

動的注入工法における最適注入方法に関する基礎的検討

鹿島技術研究所 ○伊達健介 山本拓治

京都大学 大場公德 黒川義民

水戸義忠 青木謙治

1. はじめに

石油や LPG の地下石油備蓄基地及び放射性廃棄物の処分施設の建設においては、従来の注入工法では注入が困難な低透水性の岩盤部へも、経済的かつ確実な注入が要望されている。そのため、筆者らは、高濃度のグラウト材料を効果的に注入するために、動的注入工法の実用化に取り組んできた。この工法は、一定の注入圧力に動的な圧力を付加することにより、微細な割れ目にも高濃度、高粘性のグラウトを注入可能にする新しい注入工法である。

これまでに、現場注入システムを開発し、原位置注入試験から同工法の優位性を確認¹⁾し、低透水性岩盤における注入特性についても考察^{2) 3)}を行ってきたが、地盤状況や施工目的に応じた最適な注入仕様については未解明な部分が多い。そこで、微細な亀裂を想定した亀裂模型を用いて、脈動を受けたグラウトの注入特性に関する室内注入実験を実施した。本報告は、材料の粘性と周波数の注入特性に与える影響について検討した結果の一部をとりまとめたものである。

2. 室内注入実験

図 - 1 に実験装置を示す。図に示すとおり、注入口に与える振動圧は圧力変換用シリンダからの定常圧に、サーボシリンダからの振動成分が脈動付与装置³⁾を介して提供される。圧力変換用シリンダでは最大約 2MPa の圧力を、サーボシリンダでは最大 50Hz の振動成分を注入流体に加えることが可能である。亀裂模型では鏡面仕上げしたステンレス面に所定の厚さの燐青銅を挟みこみ抑え枠で緊結することで任意の亀裂幅を与え、流路長は 2m、流路幅は 150mm とした。計測は、注入口付近に間隙水圧計が 1 個、亀裂内の流路方向に間隙水圧計が 6 個、吐出口下には流量測定を目的として排出液の重量を測定する重量秤（ロードセル）が 1 個、それぞれ設置されている。各データは 2.5 ~ 5.0msec 間隔でデータロガーによりサンプリングした。

3. 実験条件

表 - 1 に実験条件及び実験ケースについて示す。注入材料については低透水性岩盤には超微粒子セメントミルクを用いることが考えられるが、微粒子分の間隙への充填過程や硬化の影響が複雑であるため、今回の実験では材料粘性のみをパラメータとすることとし、容易に粘度調整が可能な水溶性セルロース溶液を用いて実験を行った。セルロース水溶液の粘度については、超微粒子セメントミルクを用いた事前試験により W/C = 1 ~ 8 ではニュートン性流体と仮定してよいと判断できるため、比較的高濃度の W/C = 1, 2, 4 を想定した 15mPa・s, 5mPa・s, 4mPa・s の 3 ケースと水 (1mPa・s) の計 4 ケースを設定した。注入圧力については、静的試験では 1.0MPa、動的試験では平均圧力 1.0MPa に振動成分 ±0.5MPa とした。周波数については、0.2, 0.5, 1.0, 5.0, 10, 20, 30Hz と比較的広範囲に設定した。亀裂幅については低透水性岩盤を想定して今回は 0.05mm とした。

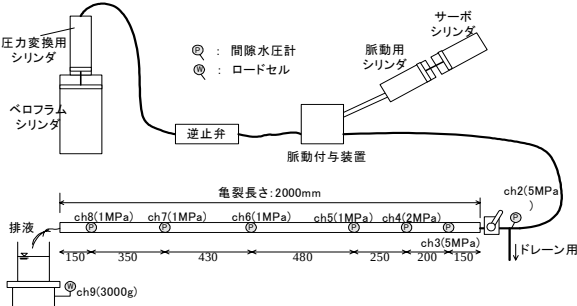


図 - 1 室内注入実験装置

表 - 1 実験条件一覧

	静的	動的						
定常圧 (MPa)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
振動成分 (MPa)	0	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5
周波数 (Hz)	0	0.2	0.5	1	5	10	20	30
水 (1mPa・s)	2	1	1	1	1	1	1	-
セルロース水溶液 (4mPa・s)	2	-	2	1	1	1	1	1
セルロース水溶液 (5mPa・s)	2	1	2	2	2	2	2	1
セルロース水溶液 (15mPa・s)	2	1	2	2	2	2	2	1

備考) 斜体は実験ケース数を示す

4. 実験結果

(1) 周波数の影響

図-2に周波数と流量増加率の関係を示す。流量増加率は動的注入における流量の静的注入時に対する増加率である。同図から、比較的低粘度でも動的注入の効果があることが確認され、また既往の研究結果と比べて、効率的な周波数は、より低い値であることがわかった。これは、実施した実験の粘度範囲や亀裂幅などが一因ではないかと思われる。なお、材料粘性が低いほど各注入周波数における増加率は大きい、材料粘性によって周波数の影響度が異なるといった傾向は見られなかった。

ここで、実際の注入効果について、注入範囲という評価パラメータを未知とするなら注入量で評価することが妥当である。そこで、4, 5, 15mPa・sの材料がそれぞれW/C=4, 2, 1に対応しているとし、各粘性、各周波数の注入パターンを流量をセメントの単位時間あたりの実質注入量に換算してみた。結果を図-3に示す。同図から、今回の実験条件においては、W/C=2を想定した5mPa・sの材料が最も実質注入量の大きい結果となった。

(2) 振幅減衰の評価

図-4(a)に5mPa・sの材料を用いたときの各周波数変動に対応した注入口からの距離と圧力振幅比の関係を示す。同図から低周波数であるほど振幅減衰の程度が少ないことがわかる。また、他の粘度においても同様の傾向が見られた。

図-4(b)には同様の関係を10Hz実験時についてまとめた結果を示す。同図から15mPa・sのときはそれより低粘性時と比べて振幅減衰の程度が大きいことがわかる。また、他の周波数においても同様の傾向が見られた。

ここで、注入材料が平行平板内を流れる圧縮性粘性流体であると仮定し、注入材料に関する連続の式と運動方程式から、理論的に流量と圧力の関係について検討を行った。図-5に10Hz時における結果について示す。同図から、実験と同様、より高粘性であるほど振幅減衰が大きいことがわかった。しかし、実験では、圧力振幅比が0.4m付近で急激に減衰しているのに対し、理論値は緩やかに減衰しており、この点に関しては一致度は低い。この理由としては注入口における圧力損失を評価していないことなどが考えられ、現在検討を実施している。

5. まとめ

動的注入工法における最適注入方法検討のため室内実験を実施した。今回は材料の粘性と周波数の影響について主に検討を実施した。その結果、動的注入による流量増加の効果が確認でき、また実施した範囲では低周波であるほどその効果は高かった。また、低粘性かつ低周波であるほど圧力の減衰は小さく、理論的な検討結果とも定性的には対応が見られた。今後、対象岩盤に応じた最適な動的注入仕様（注入材料、注入圧、周波数）などについてさらに詳細に検討していく予定である。

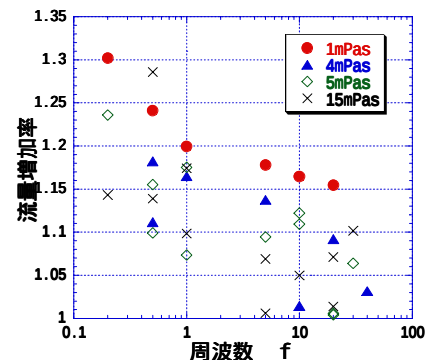


図-2 周波数と流量増加率

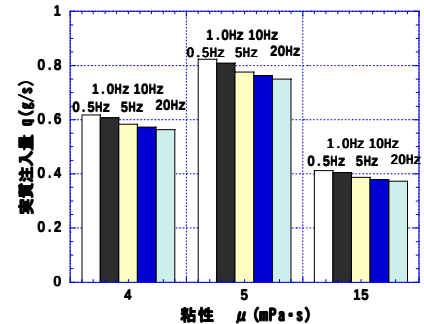
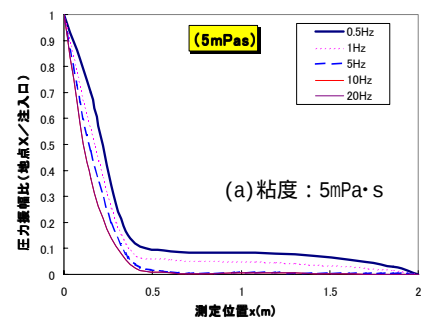
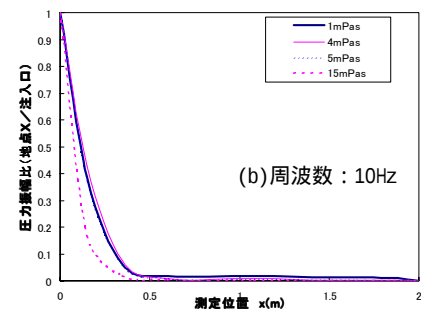


図-3 実質注入量による比較



(a) 粘度: 5mPa・s



(b) 周波数: 10Hz

図-4 圧力振幅の減衰(実験値)

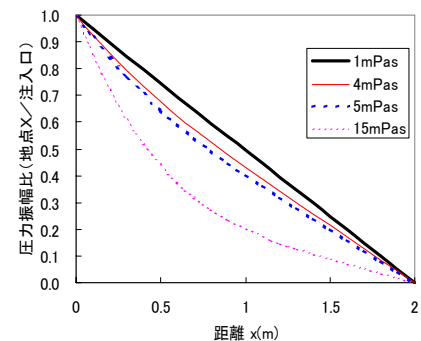


図-5 圧力振幅の減衰(理論値)

- 1) 山本, 日比谷, 伊達, 大場: 低透水性岩盤における効果的注入工法の開発, 第31回岩盤力学に関するシンポジウム, 平成13年1月
- 2) 山本, 日比谷, 伊達, 白井, 大場: 低透水性岩盤における動的注入工法の適用, 第31回岩盤力学に関するシンポジウム, 平成13年1月
- 3) 伊達, 山本, 桑川, 大場, 青木: 低透水性岩盤における動的注入工法の適用結果, 第11回岩の力学国内シンポジウム, 平成14年1月