

近年の注入工事例と改良体の強度特性

仲山貴司¹・牛田貴士²・焼田真司³・岡野法之⁴

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: nakayama@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: ushida@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: yakita@rtri.or.jp

⁴正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: nokano@rtri.or.jp

鉄道の建設工事では作業時間や空間の制約を受けることが多く、補助工法に設備が小型で作業の方向性に自由度がある注入工法が数多く利用されている。また一方で、近年は液状化対策に代表される本設の地盤改良としての適用の増加に伴い、新たな注入工法、注入材の開発が数多く見られる。そこで、本研究では、これら新技術も取扱った鉄道工事における注入のマニュアル整備のため、注入工事例を収集・分析するとともに、近年使用実績が多い注入材の強度特性を把握するため室内試験を実施した。

Key Words : chemical grouting, case study, indoor test

1. 研究目的

鉄道の建設工事では作業時間や空間の制約を受けることが多く、補助工法に設備が小型で作業の方向性に自由度がある注入工法の適用事例が多い。鉄道構造物の注入に対する基準類としては、昭和61年に国鉄により策定された「注入の設計施工指針¹⁾」(以下、注入指針と記す)があり、これまで注入工事に活用されてきた。

ただし一方で、構造物直下の基礎地盤の長期的な液状化対策など本設としての注入の利用が脚光を浴び、現在は新たな工法、材料の開発が数多くなされている。そのため、これらの工法、材料も含めた注入に関する情報の共有を図るとともに、効果的な注入の設計・施工を行うため、上記指針の改訂が要望されていた。

そこで本研究では、鉄道における近年の注入工事例を収集・分析するとともに、近年使用実績が多い注入材の強度特性を室内試験から推定する方法を検討した。

2. 事例調査

(1) 概要

事例調査の主な調査項目である①注入工法、②注入材、③注入速度とゲルタイムについて以下に調査結果を示す。
なお、注入指針では注入を「地盤注入」と「トンネル

地山注入」に区分して取り扱って、得られた知見を記載する。「地盤注入」とは、都市部の掘削土留め工、シールドトンネル工、線路下横断工等に伴い実施する注入であり、「トンネル地山注入」とは、山岳工法によるトンネルの施工に伴い実施する注入である。事例調査もこの区分に基づき収集しており、「地盤注入」で221件、「トンネル地山注入」で26件のデータを収集した。

これら事例の土質区分は図-1、図-2の通りである。また、注入の目的は、地盤注入では図-3に示す通り止水と地盤強化を兼ねる場合が最も多く、止水のみを目的とする場合と合わせると全体の91%を占め、地盤強化のみを目的とする場合は全体の9%に留まっている。トンネル地山注入では、図-4に示す通り止水と地盤強化を兼ねる場合、止水のみの場合、地盤強化のみの場合の利用がほぼ同じ割合である。

(1) 注入工法

地盤注入では、図-5に示す通り二重管ストレナ工法(複相式)が65%と最も多く用いられ、次いで二重管ダブルパッカ工法(シールグラウト方式)が17%である。また、比較的新しい工法である二重管ストレナ工法(地山パッカ方式)、結束細管多点注入工法の利用実績も少ないながらも確認された。

トンネル地山注入でも、図-6に示す通り二重管ストレナ工法(複相式)が最も多く用いられ、次いで二重管ダ

ブルパッカ工法が多く用いられている。ただし、二重管ストレーナ工法(单相式)が用いられる割合が地盤注入に比べて高く、従来工法の適用が多いことが分かる。

注入指針では注入管の構造を「単管」と「多重管」に区分して、「単管」ではロッドとストレーナ、「多重管」では二重管ダブルパッカ、二重管単相、多重管複相に分類している。これに対して、本研究の事例調査から、現在は二重管ストレーナおよび二重管ダブルパッカ(シ

管ダブルパッカ)が主流を占めるとともに、地盤注入でールグラウト方式(注入指針での多重管複相および二重は、注入指針に記載されていない、これらを改良した新たな工法の利用が見られる。

これらの工法は本設利用を目的として、削孔精度や注入範囲の精度向上を図った工法であり、都市部の鉄道工事では、注入精度の向上が望まれていることが推察される結果である。

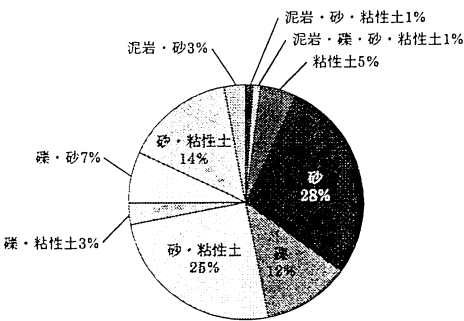


図-1 地層構造(地盤注入)

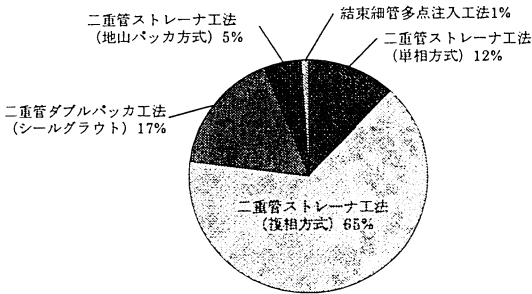


図-5 注入工法(地盤注入)

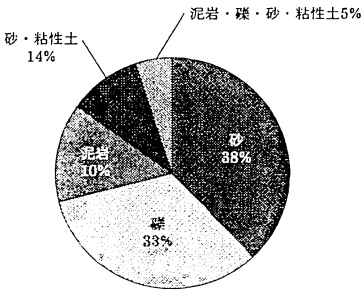


図-2 地層構造(トンネル地山注入)

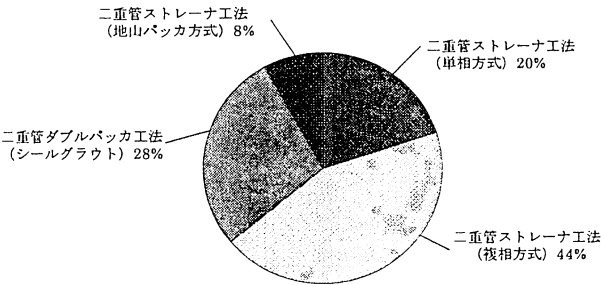


図-6 注入工法(トンネル地山注入)

(2) 注入材

地盤注入では、図-7に示す通り二重管ストレーナ工法(複相式)、二重管ストレーナ工法(地山パッカ方式)ともに水ガラス系溶液型注入材が100%を占める。また、二重管ダブルパッカ工法(シールグラウト方式)は二次注入材として懸濁液型注入材が使用される場合が4%程度あるが、水ガラス系溶液型注入材である場合が96%を占める結果となった。二重管ストレーナ工法(单相式)では、9%程度と懸濁液型注入材の使用が少ない。

トンネル地山注入では、図-8に示す通り二重管ダブルパッカ工法では二次注入材に懸濁液型注入材が用いられる場合が多く70%程度を占める。また、二重管ストレーナ工法では、これと逆に二次注入材に水ガラス系溶液型注入材を使用する場合が多い。二重管ストレーナ工法(单相式)では懸濁液型注入材が100%を占める。

トンネル地山注入に比べ地盤注入では、水ガラス系溶液型注入材の使用割合が高い。都市部の鉄道工事では、未固結の砂、粘性土のような間隙が小さい地層への注入が多いこと、重要構造物に対する近接施工となる場合も

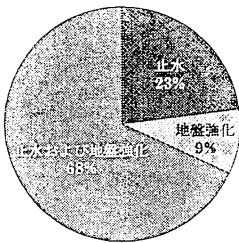


図-3 注入目的(地盤注入)

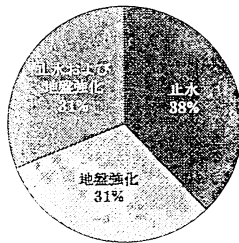
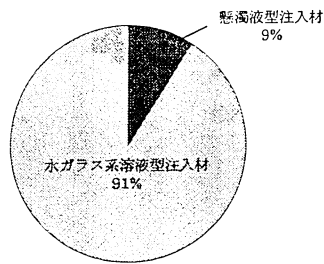
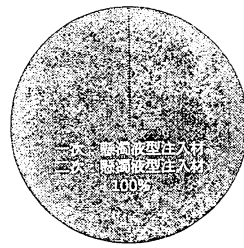


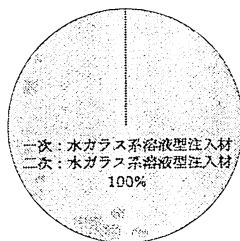
図-4 注入目的(トンネル地山注入)



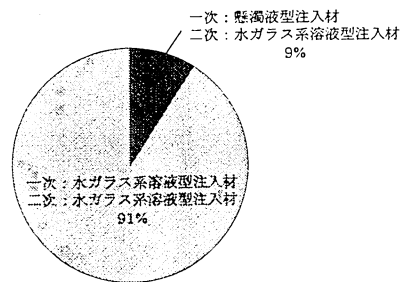
a) 二重管ストレーナ工法(単相式)



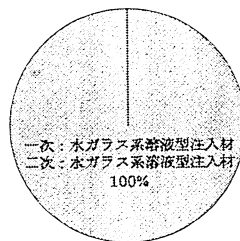
a) 二重管ストレーナ工法(単相式)



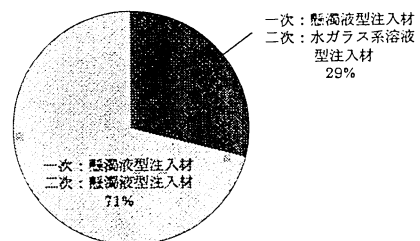
b) 二重管ストレーナ工法(複相式)



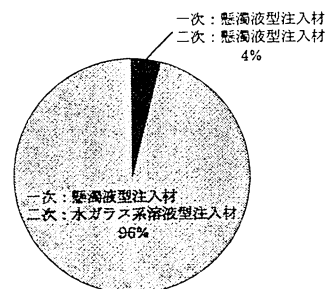
b) 二重管ストレーナ工法(複相式)



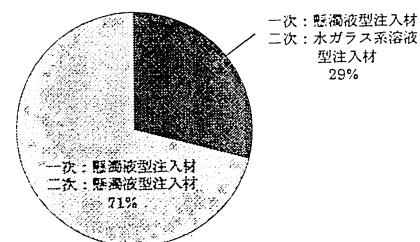
c) 二重管ストレーナ工法(地山パッカ方式)



c) 二重管ストレーナ工法(地山パッカ方式)



d) 二重管ダブルパッカ工法(シールグラウト方式)



d) 二重管ダブルパッカ工法(シールグラウト方式)

図-7 注入材(地盤注入)

図-8 注入材(トンネル地山注入)

多く、周辺地盤への影響を最小限とする必要があることから、浸透性の高い水ガラス溶液型注入材の使用が多いものと考えられる。

(3) 注入速度とゲルタイム

注入速度とゲルタイムの関係を図-9に示す。水ガラス系溶液型で8~20L/min、懸濁液型で20~30L/minの注入速度が用いられているが、水ガラス系溶液型については工法別にみると、二重管ストレーナ工法では9~18L/min、二重管ダブルパッカ工法では8~12L/minが多く用いられ

ていることが分かる。注入速度とゲルタイムについては、注入指針では、水ガラス溶液型注入材で8~20L/min、懸濁液型注入材で20~30L/minの注入速度が標準とされており、本研究の調査結果も同様な傾向を示している。ただし、工法別に見ると二重管ダブルパッカ工法ではこの範囲の中でも遅い注入速度が用いられている。注入材と同様に周辺地盤への影響を懸念する場面が増加していることに加え、ゲルタイムが長い中・酸性の水ガラス溶液型注入材が開発されたことが背景にあるものと考えられる。

4. 室内試験

近年開発され、使用実績の多い水ガラス系溶液型注入材で固化した改良体の強度特性を把握するため、①モールドで作成した改良体(以下、モールド試験と記す)と②模型地盤に浸透注入して作成した改良体(以下、浸透注入試験と記す)の一軸圧縮強度を測定した。

注入材には仮設の注入で数多く使用される中・酸性の水ガラス系溶液型(以下、中・酸性と記す)と、液状化対策等に用いるために耐久性を向上させた中・酸性の水ガラス系溶液型(以下、特殊中・酸性と記す)に分類されるものを使用した。なお、どちらもゲルタイムは10時間程度と長い、標準配合の水ガラス濃度は25%であり、それぞれの注入材を水ガラス濃度5%～25%に配合調整して使用した。

(1) モールド試験

φ5cm×10cmのモールドにてん充率が100%となる量の注入材、標準砂の順に投入後、一定期間養生した供試体を用いた一軸圧縮試験を実施した。なお、養生方法は注入材が固結するまでの1日は気中養生とし、以降は水中養生とした。

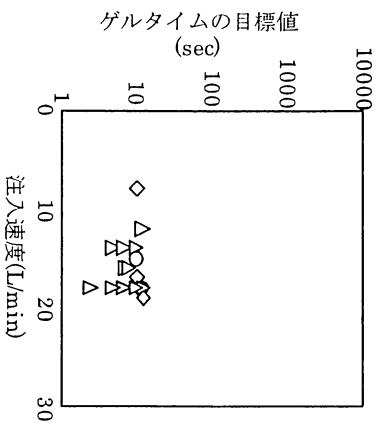
水ガラス濃度と一軸圧縮強度の関係を図-10に示す。

この結果は、注入指針に掲載されている注入材の強度特性²⁾とともに整理した。注入指針に記載される試験結果(以下、試験Aと記す)では、アルカリ性にばらつきが見られるが、本研究の試験結果(以下、試験Bと記す)では、浸透中にゲル化せずに比較的均質な供試体を作成することができ、水ガラス濃度と一軸圧縮強度とに線形に近い相関があることを確認することができた。

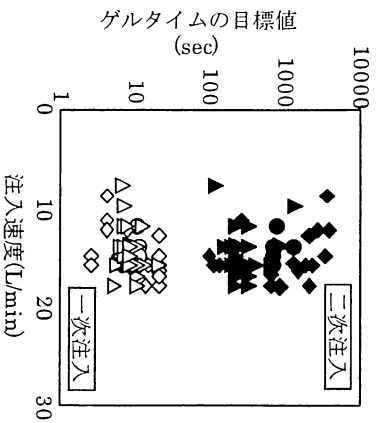
また、図-11に試験A、試験Bの一軸圧縮強度と弾性係数の関係を示す。これらの間にも比例に近い関係が見られた。注入指針に掲載される現場試験結果に、この近似式を重合わせた場合にも良い一致が見られた(図-12)。

ただし、試験Bの材齢と一軸圧縮強度の関係を図-13に示す。どちらの注入材も28日程度で強度増加が収束する傾向が確認されたが、それ以前の強度発現特性には、注入材種類による差異が認められた。

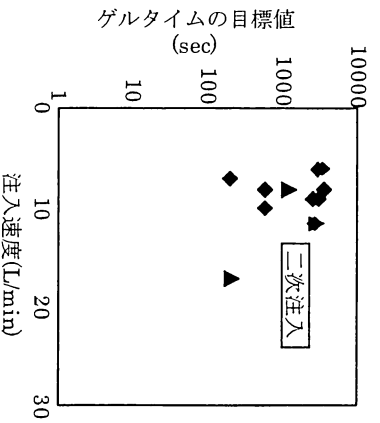
以上の結果から、中・酸性および特殊中酸性の一軸圧縮強度と水ガラス濃度、弾性係数(E_0)には良い比例関係が見られたことから、実務の設計において、現場の制約などから事前に発現強度を把握できない場合には、水ガラス濃度からある程度の一軸圧縮強度と弾性係数の推定が可能であることが示唆される。これは注入材のゲルタイムが長くなったことにより、均質な改良体が作成しやすくなったことに起因するものと考えられる。この場合、一般的な水ガラス溶液型注入材の水ガラス濃度である20～25%では一軸圧縮強度は300～600kN/m²となる。



a) 二重管ストレーナ工法(単相式)



b) 二重管ストレーナ工法(復相式)



c) 二重管ダブルパッカ工法

- ◆◇：水ガラス系溶液型(無機系、アルカリ性)
- ▲△：水ガラス系溶液型(無機系、中・酸性)
- ：水ガラス系溶液型(有機系、アルカリ性)

図-9 注入速度とゲルタイムの関係

以上の結果から、近年開発された注入工法を採用した事例は未だ少ないが、地盤注入では利用され始めていること、また、注入材で水ガラス溶液型注入材の適用が多く、注入速度も二重管ダブルパッカ工法(シールグラウト方式)では低い注入速度となっていることから、近年では、より注入精度が高く、周辺地盤への影響が小さい注入が採用される傾向にあると考えられる。

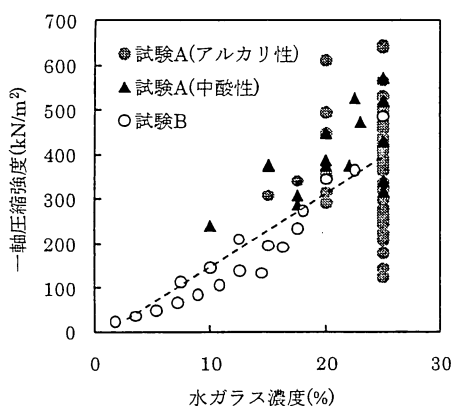


図-10 水ガラス濃度と一軸圧縮強度の関係

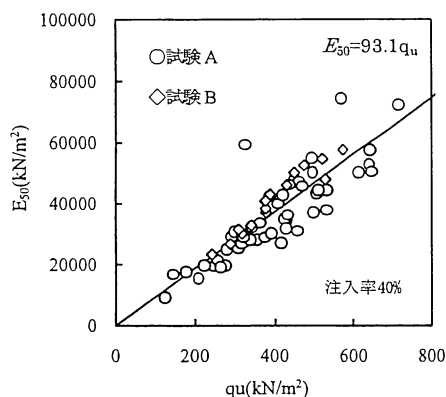


図-11 一軸圧縮強度と弾性係数の関係(試験B)

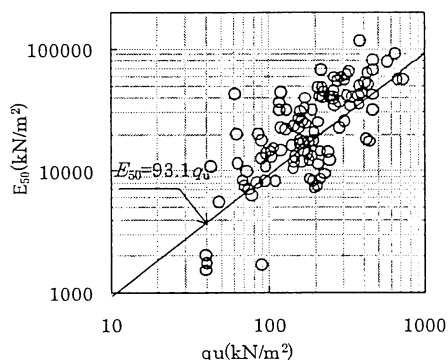


図-12 一軸圧縮強度と弾性係数の関係(現場注入試験)

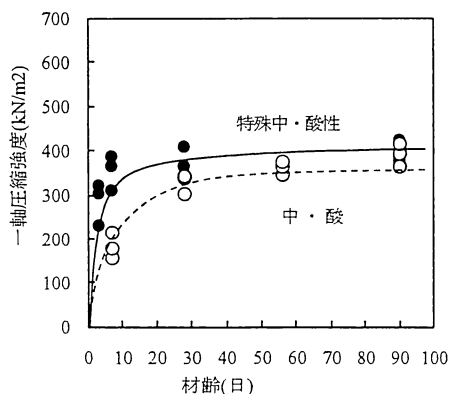


図-13 材齢と一軸圧縮強度の関係

ただし、近年の注入材ではゲルタイムが長いことに起因して、これらの一軸圧縮強度や弾性係数(E_{50})を得るためには、想定する強度を発現するまで養生する必要があることも確認された。

(2) 浸透注入試験

室内では理想的な供試体が作成できる中結、緩結の注入材も、改良体内で強度にばらつきが生じる可能性がある。これは地層構成や施工精度、注入形態などによって発生するものであり、これら要因は複雑に関係し合う。そのため、一般にはためし注入などで注入効果の確認を行う必要がある。

ただし、近年では単一層に浸透注入を想定して注入する事例も見られる。本研究では、このような場合に改良体内で生じる強度のばらつき程度を把握することを目的に、浸透注入試験を実施した。図-14に示すシリンダー内に作成した模型地盤に注入材を定速で下向きに浸透注入させて供試験体を作成して、改良体内の強度分布を測定した。詳細な試験手順は以下の通りである。

①地盤の準備

高さ1m、内径150mmのシリンダーに、珪砂7号を(飽和状態、相対密度70%)を水中落下法で投入して地盤を作成する。作成にあたっては、3層に分けて締固め、目標相対密度となるように調整した。なお、地盤の上下面にはフィルター材、金網を設置した。

②注入作業

地盤を作成したシリンダーを、定速で稼働するピストン付きの注入材タンクに接続し、てん充率80%となる注入材を注入速度1L/minで地盤に注入した。なお、注入材には中・酸性の水ガラス溶液型注入材を水ガラス濃度25%で使用した。

③養生および脱型

地盤を作成したシリンダーを3日静置した後、シリンダーから固結した地盤を取り出し、設定した位置で $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の供試体を整形した。

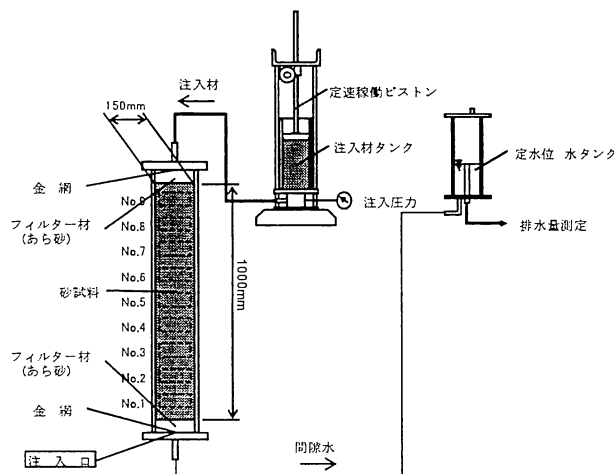


図-14 浸透注入試験

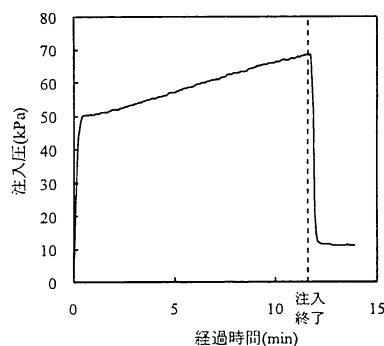


図-15 注入圧の経時変化

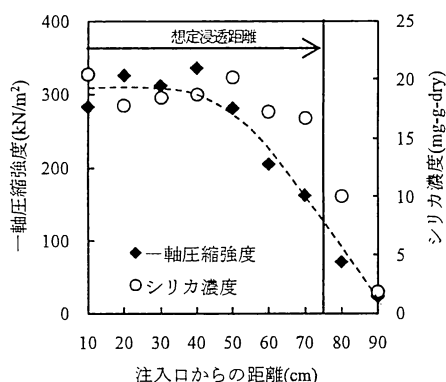


図-16 一軸圧縮強度と浸透距離の関係

図-15に注入時の注入圧の経時変化を示す。注入とともに注入圧が連続的に上昇しており、途中でゲル化することなく注入されていることがわかる。

図-16に注入面からの浸透距離と一軸圧縮強度、シリカ濃度の関係を示す。この結果、浸透境界面近傍では注入口近傍に比べ、5割程度の強度低下が見られることが分かる。

以上の結果から、モールド試験では均一な供試体が可能であったが、浸透注入試験ではばらつきが見られる結果となった。シリカ濃度も同様な傾向を示しているため、これは注入材のゲル化までに注入材が密度差により下方に移流した結果と考えられる。このため、実際に注入した改良体の一軸圧縮強度を評価する場合には、この影響による補正が必要であり、本研究からはこの影響として、改良体表面で5割程度の補正が必要であることが確認された。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1) 事例調査の結果から、使用される注入工法、注入材は、注入精度が良く、周辺地盤への影響の小さいものが選定される傾向にあることが確認された。

(2) モールド実験から、緩結の注入材であればモールドで容易に供試体を作成することができること、水ガラス濃度と一軸圧縮強度、弾性係数(E_{50})には比例関係にあることが確認された。この結果から、相対密度70%の珪砂7号の場合、一般的な水ガラス溶液型注入材の水ガラス濃度である20~25%では一軸圧縮強度は300~600kN/m²となった。弾性係数(E_{50})は一軸圧縮強度の93.1倍となった。

(3) モールド実験から、コンクリートと同様に強度発現までにある程度の期間を必要とすること、注入材種類によって強度発現特性が異なることを把握した。

(4) 浸透注入試験から、移流現象の影響を受け、改良体の強度は浸透境界面付近で5割程度の強度低下が見られた。したがって、実際の注入の一軸圧縮強度、弾性係数を推定する場合には、上記のモールド実験結果に対して、この影響を考慮する必要があるものと考えられた。

本研究は、鉄道工事における注入のマニュアル整備のために利用する予定である。取り纏めたマニュアルが実務における有用なデータとなれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道：注入の設計施工指針，1986。
- 2) 宮武洋之，小山幸則，酒井克衡：水ガラス系薬液を用いた固結砂の強度試験，土木学会第41回年次学術講演会，1986。

CASE STUDY OF GROUTING AND INDOOR TEST OF INJECTED SOIL

Takashi NAKAYAMA, Takashi USHIDA, Shinji YAKITA and Noriyuki OKANO

This study aims to make new guidance book on grouting. The construction cases were collected and the frequency in use of new method was analyzed. In addition, the strength of solidified soil by injecting was measured by the indoor test, and the strength that was able to be presumed according to the density of water glass was shown.