

動的な注入に関する模型実験（その2）

—注入速度の振幅が注入効果に与える影響について—

駒延 勝広* 大河内 保彦*

要 約： 薬液注入工法は簡易に地盤改良が行える工法として多くの現場で用いられているが、設計どおりの改良が行えない、改良後の効果判定手法が明確でないなどの問題点も多い。本研究では、薬液注入の品質改善や施工能率の向上を目的として、注入速度を変化させながら注入を行う動的注入を提案し、模型土槽を用いた注入実験を行ってきた。今回は注入速度の振幅が注入効果に及ぼす影響と、森らが提案している水注入試験により動的注入と静的注入の限界注入速度について検討を行い、その結果、以下のことがわかった。1)動的注入では静的注入よりも固結体積比が大きくなるが、注入速度の振幅が固結体積比に及ぼす影響はあまり大きくなかった。2)動的注入では静的注入よりも固結強度が大きくなり、均一な固結体が得られると考えられ、また、動的注入で強度増加を期待するには注入速度の振幅が重要であることがわかった。3)動的注入では静的注入よりも限界注入速度を速くできる可能性があると考えられ、これは動的注入では静的注入よりも施工速度を速くできる可能性があることを示していると考えられる。

キーワード： 薬液注入、注入圧力、注入速度、振幅、固結形状、固結強度、透水性、動的注入、水注入試験、砂地盤

目 次： 1.はじめに
2.動的注入実験

3.水注入試験
4.まとめ

1. はじめに

薬液注入工法は簡易に地盤改良が行える工法として多くの現場で用いられている。しかし、設計どおりの改良が行えない、改良後の効果確認手法が明確でないなどの問題点も多い¹⁾。また、薬液注入に関する主な基準類は現在9指針²⁾あるが、そのほとんどは薬液注入が環境などに及ぼす影響について示されたものであり、記載が設計や施工に及ぶ指針は国鉄の指針を含め3指針にとどまっている³⁾。しかし、この場合でも、注入方法や効果確認手法などについては定性的な記載であり、さらに具体的な注入方法の提案や品質の改善が望まれている。

本研究では、薬液注入の品質改善や施工能率の向上を目的として、注入速度を変化させながら行う注入（以後、動的注入と呼ぶ）を提案し、模型土槽を用いた注入実験を行っている。その結果、動的注入では従来の速度一定で行う注入（以後、静的注入と呼ぶ）よりも固結体積、固結強度が大きくなることがわかった⁴⁾。動的注入は注入速度を図1に示すような正弦波に近い波形に制御して注入を行っている。しかしながら、注入速度の振幅と周期が注入効果に及ぼす影響については、まだ、明らかにされていない。

そこで、今回は注入速度の振幅が注入効果に及ぼす影響について検討を行った。また、森らが提案している水注入試験⁵⁾を動的注入と静的注入に適用し、限界注入速度の比較も行ったので、併せて報告する。

* 土木研究部 土木基礎研究室

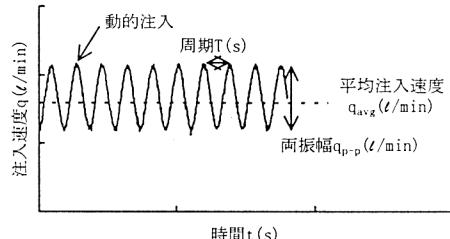


図1 動的注入の注入速度波形例

2. 動的注入実験

2.1 実験概要

実験装置図を図2に示す。本装置は上部のゴム袋に水圧を作用させて模型地盤に上載圧を加えることができる。実験では模型地盤に98kPaの上載圧を加えた。

模型地盤は市販の珪砂8号を用いて水中落下法により、相対密度が約80%となるように作製した。珪砂8号の粒度分布とその物性値を図3に示す。

薬液は水ガラス系溶液型薬液を用い、ゲルタイムを30秒に設定し、総注入量を約16Lとした。薬液の配合を表1に示す。

動的注入は注入速度を図1のように制御して注入を行っている。動的注入の注入開始から注入終了までの注入速度の平均値を平均注入速度 q_{avg} と定義し、静的注入の

注入速度との比較にはこの値を用いた。今回の実験では動的注入の平均注入速度、注入速度の周期をそれぞれ約 $8\text{cm}/\text{min}$ 、10秒と一定にし、注入速度の両振幅（以後、速度振幅 q_{pp} と呼ぶ）を変えたものを数種類行った。また、比較のために平均注入速度と同じ注入速度での静的注入も行った。実験ケースを表2に示す。

実験は、注入時に注入圧力と注入速度の測定を行い、注入1日後に土槽を解体し、固結形状と固結体の強度分布を調べた。固結体の強度分布は土槽を図4に示す座標系とみなし、注入孔と同じ高さにおけるXY平面と平行な断面（以後、注入孔断面と呼ぶ）で、注入管を中心として縦方向、横方向にそれぞれ5cm間隔で直線を引き、その交点で針入試験を行うことで調べた。針入試験は直径1.25mmの針を2cm貫入させ、そのときの貫入抵抗を調べるものであり、この針入抵抗(kgf)で固結体の強度を評価した。針入試験後、固結体より直径5cm、高さ10cmの供試体を採取し、恒温20°Cで養生を行った。注入7日後に一軸圧縮試験と透水試験を行い、固結体の強度と透水性を調べた。

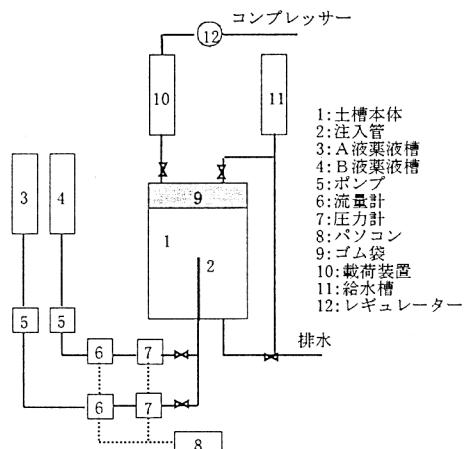


図2 実験装置図

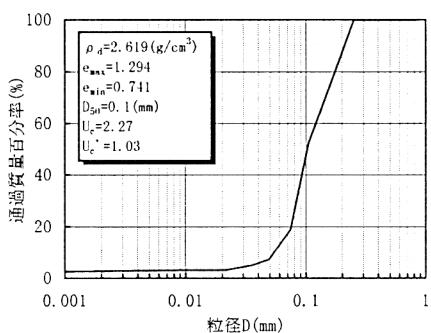


図3 砂8号の粒度分布とその物性値

表1 薬液の配合(1)

A 液(d)		B 液(d)	
水ガラス(d)	水(d)	硬化剤(g)	水(d)
0.25	0.25	50	0.485

表2 実験ケース

	注入方法	平均注入速度 $q_{avg}(\text{d}/\text{min})$	速度振幅 $q_{pp}(\text{d}/\text{min})$	周期 T(s)
CASE1, 2	静的	8.0	-	-
CASE3	動的	8.0	1.0	10
CASE4	動的	8.0	2.0	10
CASE5	動的	8.0	5.0	10

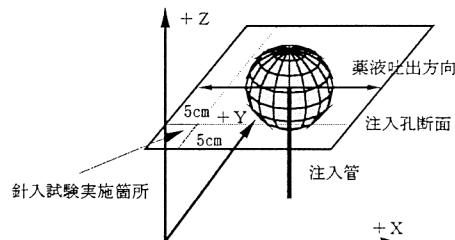


図4 実験土槽の座標系

2.2 実験結果

薬液注入において注入圧力と注入速度の挙動から注入効果を推測することはよく行われている施工管理手法である。表3に判定例の一例⁷⁾を示す。また、図5には注入実験により得られた注入圧力と注入速度の挙動を示す。表3より、静的注入(CASE1)はC型あるいはD型に分類することができる。C型、D型は何れも脈状注入や、薬液の逸脱が生じているケースであり、良好な注入が行われていないことを示している。一方、動的注入では速度振幅の大小により、注入圧力の挙動にも違いが生じているが、速度振幅が $2\text{d}/\text{min}$ の場合(CASE4)に着目すると、E型に分類することができる。E型では先にゲル化した薬液が後からの薬液によって順次押し破られる、いわゆるキャベジング効果⁸⁾を示しており、良好な注入が行われていることを示している。

図6に固結体積比 V/V_0 と速度振幅 q_{pp} との関係を示す。ここで、固結体積比 V/V_0 とは注入後、実測により求めた固結体の体積 V を実際の注入量から算出した固結体の体積 V_0 で除したものである。なお、 V_0 の算出は薬液の填充率 α を100%として行った。動的注入では固結体積比が静的注入よりも大きくなる傾向があり、また、注入速度の振幅が固結体積比に及ぼす影響はあまり大きくなかったことがわかった。今回の実験では速度振幅が $2\text{d}/\text{min}$ のときに最も効果があった。また、速度振幅が $5\text{d}/\text{min}$ のときに固結体積比が小さくなったのは、振幅が大きいために固結体に割裂脈が多数発生したためであると考えられる。

表3 注入圧力と注入速度の挙動から注入効果を判定する判定例の一例⁶⁾

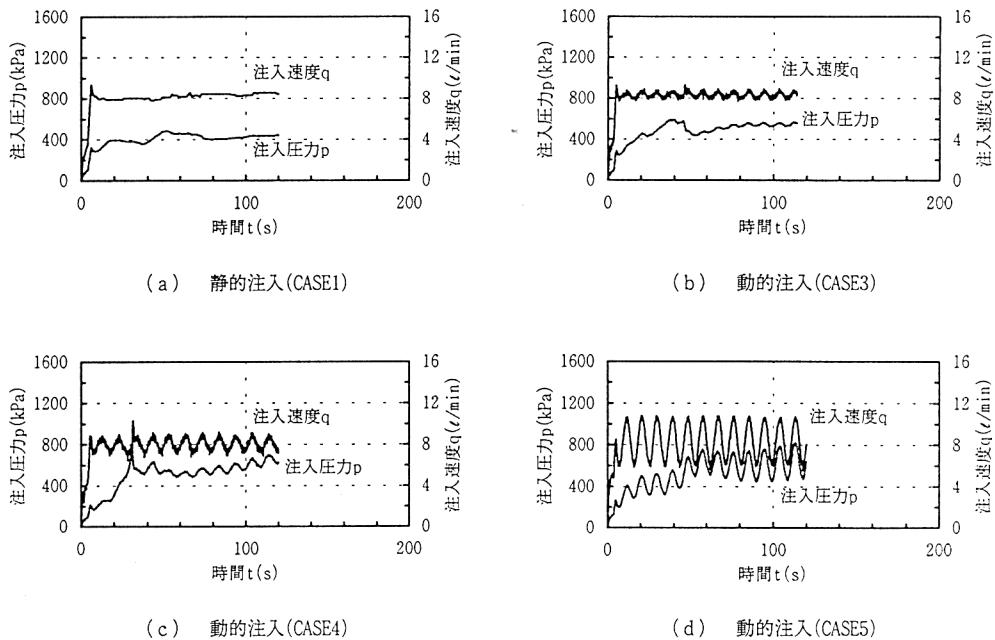
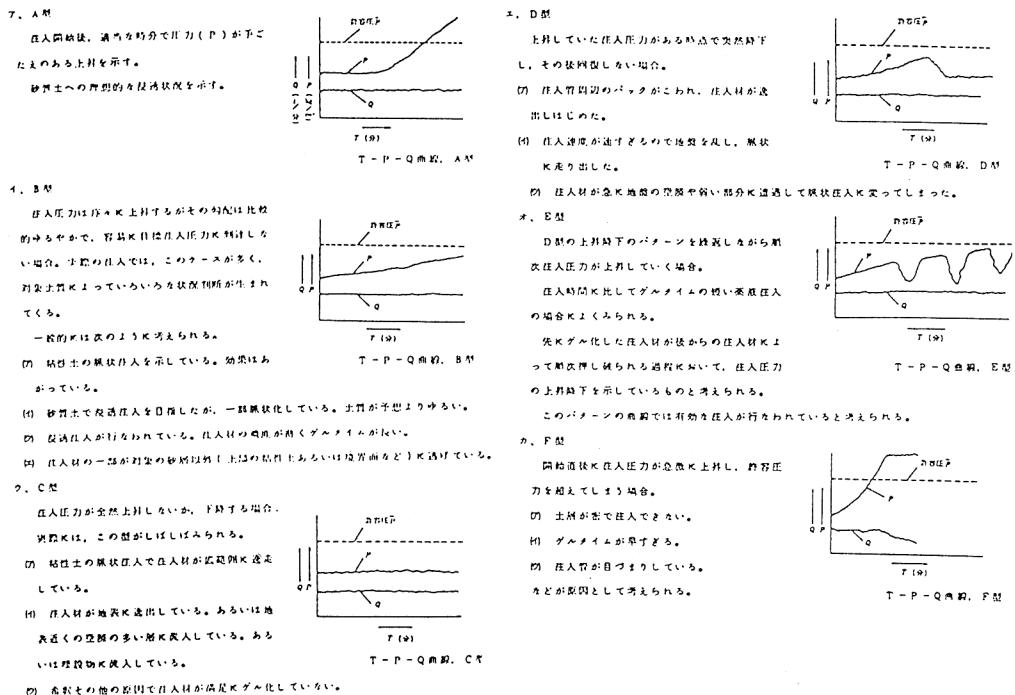
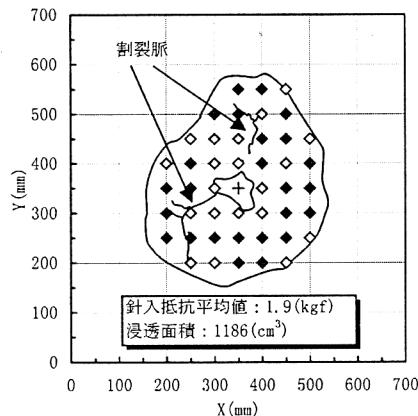


図5 注入圧力と注入速度の経時変化

図7に注入孔断面での薬液の浸透状況の一例を示す。なお、図中の菱形は針入試験の結果であり、色が黒くなるにつれて強度が大きくなることを示している。これにより、動的注入では静的注入よりも針入抵抗の大きい箇所が多いのがわかる。また、浸透面積も動的注入の方が静的注入よりも大きくなっているのがわかる。

図8に針入抵抗の平均値と速度振幅 q_{p-p} との関係を示す。平均値で比較しても、動的注入の方が静的注入よりも針入抵抗が大きくなる傾向があるのがわかる。また、図9に一軸圧縮強度 q_u と速度振幅 q_{p-p} との関係を示すが、この図においても、図8と同様に動的注入の方が静的注入よりも強度が大きくなる傾向があるのがわかる。

以上のことから、動的注入では静的注入よりも固結強度が大きく、また、目視による観察によっても割裂脈は少なく、均一な固結体が得られるということが考えられる。また、動的注入で強度増加を期待するには注入速度の振幅が重要であることもわかった。



(a) 静的注入(CASE1)

図10に透水係数 k と速度振幅 q_{p-p} との関係を示す。これより、動的注入の方が静的注入よりも透水係数が若干小さくなる傾向があるのがわかった。

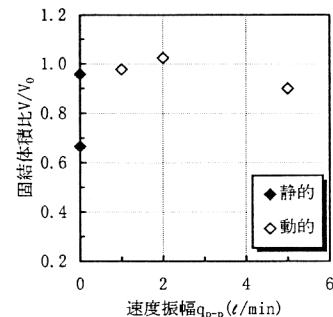
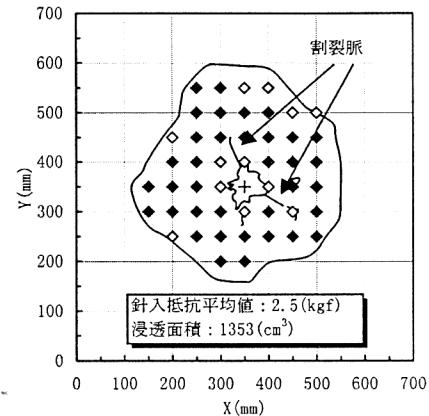


図6 V/V_0 と q_{p-p} の関係



(b) 動的注入(CASE4)

図7 薬液の浸透状況

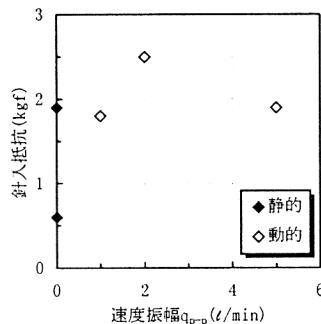


図8 針入抵抗と q_{p-p} の関係

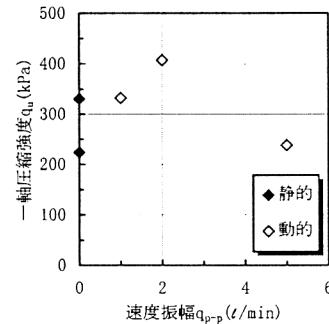


図9 q_u と q_{p-p} の関係

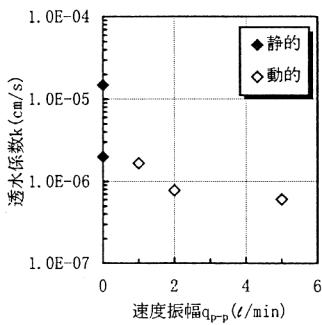


図 10 k と q_{pp} の関係

3. 水注入試験

3.1 実験概要

薬液注入において、注入効果の良否を決定する要因は地盤条件、注入材料などいろいろと考えられるが、最も影響を及ぼす要因として考えられるものに注入速度がある。しかしながら、現在の基準類では注入速度を定量的に決める方法については書かれていない。

これに対して、合理的な注入速度の決定手法として、水注入試験⁵⁾が森らによって提案されている。この試験は現場で薬液注入を行う前に水で注入を行い、薬液注入を行う場合に良好な固結形状を得ることのできる注入速度の上限値（以後、限界注入速度 q_{cr} と呼ぶ）を把握することと、その対象地盤が薬液注入に適するか否かの予測を行うことを目的としている。限界注入速度が速くなれば、施工速度を速くして同等の品質を得ることができると考えられる。そこで、動的注入と静的注入の施工性の違いを調べるために、水注入試験を行った。なお、試験方法の詳細については参考文献⁵⁾を参照されたい。

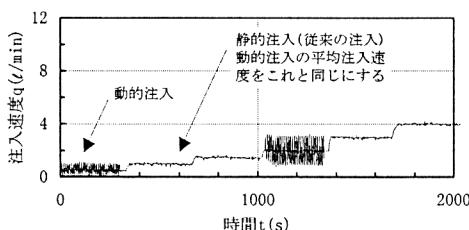


図 11 水注入試験時の注入速度波形例

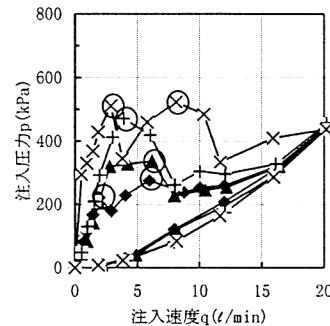
表 4 試験ケース

注入方法	速度振幅 q_{pp} (l/min)	q_{pp}/q_{avg}	周期 T (s)
静的	-	-	-
動的	1.0	-	10
動的	2.0	-	10
動的	-	0.125	10

試験は図 1 1 に示すように静的注入の注入速度と動的注入の平均注入速度を同じにして行った。また、動的注入の速度振幅に関しては、速度振幅の値をすべてのステップで一定にしたものと、速度振幅と各ステップでの平均注入速度の比率 (q_{pp}/q_{avg}) を一定にしたものについて行った。試験ケースを表 4 に示す。1 ステップの継続時間は 5 分間とし、結果の整理には最後の 30 秒間の平均値を用いた。なお、今回の実験では実験装置の都合上、動的注入では注入速度の上限値を、標準的な水注入試験での上限速度値である 20 l/min とすることはできなかった。

3.2 実験結果

図 1 2 に静的注入と動的注入の水注入試験の結果を示す。これによると、静的注入では地盤に割裂脈が発生したと思われる点（図中の○印）とその次の点の注入圧力の差が大きいのに対して、動的注入では注入圧力の差が小さい。このことは静的注入では割裂脈が発生すると、すぐに地盤に大きな破壊が生じてしまうのに対して、動的注入では割裂脈が発生しても、すぐには地盤に大きな破壊が生じないということを示していると考えられる。



(a) 静的注入

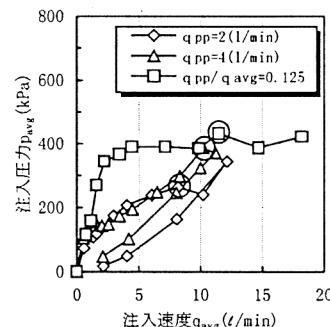


図 12 水注入試験結果

図1-3に、地盤に割裂脈が発生していると思われる点(図1-2中の○印)の注入圧力と注入速度との関係を示す。図より、動的注入では割裂脈が発生すると思われる注入速度が静的注入よりも大きくなっているのがわかる。このことは、動的注入では静的注入よりも注入速度を速

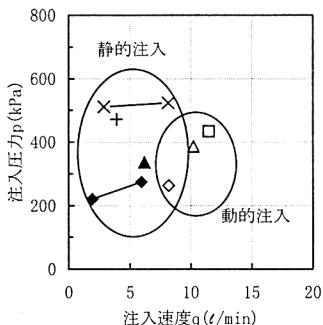


図1-3 水注入試験結果(割裂脈発生時)

くできる可能性があることを示していると考えられる。

4.まとめ

薬液注入の品質改善や施工能率の向上を目的として、注入速度を変化させながら注入を行う動的注入を提案し、模型土槽を用いた薬液注入実験及び水注入試験を行い、以下のことがわかった。

- 1)動的注入では静的注入よりも固結体積比が大きくなつた。また、注入速度の振幅が固結体積比に及ぼす影響はあまり大きくなかった。
- 2)動的注入では静的注入よりも固結強度が大きくなり、均一な固結体が得られると考えられる。また、動的注入で強度増加を期待するには注入速度の振幅が重要であり、今回の実験では2l/minのときが最適であった。
- 3)動的注入では静的注入よりも限界注入速度を速くできる可能性があると考えられる。これは動的注入では静的注入よりも施工速度を速くできる(工期短縮)可能性があることを示していると考えられる。

謝 辞

本研究は、財団法人鉄道総合技術研究所と共同で行っているものであり、本研究を進めるにあたり、ご指導を頂きました同所の村田修氏を始め、土構造グループの方々に謝意を表します。

参考文献

- 1)土質工学会編：薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp. 9-12, (社)土質工学会, 1985年2月
- 2)例ええば、建設省編：薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針、建設省, 昭和49年7月
- 3)例ええば、日本国有鉄道編：注入の設計施工指針、(社)日本鉄道施設協会, 昭和62年1月
- 4)駒延勝広・大河内保彦・遠藤修：動的な注入に関する模型実験—固結体の形状、強度、透水性についてー、東急建設技術研究所報、No. 22, 1996年10月
- 5)森麟・田村昌仁 他2名：薬液注入において浸透固結形を考慮した限界注入速度の決定方法、土質工学会論文報告集, vol. 33, No. 3, 1993年9月
- 6)土質工学会編：薬液注入工法の調査・設計から施工まで, p. 104, (社)土質工学会, 1985年2月
- 7)日本トンネル技術協会編：薬液注入工事による環境汚染防止に関する調査研究報告書(日本道路公団大阪建設局委託), pp. 88-89,
- (社)日本トンネル技術協会, 昭和53年2月

MODEL TEST ON THE SITUATION OF DYNAMIC GROUTING METHOD (PART2) -EFFECT OF AMPLITUDE OF INJECTION SPEED ON IMPROVING THE GROUND -

K.Komanobe and Y.Okochi

- Model grouting test was carried out to investigate the effect of the amplitude of injecting speed. Following conclusions were obtained.
- 1)The ratios of actual improved volume and designed volume (Grouted volume ratio) by dynamic grouting method were greater than those of ordinary method. However, the effect of the amplitude of injecting speed on the grouted volume ratio was not apparent.
 - 2)The strength of grouted part by dynamic grouting method was greater than that of ordinary method. The dynamic grouting method seemed to grout the sand more uniformly. In terms of the improved strength by dynamic grouting method, the most suitable amplitude of injection speed was 2(l/min).
 - 3)The critical injection speed by dynamic grouting method seemed to be faster than that of ordinary method. This seems that the dynamic grouting method has the possibility to shorten the working period of the grouting.