

ボックスシールド工法における裏込め注入に関する実験的研究

多田幸司*・中川雅弘*・古川浩平**・
中川浩二**

矩形断面シールド工法においては矩形のテールボイドへの確実な裏込め注入を図る事が実用化への一つの課題である。本研究では実物大模型への注入実験により充填性を検討すると共に、注入材料の性状実験を行って固化体の基本的特性を把握し、配合変更方法を提案した。これらの実験結果を踏まえて地山の掘進実験において同時裏込め注入を行い、地盤変状や裏込め厚さの測定結果から矩形断面においても確実な裏込め注入が可能である事を明らかにした。

Key Words: shield tunneling method, box shield, backfill grouting, backfill materials

1. まえがき

シールド工法は都市トンネルの施工法として多用されており、最近では円形断面だけでなく、不用断面を掘削しない矩形断面シールド工法の開発研究^{1)~3)}も進められている。これは上部用地幅が限られている場合や埋設管が輻輳する地盤内部にシールドトンネルを計画する際に占有断面積が小さくなるため有利である点などに着目した工法である。筆者らもドラムカッターを利用した矩形シールド工法について研究を重ねている⁴⁾が、例えばカッタートルクの算定やチャンバー底部の土砂堆積防止、セグメントの設計など矩形断面に起因する解明すべき課題がいくつかある。裏込め注入もその重要課題の一つであると考えられる。シールドにおける裏込め注入、特に注入材料に関しては円形シールドを対象としてその発展の歴史と共に数多くの研究報告がみられる。しかし、裏込め材料の配合設計については経験則が先に立つ面があり、矩形シールドに展開を図るには充填性や注入時期などを含め、異なった観点からの検討が必要である事も考えられた。矩形シールドへの展開に伴うと考えられる課題は次の通りである。

- ①注入時期——円形シールドにおいては上部地山のアーチ作用が期待できる場合はグラウトホールからの注入も許容されるが、矩形シールドにおいては上部のアーチ作用による安定が期待できないため、掘進と同時の裏込めが必要になる。
- ②同時注入方法——円形においては上部に2ヶ所の突起を設け、いずれか1点から注入するのが一般的であるが、矩形においては注入位置、注入箇所数など最適な方法が未知である。

③裏込め材の流動性——円形では円周に即した移動であり、裏込め材が流動し易いの 비해、矩形では四角の外周を裏込め材が移動・充填される必要があり、要求される流動性が円形シールドと異なる恐れがある。

④裏込め材料——円形では2液性の可塑状タイプにこだわらず砂モルタル等でも良いが、矩形では上記流動性から見て2液性の可塑状タイプが適すると考えられるが、最適材料は明らかでない。

⑤裏込め材の配合——円形では工事実績を基に設定し、施工条件に応じて配合、ゲルタイム等を経験的に変更する。矩形はまだ実績がないため、流動性や注入後の品質のばらつきを考慮した場合、ゲルタイムを予め把握しておく必要がある。

これらの課題に対して、本研究では矩形断面で確実な裏込め注入を図るための方法の提案とその実証のため、注入材料の性状把握実験と模型装置による充填性の確認実験を行った。さらに矩形シールド工法の実証工事において掘削断面内からの同時裏込め注入を行い、先の実験結果を実証すると共にその効果について検討を行なった。

2. 裏込め注入に関する既応の研究と現状

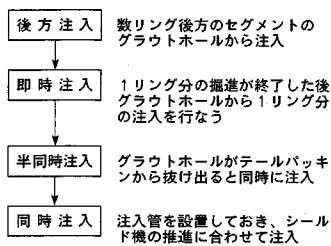
シールド工法ではその機構上、シールド機テール部でセグメントを組立て、推進していく事になる。裏込め注入はそのためやむを得ず生ずるテールボイド(テール部スキンプレートの厚さ+クリアランス)を充填するための方法であり、次の諸点を目的としている⁵⁾。

- 1) シールド機通過後の地盤のゆるみ、沈下を防止する。
- 2) セグメントからの漏水を防止する。
- 3) セグメントと地山を固定させ、ジャッキ推力を地山に伝達する。

シールド工法の発展と共に裏込め材料、注入方法、注

*正会員 戸田建設(株) 土木技術開発室
(〒104 東京都中央区八丁堀4-6-1)

**正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

図-1 裏込め注入時期⁹⁾

入時期などの改良が積み重ねられてきたが、注入時期については例えば図-1⁹⁾のような変遷をたどっている。この中では、掘進に伴う空隙が発生すると同時に注入を行う同時注入が最も優れていると考えられるが、円形シールドにおいては注入管の設置位置がシールド機外面になる点や注入口の閉塞が頻繁に起こる点に課題が残っている。従って全ケースで同時注入が採用されているわけではなく、グラウトホールからの半同時注入及び即時注入と併用されているのが現状である。地山の土質によってはテールが抜けた後に生じる即時沈下が終了した後の裏込め注入となっているケースもありうると言えよう。また裏込め材料については要求される品質として次の諸点が挙げられている⁷⁾。1) 材料分離を起こさず、長距離圧送が可能である。2) 流動性を失わず、充填性が良い。3) 注入後の容積減少が少ない。4) 早期に地山の強度以上になる。5) 水密性に富んでいる。

従来の裏込め材料は豆砂利コンクリートや砂モルタル等に代表される1液タイプのものが大部分を占めていた。しかし泥水式や土圧式などシールド工法の進展や地表沈下の厳しい規制に伴い、裏込め材の研究も数多く行われ、現在は起泡系や非起泡系などの2液タイプの採用事例が多くなりつつある。2液性裏込めは主材（以下A液と呼ぶ）と固化剤（以下B液と呼ぶ）を注入直前に混合してゲル化させ、テールボイドに充填する方法である。ゲル化後はそれ自体の流動性は持たないが、注入圧力によって流動し得る弱い固結状況を短時間保持する事ができるという特性を持っている。そのため1液タイプに比べると所定範囲への限定注入が可能である、地下水の影響を受けにくい、硬化時間の設定に自在性がある、早期強度が期待できる、等の有利な点を持っている⁸⁾とされている。現場での使用例は多いものの、ゲルタイム（A液とB液を混合した後、ゲル化するまでの時間）の設定については個々の工事において施工条件に合わせて試行錯誤を繰り返しながら施工しているのが実態であろうと考えられ、使用上のノウハウが現場段階に留っており、ゲルタイムの変更やそれに付随する強度の調整方法などがマニュアル化された状況には至っていないと推察される。

2液性裏込め材に関する多くの研究が三木、下田らに

よって行われている。シリカゾルの添加による品質改善⁹⁾、高炉スラグの有効利用¹⁰⁾、可塑性グラウトの性能実験や注入実験^{11), 12)}、現場泥水の利用¹³⁾や石灰系材料の添加による品質改善¹⁴⁾などである。水砕スラグの研究は河野ら¹⁵⁾によるものが見られるが、その後材料面の研究は多種類に及び、福田らの早強セメント+水ガラス+特殊固化助材¹⁶⁾、有泉らのベリットセメント¹⁷⁾、堀内らのフライアッシュセメント¹⁸⁾、森吉らのアスファルト乳剤¹⁹⁾の適用などに至っている。また施工条件に対応した研究として、斎藤らによる急曲線急勾配シールドにおける裏込め材²⁰⁾、下村らによる海底下シールドの防水防食性裏込め材²¹⁾なども研究されている。

このように数多い研究が為されているが、実験に用いた配合が記載されていない場合や材料の種類が明確でない場合（水ガラス、ベントナイト等）もあり、そのため本研究で実験条件やデータを上記の研究成果からそのまま引用するには不十分であると判断された。また実験の一つの目的である矩形のテールボイドへの裏込め充填では状況に応じてゲルタイムを調整する必要があると想定されたが、ゲルタイムの変更やそれに伴う長期強度の調整まで言及した実験データは見られないのが現状であった。そこで本研究ではまず室内実験により裏込め材料の基本的性質を把握し、配合変更に必要なデータを整理して配合調整方法の考え方を提案した。その結果を用いて矩形のテールボイド模型による注入後の流動性や充填性の確認のための実験を行い、さらに実証施工においてその成果を確認した。

3. 配合に関する室内実験

2液可塑性材料の基本特性を把握し、施工状況に応じた配合調整を行うための手法を求める事を目的として室内配合実験を実施した。

①使用材料

使用材料は起泡系、非起泡系各々2種類を用いた。それぞれa材～d材と呼ぶ。長期強度を15～20kgf/cm²としたときに各メーカーから提示された資料を基に設定したA液、B液混合後の標準配合（1m³あたり）を表-1に示す。長期強度は既往の研究と本研究のデータを対照するため、28日強度²²⁾と考える事とした。

各使用材料において固化材B液としては全てケイ酸ナトリウムが用いられている。ケイ酸ナトリウムは比較的安価な材料であり、地下水汚染等の問題で他の材料に比べて安全性が高く、注入材料として公認された材料である事によると考えられる。一般にB液の濃度は公表されておらず、本研究では各メーカーから取り寄せたB液をそのまま用いている。

②A液とB液の反応性

本実験はA液の材料種別によるB液との反応性やB

表-1 裏込め材料配合表 (A, B液混合後)

No	種類	配合 (1㎡あたり)						B液 (ℓ)
		A液						
		硬化材 (kg)	助材 (kg)	起泡剤 (kg)	安定剤 (kg)	水 (ℓ)	空気量 (ℓ)	
1	a材	230	130	0.4*1	2.0	650	130	91
2	b材	218	218	1.6*2	2.2	300	455	91
3	c材	227*3	82	—	0.9	793	—	91
4	d材	254*4	73	—	2.5	800	—	91

*1. 起泡系、高分子系起泡剤を使用 *3. 非起泡系、スラグ系硬化材を使用
*2. 起泡系、蛋白系起泡剤を使用 *4. 非起泡系、セメント系硬化材を使用

表-2 A液試験結果

項目	比重	ブリージング	コンスタンス	空気量
方法	500ccのガラス容器で重量測定	1000ccのメスシリンダー	Pロート	アルコール法 ²³⁾
a材	計算値 1.119 実測値 1.091	1時間後のブリージング 2%	4~5時間は可使状態**維持	設定13%に対し、20~25% 2%/時間の割合で消泡
b材	計算値 0.813 実測値 0.839	攪拌時、上部に気泡が残る	3時間で下部硬化始まる	設定45%に対し、13~65% パラッキ多し
c材	計算値 1.213 実測値 1.223	5時間後のブリージング 1%以内	4~5時間は可使状態維持	—
d材	計算値 1.230 実測値 1.239	30分後のブリージング 5%	4~5時間は可使状態維持	—

**Pロート可使状態とはPロートで落下させたときに途切れず連続して流下する状態を言う。

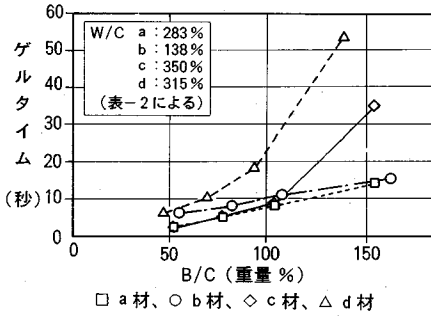


図-2 材料の種類によるゲルタイムの相違

液量によるゲルタイムの変化の程度を把握する事を目的として実施した。B液の量を数種設定し、上記a~d材についてゲルタイムの変化を測定した。ゲルタイムの測定はA液を入れたビニール袋内にB液を投入すると同時に手動振とう攪拌し、ゲル化するまでの時間を測定した。

測定結果を図-2に示す。横軸にB液とA液中の硬化材料Cの重量比率(B/C;以下同じ)をとって表示している。B液の量を増やしていくと、ゲルタイムが長くなる傾向が見られる。起泡系材料(a, b)に比べ、非起泡系材料(c, d)はB液量が多い場合に特にゲルタイムが長くなっている。なお本図は実験方法習熟前のものであり、後述するデータと必ずしも一致しないが、a~d材の違いは読み取れる。またa~d材のA液単体の比較結果を表-2に示す。以後の細部にわたる実験を多くの材料で行う事は実際的でないので、材料を1種に絞る事とし、表-2の試験結果を参考に比較的ばらつきの少ない材料を選択する事とした。今回の試験の限りでは起泡系a材は消泡が見られ、b材は起泡量のばらつきが多いという結果となった。また非起泡セメント系d材はブリージング率がやや大きい事が認められた。この結果、比較的ブリージング率が小さく、消泡等の問題もない非起泡スラグ系c材が本研究のような基礎実験の材料として適切であると判断した。このc材を用いてB液量とゲルタイムの関係について、W/C(A液の水と硬化材の重量比率)を変えて細かく検討した。図-3にその結果を示す。

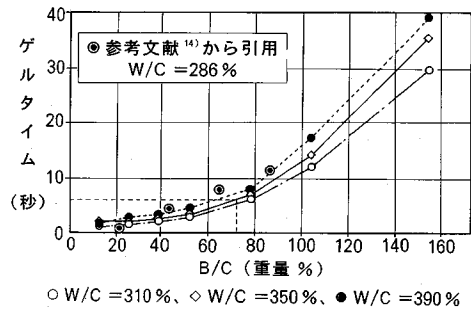
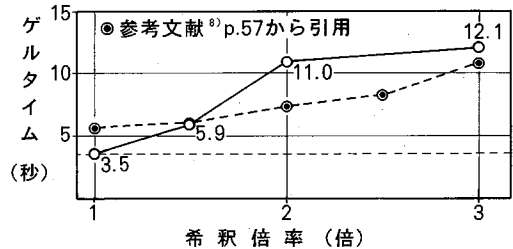


図-3 B液量によるゲルタイムの変化



例: 希釈倍率2倍の場合、B液と同量の水をA液から抜いてB液を薄め、残りのA液と混合する。

図-4 B液濃度によるゲルタイムの変化

図-2と同様にB液とA液中の硬化材料Cの比率を横軸にとって表示している。W/Cの増加に伴ってゲルタイムが少し長くなる傾向が読み取れるが、B液量の少ない範囲ではほぼ同一曲線上にのると言ってもよく、ゲルタイムとB/Cの良い相関が認められる。図中に三木・下田の研究データ¹⁰⁾も併せ示す(◎印)。ほぼ同様の材料であると考えられ、類似の傾向を示していると言える。A液中の硬化材料や助材の量を変える事によってもゲルタイムの調整は可能であるが、A液の品質が変化し、管内沈降等の問題が発生するため、B液の添加率で調整する方がより扱いやすいと言えよう。

B液量が少ないほどゲルタイムが短くなる事は文献

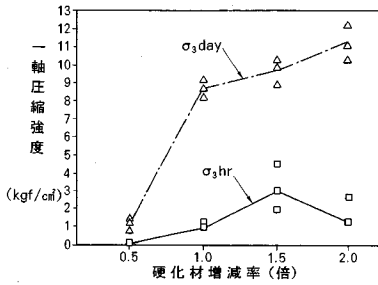


図-5 硬化材量による一軸圧縮強度の変化

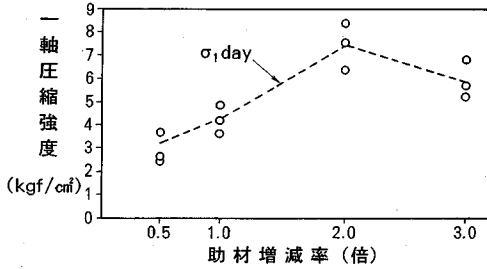


図-6 助材量による一軸圧縮強度の変化

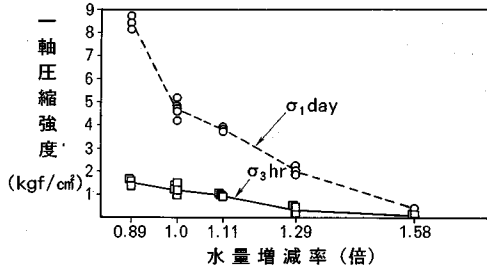


図-7 水量による一軸圧縮強度の変化

8)にも示されている。しかしB液量がゼロであれば、ゲル化しないわけであり、ゼロに近づくどこかに変曲点があると考えられる。これを実験的に確認しようと試みたが、手動で振とう攪拌する方法ではB/Cを13%以下に減らすと目視下においても均質性が保てなくなるため不可能であった。B液量を結果的に少なくできる方法としてA液中の水でB液を希釈して混合攪拌する方法が考えられるが、図-4に一例を示す通り、ゲル化後の組成は不変でも希釈率によってゲルタイムが変化する。ケイ酸ナトリウムとセメント系材料との反応機構が完全に明らかにはされていない²⁰事情を考慮すると、この方法も適切ではない。変曲点の確認は今後の課題として残される。

③裏込め材の強度

シールド工法の裏込め充填においてゲルタイムを変更した場合、硬化後の強度もそれに伴って変化する。そのためこの強度を設計値に合わせる必要がある。ゲルタイムの調整は前節で述べた通り、B液量の増減で行うのが

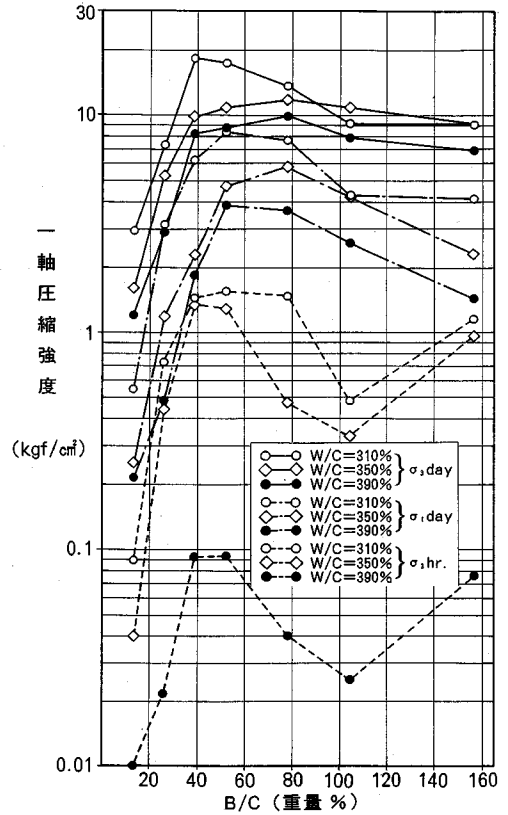


図-8 B液量による一軸圧縮強度の変化 (若材令時)

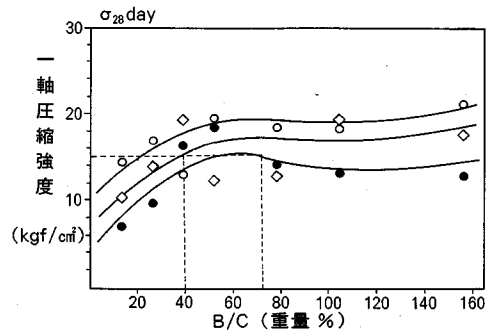


図-9 B液量による一軸圧縮強度の変化 (長期材令時)

最も簡便な方法であるが、そのときにどの材料を増減すれば強度を設計値に合わせる事ができるのかが明らかでない。そこで配合設計の指針を得る事を目的とした実験を実施した。材料c材を用いている。

供試体の作成は次の方法をとった。すなわち所定のビニール袋内にモールドをセットしておき、A液投入後B液を瞬時に投入、混合してモールド内にゲル化体を作成した。それを1~2時間後脱型して水中養生し、所定の材

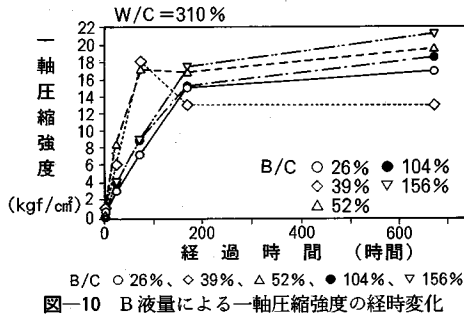


図-10 B液量による一軸圧縮強度の経時変化

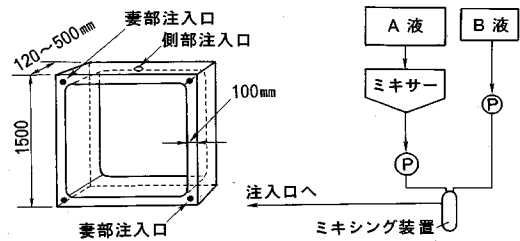


図-11 充填実験装置

令(室内空調下 20°C)で圧縮試験を行った。試験では1ケース 2~3本の供試体を用いている。なお圧縮試験はJIS A 1216「土の一軸圧縮試験方法」に拠った。

まずA液を構成する各材料の強度への影響について述べる。表-2, No.3に示す配合を基準とし、一つの因子だけを増減する方法をとってその影響を検討した。図-5は硬化材料のみを変えた時の強度の変化である。硬化材は強度発現の主体となる材料であり、硬化材量の変化に対して一軸圧縮強度が敏感な反応を示している。概ね硬化材量に伴って強度が増大する結果となっている。硬化材増減率2.0倍のときの若材令強度が減少しているが、このときはゲルタイムが約2秒であり、供試体作成時の攪拌混合が不十分であったと考えられる。

助材(ベントナイト)量による一軸圧縮強度試験結果を図-6に示す。B液比率は一定としている(B/C=52%)。これは硬化材に対する助材の量を変化させた試験結果であり、助材量が増えると強度が増加する傾向にある。しかしベントナイトの使用は一般に粘性比重調整のためである事が知られており、助材量によって強度を加減する方法はA液の圧送抵抗の増大あるいは管内沈降の発生などの問題を引き起こす恐れがあると言える。

硬化材に対する水量を変えた場合の一軸圧縮強度試験結果を図-7に示す。水量の増減は強度と強い関係がある事が示されている。

安定剤を変化させたときの試験結果は図示していないが、強度にはほとんど変化はない事が認められた。

次にB液量を変えたときの強度変化について述べる。これは前述のゲルタイムを調整したときに生じる、強度に与える影響の検討である。W/Cを3通りに設定し、材令毎に強度の変化を調べた。図-8に若材令時、図-9に長期材令時の結果を示す。若材令時ではB液が少ない時はB液量に比例して強度が増加するが、B/C>50%になるとB液量の増加に対して漸減する傾向を示す。長期材令時はバラツキはあるものの、概ねB液量の増加に伴って強度が増加する傾向にあると言える。図中に示す曲線は各W/Cにおける漸近線と思われるものを示してある。このデータを経時で書き換えた結果を図-10に示す。若材令時の強度増加傾向ならびに長期強度がB/C

によって違っている。データの個数が十分でないため、B/Cに対して一意的な関係は得られていないが、B/Cが強度に影響する傾向は読み取れる。

以上より次の事が言える。

- 1) ゲルタイムを調整するためにB/Cだけを変えると短期強度、長期強度いずれも変化する。
- 2) 強度を合わせるためにA液の配合を変える必要があるが、強度との関係は硬化材量、水量が大きい。
- 3) しかし硬化材量を変えるとB/Cが再度変化するため、水量で強度を調整するのが適当である。
- 4) 助材、安定剤は比例配分で算定して実用的には問題ない。

④配合変更方法

以上の結果を踏まえて、ゲルタイム変更時の配合調整方法を示す。材料を限定したデータであり、データの個数も少ないため、実際の工事に適用する時は修正、補足を行う必要があるが、全体の考え方を次に示す。

- 1) 図-3により変更後のゲルタイムからB/Cを決める。
- 2) 次にこのB/Cと設計強度から図-8、図-9を用いてW/Cを求める。
- 3) 得られたB/CとW/Cから硬化材を1としてB液量、水量を決め、助材、安定剤を当初配合の比率で算出する。
- 4) この各材料の比率を基に1m³あたりの配合を算出する。

4. 充填性に関する模型実験結果及び考察

矩形シールドは上辺が水平に切削されるため、円形断面のようなアーチ作用による地山の自立性は望み難い。地表沈下を防止するためには、掘進と同時にテールボイドを完全に充填する事が必要であると考えられる。手掘り式では矩形シールドの施工例が数例あるものの、古い時代に属する事例であり、同時注入や2液注入が多用される現在においては、参考データはほとんどないと言って良い。そこで矩形のテールボイド模型を作成して注入後の裏込め材の流動性や充填性の確認を目的とした注入実験を実施した。

表-3 裏込め充填実験内容

要因	水準
注入口の位置	上部、下部、側部
注入口の数	1ヶ所注入、2ヶ所注入
ゲルタイム	2.5秒、6秒

表-4 充填性実験一軸圧縮強度変化 (σ_{28})

ケース	注入箇所	設定ゲルタイム (秒)	測定強度 (kgf/cm ²)			
			A点	B点	C点	D点
1	下部左	2.5	9.68	11.98	10.23	9.89
2	下部右	2.5	6.56	11.77	6.81	5.31
3	上部右	2.5	7.29	9.27	7.55	—
4	ラウトホール	2.5	7.51	—	—	—
5	下部両側	2.5	9.95	12.13	8.50	4.86
6	下部左	6.0	—	—	—	—

○No. 3, No. 4 は供試体採取一部不能。
○No. 6 は供試体採取不能。○A～D点は図-12参照。
□は注入口、アンダーラインは排水口の位置付近を示す。

表-5 配合表 (A, B液混合後の1m³あたりの配合)

設定ゲルタイム (秒)	A液				B液	テストピースの一軸圧縮強度 σ_{28} (kgf/cm ²)
	硬化材 (kg)	助材 (kg)	安定剤 (kg)	水 (ℓ)		
ケース1～5	235	85	0.9	821	59	15.10
ケース6	202	73	0.8	790	112	14.50

(1) 実験装置

図-11に実験模型を示す。压力容器で実験を行う事が理想的であるが、透明板で压力容器を作成するのは費用の点で困難であり、今回の実験では充填状況を視認する事を優先してアクリル板を用いた無加圧の装置とした。図中に示すように同時注入を想定した妻部注入口とグラウトホールからの注入を想定した側部注入口を設けている。テールボイドの大きさはシールド機の設計条件によって異なるが、試算結果より100mmとしている。注入は定量小型ポンプを用いたが、A, B液の混合方式は実際の工事で使われる機構と同等の装置による。

(2) 実験方法

実験内容は表-3に示す通りであり、注入箇所、数、設定ゲルタイムを変数とした計6ケースの実験を行った。各ケースにおいて目視による充填状況の確認と注入後のゲル体の品質試験を行っている。裏込め材料は前章で述べた非起泡スラグ系材料c材を用いた。

装置内を水で満たした後、掘進速度を30mm/minとしたときのテールボイド発生量に相当する流量で裏込め材を注入した。水抜き孔を1ヶ所設け、注入量に見合う水を排水させている。注入後直ちに脱型して小型ベーン

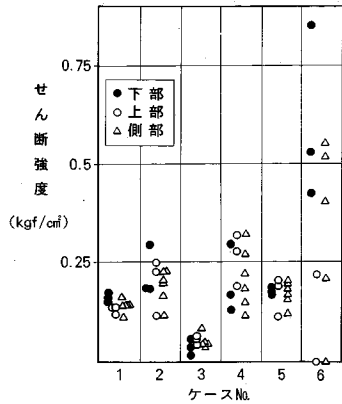


図-12 ベーン測定によるせん断強度分布

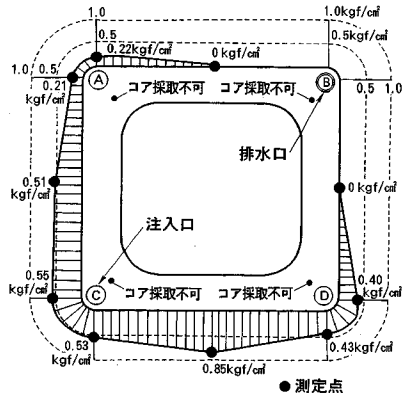


図-13 ケース6におけるせん断強度分布

せん断試験器によって複数ポイントのせん断強度を測定し、裏込め材の品質、充填性を確認した(各辺両端2点、中央1点、計12点)。また実験装置コーナー部でコアをサンプリングして一軸圧縮強度も測定している。

(3) 実験結果

実施したケース1～6の実験条件と共に一軸圧縮強度試験の結果を表-4に示す。

①裏込め材のゲルタイム

ゲルタイムの設定は配管の長さを計算して注入口手前の管内でゲル化が始まるように設定するのが通常である。実験に用いた管径、管長、注入量から算出した結果が2.5秒である。試験的に注入口から地山側へ出た後にゲル化が始まる場合を想定してゲルタイム6秒の実験も行った。他の条件を同一として比較すると前者がケース1、後者がケース6になる。このときの配合を前章で示した方法で設定した。ゲルタイム2.5秒を6秒に変更するときの手順である。ゲルタイム2.5秒に相当する数値を以下の()内に示す。図-3からゲルタイム6秒(2.5秒)に相当するB/C=72% (33%)を読み取り、図-9から $\sigma_{28}=15\text{kgf/cm}^2$ に相当するW/C=390% (W/C=350%)とした。後は所定の比率で助材、安定剤を決めてm³配合に換算する。A液、B液混合後の1m³あた

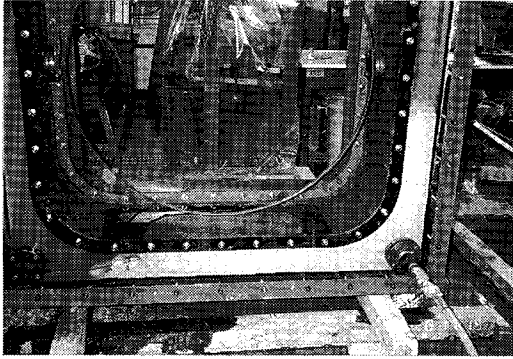


写真-1 下部からの注入



写真-2 上部からの注入

りの配合ならびにテストピースの試験結果を表-5に示す。

表-4に一軸圧縮強度を示す通り、ケース1では平均して $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度の強度が出ている。また図-12に示すベーン試験結果からせん断強度も安定した数値であり、バラツキが少ない事が確認できた。

ケース6のベーン試験結果を分布図として図-13に示す。注入口付近では一見せん断強度が発生しているように見えるが、コアの採取は不可能であり、表層部のみゲル化し、内部は固化していない状況であった。注入口最遠部(図中に示すB点)でせん断強度が発生していない事から考えると、固化体が圧力によって流動充填されていく現象ではなく、水によって希釈された低い強度の裏込め材がどんどん打ち込まれていき、注入口付近で滞留が生じて圧縮されアクリル板表面部でせん断強度が発生したと思われる。装置内の水が白濁する状況は目視結果でも認められており、ゲル化させるのは管内でなければならぬと言える。矩形のテールボイドに対して裏込め材が流動、充填できるかどうかが問題であったが、下

部1点からの注入かつゲルタイム2.5秒の条件下においては完全な充填、強度の保持が可能であった。

②注入方法

1) 注入口の位置

下部からの注入状況を写真-1に示す。固化体が上方、側方に向けて流動しているところであり、均質な固化体が押し出されていく状況が見られる。ケース1, 2が下部からの注入である。せん断強度、一軸圧縮強度の結果をみるとケース2で注入口、排水口近くの強度の低下が認められるものの、コアは全て採取可能であり、充填性は良好であったと考えられる。一軸圧縮強度は大気下でゲル化させたテストピースの値 $15\text{kgf}/\text{cm}^2$ に比べて約7割の値となっており、無加圧で水中へ注入した場合は加圧による脱水作用がないため、若干の希釈によってこのように強度低下が生ずるものと思われる。

写真-2に上部からの注入状況(ケース3)を示す。固化体が上部から落下している状態である。実験装置が簡易のもので加圧できる構造ではないため、上部からの注入はこのようにゲルが水を巻き込んだ状態の充填となる。せん断強度、一軸圧縮強度とも下部注入の場合に比べて低下しており、注入箇所の最遠部コーナーにおいてはサンプリングしたコアが一体化していない状況であった。

側部(上面)からの注入(ケース4)はグラウトホールからの注入を想定した場合である。奥行を500mmとした関係で大量注入となり、注入時間が長くなったため経時によってせん断強度が大きくなっているが、内部は水を巻き込んだ状態であり、コアとして採取できない状況である。上部からの注入と同様に裏込め材の品質は良くない。

2) 注入口の数

下部2ヶ所から注入した場合(ケース5)には次のようになる。充填状況は下部1点からの注入と同様にゲル体が押し出されていくのが確認されている。しかし下辺中央部の水の逃げ道がなくなり、右方向に走ったため右側(D点)の一軸圧縮強度が低くなっている。実際の工事における同時注入は推進ジャッキのストロークに同調させたmm単位の奥行での注入であり、このような奥行10cmの注入とは異なるが、断面が大きくなったときの複数点注入時には検討する必要があると言えよう。

③加圧下の注入

加圧下の強度発現をチェックするために図-14に示す装置を使用して圧力下の注入を試みた。1~ $3\text{kgf}/\text{cm}^2$ の加圧パイプ内と無加圧パイプ内に裏込め材を注入し、固化体の強度を比較したものであるが、図-15に結果を示すとおり、 $3\text{kgf}/\text{cm}^2$ で約2倍の強度が発生した。実際の裏込め注入においては本模型実験結果よりも高い強

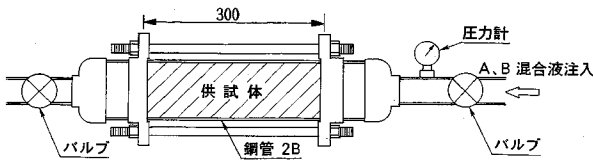


図-14 加圧試験装置

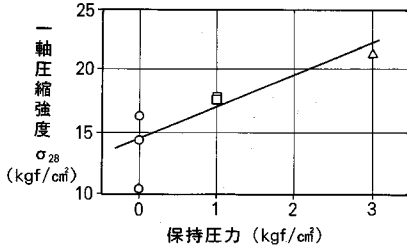


図-15 加圧下における固化体の一軸圧縮強度

度が発生する事も考えられよう。

(4) まとめ

本実験の目的は矩形4辺への充填性, 必要な流動性, ゲルタイムの設定の考え方などを検討する事であった。加圧できない装置であったため不十分さは残るが, 大まかな傾向は把握できた。2液性裏込め材を用いるという前提ではあるが, 矩形という形状に伴う問題点は初期に想定された程ではなく, 管内でのゲル化を設定すれば1.5m角というスケールでは流動に問題はない事がわかった。但しこの実験はボイドの奥行きが120mmであり, 実際のジャッキストロークに同調させたmm単位の同時注入において流動性に問題ないかどうかは実証工事で確認する。また注入箇所については下部からの注入が良いという結果となったが, 実際の裏込め注入は加圧下となるため, この点についても実証工事で確認する事とした。

5. 実証工事における裏込め注入

ボックスシールド工法の実証工事を実施した。その中で前章までに述べた裏込め材料・方法によって裏込め注入を検証した。実証工事は 2850×2850 mmのシールド機によって下記条件で計画路線を掘進したものである。

- ・掘進延長 40m×2本
- ・土質 上部1/4細砂 (N=2), 下部3/4凝灰質粘土 (N=12)
- ・土被り 4m
- ・地下水位 GL-1.5m
- ・テールボイド 75mm
- ・裏込め材料 c材 (3章参照)
- ・裏込め注入方法 掘進同時注入

(1) 矩形シールドにおける同時注入機構

円形シールドで用いられる同時注入はシールド機上部に注入管を設置して行う方式であり, 掘進範囲外に注入

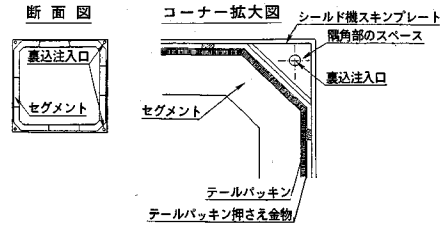


図-16 矩形シールド同時注入機構

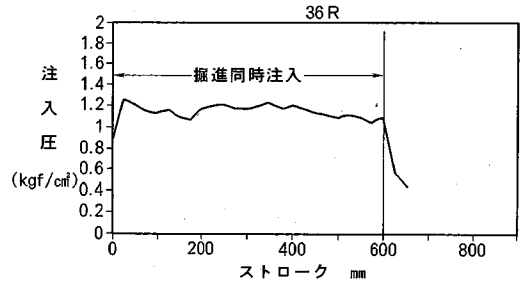


図-17 注入圧力の変化

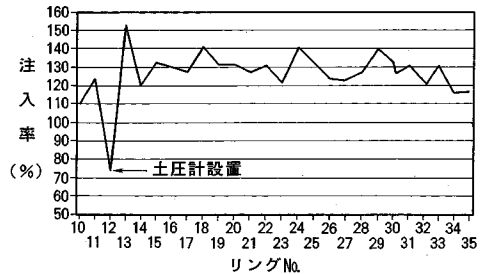


図-18 注入量の変化

管が突き出すため, 管口が閉塞し易いという欠点や注入管の存在がかえって地盤を乱してしまうという問題があった。一方, 矩形断面においてはシールド機テールの隅角部におけるスキンプレート内面とセグメントの間に生ずるスペースを利用して注入管を配置する事ができるため, 掘削範囲内からの同時注入が可能であるという利点を有し, 閉塞防止や注入圧力の安定化が可能になると考えられる。この実証施工では図-16に示すように各隅角部に1個, 計4個の注入管を配置した。充填性と共にこの注入機構の性能についても確認する。

(2) 施工状況

図-17に注入圧力の変化の代表例を示す。注入率を設定したときのリング内の圧力変動の記録であり, 1.2 kgf/cm²前後の安定した注入結果となっている。圧力は注入ポンプ元圧であり, 配管抵抗を減ずると吐出圧は0.5kgf/cm²程度と推定される(配管抵抗を発進前に測定, 0.6~0.7kgf/cm²/92.6m)。セグメント上部の実測土水圧0.4kgf/cm²(設計土圧4m×1.6t/m³=0.64kgf/

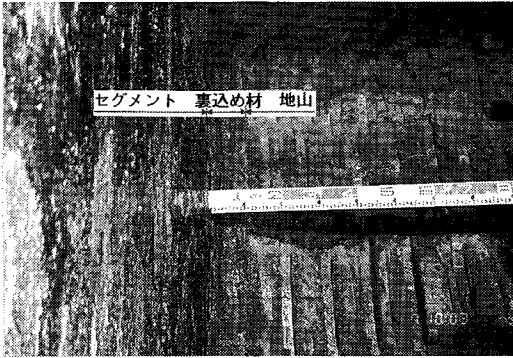


写真-3 裏込め充填状況

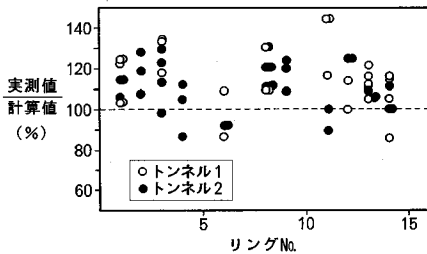


図-19 裏込め厚さ測定結果

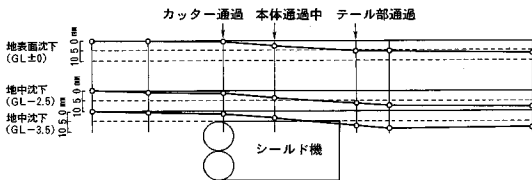


図-20 シールド直上の沈下の経時変化

cm²) にほぼ見合う圧力で注入できたものと考えられる。実際の施工においては設計土圧を裏込め注入圧力が上回る事が多く、セグメントの設計において裏込め注入圧力を短期荷重と考えて照査しておく必要があると言える。

図-18 に注入率の記録を示す。注入制御盤の故障、バルブ操作の不慣れなど短距離施工で生じがちな不具合や土圧計設置による注入の遅れ(12リング、テールから土圧計が抜け、土圧計を地山に密着させるまで裏込め注入を行わなかったもの)などにより、やや凹凸はあるが、概ね130%前後の注入率となっている。N値5~10の凝灰質粘土が断面の3/4を占めるこの地盤においてはほぼ妥当な値と言えよう。

(3) 充填状況の確認

掘進終了後、2本のトンネル間を切り抜ける工事があり、そのときに裏込め材の充填状況を確認する事ができた。写真-3に一例を示すが、裏込めが露出した延長20mにおいて完全な充填が認められた。これらの写真からスケールアップした裏込め厚さと、オーバーカット量や

テールクリアランス量から算出した計算値の比較を図-19に示す。若干の凹凸はあるものの、充填性が良好であった事が数値の上からも確認できる。この区間における注入の位置は右下、左上等4ヶ所全てに振り分けた1ヶ所からの注入を行っている。前章で課題として残っていた上部からの注入については圧力下ではゲルが水を巻き込んだ状態にはならず一体化された状況である事が確認できた。またジャッキストロークに同調したmm単位の同時注入においては充填性は確保できたが、コアの観察結果によると掘進を止めた箇所(リング間あるいは排泥管閉塞時等)においては剥離する状況が認められている。打継目をフレッシュにするわけにはいかず、裏込め材の品質上の限界であろうと考えられる。

(4) 地盤変状測定

シールド掘進に伴う地盤変状の測定を実施した。その結果の一部を図-20に示す。地表面沈下ならびに層別沈下計による地中の変位量を測定した結果である。地表面沈下は最大6mmである。土被りが少ないため、シールド掘進の影響が地表につながり易い状態である事を考えると大きい沈下量ではない。シールド通過に対して最も速く反応する地中沈下(シールド機直上50cm)の経時変化を見ると、先行沈下は約1mmであり、シールド機本体が通過するとき約7mmまで増えている。テール通過後は1mm程度の追加であり、裏込め充填不良による沈下はほとんど生じていないと言える。主たる沈下の原因である本体通過時はシールド機と地山の縁切りのためにカッター掘削径を本体より5mmずつ大きくしており、これが沈下に直結したものと推測される。

6. 結論

裏込め材の配合実験、テールボイド模型実験から実際の掘進時の裏込め注入実験までの一連の実験により、矩形シールドにおける裏込め注入の施工性や充填性について追求した。この結果、次の事が言える。

- ① 矩形のテールボイドという特殊な形状であっても、円形シールドと同様に管内で固化するゲルタイムを設定すれば希釈を受けず、十分な流動性、充填性が確保できる。但し、A、B液混合後の管長はゲルの品質保持の上で重要であり、掘進中の管長変更は極力避けるべきであると言える。
- ② 実証施工では裏込めのゲルタイム変更を行う必要がなく、強度の調整を試行できなかったが、模型実験の章で述べた通り、配合変更の手順を明らかにした。今後、データの追加によってさらに補足する必要はあるが、円形シールドでも適用出来るものである。
- ③ 模型実験で課題として残された注入箇所については、実証施工で上部からの注入を試みた結果、加圧下の注入であればゲルが水を巻き込んだバラバラの状態には

ならず、一体化された裏込めである事が確認できた。

- ④隅角部を利用した掘削断面内からの同時注入については、注入圧力がほぼ一定であり、安定した裏込め注入が可能である事を見出した。この結果裏込めに起因する地表沈下を抑える事ができた。この機構は矩形にとどまらず、円形シールドに対してもテールシールドの工夫は必要になるが、応用可能と考えられる。

7. あとがき

矩形シールドの課題である裏込め注入について、実証施工を含め、実験的に確認した。シールド施工後にトンネル間を掘削して裏込め厚さを測定し、矩形においても十分な充填が可能である事を立証した。しかし今回の実証施工機は2.85m×2.85mのシールド機であり、裏込めの流路長は最大で11m程度である。注入箇所は1ヶ所で十分であったが、大断面になると流路長が長くなるため、複数点からの注入が必要になる事も予想される。複数注入を行った場合の裏込め材合流点での地下水の巻き込みによる品質低下、その防止方法など、今後さらに研究していきたいと考える。

なお、本研究の実施にあたっては共同開発のメンバーである大成建設(株)、(株)利根、三井造船(株)の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 坪井広美・宇津木薫：矩形断面シールド工法の開発(その1)、西松建設技報第15号, pp. 7~12, 1992.
- DPLEX シールド工法公開実験資料, 大豊建設, 1991.7.
- 矩形シールド公開実験概要, 五洋建設, イセキ開発工機
- 多田幸司・谷口徹・古川浩平・中川浩二：ボックスシールド機の開発と施工性に関する実験的検討, 土木学会論文集VI-21, No. 480, 1993.12.
- 亀田宏：泥土圧シールド工法における裏込め注入, 第6回トンネル技術シンポジウム, pp. 27~36, 日本トンネル技術協会, 1984.9.
- 三木五三郎・下田一男：シールドトンネル裏込め注入工法の問題点と今後の動向, 第6回トンネル技術シンポジウム, pp. 1~8, 日本トンネル技術協会, 1984.9.
- 土木学会編：トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, pp.146~147, 1986.
- 三木五三郎・斎藤孝夫・下田一雄・木村昌義著：裏込め注入工法の設計と施工, pp. 52, 山海堂, 1990.6.
- 三木五三郎・下田一雄・佐藤剛司：耐水性エマルタルの開発研究, 土木学会第32回年次学術講演会, 1977.
- 三木五三郎・下田一雄・四方哲雄：低アルカリ性エマルタルの開発研究, 第13回土質工学研究発表会, 1978.
- 三木五三郎・吉川新吉・下田一夫・皆川哲寛・山崎恵一郎：可塑性グラウトを用いた裏込め注入工法, 第15回土質工学研究発表会, 1980.
- 三木五三郎・上地治實・下田一雄・井出一夫：TGグラウトを用いた新しい裏込め注入工法について, 第16回土質工学研究発表会, 1981.
- 三木五三郎・上地治実・岡嶋正樹・井上稔・田中和利：裏込め材の混合形態に関する一考察, 第17回土質工学研究発表会, 1982.
- 三木五三郎・下田一雄：スラグー石灰系硬化剤を用いた裏込め剤の開発研究, 第17回土質工学研究発表会, 1982.
- 河野伊一郎・高田明・二町宣洋・与田昭男：注入材としての水砕スラグ, 第17回土質工学研究発表会, 1982.
- 福田誠・河村邦基・斎藤孝夫：シールド裏込め注入材の強度特性に関する室内実験(その1), 第22回土質工学研究発表会, 1987.
- 有泉毅・恵利川勝軍：シールド裏込め材料の水密性向上技術の研究(その1), 土木学会第43回年次学術講演会, 1988.
- 堀内澄夫・森誠二・高橋和敏・小田原卓郎・楠亀鉄男：フライアッシュを主材とした長時間安定性裏込め材, 土木学会第44回年次学術講演会, 1989.
- 森吉昭博・深井一郎・竹内幹雄・井戸芳昭・大野健一郎：地中構造物の防水, 減震用材料としてのアクアファルトの開発と特性, 土木学会第44回年次学術講演会, 1989.
- 斎藤優・本間毅一・浅岡宣明・浅田健次：裏込め注入に関する要素実験(1), 土木学会第47回年次学術講演会, 1992.
- 下村真弘・金井誠・竹内幹雄・大野健一郎：シールドトンネル防水材としての裏込め注入材料実験(その1), 土木学会第45回年次学術講演会, 1990.
- 文献8, pp. 82, 山海堂, 1990.6.
- 文献8, pp. 146, 山海堂, 1990.6.
- 島田俊介・佐藤武・多久実著：最先端技術の薬液注入工法, pp. 115, 理工図書, 1991.6.

(1994.3.7 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON BACKFILL GROUTING IN BOX SHIELD TUNNELING METHOD

Koji TADA, Masahiro NAKAGAWA, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

In tunneling using shields with rectangular cross sections (box shield tunneling method), it is important and necessary to ensure the backfill grouting of the rectangular-shaped tail void to put the method to practical use. In this study, grouting performance was investigated through tests using a full-scale model. The basic characteristics of hardened backfill materials were also examined through a series of tests to propose different mix proportions. Based on the results of the above tests, simultaneous grouting was carried out during experimental tunneling to investigate the state of ground deformation and grouting thickness. The above measurements proved that the successful backfill grouting of the rectangular-shaped tail void was possible.