

動的注入工法の開発

東急建設(株)技術研究所
(財)鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 主幹
東急建設(株)技術研究所

駒延 勝広
村田 修
大河内保彦

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、注入後の効果確認手法が明確でないなど問題点も多い¹⁾。

薬液注入の注入形態は浸透注入、割裂注入、及び両者の中間に位置する割裂浸透注入の3種類に分類することができる。浸透注入とは土粒子の配列を乱さずに土の間隙を薬液で充填して土粒子を結合させることで、土の粘着力の増加、地盤の不透水化を図る注入形態(図1)である。これに対して、割裂注入とは地盤が破壊されることにより生じた空隙に薬液が充填される注入形態(図2)である。この場合、良好な改良効果を得るには設計範囲内に割裂脈を多数形成させて割裂脈の分布を密にすることで、複合地盤としての強度増加が図られ、良好な改良効果が得られる。

一般に砂質土地盤では浸透注入を、粘性土地盤では割裂注入を主体として改良効果を期待している。

しかし、注入速度一定で注入を行う従来工法では注入速度が速すぎると薬液がある特定の方向に進展してしまい、浸透注入とならないばかりか、設計範囲内の割裂脈の本数も少なくなり、良好な改良効果が得られないことが多い(図3)。これが薬液注入工法の信頼性が低いといわれる一因であり、実施工に

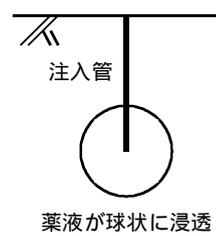


図1 浸透注入

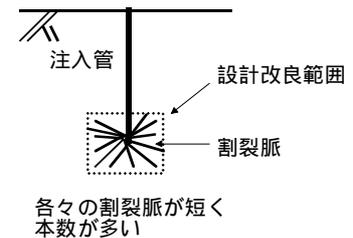


図2 割裂注入

おいてもこのようになることが多いと報告されている²⁾。

筆者らは薬液注入工法の品質改善と施工能率の向上を目的として、注入速度もしくは注入圧力を変化させながら注入を行う動的注入工法を提案し、浸透注入については模型実験を行い、割裂注入に関しては現場実験によりその改良効果を検討し、本工法の開発を行っている³⁾。

本報告では、これまでの模型実験及び現場実験により得られた動的注入工法の改良効果について報告する。

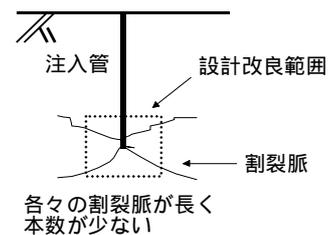


図3 改良効果が得られない注入の一例

2. 動的注入工法の概要

動的注入工法は現在のところ注入速度を図4のように制御して注入を行っている。実験では動的注入工法の注入開始から終了までの注入速度の平均値を平均注入速度 q_{avg} 、注入速度の両振幅を速度振幅 q_{p-p} と定義した。動的注入工法と従来工法の注入速度の比較には平均注入速度 q_{avg} を用いた。本工法では以下の利点が考えられる。

- 1) 注入速度を随時変化させているので、注入圧力が高い状態で持続することを防ぎ、割裂脈の発生を防止できる。
- 2) 万一、割裂脈が発生しても、固結体に悪影響を及ぼすような大きな割裂脈の発生を防止できる。
- 3) 割裂注入が主体となる粘性土地盤では短い割裂脈を多数発生させて、複合地盤としての強度を大きくすることができる。
- 4) 特別な注入装置を必要とせず、従来の装置を多少改造するだけで施工可能である。

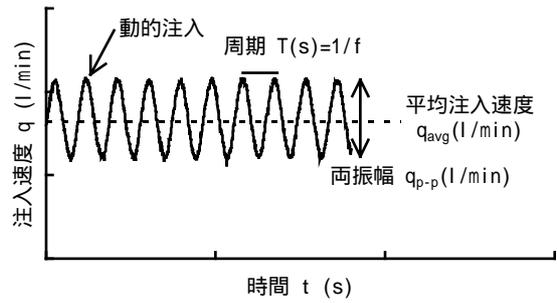


図4 動的注入工法の概念図

3. 模型実験

3.1 実験概要

実験装置を図5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。実験では地中の応力状態を再現するために模型地盤に 10tf/m^2 の上載圧を加えた。

模型地盤は珪砂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。相対密度80%での模型地盤の透水係数は $k=5.0 \times 10^{-4}(\text{cm/s})$ であった。珪砂8号の粒度分布と物性値を図6に示す。

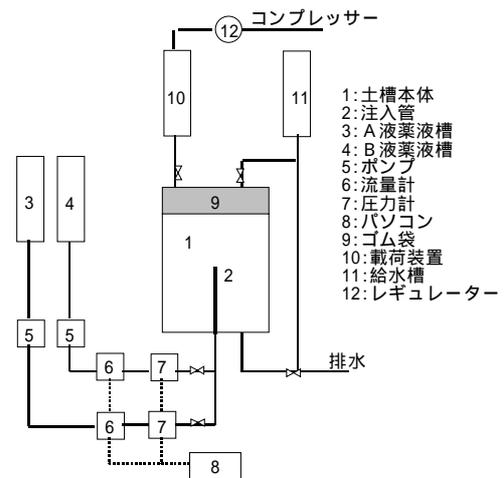


図5 実験装置

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16lとした。

実験は速度振幅及び周波数が改良効果に及ぼす影響を検討するために、速度振幅、周波数を変化させた実験を行った。実験ケースを表1に示す。

表1 実験ケース

実験ケース	注入方法	平均注入速度 q_{avg} (l/min)	速度振幅 $q_{\text{p-p}}$ (l/min)	周波数 f (Hz)	
1	ST1	従来工法	-	-	
2	ST2				
3	ST3				
4	DYqp1f01	動的注入	8.0	1.0	0.1
5	DY1qp2f01	動的注入	8.0	2.0	0.1
6	DY2qp2f01	動的注入	8.0	2.0	0.1
7	DY1qp5f01	動的注入	8.0	5.0	0.1
8	DY2qp5f01	動的注入	8.0	5.0	0.1
9	DYqp2f02	動的注入	8.0	2.0	0.2
10	DY1qp2f05	動的注入	8.0	2.0	0.5
11	DY2qp2f05	動的注入	8.0	2.0	0.5

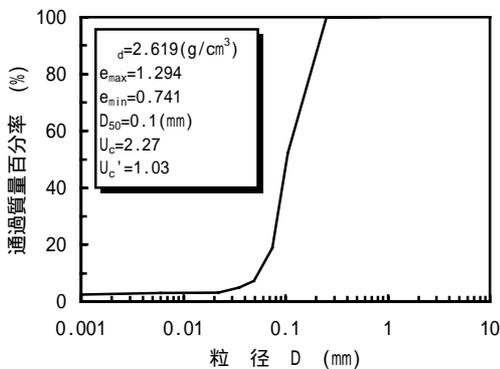


図6 珪砂8号の粒度分布

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、固結体の形状と強度分布を調べた。注入孔と同じ高さにおけるXY平面と平行な断面を注入孔断面（図7）と定義し、固結体の強度分布はこの断面において針貫入試験を行い調べた。

針貫入試験は直径1.25mmの針を2cm貫入させたときの貫入抵抗（以下、針貫入抵抗(kgf)とする）を調べるもので、これより固結体の強度を評価した。針貫入試験後、固結体より直径5cm、高さ10cmの供試体を採取し、 20 ± 1 の恒温槽において養生した。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。

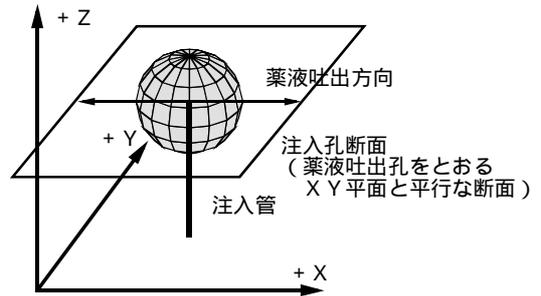


図7 注入孔断面

3.2 実験結果

写真1、2に模型実験より得られた固結体の形状の一例を示す。写真中の点線は設計改良範囲を、矢印は薬液の吐出方向を示している。写真より、従来工法では固結体が横長でいびつな形状を呈しているのがわかる。これは薬液吐出方向に割裂脈が発生、進展したためである



写真1 従来工法

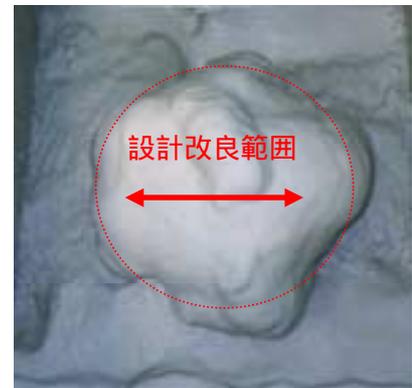


写真2 動的注入工法

と考えられ、目視による観察では薬液吐出方向に大きな割裂脈が確認された。結果として、従来工法では設計改良範囲が十分に改良されていない。これに対して、動的注入工法では固結体がほぼ球状となっており、設計改良範囲のほとんどが改良されている。また、目視による観察でも割裂脈はほとんどみられなかった。

図8に固結体の固結体積比 V/V_0 と速度振幅 q_{p-p} 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 は薬液の充填率を100%として算出した。図より、動的注入工法は固結体積比が従来工法よりも大きくなり、改良効果が高いことがわかる。速度振幅5(l/min)では固結体積比がさくなっているが、これは速度振幅が大きすぎると地盤を破壊し、割裂注入が主体になるためであると考えられる。目視による観察でも多数の割裂脈が確認された。これより、動的注入工法においては、適切な速度振幅値を用いる事で改良効果が高くなる事がわかる。

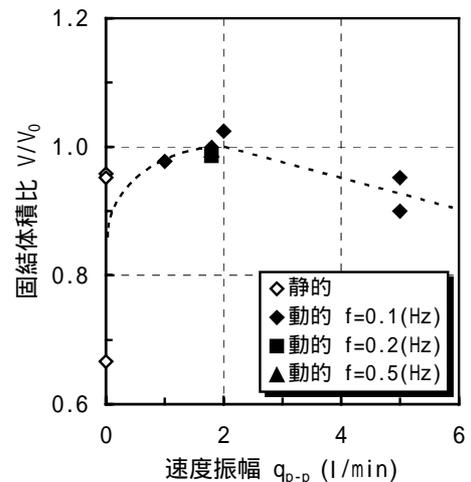


図8 固結体積比と速度振幅 q_{p-p} との関係

図9に固結体の針貫入抵抗の平均値と速度振幅 q_{p-p} との関係を示す。2つの図は同様な傾向を示しており、動的注入工法は従来工法よりも固結体の強度が大きくなっているのがわかる。また、周波数の強度に与える影響は必ずしも明確ではない。しかし、速度振幅が大きすぎると改良強度が低下する傾向があるのは固結体体積比の場合と同様である。

図11に固結体の透水係数 k と速度振幅 q_{p-p} との関係を示す。動的注入工法は従来工法よりも透水係数が若干小さくなる傾向があるが、ほとんどは $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-7} (cm/s)$ の範囲にあり、動的注入工法による固結体の透水性に関する改良効果は従来工法とほぼ同等以上であると考えられる。

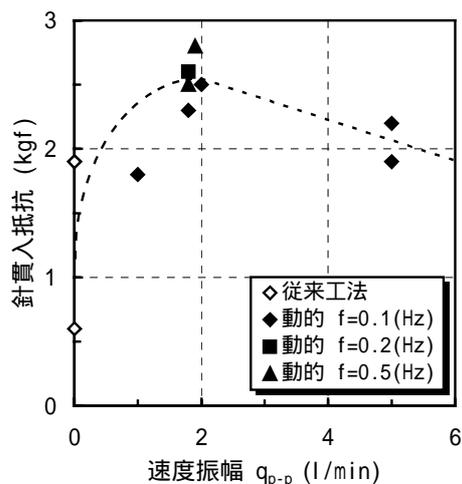


図9 針貫入抵抗と速度振幅 q_{p-p} との関係

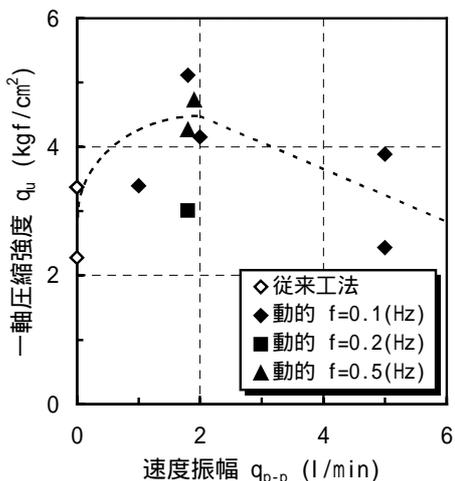


図10 一軸圧縮強度 q_u と速度振幅 q_{p-p} との関係

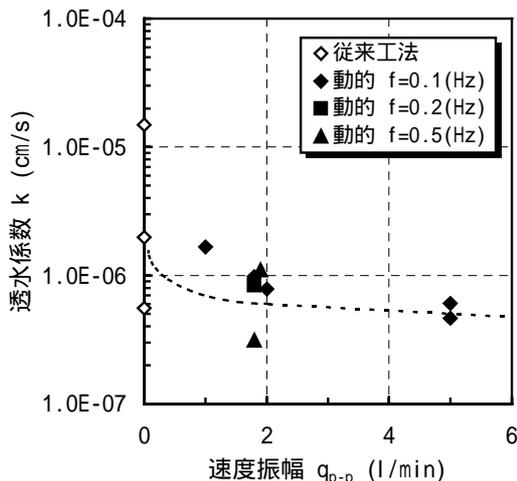


図11 透水係数 k と速度振幅 q_{p-p} との関係

4. 現場実験

4.1 実験概要

当該地盤は GL-0.5m 程度までが埋め土、GL-0.5~3.5m 程度までが関東ロームである。実験ヤードで行ったオートマチックラムサウンド試験の結果を図12に、GL-1.5m で採取した関東ロームの粒度分布を図13に示す。ローム地盤では一般的に薬液注入は割裂注入となることが知られており、動的注入工法の割裂注入に関する適用性を現場実験で検討した。

注入は図12に示すように GL-1.0~2.0m の領域に行った。注入条件は1ステップ当りの注入量を 70l とし、0.25m/ステップで注入を行い、総注入量を 280l とした。設計では注入率 35%で、直径 1m、高さ 1m の円柱ができる注入量である。

薬液はセメント系懸濁液型のものを用い、ゲルタイムを 15 秒に設定した。

実験は速度振幅及び周波数が改良効果に及ぼす影響を検討するために、速度振幅、周波数を変化させた実験を行った。実験ケースを表 2 に示す。

注入後、掘削を行い割裂脈の分布状況について調べた。

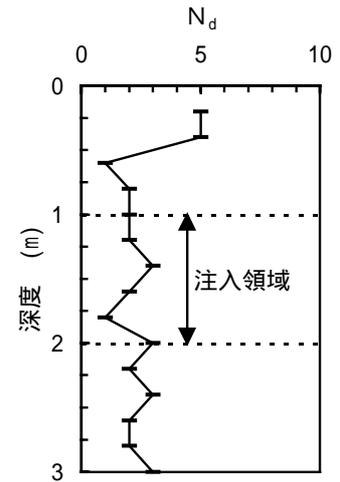


図 1 2 A R S 試験結果

表 2 実験ケース

実験ケース		注入方法	平均注入速度 q_{avg} (l/min)	速度振幅 q_{p-p} (l/min)	周波数 f (Hz)
1	STA	従来工法	10.0	-	-
2	DYN1	動的注入	10.0	1.0	0.1
3	DYN2	動的注入	10.0	2.0	0.1
4	DYN3	動的注入	10.0	4.0	0.1
5	DYN4	動的注入	10.0	1.0	0.2
6	DYN5	動的注入	10.0	1.0	0.5

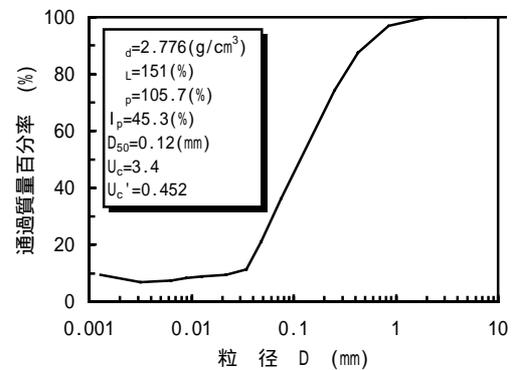


図 1 3 関東ロームの粒度分布

4.2 実験結果

割裂脈の分布状況の一例を写真 3、4 に示す。図中の矢印は割裂脈を示している。これより、動的注入工法は従来工法と比較して割裂脈が多数発生しているのがわかる。

図 1 4 に割裂脈の発生本数の深度分布を示す。ここで対象としている割裂脈は設計範囲内（注入管を中心とした直径 1m の円内）にあるものとし、設計範囲外へ進展しているものについては設計範囲内にある部分のみを有効とした。

速度振幅に着目すると、平均注入速度の 2 割の速度振幅のときに割裂脈の本数が最も多くなっている。また、GL-1.0m では土かぶり薄いために割裂脈が進展しやすくなり、割裂脈の本数が少なくなってい



写真 3 従来工法

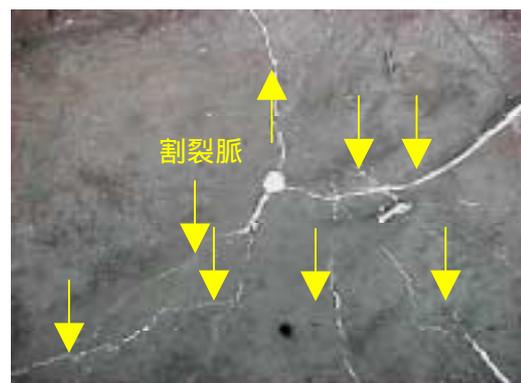


写真 4 動的注入工法

ると考えられる。ロームの下部は砂礫層があり、GL-2.0m 位置での注入は透水性の大きい礫地盤に薬液が流れたことが予想できるため、評価の対象外とした。

周波数に着目すると、周波数が大きくなるにつれて、割裂脈の本数が多くなっている。また、周波数を変化させた場合には、割裂脈の本数が深度に関係なく、全体的に増加する傾向があるのがわかる。これは速度振幅を変化させた場合にはみられない傾向である。

以上より、動的注入工法は従来工法よりも設計範囲内に多くの割裂脈を形成でき、割裂注入にも適用可能であると考えられる。

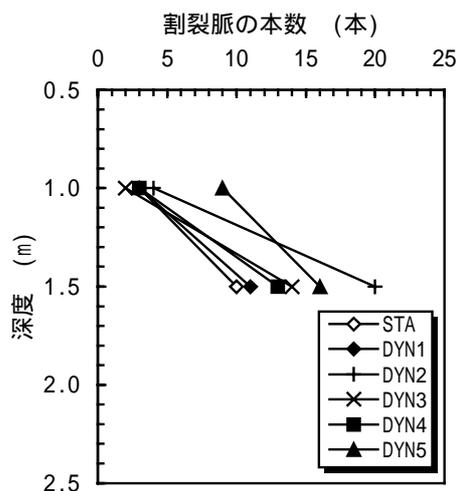


図 14 割裂脈の深度分布

5. まとめ

薬液注入工法の品質改善と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工法を提案し、模型実験及び現場実験によりその改良効果を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 動的注入工法は従来工法よりも固結体の体積が大きくなると考えられる。
- 2) 動的注入工法は従来工法よりも固結体の強度が大きくなると考えられる。
- 3) 固結体の体積および強度は速度振幅を大きくすると動的注入の効果が低下する。
- 4) 粘性土地盤において、動的注入工法は従来工法よりも設計範囲内に多くの割裂脈を形成でき、改良効果を向上できる。

6. おわりに

薬液注入工法の品質改善や施工能率の向上を目的として動的注入工法を提案し、模型実験、現場実験により検討を行った結果、良好な注入効果が得られることがわかった。

今後は試験施工、実施工などを行い、実用化を図りたいと考えている。

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、(社)土質工学会、pp.9～12、1985.2
- 2) 土質工学会編：薬液注入工法の調査・設計から施工まで、(社)土質工学会、pp.65～66、1985.2
- 3) 例えば、駒延勝広・村田修：動的注入工法の振幅および周波数が改良効果に与える影響、pp.19～24、鉄道総研報告、Vol.12、No.4、1998.4