

Ⅲ-326

高濃度グラウト材の微小亀裂への動的注入試験

鴻池組 正員 大橋 昭 正員 平 治
日本基礎技術 正員 寺戸 康隆
鴻池組 西浜 譲二 正員 蔵野 彰夫

1. まえがき エネルギー地下備蓄、放射性廃棄物の地層処分など、大深度地下の岩盤空洞を利用した貯蔵システムが注目される。そこでは、岩盤空洞の封鎖性・安定性を確保することが最重要課題であり、多数の微小亀裂を含む周辺地盤のゆるみ域における地下水の移流制御や地盤強化のために、グラウティング技術の高性能化が求められる。筆者らは、微細な岩盤亀裂への高密度注入技術として、注入圧力に脈動を与えることにより、グラウト材の流動性・浸透性の向上と目詰まりの抑制効果が期待される動的注入工法¹⁾に着目し、高濃度グラウト材と100 μ m前後の模擬亀裂を用いた注入試験²⁾および微小平行隙間内の非定常流解析³⁾を試みた。本研究では、既報²⁾の注入試験を踏まえて注入試験装置を改造し、注入の圧力条件（脈動圧の振動数と振幅）による影響を精査して動的注入効果の一端を明らかにした。

2. 注入試験 図1に模擬亀裂を設けた試験体の概要を示す。亀裂（開口幅H:20~200 μ m, 流路幅:40mm）は2枚の鋼製フランジ間に所定厚のスペーサを挟み込んで構成し、水圧式ダイヤフラムジャッキにて均等に拘束した。グラウト材は試験体の中央から圧入して両端から流出させ、測定孔 $T_0 \sim T_3$ にて流動中の静圧分布を測定した。また、注入装置については、正弦波に近似した脈動圧が得られる油圧サーボ制御式注入ポンプを開発し、[圧力 $P(=P_0 \pm P_0) : 2 \pm 1$ MPa以下, 流量:0.02~31 cm^3/s , 振動数 $f : 0 \sim 50$ Hz]の範囲で圧力を制御した。なお、グラウトの平均流速は注入ポンプのピストン速度から算出した。

注入材料には、超微粒子セメント（SFと略記）および山形産250meshベントナイト（BEと略記）を用い、その配合水量は $[W/SF=1, 0.5, W/BE=10, 8, 6]$ である。また、分散剤には、ナフタレン系硫酸塩系（NS塩と略記）およびヘキサメチン酸ナトリウム（HNaと略記）を用い、固体分との重量比で一律2%を添加した。材料の混練りには高速剪断型攪拌機を使用し、所定の手順と時間管理のもとで試料を作製した。混練り後、SFは直ちに、BEは24時間静置後に再攪拌して試験に供し、試験中には緩攪拌を行った。材料の粘性測定には二重円筒型回転粘度計（内筒半径:13mm, 外筒半径:15mm, 内筒高さ:70mm, 内筒回転数:5~400rpm）を使用した。なお、試料温度は $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ に管理した。

試験は静的試験を含めて約500ケース行い、目詰まりが生じた場合を除き各試験条件について3~5ケースの平均で試験結果を整理した。

3. 試験結果および考察 図2は静的注入試験の結果に巾乗曲線を当てはめ整理したものであり、注入圧力 P と平均流速 U の関係を示した。水ではほぼ45°の勾配と高い相関係数 ρ 、および1.1 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 前後の粘度 μ （2次元ポアズイユ流れから推定）が得られており、試験装置が十分な精度をもつことが確かめられた。SF:W/SF=1はニュートン流体に近い特性を示すものの、SF:W/SF=0.5とBE全体は非ニュートン流体の挙動を呈する。

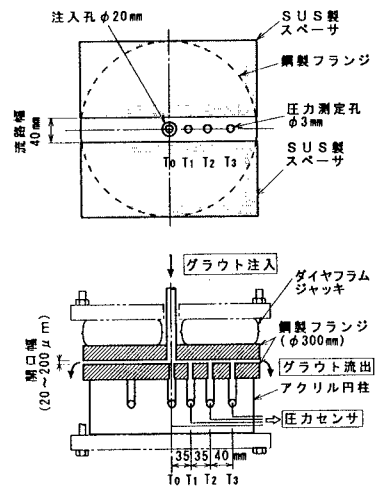


図1 注入試験体

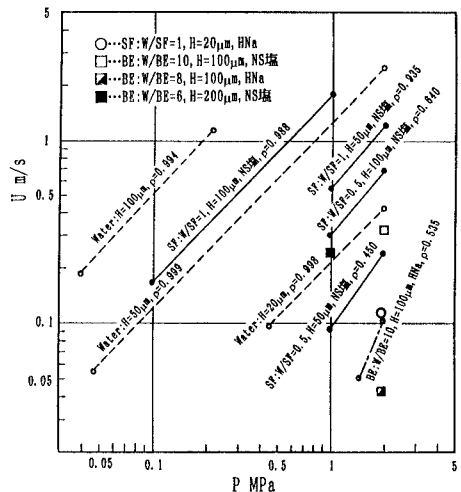


図2 静的注入時の試験結果

図3は回転粘度計による試料の流動曲線を示す。試料は注入試験に準拠して作製し、粘度測定では剪断履歴と測定時間を所定の手順に従い管理した。結果によると、固体濃度が高くなるほど見かけ粘度 μ_a がずり速度 D に強く依存し、非ニュートン流体の特性が顕著になる。また、各試料の特性は前述の静的注入試験結果とよく対応する。

表1にはSFの試験結果を一括して取りまとめた。W/SF=1, H=20 μ mおよびW/SF=0.5, H=50 μ mに脈動効果が認められるが、その効果は小さい。ただし、試験中に生じた目詰まりが脈動圧により解消される場合も多く、この観点からは動的效果があるといえる。

図4はBEについて脈動圧の振動数 f と平均流速 U の関係を示す。BEには全ての試験条件において脈動効果が発現し、5~30Hzの範囲、特に10Hz前後が適切であると考えられ、ボルクレイを用いた前回の試験²⁾と同じ傾向を得た。また、分散剤の種類により脈動効果の発現度合いは異なる。参考として、振動層の影響を考慮した微小平行隙間の1次元波動解析³⁾の結果を図5に示す。縦軸は流路出口の平均流速 U_{out} (1/4~5/4周期の時間平均)をポアズイコ流れの断面平均流速 U_{pp} で無次元化したものである。粘度が50mPa $\cdot$ s以上の計算例では、振動層の影響が強まり振動数 f の増加によって平均流速は低下する。すなわち、動的注入においては、低い振動数の脈動で粒子が励起され、見かけの構造粘性が低下して流動性が大きく向上するものの、一方では振動数の高まりとともに振動層による摩擦抵抗の増加を招き、脈動の効果が削減されるものと推察できる。

図6にはBEについて脈動圧成分の振幅 P_0 と平均流速 U の関係を示した。結果によれば、0.5MPa以上において P_0 の増加とともに脈動の効果が増すことが明らかになった。なお、 P_0 に関する図5と同様な解析では、 P_0 による変化は殆どみられない。

4. あとがき 高濃度グラウト材と微小模擬亀裂を用いた一連の注入試験において、動的注入工法の有効性と脈動圧の条件を明らかにした。今後、①脈動下にあるグラウト材のレオロジー特性の究明、②グラウト材と分散剤の適合性の追及、③長尺模擬亀裂を用いた浸透試験、④構造粘性を考慮した流動解析等を実施する予定である。本研究は科学技術庁補助金交付研究の一部をまとめたものであり、ここに付記して感謝する。

参考文献 (1) Börgesson, L., et al., Final Report of the Rock Sealing Project, Clay Technology AB, Sweden(1992). (2) 平, 他3名, 微小亀裂への「グラウティング」における動的注入効果, 土木学会第49回年次学術大会(1994). (3) 大橋, 他3名, 微小亀裂への動的「グラウティング」に関する流動解析, 土木学会第49回年次学術大会(1994).

表1 超微粒子セメントの試験結果

試料	分散剤	H μ m	平均流速 U m/s	
			静的注入 ($P = P_0$ MPa)	動的注入 ($P = P_0 \pm P_a$ MPa)
① SF:W/SF=1	NS塩	100	1.85(0.98)	1.85(0.98 $\pm$ 0.49)
② SF:W/SF=1	NS塩	50	1.23(1.96)	1.30(1.96 $\pm$ 0.98)
③ SF:W/SF=1	NS塩	20	0.115(1.96)	0.202(1.96 $\pm$ 0.98)
④ SF:W/SF=0.5	NS塩	100	0.704(1.96)	0.719(1.96 $\pm$ 0.98)
⑤ SF:W/SF=0.5	NS塩	50	0.247(1.96)	0.306(1.96 $\pm$ 0.98)

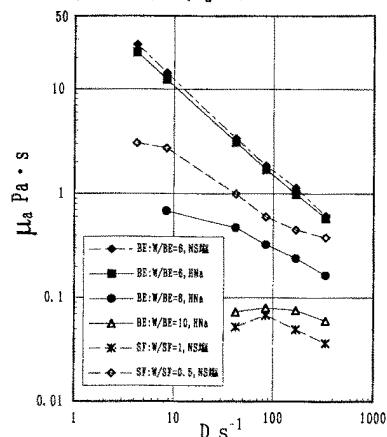


図3 グラウト材の流動曲線

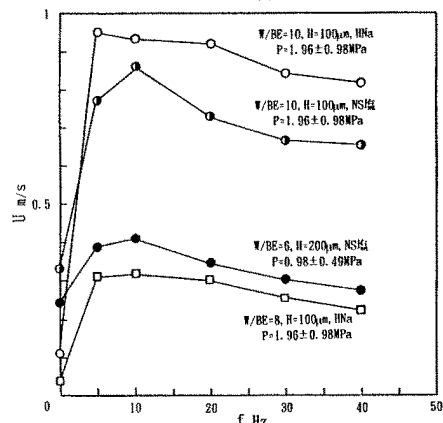


図4 ベントナイトの試験結果(振動数の影響)

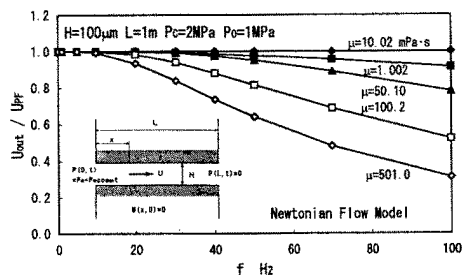


図5 脈動流の波動解析

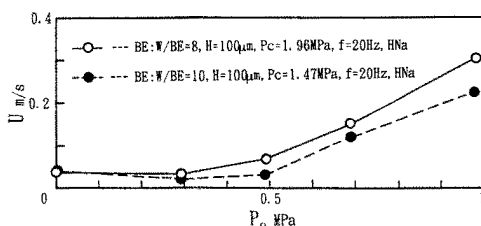


図6 ベントナイトの試験結果(振幅の影響)