

シールドトンネルの裏込め注入実験

Experiment of Back-fill Grouting on Shield Tunneling

小山 幸則*・清水 満*・佐藤 豊*・岡本 達也**・梶原 健次郎***

Yukinori KOYAMA, Mitsuru SHIMIZU, Yutaka SATO, Tatsuya OKAMOTO, and Kenjiro KAJIWARA

Back-fill grouting of shield driven tunnel is significant for not only surrounding media but also acting load on tunnel. Insufficient back-fill grouting may lead enormous amount settlement of ground surface and concentrated load may act on the tunnel. A back-fill grouting model tests have been carried out and a discussion about the behavior of back-fill grouting of shield driven tunnel in this paper. Some elementary tests for grout material have also been done. The differences of the material, pressure of injection and stiffness of surrounding ground varied the behavior of back-fill grout shape.

Key words: shield tunnel, back-fill grouting, model test

1. はじめに

都市トンネルの建設においてはシールド工法が用いられることが多いが、シールド工法によってトンネルが施工される場合には、シールドセグメント外側に空隙（テールボイド）が生じてしまう。このため、速やかにこの空隙が「裏込め注入」によって充填されなければ周辺地盤の沈下を引き起こすばかりでなく、トンネル自体にも偏荷重が作用する可能性がある。裏込め注入は地盤注入と同様、注入状況や注入効果の確認を視覚的に行うことは事実上不可能で、未知の部分が非常に多い工法である。

今回、裏込め注入材の基礎的な材料試験と模型地盤中に注入する実験を行い、その注入状況や注入効果の確認を行ったのでここに報告する。

2. 研究の目的

裏込め注入がトンネルや周辺地盤に与える影響や効果としては以下のようなことが考えられる。

- ①裏込め注入のトンネル覆工への影響として、注入時に覆工に与える注入圧や注入後の土圧再配分。
- ②裏込め注入のトンネル周辺地盤への影響として、地表面沈下の低減や覆工廻りのゆるみ領域の拡大防止。

本研究の最終的な目的は裏込め注入がセグメントや周辺地盤に及ぼすこれらの影響や効果を明らかにすることであるが、その第1段階として、まず、裏込め注入材の基礎的な材料特性の把握と、注入圧、注入材料注入方法などが注入状況に与える影響を把握することを目的とした。

* 正会員 ㈱鉄道総合技術研究所トンネル研究室

** 正会員 ㈱熊谷組技術開発本部シールド技術部

*** 正会員 ㈱熊谷組技術研究所土木構造研究部

3. 基礎実験¹⁾

3・1 裏込め注入材料

大型土槽実験に先駆けて、使用する裏込め注入材の物理特性試験、力学特性試験を実施した。

基礎実験に使用した裏込め注入材は、可塑形状A（セメント・エア系）、可塑形状B（セメント・非エア系）、可塑形状C（スラグ・非エア系）およびLWの4種類とした。配合は表-1に示すように標準配合とした。

3・2 物理特性試験

裏込め注入材の物理特性として、コンシステンシー、ゲルタイム、空気量の測定を行った。表-2に物理特性試験結果を示す。

3・3 力学特性試験

(a)一軸圧縮強度試験

裏込め注入材の経時毎の強度発現性および弾性係数を把握することを目的に、一軸圧縮強度試験を行った。一軸圧縮強度の測定はJIS A1216「土の一軸圧縮試験方法」に準じて行った。ひずみ速度は1%/分の圧縮ひずみが生じる割合を標準として供試体を圧縮し、測定値は3本の平均を用いた。なお、養生方法は水中養生とし、養生温度は地中温度を想定し15℃とした。

一軸圧縮強度試験結果を図-1に示す。エア系（A）は、非エア系に比べて裏込め注入材中に含まれる水量が少ないため、早期強度の発現性は優れているが、長期強度の発現性は劣る。主材の比較で、セメント系（B）とスラグ系（C）では、セメント系は早期強度が高いが長期強度ではスラグ系が高い結果となったが明らかに高い強度発現を示したのはLWであった。

(b)体積変化率試験

裏込め注入材は、流動状固結⇒可塑状固結⇒固結と時間の経過と共に変化し硬化する。この過程の中で注入中の裏込め注入材は、加圧下で充填されるため、圧密現象による体積変化（減少）が起こることを念頭に圧密試験用モールドに注入材を入れ一定圧で加圧し、裏込め注入材の体積変化率を測定した。上載荷重 p は1.0、2.0 および 3.0 kgf/cm²とした。

体積変化率試験結果を図-2に示す。エア系（A）は、加圧と同時に空気量分（10～15%）が抜け、その後（約20分後）体積変化率は落ち着い

表-1 配合表

< 可塑形状 A >

A 液					B 液	
セメント	粗骨材	起泡材	安定剤	水		
270 kg	130 kg	0.5 kg	2.2 kg	630 ℓ	13.6 %	100 ℓ

< 可塑形状 B >

A 液				B 液
セメント	骨材	安定剤	水	
260 kg	35 kg	4.8 ℓ	897 ℓ	80 ℓ

< 可塑形状 C >

A 液				B 液
セメント	助 剤	安定剤	水	
250 kg	90 kg	1 kg	872 ℓ	80 ℓ

< L W >

A 液		B 液	
セメント	水	水ガラス	水
400 kg	373 ℓ	250 kg	250 ℓ

表-2 物理特性試験結果

物理特性 注入材	ゲルタイム (sec)	コンシステンシー		空気量 (%)
		Pロート(sec)	円筒70-30(cm)	
試験方法	カフ倒立法	Pロート	円筒70-30	7kg法
可塑形状A	10～15	9	35～40	10～15
可塑形状B	8～10	8～9	35～45	—
可塑形状C	6～8	8～9	30～40	—
LW	30～60	8	50～60	—

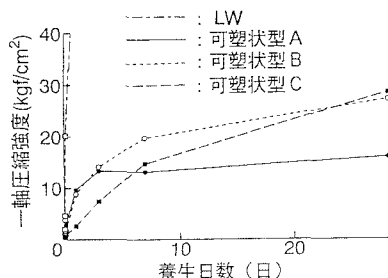


図-1 強度発現の比較

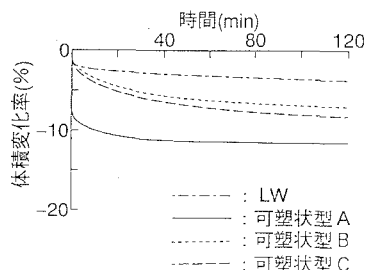


図-2 体積変化率

(上載荷重 $p=3.0\text{kgf/cm}^2$ 時)

ている。セメント系（B）に比べスラグ系（C）の体積変化率は大きく、2時間後も変化が落ち着いていない。LWは、ゲル化後短時間で固結領域になるため、体積変化率は約 2%と非常に小さい結果となった。

4. 大型土槽試験²⁾

4・1 実験装置

実験装置は、実験地盤を作成する大型実験土槽（幅4.0m、高さ3.0m、奥行き3.0m）、シールドトンネルの裏込め注入の施工を模擬するための内筒管（外径 ϕ 1000mm、厚さ10mm；セグメントに相当）および外筒管（外径 ϕ 1060mm；シールドに相当）、裏込め注入装置などから構成されている。外筒管端部には、引き抜きジャッキが取り付けられてあり外筒管を引き抜き30mmのテールボイドを生じる構造となっている。また、土槽中央部には仕切り板を設置し、左右で2回の実験を行えるようにした。実験装置を図-3に示す。

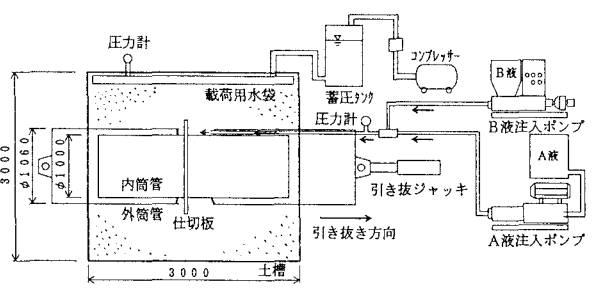


図-3 大型土槽試験装置

4・2 実験方法

実験は、実験土槽内の砂地盤中にトンネル模型管を設置した後、地盤上部から載荷用水袋により $1.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ の鉛直方向の載荷状態で外筒管を引き抜きながら、テールボイド（30mm）に裏込め注入を行った。実験ケースは、実験地盤、注入材料、注入圧、注入方法をパラメーターとした。実験地盤は砂地盤とし硅砂5号を使用し、密地盤（締固め度95%）と緩地盤（締固め度85%）とした。裏込め注入材は、基礎実験に使用した材料の中から可塑状型B（セメント・非エア系）およびLWの2種類とした。可塑状型Bを用いた実験は、鉛直載荷重前後の注入圧 $1.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ （低圧）と $2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ （高圧）の2ケースで同時注入により行った。同時注入の管理は、圧力管理と量管理を行った。圧力管理は引き抜きジャッキの引き抜き速度の調整、量管理は引き抜きジャッキの速度一定で注入ポンプの吐出量の調整により行った。またLWを用いた実験は、10cmピッチの即時注入により行った。注入はトンネル模型のクラウン部1カ所から行い注入圧はA液とB液の混合直後の注入管に設置した圧力ゲージにより管理した。

4・3 実験結果

実験結果を表-3に示す。

(a)実験地盤の作成結果

実験地盤の乾燥密度は密地盤で平均 $1.589\text{g}/\text{cm}^3$ 、緩地盤で平均 $1.485\text{g}/\text{cm}^3$ であった。含水比は密地盤で平均3.31%、緩地盤で平均5.15%であった。締固め度は密地盤で平均 95.83%、緩地盤で平均 89.41%であった。密地盤と緩地盤の違いは、乾燥密度で約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 、締固め度で約 5%であった。

(b)注入率

同時注入の注入率は、地盤の自立性が良かった密地盤では、高圧、低圧の差は少なくそれぞれ約 160%と約 170%であったのに対し、緩地盤では低圧で約 190%、高圧で約 380%であった。これは、緩地盤の場合は地盤の緩い箇所へ裏込め注入材がまわり込んだためと考えられる。即時注入の注入率は、密地盤で約 120%、緩地盤で約 150%であった。

表-3 実験結果

地 盤		密地盤			緩地盤		
注入方法		同時		即時	同時		即時
注 入 圧		低圧	高圧	——	低圧	高圧	——
地盤 状況	$\gamma_d(\text{kgf/cm}^3)$	1.549	1.625	1.625	1.479	1.490	1.479
	含水比 (%)	3.03	3.46	3.46	5.27	5.02	5.27
	締固め度 (%)	93.33	98.15	98.15	89.05	89.76	89.05
注入 材料物 性値	種類	可塑状 B	可塑状 B	LW	可塑状 B	可塑状 B	LW
	ゲル化 (sec)	10.53	11.67	67.00	14.96	14.96	65.00
	P0-t (sec)	8.32	8.54	8.17	8.88	7.99	7.76
	70-3-3 (cm)	44.5	36.0	55.0	33.5	41.5	55.0
	注入圧 (kgf/cm ²)	0.912	1.822	——	0.852	1.793	——
注入率 (%)		159.7	170.9	115.8	186.8	375.3	149.2

(c)裏込め注入材の充填状況

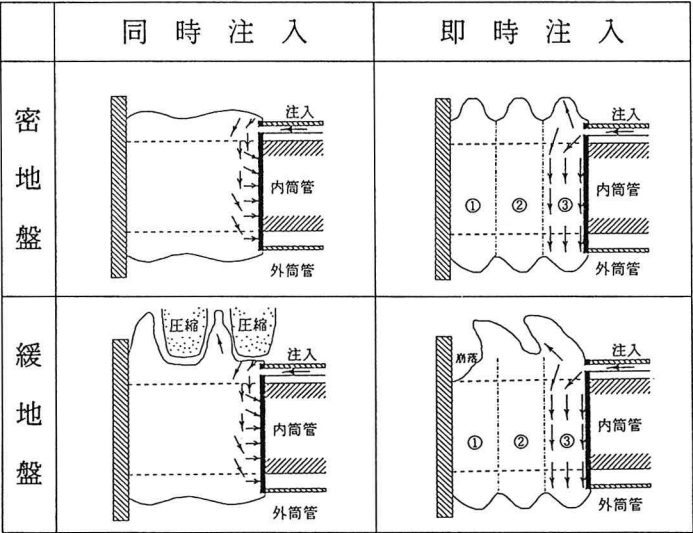
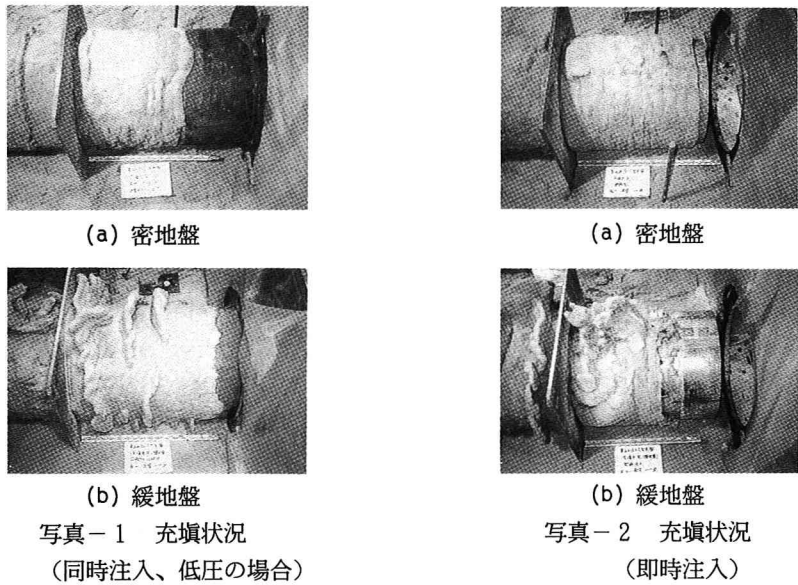
裏込め注入材の充填状況を写真－１、写真－２および図－４に示す。

①同時注入

密地盤では、高圧、低圧ともに地盤の崩壊が少なく安定している。緩地盤ではトンネル軸直角に円盤状の突起部が形成された。これは、トンネル模型管の周辺の緩い箇所へ裏込め注入材の逸走（圧入）が生じたためと考えられる。

②即時注入

密地盤では、クラウン部の地盤の肌落ちが起こり裏込め注入材のまわり込みが生じて、トンネル軸方向に凹凸がみられた。緩地盤では、外筒管引き抜き直後から周辺地盤の崩壊が生じ、崩壊部に注入材が走りテールボイドへの裏込め注入材のまわり込みが遮断された箇所が存在した。



図－４ 充填状況（模式図）

断面は、図-5に示すように同時注入、即時注入ともに地盤の硬軟に差はなく、裏込め注入材のみのゾーンと砂混じりのゾーンの2層を形成していた。裏込め注入材のみのゾーンの厚さ(=tu)は注入圧による差はあるが、密地盤、緩地盤ともに厚さは約30mmであり、充填度は密地盤、緩地盤ともに100%といえる。砂混じりのゾーンは、砂の空隙に注入材が浸透したものであり、その厚さ(=ts)は密地盤で高圧、低圧とも約15~20mmであったのに対し、緩地盤では高圧で約20mm、低圧で約12mmであった。

強度分布の比較を図-6に示す。同時注入では、密地盤に比べ緩地盤の方が強度分布にバラツキがあるが強度は大きい。これは、密地盤はテールボイドが自立した状態で裏込め注入材が充填されたのに対し、緩地盤はテールボイド内に充填される注入材に周辺地盤の砂が混入しサンドゲルの状態となったためと考えられる。即時注入は同時注入に比べ強度分布にバラツキが生じている。

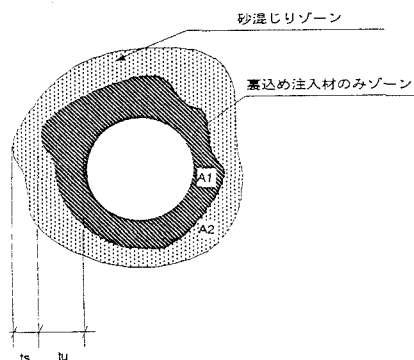
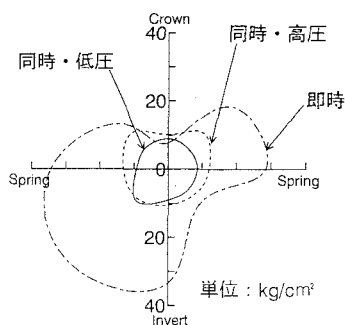
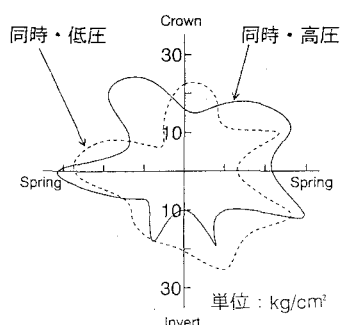


図-5 充填厚さ



(a)密地盤



(b)緩地盤

図-6 強度分布

(d)充填状況の定量化

裏込め注入材のまわり方は、図-5に示すように内筒管の表面に裏込め注入材のみのゾーンとその外側に砂混じりのゾーンの2層が形成された。そこで、裏込め注入材の充填状況を以下のようなパラメーターを定義し、式(1)~式(4)で定量化を行った。

ここで、

$$V = V_1 + \alpha \times V_2 \quad \text{--- (1)}$$

$$\gamma = V / V_t \quad \text{--- (2)}$$

$$\gamma_1 = V_1 / V_t \quad \text{--- (3)}$$

$$\gamma_2 = \alpha \times V_2 / V_t \quad \text{--- (4)}$$

V ; 総注入材料 (m³)

V_t ; 理論テールボイド量 (m³)

V_1 ; 純裏込め注入ゾーンの体積 (m³)

V_2 ; 砂混じり注入ゾーンの体積 (m³)

γ ; 実注入量の理論テールボイド量に対する比率(%) : 実注入率

γ_1 ; 純裏込め注入ゾーン中の注入量の理論テールボイド量に対する比率(%) : ボイド充填率

γ_2 ; 砂混じり注入ゾーン中の注入量の理論テールボイド量に対する比率(%) : ボイド周辺浸透率

α ; 砂混じり注入ゾーンの注入率(%) : 浸透率

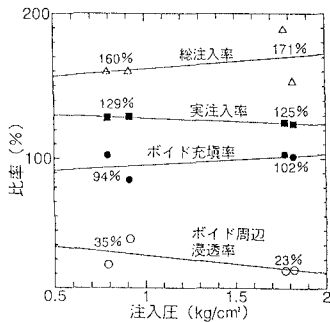
β ; 損失を含む使用注入材量の理論テールボイド量に対する比率(%) : 総注入率

裏込め注入材の周辺地盤への浸透率 α は、実験終了後の試料をサンプリングし、室内試験を行った結果41%であった。図-7に圧力管理での同時注入を行った時の充填状況の定量化の結果を示す。

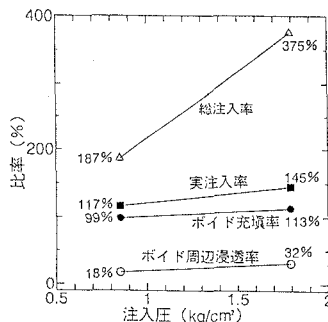
- ①ボイド充填率 γ_1 は、高压、低压の差はあるが、密地盤で94~102%、緩地盤で99~113%であり、密地盤、緩地盤ともテールボイドはほぼ充填された。
- ②ボイド周辺浸透率 γ_2 は、密地盤で23~35%、緩地盤で18~32%であり同等と考えられる。
- ③総注入率 β と実注入率 γ の差分は、密地盤で31~46%、緩地盤で70~230%であり、地盤の硬軟によって大きく異なる。この差分の要因としては、注入圧による圧密減少や周辺地盤への逸走および実験上のロス分が考えられる。

図-8に量管理での同時注入を行った時の充填状況の定量化の結果を示す。目標注入率を上げることにより総注入率 β と実注入率 γ の差分が増加し、テールボイド以外の周辺地盤への逸走が起こり、突起部が生じやすくなると考えられる。

実験結果から、密地盤では注入圧の高低による注入率の変動が小さいことから、密地盤では最適な注入がなされたと考えられ、圧力管理によって十分管理が可能と考えられる。しかし、緩地盤では注入圧の高低による注入率の幅が大きく、高压下では過剰注入となる恐れがあり、圧力、量併用管理が必要と考えられる。



(a) 密地盤



(b) 緩地盤

図-7 充填状況の定量化(圧管理)

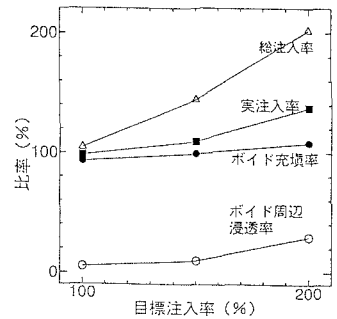


図-8 充填状況の定量化
(量管理)

5. あとがき

裏込め注入材の基本的な特性を把握するための基礎実験と、模型地盤中に注入を行った結果についてその注入状況を紹介した。これによって、注入材料、注入方法、注入圧力や周辺地盤の剛性が裏込め注入の注入量や注入形状を左右することが視覚的、定性的に確認できたと考えられる。今後さらに裏込め注入がトンネルや周辺地盤に与える影響について研究を進めるため、現在、模型管や土槽内部に設置した土圧計の計測結果を整理中であり、別の機会にこれらの結果を紹介していきたい。裏込め注入が及ぼす影響は前述のとおり多様であるが特に、注入時に作用する裏込め注入圧は大きな荷重となってセグメントに作用し、セグメントの短期的な安全性を左右する可能性があると考えられる。今後さらに検討を進め、実験結果より得られる土圧分布や地盤変位より、施工時荷重としての裏込め注入の重要性を解明するとともに、引き続き裏込め注入がトンネルの長期安定性に及ぼす影響についても検討を進めていきたい。

[参考文献]

- 1) 清水満、岡野法之、岡本達也、梶原健次郎：シールドトンネルの裏込め注入に関する研究(その1)－基礎実験－、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集(Ⅲ-39)、1993. 9
- 2) 小山幸則、佐藤豊、岡本達也、井原俊一：シールドトンネルの裏込め注入に関する研究(その2)－大型模型実験－、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集(Ⅲ-40)、1993. 9