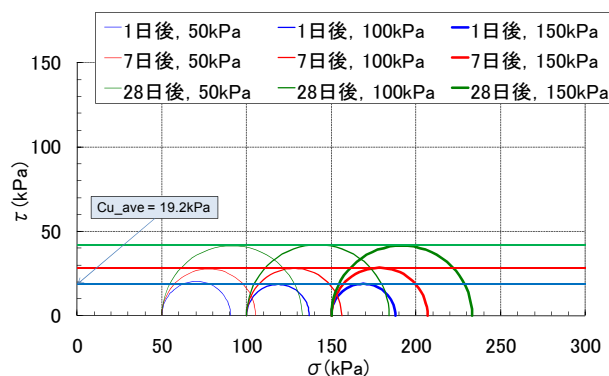


図-4 三軸圧縮試験の結果(モールの円)

(2) 平行平板による高水压抵抗性実験

図-5は高水压抵抗性実験後に観察した溶液型グラウト材の破壊状況を示したものである。実験中に図-1左に示した観測窓から溶液型グラウトの状態を観察したところ、限界水压に近付くと亀甲状のひび割れが生じ、その後、

徐々に細くなる様子が観察された。最終的には図-5に示したような水みちができてグラウト材が押し出される様子が観察できた。

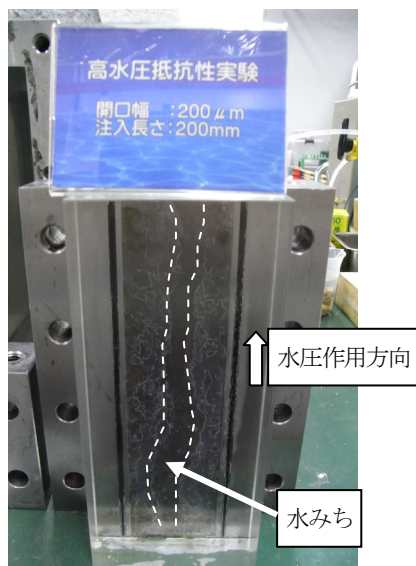


図-5 実験後の溶液型グラウト材の破壊状況

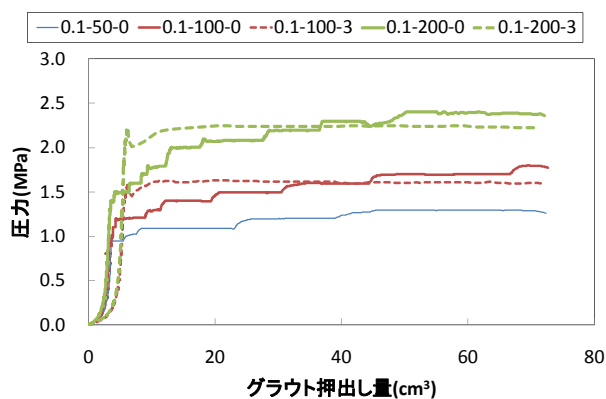


図-6 水圧とグラウト押し出し量の関係（呼び開口幅100μm）

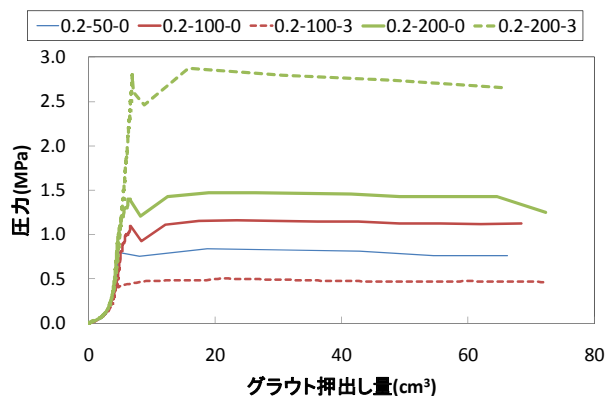


図-7 水圧とグラウト押し出し量の関係（呼び開口幅200μm）

図-6、図-7はそれぞれスリット開口幅呼び寸法が100μm、200μmの平行平板を用いた実験結果であり、水圧とグラウト押し出し量との関係である。水圧を0から载荷し始めた直後はほとんどグラウトは押し出されず、ある圧力に達したところで押し出されている様子が分かる。なお、水圧を载荷し始めた直後にグラウトが若干押し出されているようなデータとなっているが、これは経路内に残留した空気が圧縮されたものであり、実際にグラウトが押し出されたものとは考えていない。

4. 溶液型グラウトの岩盤亀裂内での高水圧抵抗性に関する試算

(1) 検討モデル

溶液型グラウトの亀裂内での水圧抵抗性を検討するモデルを図-8に示す。グラウト材と平行平板との間で発揮される付着強度は、上面(アクリル板)、下面(鉄)との接触条件の違いや、スリットの長さ方向、幅方向（奥行き方向）にもよっても異なると考えられるが、これらを平均化した値を平均付着強度(τ_s)としてつり合い式(1)を導いた。また、平均付着強度と溶液型グラウトのせん断強度 C_u との関係を係数 α を用いて式(2)として示した。

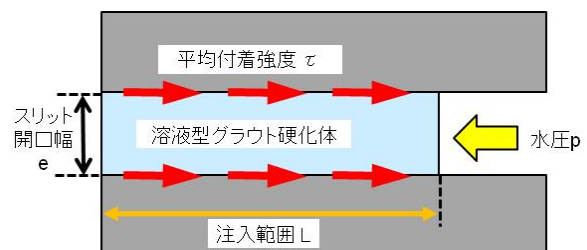


図-8 高水圧抵抗性の検討モデル

$$B \times e \times p = 2 \times \tau_s \times L \times B$$

$$\therefore \tau_s = \frac{ep}{2L} \quad (1)$$

$$\tau_s = \alpha \cdot C_u \quad (2)$$

(2) 実験結果との比較

表-3は高水圧抵抗性実験の結果をまとめたものと、式(1)、(2)を用いて計算した τ_s 、および α を示したものである。透水試験により求めた平均水理学的亀裂開口幅は、呼び寸法に比較して50μm程度小さかったことが分かった。また、限界水圧は図-6および図-7においてグラウト押し出し量が急激に増加している圧力を目測して決定した。これらの値を用いて式(1)から求めた平均付着強度 τ_s は

溶液型グラウトのせん断強度 $C_u=19.2\text{kN/m}^2$ よりかなり小さく、またばらつきも大きい。溶液型グラウトのせん断強度 C_u と平均付着強度 τ_s との関係を示す係数 α は0.01～0.06の範囲で、平均で0.03程度であった。

表-3 平行平板を用いた実験の結果と試算結果

供試体名 E-L-P	平均水理学的 亀裂開口幅 $e(\mu\text{m})$	限界 水圧 $p(\text{MPa})$	平均付 着強度 $\tau_s(\text{kN/m}^2)$	係数 α
0.1-50-0	49	1.0	0.49	0.026
0.1-100-0	49	1.2	0.29	0.015
0.1-100-3	63	1.6	0.50	0.026
0.1-200-0	56	1.7	0.24	0.013
0.1-200-3	67	2.3	0.39	0.020
0.2-50-0	152	0.8	1.22	0.064
0.2-100-0	164	1.1	0.90	0.047
0.2-100-3	142	0.5	0.36	0.019
0.2-200-0	164	1.4	0.57	0.030
0.2-200-3	146	2.8	1.02	0.053

(3) 必要とされる注入範囲の試算

以上に示した実験結果をもとに、亀裂開口幅 $100\mu\text{m}$ 、想定される地下水圧が 3MPa の場合に必要なとされるグラウトの注入範囲（改良長）を試算する。試算に用いる係数 α は表-3の平均値0.03とし、安全率 F_s は仮に3とする。

$$L = \frac{ep}{2\tau_s} = \frac{ep}{2 \times \alpha \cdot C_u} \times F_s \quad (3)$$

$$= \frac{0.0001 \times 3000}{2 \times 0.03 \times 19.2} \times 3 = 0.8(m)$$

この試算結果は模擬亀裂がアクリル、あるいは鉄のスリットとの付着強度を基に試算したものであり、実際の岩盤亀裂より付着条件が悪いと考えられる。このことを考慮しても、ゲルの強度が非常に小さい溶液型グラウトでも現実的な範囲で改良できれば高水圧に耐えられる可能性があることが分かった。

5. 結論

溶液型グラウトの岩盤亀裂内での水圧抵抗メカニズムを検討するため、平行平板を用いた高水圧抵抗性実験を行い、検討モデルの検証および試算を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 溶液型グラウトは亀裂内で限界水圧近くになると、亀甲状のひび割れが生じ、最終的には水みちが生じて急激に押し出された。
- (2) 限界水圧は溶液型グラウトのせん断強度ではなく、亀裂との付着強度によって決まり、アクリル、あるいは鉄製スリットの条件では $\tau_s=0.03 \times C_u$ の関係であった。

今回の実験は実際の岩盤亀裂を用いていないことから、さらに詳細な高水圧抵抗性を評価するためには、岩盤亀裂を模擬した供試体による実験が必要と考えている。また、今後の技術的課題としては以下が挙げられる。

- ・寸法効果：進行性破壊の影響を確認する
- ・長期耐久性：長期荷重による影響を確認する

今回の実験結果が、同種の研究に対して何らかの参考になれば望外の喜びである。

謝辞：本論文をとりまとめるにあたり、日本大学の三田地教授よりご指導、ご助言をいただきました。また、日本大学学部生（当時）の目黒光太郎君、富岡晴香さんに実験の補助をしていただきました。さらに、強化土エンジニアリング様よりコロイダルシリカのサンプルを提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 米倉亮三他：恒久グラウト・本設注入工法，山海堂，2007
- 2) 日本原子力研究開発機構：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費（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「グラウト浸透モデルの改良と溶液型グラウトの岩盤グラウトへの適用性確認試験」，2008
- 3) 新貝文昭，杉山博一，延藤導：地層処分におけるグラウト技術の高度化開発（その 5）－溶液型グラウト材料の適用性に関する試験－，土木学会第 64 回年次学術講演会，2009

WATER PRESSURE RESISTANCE OF LIQUID-TYPE GROUT IN ROCK FRACUTURE

Hirokazu SUGIYAMA and Jun NOBUTO

We have conducted several tests of durable liquid-type grout (colloidal silica) to investigate basic characteristics of liquid-type grout for geological disposal of high-level waste (HLW). Liquid-type grout is inferior to cement grout in the resistance strength against high water pressure. Laboratory tests were performed to measure resistance strength of liquid-type grout in rock fracture, which was modeled by a parallel plane made of iron and acrylic plate. As test results, the shear resistance of the liquid-type grout could be expected about 3% of shear strength derived from triaxial compression tests. Based on test results, we conducted simple calculation for required grout injection area.