

(65) 土被りの浅い砂質地山トンネルにおける

薬液注入工法の地山補強効果

フジタ工業(株) 技術研究所 正会員 ○佐藤研一 田口善文 香川和夫
土木本部 酒向信一

The Effect of Ground Improvement by Chemical Grouting Method in Shallow Tunnel

Kenichi SATO, Yoshifumi TAGUTI, Kazuo KAGAWA, Shinichi SAKOU
FUJITA Corporation

Abstract

The chemical grouting method is a reinforcement to stabilized the face and to control surface settlement. But generally, the effect of this method has been not reliability, and the execution management has been difficult.

In this paper, the chemical grouting test in the large scale soil box, and a series of large scale triaxial compression test with model of the sand gel performed in order to investigate the strength of sand reinforced with chemical grout.

The results were represented comparing the stress-strain relationship of reinforced sand with that of sand, and represented relationship the amount of sand gel and apparent cohesion.

1. はじめに

都市部に地下鉄等のトンネルを掘削する場合、その地山が未固結で土被りの薄い場合が少なくない。そのため掘削を進める際の切羽の自立や、構造物に影響を及ぼす地表面沈下等が大きな問題となってくる。

薬液注入工法は、その対策工法として重要な補助工法の一つである。しかし、薬液注入工法は注入地盤の内部状態が複雑多岐にわたり不均一なために、その注入効果は信頼性に欠けており、そのために、この工法は一般に施工管理が非常に難しいとされている。

そこで、都市トンネルにおける薬液注入工法について、合理的かつ経済的な注入技術の開発にあたりその基礎的な研究の一環として大型土槽を用いた注入実験を行なった。そして、その実験より得られた結果をもとに大型三軸試験機を用いたモデル試験を行ない、薬液注入による地山強度の増加を調べたものである。

2. 土槽実験

薬液注入の薬液の種類による地盤内の固結体の形状を確認し、薬液の基本的な性質を知るために大型土槽中に均一な地盤を作成し、薬液の注入実験を行なった。

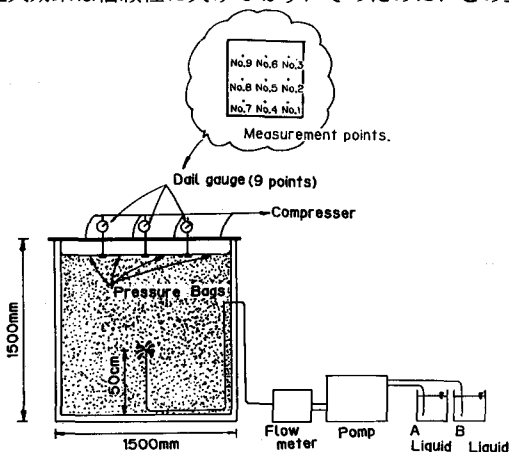


図-1 大型実験土槽

実験に使用した大型土槽は、図-1に示すように一辺が1500mmの立方形であり、土槽上部にプレッシャーバッグとダイヤルゲージをセットすることにより、載荷および地盤の体積変化を計測することが可能な様に設計、製作した。

実験には、一般に脈状に注入されるといわれる水ガラスセメント系薬液（LW）と浸透注入とされる水ガラス系溶液型薬液の2種類の薬液を使用した。セメント系には、A液に水ガラス、B液にコロイドセメント溶液を用い、溶液型には、A液に水ガラス、B液にグリオキザールを表-1に示す配合によって使用した。

薬液の注入は、薬液注入用ポンプを使用し、薬液の吐出口を土槽中央部から約50cmの位置にくるようにセットして、毎分8ℓ/min.の注入速度で上載荷重（ $\sigma_v = 0.0, 0.5, 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ）を変化させて行なった。

薬液が注入された土槽地盤には、図-2, 3に示すような固結体が形成されていた。

この図から、LWを使用した場合は薬液が脈状に地盤に入り固結体が盤状に広がり、溶液型の薬液を使用した場合には固結体が球状になり、薬液が浸透注入された状態が見られた。

3. 大型三軸圧縮試験

土槽実験を数回行った結果より、固結体の形状は注入するたびに異なり、その評価法はかなり難しいと考えられた。そこで、薬液注入された地盤の強度増加を調べるために、固結体について次のようなモデル化を行い、三軸圧縮試験を行なった。

3-1 薬液注入による固結体のモデル化

図-4は、都市トンネルにおける薬液注入の概念図を示したものである。

表-1 薬液配合量

A 材		B 材 (LW)		B 材 (溶液型)	
水ガラス	25 ℓ	コロイドセメント	25 kg	グリオキザール	25 ℓ
水	75 ℓ	水	75 ℓ	水	75 ℓ

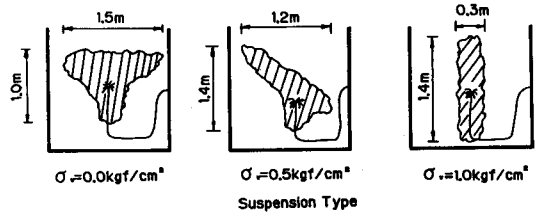


図-2 土槽地盤内に形成された固結体（LW）

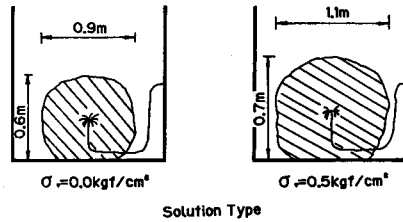


図-3 土槽地盤内に形成された固結体（溶液型）

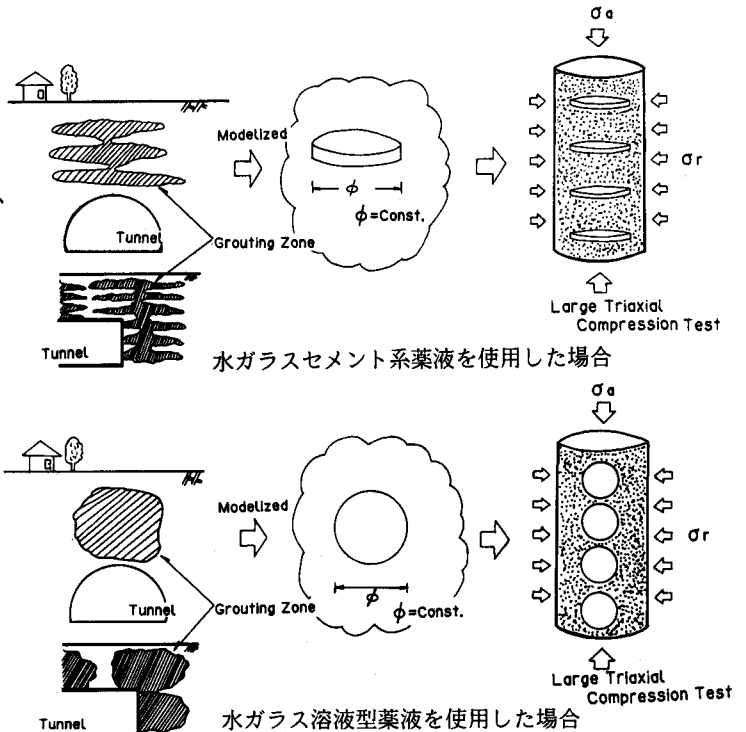


図-4 薬液注入の概念図

この図をもとに、薬液注入による地盤の強度増加を知るために大型三軸試験装置を使用し、供試体内にモデル化された固結体を入れて実験を行なった。

図-2, 3に示した結果からもわかるように、使用する薬液がLWと溶液型とでは、固結体の形状が明らかに異なっていることに着目し、それぞれの固結体について、LWに対しては盤状の固結体を円盤状のサンドゲルとして、溶液型に対しては球状の固結体を球形のサンドゲルとしてモデル化を行なった。

3-2 大型三軸圧縮試験

図-5は、実験に使用した大型三軸圧縮試験装置である。

供試体は直径30cm、高さ60cmであり、試料に豊浦砂を使用し、間隙比 $e=0.72$ を目標に空中落下法により作成した。また、実験は飽和状態で圧密排水条件で行なった。

供試体内に入れたサンドゲルの作成は、円盤状サンドゲル（直径 $\phi=200\text{mm}$ 、厚さ $t=1.7, 3.0\text{cm}$ ）および球形サンドゲル（直径 $\phi=100, 200\text{mm}$ ）の両方ともに図-6に示すようなモールドを使用して行った。薬液は、土槽実験で行なった配合率で配合を行ない、振動台を用いて同じ固結体が毎回できるように振動時間と薬液量を管理して行なった。また、セメント系薬液を使用したサンドゲルについては3日強度を基準として実験に使用した。

三軸圧縮試験は、供試体中にそれぞれのサンドゲルを図-7に示すように等間隔に配置し、拘束圧を三段階（ $\sigma_c=0.2, 0.5, 1.0\text{kgf/cm}^2$ ）変えて行なった。また、円盤状のサンドゲルについては厚さと枚数（ $n=1, 3, 6, 12, 18$ ）を、球形のサンドゲルについては直径と個数（ $n=1, 3, 6, 9, 15$ ）を変えることで薬液の注入率を変えながら実験を行なった。

3-3 実験結果および考察

図-8は厚さ $t=3.0\text{cm}$ の円盤状サンドゲル6枚（注入率13%）を供試体中に入れた場合の試験結果である。また、比較のために豊浦標準砂の結果も示した。円盤サンドゲルを入れた場合、軸差応力は砂だけの結果に比べて、軸ひずみの小さい部分でピークがみられ、円盤サンドゲルを入れた

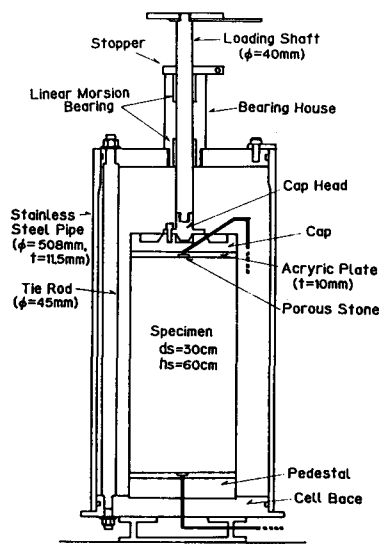


図-5 大型三軸圧縮試験

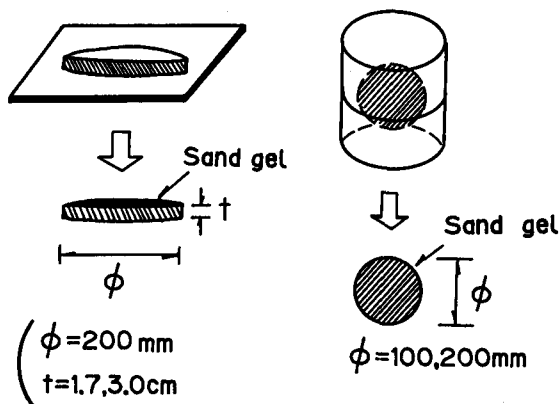


図-6 サンドゲル作成用モールド

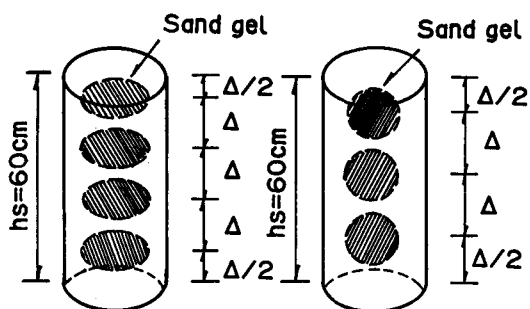


図-7 サンドゲル配置図

ことによる強度の増加が見られた。

図-9は、直径 $\phi=100\text{mm}$ の球形サンドゲルを3個（注入率4%）を供試体中に入れた場合の試験結果である。球形サンドゲルを入れた場合の試験結果は、強度増加はあるものの顕著なピークも見られなかった。

今回、供試体中に入れたLW、あるいは溶液型のサンドゲルの体積（VL, VG）が供試体全体の体積（V）に占める割合を注入率（VL/V, VG/V）として、注入率が強度に及ぼす影響を調べた。

図-10は、厚さ3cmの円盤サンドゲルを供試体中に6枚および12枚入れて、注入率を13%および26%とした場合の拘束圧 $\sigma_3=1.0\text{kgf/cm}^2$ における試験結果である。この図からわかるように、サンドゲルの枚数が増すにつれて地盤の剛性が上り、顕著なピーク強度の発現が軸ひずみの小さい部分で見られた。

また、同様に図-11は、 $\phi=200\text{mm}$ の球状サンドゲルを供試体中に1, 2, 3個入れて、注入率を10, 20, 30%とした場合の試験結果である。この結果から、注入率が10%および20%のときには、ほとんど強度の増加は見られないが、注入率が30%においては明確なピークが見られた。これらの結果より、セメント系薬液（LW）および溶液型薬液ともにその注入率を増すことにより地盤の強度が上昇する結果が得られた。

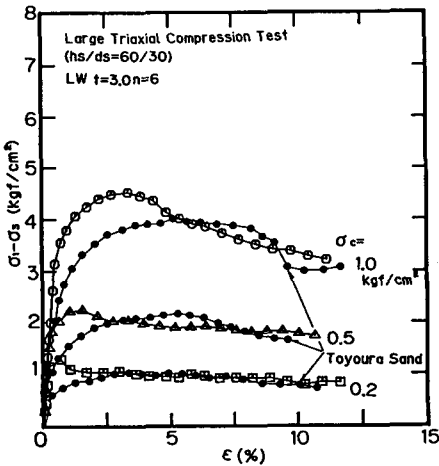


図-8 三軸圧縮試験結果（LW）

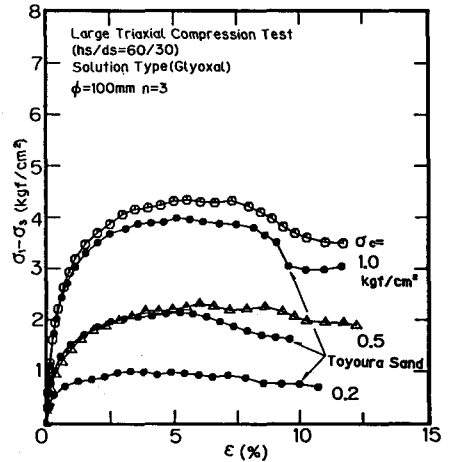


図-9 三軸圧縮試験結果（溶液型）

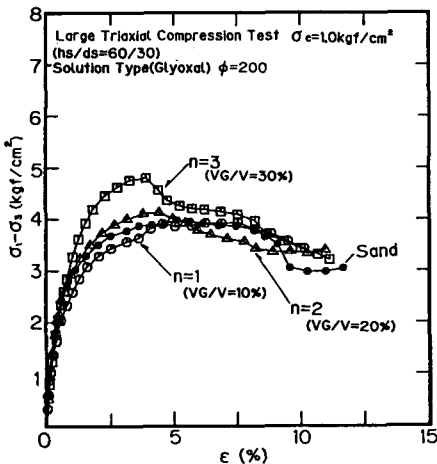


図-10 三軸圧縮試験結果（LW）

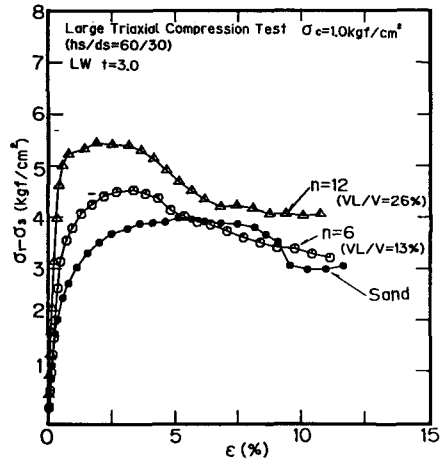


図-11 三軸圧縮試験結果（溶液型）

図-12は、厚さ3cmの円盤サンドゲルを12枚入れて、注入率を26%とした場合におけるモールの応力円である。この図から、 0.6kgf/cm^2 程度の見かけの粘着力の発現が見られる。このように、薬液注入は見かけの粘着力の増加によって地盤強度を増加するということが解る。

そこで、図-13, 14 にセメント系薬液サンドゲルと溶液系薬液サンドゲルにおける注入率と見かけの粘着力の関係を示す。ここで、注入率100%の結果については、直径5cm、高さ10cmの供試体を用い別途、実験したものである。この結果から解るように、見かけの粘着力は注入率の増加によって、除々に発現していく傾向にあることが解る。また、2つの薬液ともに、注入率が25%付近から急激な見かけ粘着力の増加が見られる。したがって、この結果から考察すれば薬液注入によって地盤全体を改良せずに、その現場に応じた設計に必要な見かけの粘着力が得られる程度に、薬液を限定的に定められた位置に注入することができれば、薬液注入の効果を有効に発揮させることができ、合理的かつ経済的な薬液注入ができると考えられる。

4. まとめ

以上の結果をまとめると次の通りである。

(1) 土槽地盤中に薬液を注入すると、地盤内に形成される固結体は薬液の種類によって異なることがわかった。

(2) 固結体のモデル化を行い、薬液注入された地盤の強度増加を調べるために、大型三軸圧縮試験を行った結果、供試体内にセメント系薬液(LW)および溶液型薬液のサンドゲルを入れると、それぞれに強度の増加を示し、LWにおいては、軸ひずみの小さなときに急激な強度の増加を示した。

(3) 供試体中に入れるサンドゲルの量を増やし、薬液注入量を上げると供試体の見かけの粘着力の増加が見られた。この粘着力の増加を設計に有効に利用し、薬液を限定的に注入することが出来ればより合理的かつ経済的な薬液注入が出来ると思われる。

参考文献

- 1) 柴崎光弘ら：薬液注入工法の設計と施工、山海堂、1983
- 2) 島田俊介ら：最新の地盤注入工法、理工図書、1982

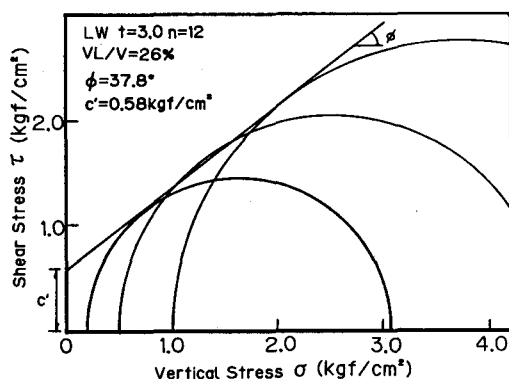


図-12 モールの応力円

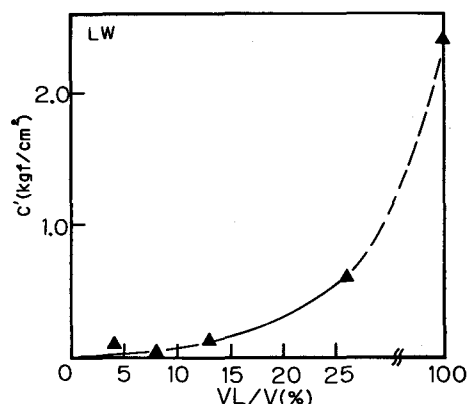


図-13 見かけの粘着力と注入率の関係 (LW)

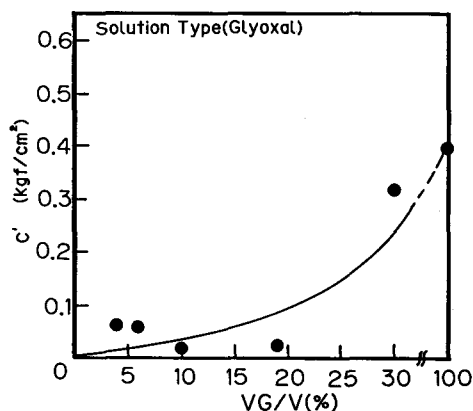


図-14 見かけの粘着力と注入率の関係 (溶液型)