

# 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

駒延 勝広 村田 修

Effect of Amplitude and Frequency of Dynamic Grouting Method on Improve the Ground

Katsuhiro KOMANOBE Osamu MURATA

Model grouting tests were carried out to investigate the effect of amplitude and frequency of the injecting speed. From these tests, the following conclusions were obtained. 1) The fracture generated by the dynamic grouting method was less than that by the ordinary method. The effect of the fracture generated by the dynamic grouting method on the shape of grouted part was not significant. The fracture generated by the dynamic grouting method seems to increase as frequency increases. 2) The strength of grouted part by the dynamic grouting method was greater than that by the ordinary method. The effect of the amplitude of injecting speed on the strength of grouted part was significant.

キーワード：薬液注入、動的注入、注入速度、振幅、周波数、割裂脈、針貫入抵抗、土槽実験

## 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<sup>1)</sup>。

薬液注入において所定の改良効果を得るには浸透注入することが重要であると考えられる。つまり、土の骨格をほとんど乱さずに、土の間隙を薬液で充填して土粒子を結合させることで、土の粘着力が高まり、地盤が不透水化し、良好な改良効果が得られる。しかし、浸透注入となるのは砂質系で透水性が比較的大きい地盤のみであり、透水性の低い地盤や、注入速度が速すぎたりすると、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割裂注入となり、良好な改良効果が得られないことが多い。これが薬液注入の信頼性が低いといわれる一因である。また、実際の注入でも浸透注入より、むしろ割裂注入となることが多いといわれている<sup>2)</sup>。

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方法(以下、動的注入とする)を提案し、模型土槽を用いた室内実験を行ってきた。その結果、動的注入では割裂脈が少ないので、固結体の強度が大きくなるなど、従来行われている速度一定で行う注入方法(以下、静的注入とする)よりも良好な改良効果が得られることがわかった<sup>3)</sup>。なお、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。

本報告では注入速度の振幅および周波数が改良効果に及ぼす影響について報告する。

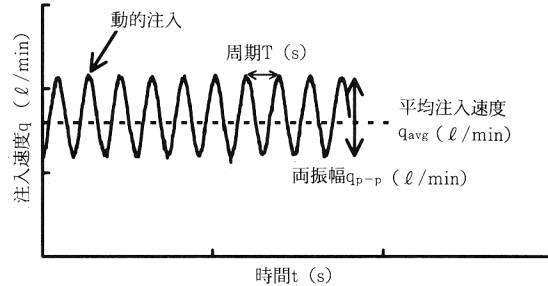


図1 動的注入の注入速度の波形例

## 2 実験概要

実験装置を図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構造となっており、模型地盤に98kPaの上載圧を加えて実験を行った。

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。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。今回は、動的注入の平均注入速度を約8(ℓ/min)と一定にし、注入速度の両振幅(以下、速度振幅 $q_{p-p}$ とする)、周波数 $f(=1/T)$ をそれぞれ数種類に変えて実験を行った。また、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

## 特集：土構造物

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、固結体の形状と強度分布について調べた。固結体の形状は模型土槽を図4に示す座標系とみなして調べた。また、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と定義し、固結体の強度分布はこの断面において調べた。その方法はまず注入孔断面を縦幅、横幅各5cmの格子ブロックに分割し、その後、全面が固結しているブロックにおいて中心部で針貫入試験を行い調べた。なお、格子ブロックの分割は注入管があるブロックの中心部と注入管の中心が一致するように行った。詳細を図5に示す。針貫入試験は直径1.25mmの針が2cm貫入するときの貫入抵抗を調べるものであり、この貫入抵抗を針貫入抵抗(kgf)と定義し、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、ラップフィルムで包み20±1°C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について調べた。

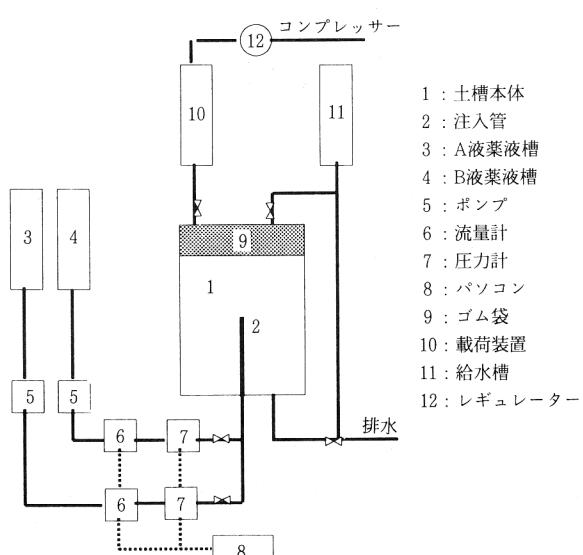


図2 実験装置

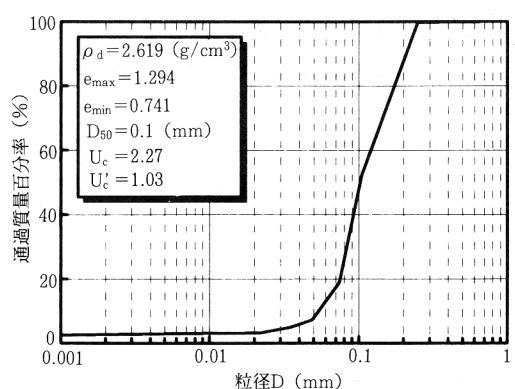


図3 硅砂8号の粒度分布とその物性値

表1 薬液の配合 (1 l)

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

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 ST1	静的	8.0	—	—
2 ST2	静的	8.0	—	—
3 ST3	静的	8.0	—	—
4 DYqp1f01	動的	8.0	1.0	0.1
5 DY1qp2f01	動的	8.0	2.0	0.1
6 DY2qp2f01	動的	8.0	2.0	0.1
7 DY1qp5f01	動的	8.0	5.0	0.1
8 DY2qp5f01	動的	8.0	5.0	0.1
9 DYqp2f02	動的	8.0	2.0	0.2
10 DY1qp2f05	動的	8.0	2.0	0.5
11 DY2qp2f05	動的	8.0	2.0	0.5

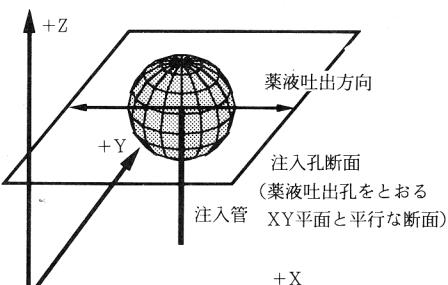


図4 模型土槽の座標系

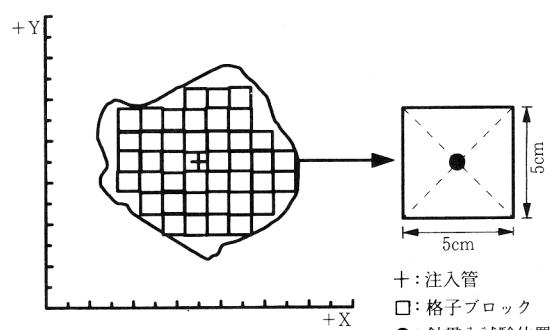


図5 強度分布の測定方法

## 3 実験結果

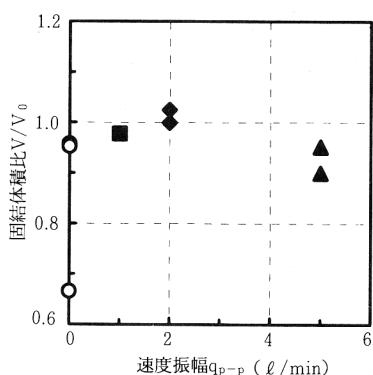
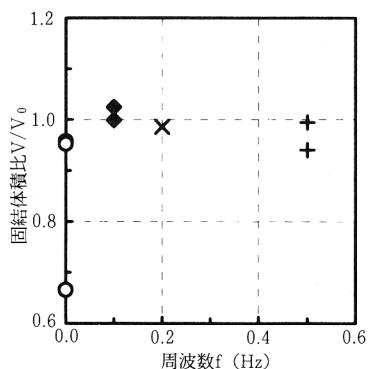
## 3.1 固結体の形状

図6に周波数が0.1(Hz)のときの動的注入による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、 $V_0$ は薬液の填充率 $\alpha$ を100%として算出した。図より、動的注入では固結

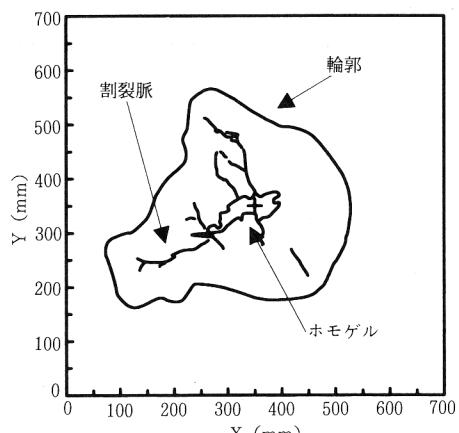
体積比が静的注入よりも若干大きくなっているのがわかる。また、動的注入で固結体積比が最も大きかった速度振幅 $2(\ell/\text{min})$ のときと、最も小さかった $5(\ell/\text{min})$ のときに10%程度の差があることから推察すると、動的注入では速度振幅が大きすぎると、固結体の体積が小さくなると考えられる。

図7に速度振幅が $2(\ell/\text{min})$ のときの動的注入による固結体の固結体積比 $V/V_0$ と周波数 $f$ との関係を示す。これも速度振幅のときと同様に、動的注入の方が静的注入よりも固結体積比が若干大きくなっているのがわかる。また、今回実験を行った $0.1\sim0.5(\text{Hz})$ の比較的低い周波数の範囲では、どの周波数においても固結体積比は1.0程度であり、動的注入の周波数が固結体の体積に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図8に注入孔断面での薬液の浸透状況と割裂脈の分布状況の一例を示す。図中の+印は注入管を示している。図より、静的注入では長い割裂脈が発生しており、固結形状も割裂脈に沿った形状をしているのがわかる。つまり、静的注入では割裂脈が固結体の形状に及ぼす影響が大きいといえる。これに対して、動的注入では割裂脈の発生が少なく、また、発生した割裂脈の長さも短く、薬液もほぼ円状に浸透しているのがわかる。つまり、動的注入では割裂脈の発生が少なく、割裂脈が発生しても固結体の形状に及ぼす影響は小さいといえる。また、動的

図6  $V/V_0$ と $q_{p-p}$ との関係図7  $V/V_0$ と $f$ との関係

注入では周波数が高くなると、割裂脈が多く発生する傾向がみられた。これは周波数が高くなると、注入圧力が注入速度の挙動に追随できず、注入圧力が完全に低下する前に注入速度が増加し、結果として、高い圧力状態が持続してしまうためであると考えられる。



(a) 静的注入 (実験ケース: ST1)

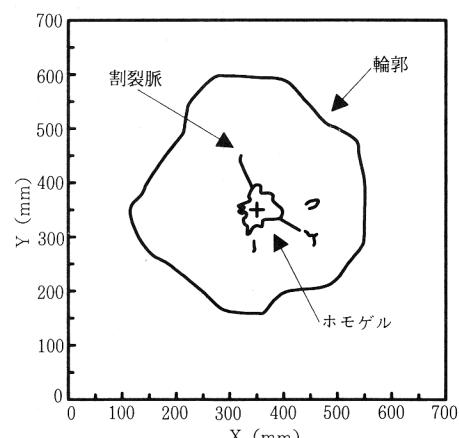
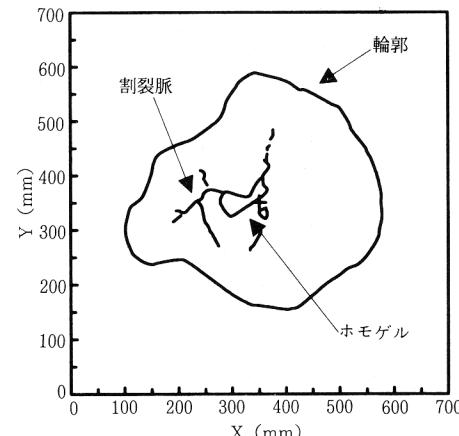
(b) 動的注入: 速度振幅 $2(\ell/\text{min})$ , 周波数 $0.1(\text{Hz})$   
(実験ケース: DY1qp2f01)(c) 動的注入: 速度振幅 $2(\ell/\text{min})$ , 周波数 $0.5(\text{Hz})$   
(実験ケース: DY1qp2f05)

図8 注入孔断面での薬液の浸透状況の一例

## 特集：土構造物

## 3.2 固結体の強度

図9に注入孔断面での固結体の強度分布の一例を示す。図中の菱形は針貫入抵抗を示しており、色が黒くなるにつれて固結体の強度が大きくなっていることを示している。こ

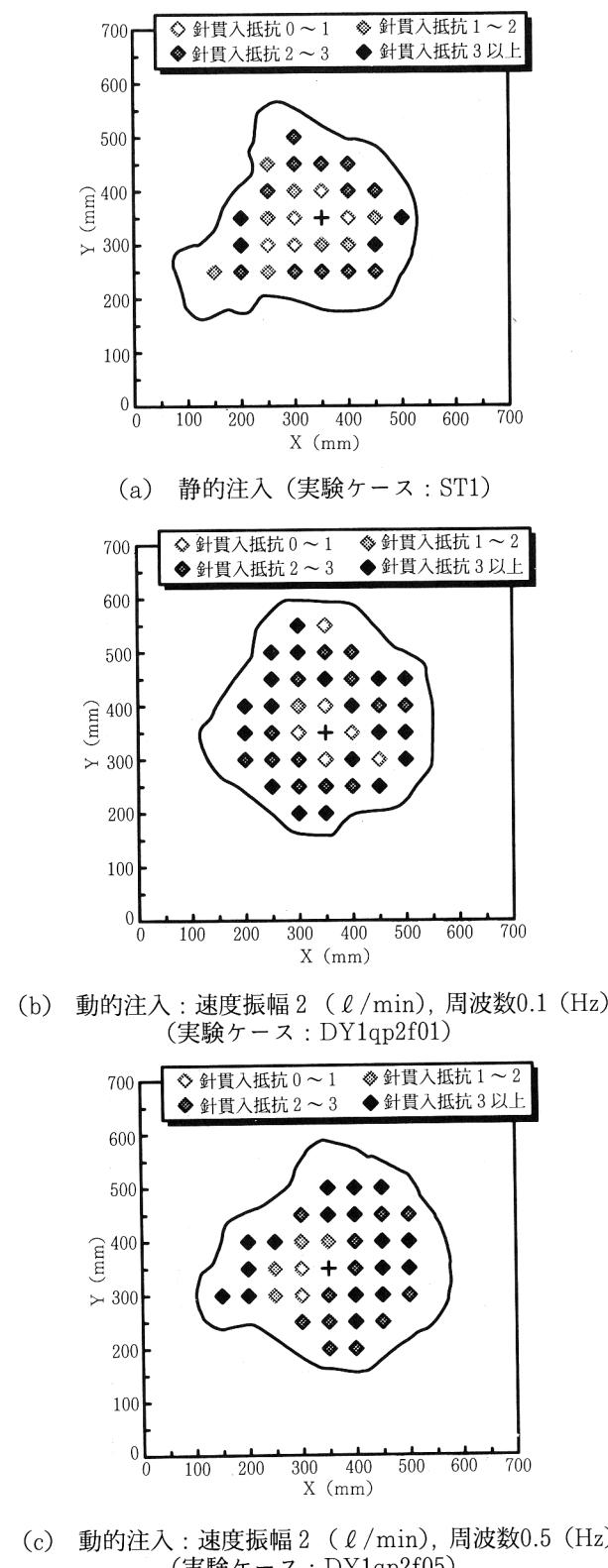
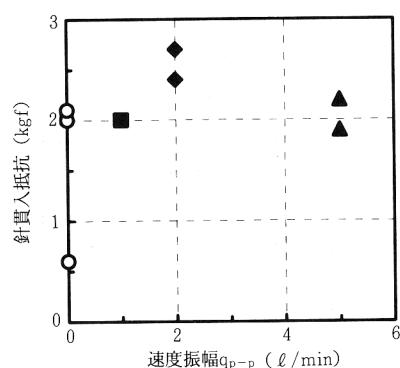


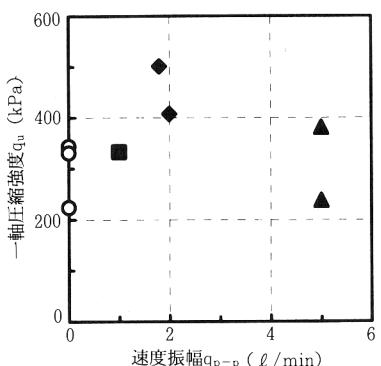
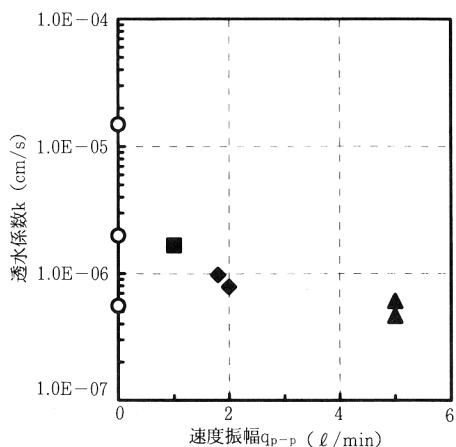
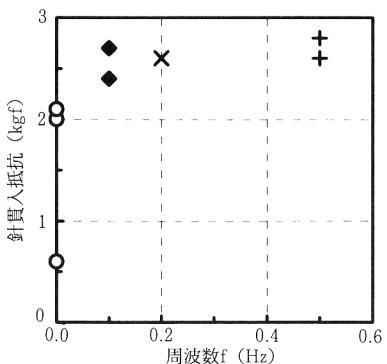
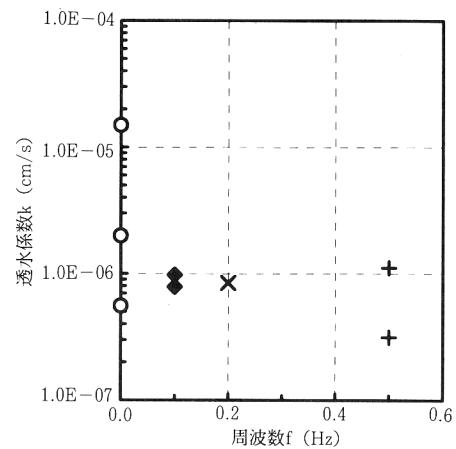
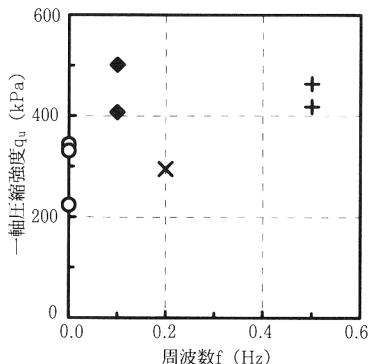
図9 注入孔断面での強度分布の一例

れより、動的注入では静的注入よりも針貫入抵抗の大きい箇所が多く、固結体の強度が大きくなっているのがわかる。

図10に周波数が0.1 (Hz) のときの動的注入による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。平均値で比較しても、動的注入の方が静的注入よりも針貫入抵抗が大きくなっているのがわかる。また、動的注入の速度振幅が針貫入抵抗に及ぼす影響は、速度振幅が2 ( $\ell / \text{min}$ ) のときに約2.7 (kgf) と最も大きく、5 ( $\ell / \text{min}$ ) のときに約2.1 (kgf) と最も小さくなり、固結体積比のときと同様の傾向がみられた。図11に周波数が0.1 (Hz) のときの動的注入による固結体の一軸圧縮強度 $q_u$ と速度振幅 $q_{p-p}$ との関係を示すが、この図においても、動的注入の方が静的注入よりも固結体の強度が大きくなっているが、針貫入抵抗のときと同様な傾向を示している。以上より、動的注入で固結体の強度増加を期待するには速度振幅が重要であり、また、固結体の体積が大きくなると固結体の強度も大きくなると考えられる。

図12に速度振幅が2 ( $\ell / \text{min}$ ) のときの動的注入による固結体の針貫入抵抗の平均値と周波数 $f$ との関係を示す。これも速度振幅のときと同様に、動的注入の方が静的注入よりも針貫入抵抗が大きくなっているのがわかる。また、どの周波数においても針貫入抵抗は2.7 (kgf) 程度であり、動的注入の周波数が固結体の強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。図13に速度振幅が2 ( $\ell / \text{min}$ ) のときの動的注入による固結体の一軸圧縮強度 $q_u$ と周波数 $f$ との関係を示す。この図によると、動的注入の方が静的注入よりも固結体の強度が大きくなっているが、針貫入抵抗のときと異なった傾向を示しているのがわかる。これは注入孔断面での割裂脈の分布状況などから推察すると、周波数が高くなると、割裂脈の発生が多くなり、一軸圧縮強度は供試体の採取位置の違いによる影響を多大に受けたためであると考えられる。

図10 針貫入抵抗と $q_{p-p}$ との関係

図 11  $q_u$  と  $q_{p-p}$  との関係図 14  $k$  と  $q_{p-p}$  との関係図 12 針貫入抵抗と  $f$  の関係図 15  $k$  と  $f$  の関係図 13  $q_u$  と  $f$  の関係

### 3.3 固結体の透水性

図14に周波数が0.1(Hz)のときの動的注入による固結体の透水係数kと速度振幅 $q_{p-p}$ との関係を、図15に速度振幅が2(l/min)のときの動的注入による固結体の透水係数kと周波数fとの関係を示す。どちらも、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が、そのほとんどが $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-7}$ (cm/s)の範囲にあり、また、透水試験の試験精度から考えると、動的注入と静的注入では固結体の透水性は同程度であると考えられる。また、動的注入の速度振幅、周波数が固結体の透水性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

### 4 まとめ

動的注入の注入速度の振幅および周波数が改良効果に及ぼす影響について得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 動的注入は静的注入よりも固結体の体積が若干大きくなる。また、動的注入では速度振幅が大きすぎると、固結体の体積が小さくなると考えられる。
- (2) 動的注入は静的注入に比べて割裂脈の発生が少なく、割裂脈が発生しても固結体の形状に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、動的注入は周波数が高くなると、割裂脈が多く発生する傾向がみられる。
- (3) 動的注入は静的注入よりも固結体の強度が大きくなる。動的注入で固結体の強度増加を期待するには速度振幅が重要である。また、固結体の体積が大きくなると固結体の強度も大きくなると考えられる。
- (4) 動的注入は静的注入よりも透水係数が若干小さくなる傾向があるが、透水試験の試験精度から考えると、動的注入と静的注入が固結体の透水性に与える影響は同程度であると考えられる。また、動的注入の速度振幅、周

**特集：土構造物**

波数が固結体の透水性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

**5 おわりに**

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、模型土槽を用いた室内実験により、その注入効果の検討を行ってきた。今後は、室内実験により得られた基礎データをもとに現場での実証実験や、粘性土地盤や互層地盤、セメント系注入材での室内実験を行い、最終的には、より品質の高い注入方法や注入管理手法を提案していく予定である。

なお、本報告は東急建設株式会社との共同研究の一部を報告したものである。

**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) 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
- 3) 駒延勝広, 大河内保彦：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—、東急建設技術研究所報, No.23, 1997

**駒延勝広**

所属職名：技術開発事業本部構造物技術開発事業部（土構造）、

技師

電話 : NTT 042-573-7280 JR 053-7280

E-mail : koma@rtri.or.jp

専門分野：土質工学

**村田 修 工博**

所属職名：技術開発事業本部（計画）、主幹

電話 : NTT 042-573-7482 JR 053-7482

E-mail : o-murata@rtri.or.jp

専門分野：土質工学