論　文

[1108]　シールド工法における場所打ちライニング工法の開発

正会員○福留和人（間組技術研究所）
鶴岡　進（間組技術開発部）
巽　　治（間組土木設計部）
安藤利則（間組技術研究所）

1．まえがき

現在、過密化した都市部でのトンネル工事では、多様な地盤への対応、環境保全および安全性等からシールド工法が中心的役割を果たしている。しかし、シールド工法による工事量が増加にするにしたがって、より経済的で合理的な工法の開発が求められるようになっている。このような背景から、高価なセグメントを用いずにシールドテール内でコンクリートを打設して覆工を構築する『場所打ちライニング工法』の開発が精力的に行われている。

今回、軟弱地盤および滞水地盤に適用可能な『場所打ちライニング工法』の開発を目的として、①急硬材を用いた超早強コンクリートの物性試験②スキンプレートスライド時の推進力の把握③打継ぎ部の止水方法の検討④コンクリートの打設方法および打設管理方法の検討および⑤実大モデルによる載荷実験を行った。

本報ではこれらの実験から得られた結果と若干の考察について述べる。

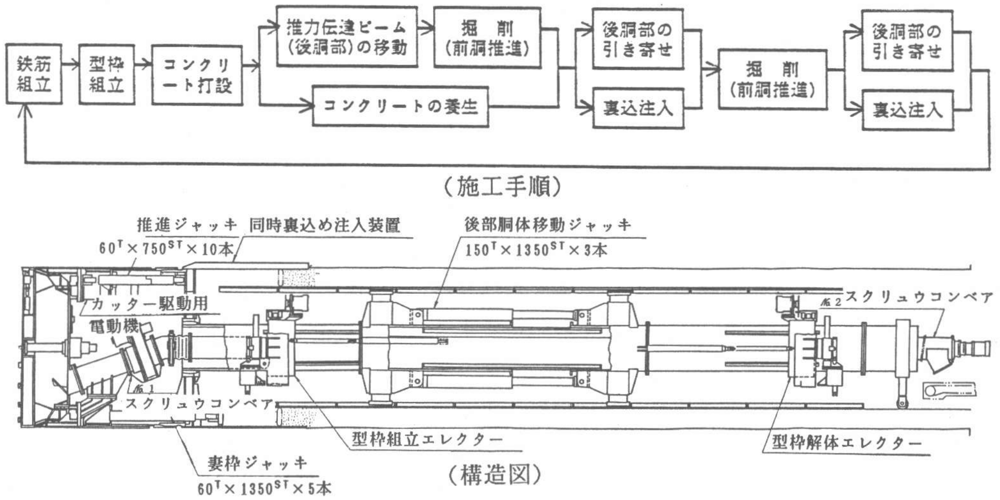
2．工法の概要

開発を進めている『場所打ちライニング工法』の概要を図－1に示す。本工法は、シールドテール内でコンクリートを硬化させてた後地山に押し出すことおよび既設コンクリートにシールドの推進反力をとっている点が特徴であり、以下に示す利点を有する。

（1）シールドテール内でコンクリートを硬化させるので、滞水地盤や軟弱地盤でも施工可能となるとともに所定の覆工厚の確保および所定位置への鉄筋設置が可能となる。

（2）早期強度が高いので、コンクリート打設後妻型枠の脱型が早期にできる。

（3）推進反力を後方の硬化コンクリートにとるため、若材令コンクリートへの影響がない。



図－1　工法の概要

3．コンクリートの特性

3．1　コンクリートの仕様

本工法に用いるコンクリートの仕様を表－1に示す。

3．2　使用材料

使用材料を表－2に示す。

3．3　コンクリートの配合

コンクリートの配合を表－3に示す。ここで、急硬材量および凝結調整剤量を変化させて試験を実施した。

表－1　コンクリートの仕様

項目		目標値	備考
フレッシュコンクリート	スランプ	16±2cm	充填性を考慮
	空気量	4±1％	
	可使時間	40分	打設時間を考慮
圧縮強度	材令1時間	20 kgf/cm²	土圧水圧に対する安定性を考慮
	材令1日	100 kgf/cm²	型枠脱型強度
	材令28日	240 kgf/cm²	設計基準強度

表－2　使用材料

	種類	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	比重：3.16
混和材	急硬材	CSA系，比重：2.91
細骨材	川砂（大井川産）	比重：2.60，F.M：2.76
粗骨材	砕石（秩父産）	比重：2.70，F.M：6.65
混和剤	流動化剤	
	凝結調整剤	可使時間の調整

表－3　コンクリートの配合

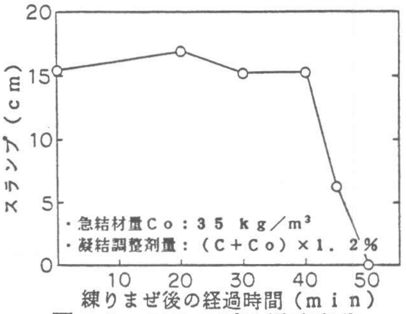
最大骨材寸法 Gmax (mm)	水結合材比 W/C+Co (％)	細骨材率 S/a (％)	急硬材添加率 Co/C+Co (％)	単位量（kg／m³） 水 W	セメント C	急硬材 Co	細骨材 S	粗骨材 G	流動化剤 (l)	凝結調整剤(＊C+Co%)
20	45	52	14.3	158	300	50	932	893	3．5	1．0～1．5
			10.0	158	315	35	933	894		
			7.1	158	325	25	934	895		

3．4　コンクリートの特性

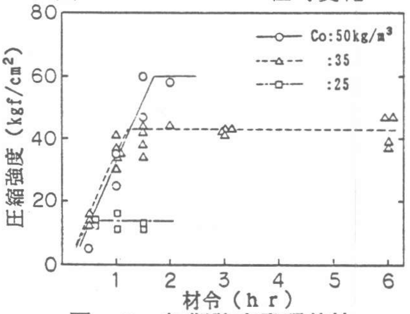
（1）スランプの経時変化：図－2にスランプの経時変化の測定例を示す。図からわかるように、スランプの保持能力は高く、可使時間の終了間際までスランプの低下はほとんどない。この時のコンクリート温度の測定結果によると、スランプの低下と同時に温度が上昇し始め、スランプが0cmとなった時、約1℃の温度上昇があることがわかった。したがって、実際の施工では、コンクリート温度の測定を行って可使時間を管理する必要がある。

（2）初期強度の発現特性：図－3に初期強度発現特性を示す。図からわかるように急硬材の添加量が多くなるほど高い初期強度が得られるが、強度の増進速度は、添加量にかかわらずほぼ一定である。したがって、初期にどの程度の強度が必要であるかに応じて急硬材の添加量を決定すれば良いことになる。図から今回設定した初期強度を満足するための急硬材の添加量は、ばらつきを考慮して35 kg/m³程度となる。

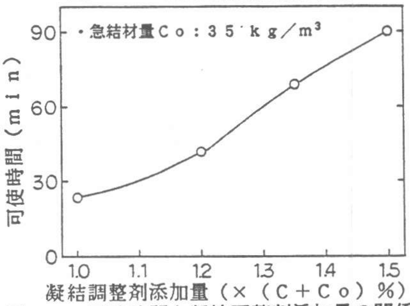
（3）凝結調整剤量と可使時間の関係：図－4に凝結調整剤量と可使時間の関係を示す。図からわかるように、凝結調整剤量が増えるほど可使時間が長くなる傾向がある。したがって、事前に凝結遅延剤量と可使時間の関係を把握することによって可使時間を調整することが可能である。今回設定した可使時間の仕様を満足するための添加量は、結合材量の1.0～1.2％となる。



図－2　スランプの経時変化



図－3　初期強度発現特性



図－4　可使時間と凝結調整剤添加量の関係

４．付着試験

４．１　試験方法

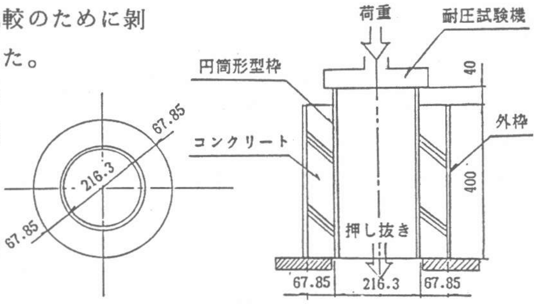
（１）試験モデル装置：試験モデルを図－５に示す。

（２）剥離剤の種類および塗布量：試験に用いた剥離剤は、表－４に示す鉱物油をベースとした２種類とし、その塗布量は，30m²/l（約33μ厚）とした。また、比較のために剥離剤なしの場合についても同様の試験を行った。

（３）載荷方法：コンクリート打設後所定の材令において、図－５に示す方法で円筒形型枠の押し抜き荷重を測定した。

表－４　剥離剤の種類

種類	配合成分	特徴
A	各種活性剤	全型枠剥離剤
E	各種活性剤＋特殊防錆剤	特殊防錆剥離剤ノロ付着防止剤



図－５　試験モデル

４．２　試験結果および考察

図－６、７に試験結果を示す。ここで、付着力および摩擦力は、下式より算出した。

・付着力　$\tau = (P_{max} - P_o) / A_t$

・摩擦力　$F = (P_{min} - P_o) / A_t$

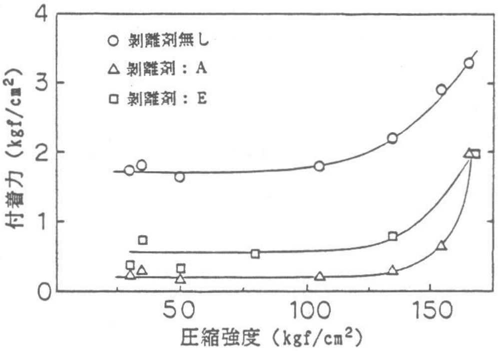
ここで、P_{max}：押し抜き荷重の最大値

P_{min}：付着切れ後の荷重の最小値

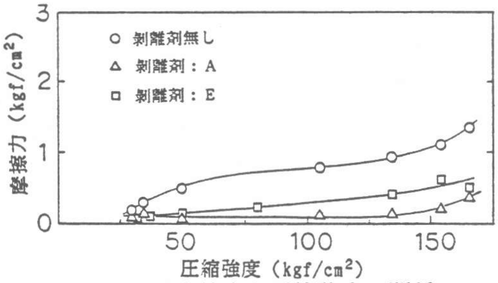
P_o　：円筒形型枠自重

A_t　：コンクリートの付着面積

図からわかるように、付着力は、剥離剤の種類にかかわらず圧縮強度 100 kgf/cm²までは、ほとんど変化はみられない。この時の付着力は、剥離剤を用いた場合 0.5 kgf/cm²以下であり、良好な付着切れ性能を有している。その後、圧縮強度の増進とともに付着力が大きくなり、剥離剤を用いた場合でも、材令24時間(圧縮強度150kgf/cm²程度)で、2kgf/cm²程度の付着力が期待できる。以上の結果より、今回用いた剥離剤（通常使用）であれば、スキンプレートスライド時の「剥離易さ」とシールド推進時の内型枠とコンクリートの「付着力」の相反する性能を期待できるといえる。



図－６　付着力と圧縮強度の関係



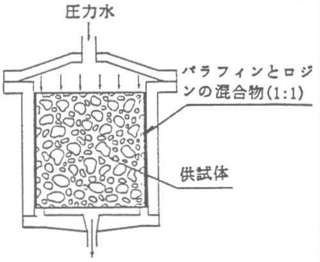
図－７　摩擦力と圧縮強度の関係

５．打継ぎ部の止水方法の検討

５．１　試験方法

（１）試験装置：試験は、図－８に示すインプット方式の透水試験装置を用いた。

（２）止水材料：試験に用いた止水材料を表－５に示す。これらは、主にゴムと水膨張性物質から成っている。また、比較のために止水材無の場合についても試験を実施した。

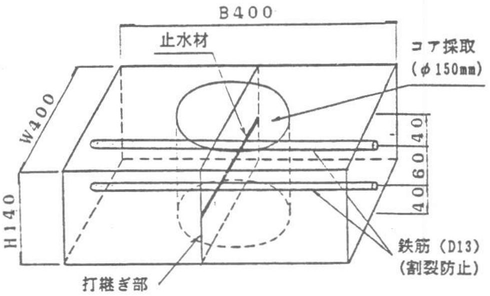


図－８　試験装置

表－５　止水材料の種類

止水材料種類	断面寸法(mm)	備考
A－1	20×5	非電解質
A－2	20×10	
D－1	20×5	電解質
D－2	20×10	
S－1	20×5	電解質
S－2	20×10	

（３）供試体作製方法：供試体の作製にあたっては、図－９に示すような型枠を用い、中央部に打継ぎ部ができるようにコンクリートを２回に分けて打設した。止水材料は、打継ぎ部の中央に専用の接着剤により貼付した。コンクリートの打継ぎ間隔は、実際の施工サイクルを考慮して、材令３～４時間とした。硬化後打継ぎ部からコア（φ150×Ｈ140mm）を採取し透水試験に供した。透水試験の開始材令は、２８日とし、試験開始までの養生は標準水中養生とした。



図－９　供試体作成方法

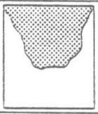
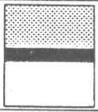
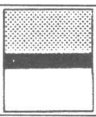
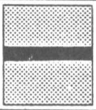
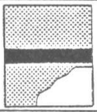
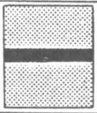
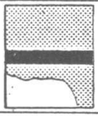
（４）透水試験方法：透水圧力は、１～１０ kgf/cm^2 とし、１ kgf/cm^{2}毎に段階的に加圧した。各段階の保持時間は、１～５ kgf/cm^2：２０分間，６～１０ kgf/cm^2：２分間とした。各水圧毎に漏水の有無を調べ、漏水が認められる場合は、その時点での水圧および経過時間を測定した。試験終了後、供試体を割裂して、透水部のスケッチおよび写真撮影を行った。

５．２　試験結果および考察

表－６に試験結果の一覧を示す。

今回の試験では、加圧時間が短かかったため、止水材料無の場合でも漏水はみられなかった。しかし、割裂後の透水状況の観察結果によると、２／３程度まで透水しており、長期にわたる加圧下では、漏水が生じたものと考えられる。止水材料の種類による比較結果では、非電解質のＡが止水性がよく、水圧 10kgf/cm^{2}まで漏水はみられなかった。電解質のＤおよびＳでは、止水効果がみられなかった。

表－６　透水試験結果

種類	スケッチ図	試験結果	種類	スケッチ図	試験結果
止水材無		加圧中の漏水はなかったが、2/3 付近まで透水しており、長期間では漏水するものと考えられる。	—	――――	――――
A-1		漏水は全く見られず水は全て止水材により止水されている。	A-2		漏水は全く見られず水は全て止水材により止水されている。
D-1		水圧をかけた直後から漏水がみられ、止水材の効果はほとんどないといえる。	D-2		水圧をかけた直後から漏水がみられ、止水材の効果はほとんどないといえる。
S-1		水圧 2kgf/cm^2 までは漏水はなかったが水圧 3kgf/cm^2 (10分後) から漏水が認められた。	S-3		水圧 3kgf/cm^2 までは漏水はなかったが水圧 4kgf/cm^2 (6分後) から漏水が認められた。

注）▒は、透水部分を示す。■は、止水材を示す。

以上の結果より、コンクリートの打継ぎ部には、止水材料を使用することが必要であり、その止水材料は、非電解質のものがよいことがわかった。

６．打設方法および管理方法の検討

６．１　打設方法および計測項目

実物大の型枠（内径 2,400mm，覆工厚 400mm，リング長 1,200mm、打設口は妻型枠に２箇所）を用い、表－７に示す３通りの方法で打設した。計測項目は以下のとおりである。

①打設時：打設高さおよび側圧（土圧計により測定、打設口側上中下３箇所）②硬化後：各断面の弾性波速度を測定

表－７　打設方法

	打　設　方　法
ケース１	下部打設口から 120° まで打設し残りを上部打設口から打設する。
ケース２	上部打設口のみから打設する。
ケース３	下部打設口のみから打設する。

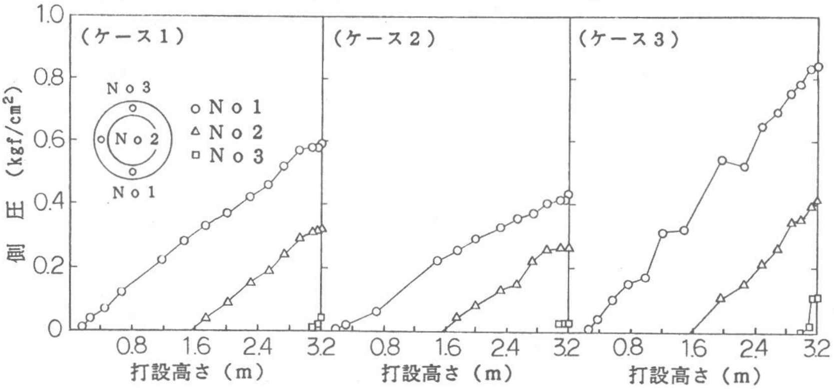
６．２　試験結果および考察

図－10に打設時の各位置におけるコンクリートの圧力と打設高さの関係を示す。いずれの打設方法の場合でも、コンクリートの側圧は、打設高さと直線関係にあるが、直線の傾きは、打設方法により異なる。これは、打設方法により、コンクリートポンプの圧力の伝達の程度が異

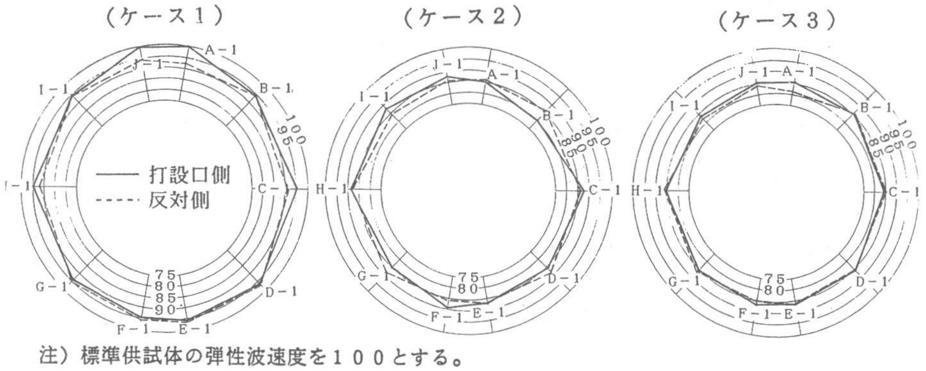
なるためであると考えられる。したがって、コンクリートの側圧で打設高さを管理する場合、この点を注意する必要がある。一方、コンクリートが天端まで充塡されたかどうかは、上方に取り付けた圧力計で検知できる。

図－11に各断面における弾性波速度の測定結果を示す。図からわかるように、ケース１の充塡性が最もよく、ケース２、３が若干充塡性が悪くなっている。この結果では、ケース２と３に有意な差はみられなかったが、外観観察によれば、ケース２は、材料分離によるあばたが観察された。それに対し、ケース３は、天端にブリージングがみられる以外は、良好な仕上がり状況であった。また、打設時のポンプ圧の上昇もさほどみられなかった。

以上のように、品質からは打設管を切り替える方法が最も適当であるが、施工上の手間を考えた場合、下方のみから打設する方法でも十分施工可能であるといえる。



図－10　コンクリートの側圧と打設高さの関係



注）標準供試体の弾性波速度を１００とする。

図－11　弾性波速度測定結果

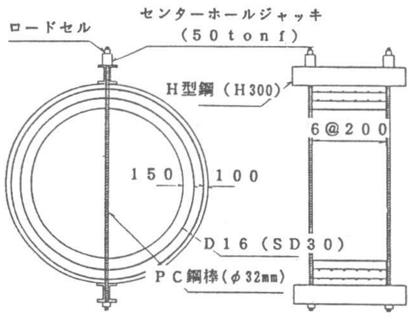
７．実大モデルによる載荷実験

７．１　実験方法

（１）実験モデル：実験に用いたモデルは、実物大とし、その寸法は、内径 2,400mm、覆工厚 400 mm、リング長 1,200 mm とした。

（２）載荷方法：載荷方法は、図－12に示すとおりで、ＰＣ鋼棒を緊張することによって、圧縮荷重を載荷する方法とした。実験は、表－８に示す３ケースについて行った。

（３）計測項目：載荷荷重および内空変位（鉛直および水平）を測定した。



図－12　載荷方法

7．2　実験結果および考察

表－8　実験ケース

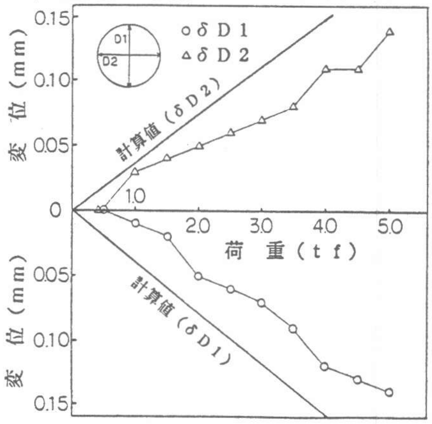
実　験　名	荷　　重	実　験　目　的
初期載荷実験	5tfまで載荷（0.5tf 毎）	内型枠脱型時の挙動の把握
初期持続載荷実験	5tfで7日間持続載荷	内型枠脱型後から設計基準強度達成までの挙動の把握
強度実験	最大荷重まで載荷(1tf毎)	最終的な耐力の把握

（1）初期載荷実験：図－13に載荷荷重と内空変位の関係を示す。図からわかるように、5 tonfまで弾性範囲内の挙動を示し、弾性理論*)による計算値とよく一致している。また、5 tonf載荷時の変位も0.14mmと小さく、ひびわれはまったく見られなかった。

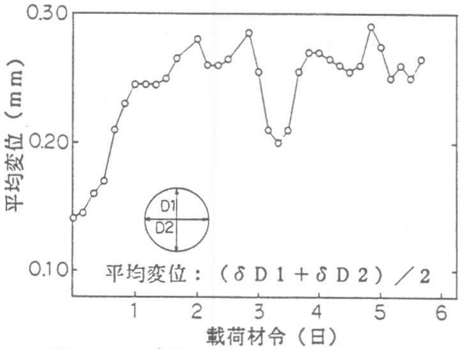
（2）初期持続載荷実験：図－14に載荷材令と内空変位の関係を示す。載荷後2日間は、徐々に変位が増大するが、それ以降はほとんど変化はみられない。変位量も、載荷直後の2倍程度で、過大な変位が生ずることはなかった。また、ひびわれもまったくみられなかった。

（3）強度実験：図－15にひびわれ発生前の載荷荷重と内空変位の関係をしめす。図からわかるようにひびわれ発生まで弾性挙動を示し、弾性理論*)による計算値と良好に一致している。ひびわれ発生荷重は、21.0 tonf であり、標準供試体により測定した引張強度（23.6kgf/cm²)から求めた計算値（16.9 tonf）を上回った。また、最大荷重も57.8 tonfと大きく、構造物として十分な耐力を有することが確認できた。

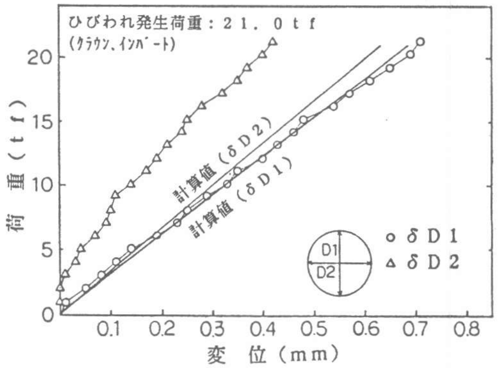
*）断面力：薄肉リングとして計算。変位：弾性体として計算($\delta D1=-0.149PR^3/EI$, $\delta D2=0.137PR^3/EI$)、ひびわれ発生荷重：引張縁の応力が引張強度に達するときの荷重を計算($\sigma cr=N/A+M/I*y$)



図－13　荷重・変位関係（初期載荷実験）



図－14　変位と載荷材令の関係（初期持続載荷実験）



図－15　荷重・変位関係（強度実験）

8．まとめ

今回実施した一連の実験から得られた結論をまとめると以下のようになる。

①急硬材および凝結遅延剤を用いることによって所要の初期強度および可使時間を確保できる。
②通常使用される剝離剤で、若材令時の「剝離易さ」と硬化後の「付着力」を期待できる。
③打継ぎ部の止水性の確保には、止水材を用いる必要があり、その材質は非電解質が望ましい。
④施工性および施工品質を考えた場合、下部打設口から打設する方法が最も適当である。
⑤実大モデルによる載荷実験の結果、十分な耐力を有することが確認できた。