

# 自動トンネル築造工法におけるライニング技術の研究開発

## ON THE LINING TECHNOLOGY OF THE AUTOMATED TUNNELING METHOD

高塚外志夫\*・岡田武司\*\*・近藤章司\*\*\*・中西信輔\*\*\*\*

By Toshio TAKATSUKA, Takeshi OKADA, Syozi KONDO  
and Shinsuke NAKANISHI

Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation has developed the automated lining technology that utilizes quick-setting resin mortar, which meets construction demands for long and winding small-diameter tunnel. Through experiments, quick-setting and low-shrinkage have been attained in resin mortar development, and mortar-supply equipment, mixing form of resin mortar and hardener and sliding-former have been examined, which were good to be automated. Using this technology, a 100 mm thick circular tunnel lining are constructed with an inner diameter of 1200 mm. Tunnels that were cast in-place have good mechanical characteristics, and this suggest that mechanical design is appropriate.

### まえがき

一般公道下に建設される公益物件の地下設備については、交通量の増大および都市の成熟化に伴い、地表からの開削工法による埋設工事が増々困難になってきている。通信ケーブル用トンネルについても、非開削工法による信頼性の高いトンネル築造技術の実現が強く望まれている。特に光ファイバーケーブルのような小径で高密度な新しい伝送媒体の出現に伴い、比較的小径（内径1200 mm以下）のトンネルを長距離曲線施工する必要性が高まっている。

小口径管を非開削で埋設する工法には、従来から発達した坑内の元押し装置によって推進用鉄筋コンクリート管を推進する工法が多方面で用いられているが、①100 m以上の長距離トンネルの施工が比較的困難である、②直線

施工が原則であり、曲線施工が困難である、のような問題点があった。

このような背景から筆者らは小口径トンネル築造工法の自動化をめざして、長距離曲線施工が可能なトンネル築造機械の研究を行ってきた<sup>2)</sup>。この工法の実現には短時間でトンネル壁体（以下ライニングと称す）を自動築造することが不可欠となり、そのために、以下の2点が課題となった。

- (1) 短時間で必要強度を満足できる材料を開発する。
- (2) その材料を長距離区間送給するとともに、ライニングを打設成形する装置を開発する。

第1の課題については、打設後1時間以内に施工上必要な圧縮強度40 MPaの強度発現が可能な早強性材料を開発した。筆者らは不飽和ポリエステル樹脂を結合剤に選び、常温硬化に適した硬化剤-促進剤系にさらに各種の添加剤を加えて、所要の可使時間を確保しながら要求値を満たしている。また、レジン特有の硬化時収縮も、熱可塑性樹脂の添加により解決を図っている。

第2の課題に対しては、自動化に適した材料送給方式、混合打設方式および耐久性の良い型枠機構を開発して、ライニング工程の自動化を可能にしている。なお、一連の装置群は操作室からの遠隔集中制御で動作する方式と

\* 正会員 工修 日本電信電話公社茨城電気通信研究所  
研究専門調査員

(〒319-11/茨城県那珂郡東海村白方白根 162)

\*\* 同研究所 研究専門調査役

\*\*\* 正会員 日本電信電話公社筑波電気通信建設技術開発センター 専門調査役

(〒305/茨城県筑波郡大穂町花畑 1-7-1)

\*\*\*\* 正会員 工修 日本電信電話公社建設局 調査員

(〒100/東京都千代田区内幸町 1-1-6)

している。

本論文は、はじめにライニングシステムを構成する早強性材料および装置群の設計について述べ、次に試作したシステムを用いた実地盤での運用実験結果にもとづき、本システムが所期の目的を満足し実用的であることを明らかにしている。

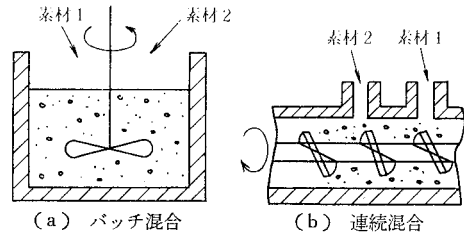


図-1 混合方式

## 1. 基本システム構想と要求条件

### (1) 基本システム構想

a) 材料：長距離曲線施工を実現するにはシールド機械の先端押し方式が前提となるので、反力壁となるライニングを現場築造することが不可欠となった。セグメント自動組立方式および早強性材料現場打設方式が候補に上がり、組立精度は技術的に確保できる見通しはあったが経済性において問題が残る。早強性材料を用いる後者の方式が実現性が高いと判断して研究対象を絞った。早強性材料としては、無機系材料であるセメントコンクリートを検討したが、早強性のものでも硬化速度が緩すぎ、さらに引張り強度が小さいために候補から除外した。一方、有機系材料の中に液状レジン硬化反応を用いると、高強度が得られ硬化速度の調整も容易であることを知った<sup>3)</sup>。中でも、常温にて硬化可能であり、安定した供給体制にあって低価格な不飽和ポリエステル樹脂を液状レジンとして選び、要求を満たすように改質を図った。

b) 装置群：ライニングシステムの大まかな施工プロセスを形成するために、早強性材料の送給、混合、成形方式について基本方式を定めた。早強性材料は砂を主成分とする高粘度流動体となるため、管路を用いた送給方式では距離に限界があり、また有機材料のため保守性に問題が残るのでバッチ方式を選定した。早強性材料は硬化速度が速いので型枠内へ打設直前に硬化液を混合する必要がある。混合方式には図-1に示すようなバッチ方式と連続方式が考えられるが、装置が小さくてよい連続方式を採用した。なお、硬化液の配合量は非常に少量であることが予想されたので、配合量を制御して精度を高める方針とした。打設成形方式には、成形性において信頼性の高い型枠内充填成形方式を採用した。したがってライニング装置群は送給系(送給部、連結部、混合打設機)と型枠系(型枠部)から成る。

### (2) 要求条件

早強性材料に対する要求条件は施工面から定まる早強性と構造面から定まる高強度、さらに施工性より表-1<sup>4)</sup>のように定める。装置に要求される機能をまとめると次のとおりである。

表-1 早強性レジンモルタルに要求される特性

要 求 項 目		要 求 値 等	
早 期 強 度	圧縮強度	打設後25分以内	8.6 MPa 以上
		打設後45分以内	32.7 MPa 以上
	曲げ強度	打設後90分以内	7.4 MPa 以上
		打設後24時間以内	14.9 MPa 以上
水中接着性、打設後24時間以内で曲げ強度		14.9 MPa 以上	
低収縮性		打設後24時間で収縮率	-0.1 ~ +0.2%
材料分離防止性		混練後、24時間以内での材料分離	ないこと

① 送給系：25°C で 60 PaS の粘度を有する材料を毎分 42l 送給できる。硬化液の配合制御に適した送給方法であって成形品に影響を与えない。ライニング1打設に必要な材料を確保できる。混合性と洗浄性の良い混合打設機形状である。② 型枠系：内型 120 cm、厚さ 10 cm、長さ 50 cm のライニングが成形できる。脱型力が小さい。曲率半径 100 m の曲線施工に対応できる。この他に保守性、耐久性についても考慮する。

## 2. 早強性材料の配合設計

### (1) レジンモルタルの組成

レジンコンクリートは結合材であるレジンと、増量材である粗骨材、細骨材、炭酸カルシウム粉末より構成される。本システムでは空気圧送スクリュー羽根による混合を行う必要から、粗骨材は使用せず細骨材も 3.0 mm 以下の細砂を用いたレジンモルタル(以下 REM と称す)を使用することにした。材料配合は強度、粘度、価格に影響を及ぼすので、まず砂と炭酸カルシウム粉末の配合比定めるため、強度および粘度の関係を調べた。図-2に樹脂と骨材の比を 1:4 とした場合の実験結果を示す。これより強度と粘度の均衡がとれ、強度の大きい 7:3 の比を選んだ。次に樹脂配合量を変えた時の粘度および強度を調べた。図-3、図-4に実験結果を示す<sup>5),6)</sup>。樹脂量が 15% 以下になると粘度が急激に高くなり流動性は悪くなる。また、20~30% において曲げ強度は最大を示している。粘度に対する要求値を考慮して樹脂配合量を 20% と定めた。

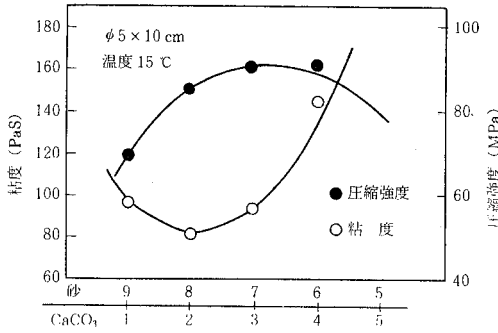


図-2 砂-CaCO<sub>3</sub> 比と粘度、圧縮強度

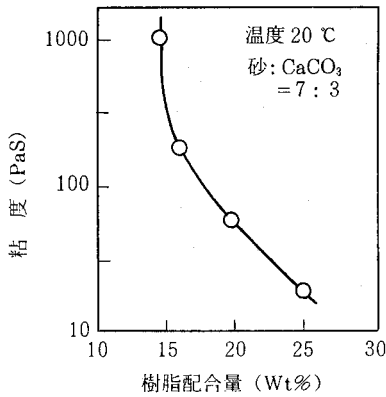


図-3 樹脂配合量と粘度

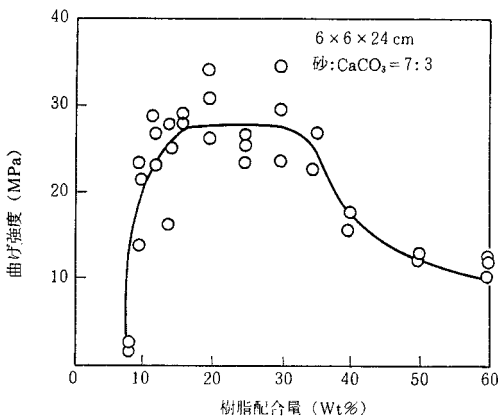


図-4 樹脂配合量と曲げ強度

(2) 早強性

不飽和ポリエステル樹脂 (以下 UP と称す) を使用した REM の常温硬化系には、メチルエチルケトンパーオキサイド (以下 MEKPO と称す) - オクテン酸コバルト (以下 CoOc と称す) が有効であることが知られている<sup>3)</sup>。しかしながらこの硬化系では要求値を満足することができないことが判った。そのため CoOc と協同して MEKPO の分解を促進する添加剤として、芳香族アミン化合物が有効

であることを見出した。この化合物の効果は大きく、UP 単独では反応熱で炭化される恐れがあったが、モルタル状態では多量の増量材によって熱が分散されるので、UP は変質しないことが明らかになった。この種の化合物の中から適正なものを選ぶために比較実験を行った。図-5 にその促進効果を示す<sup>7)</sup>。

この中よりジメチルアニリン (以下 DMA と称す) の効果が大きいので採用することにした。

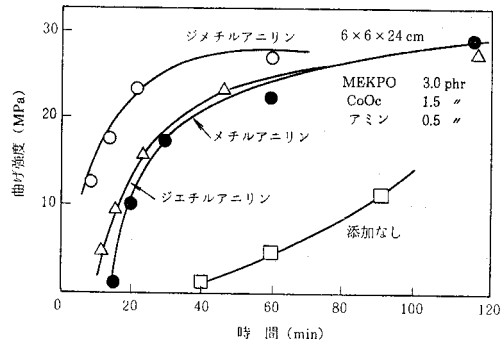


図-5 各種アミンの促進効果

ところが DMA の添加によって硬化時間を短縮することはできたが、同時に可使時間も 1~2 分になって非常に扱いにくいことがわかった。可使時間を長くするには MEKPO からの反応開始点を一定時間不活性にすることが有効であり、高分子工業の分野で重合禁止剤として用いられている p-t ブチルカテコール (以下 PTBC と称す) を少量添加することにした。

以上のように MEKPO-CoOc の硬化系に、硬化促進剤として DMA、重合禁止剤として PTBC の組み合わせにより、図-6 に示すような早強性と可使時間が確保できる早強性材料を得ることができた。

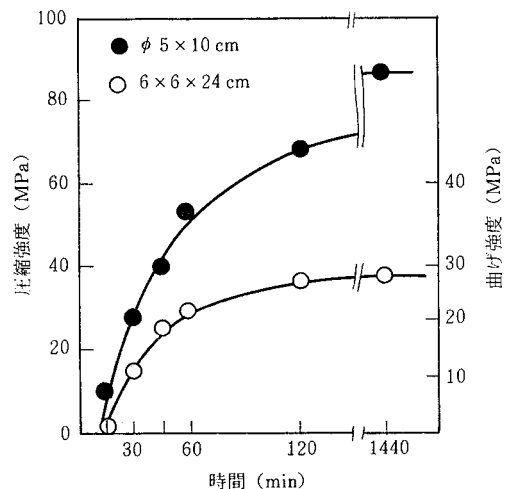


図-6 早期強度特性

### (3) その他

REM 特有の硬化時収縮に対しては、樹脂中に UP と相容性の良い酢酸ビニル樹脂を数%添加することによりほぼ 0 にすることができた。また、一般の REM に比べて樹脂量が多いので樹脂と骨材との材料分離が起り易くなるが<sup>8)</sup>、塗料のタレ防止に利用されている超微粒子状シリカ粉末が防止に有効であることを見出した。なお、耐水配合として、骨材にシラン処理を施して水中打継ぎ強度の向上を図っている。

### (4) 材料配合

表-2 に早強性 REM の材料配合を示す。

表-2 早強性レジンモルタル配合

種類	材 料	配合 kg
結 合 材	低吸収性不飽和ポリエステル樹脂	100
骨 材	シラン処理剤(砂(粒径3mm以下))	280
	炭酸カルシウム (CaCO <sub>3</sub> )	120
分 離 防 止 剤	超微粒子状無水シリカ (アエロジル)	0.5~1
添 加 剤	硬 化 剤 メチルエチルケトンパーオキシサイド (MEKPO)	3
	硬 化 促 進 剤 オクテン酸コバルト (CoOc)	1.5
	硬化促進補助剤 N-N ジメチルアミン (DMA)	0.2
重 台 禁 止 剤	p-t. ブチルカテコール (PTBC)	0.03~0.05

### (5) REM の強度

配合が定まった REM の各種強度を調べた。表-3 に試験条件および結果を示す。打継ぎ強度試験用試料は水中で成形し、打継ぎ間隔を実際の打設間隔である 1 時間に設定した。その他の試料はすべて大気中で成形した。環境温度は 20°C であり、7 日強度で評価を行った。

圧縮強度の平均値は 83.9 MPa あり、UP を使用した REM の中では低い方に属する。変動係数はセメントコンクリート<sup>9)</sup>と比べて小さく、安定した強度発現を示している。曲げ強度の平均値は 25.9 MPa あり、曲げ強度/圧縮強度の比は 0.3 であり、通常の 0.2 程度<sup>10)</sup>よりかなり大きい。また、引張り強度は割裂強度で評価しており、その平均値は 10.4 MPa を示しているが、曲げ強

表-3 REM の強度評価

試験項目	試 料		試験結果 (MPa)	
	寸 法 (cm)	数量 (本)	平均値	標準偏差
圧 縮 強 度	φ 5 × 10	100	83.9	2.7
引 張 り 強 度	φ 5 × 10	100	10.4	1.3
曲 げ 強 度	6 × 6 × 24	100	25.9	1.8
打 継 強 度	6 × 6 × 24	30	17.5	2.4

度に対し通常より小さな値となっている。打継ぎ強度の平均値は 17.4 MPa を示し、母材強度の 7 割の強度発現を期待できる。

以上より、早強性 REM は曲げ強度が大きく、その発現性も安定していると判断ができるので、ライニングのような曲げ部材を構成する材料として有用である。

## 3. 装置群の設計

### (1) 送給系装置

a) 送給部：本工法で送給する必要のある材料は未硬化状 REM, MEKPO, 洗浄液である。トンネル内をタンクに収納されてパッチ運搬された材料は連結部を介して、型枠部まで連絡する管路系で送給される。モルタル状の高粘度な材料を管路で送給する方法には次のような手段がある。

① ピストン圧送方式：電動機および油圧によってピストン往復運動を行ってモルタルを押し出す。

② 連続絞り出し方式：ポンピングチューブに満たされたモルタルを回転ロータに取り付けたローラーで絞り出す。

③ プレサラー方式：モルタルを貯蔵するタンクに空気を送り、圧力差でモルタルを押し出す。

当初、①、③は装置構成が大がかりになり、内径 120 cm のトンネル内へ搬入・設置が難しいと判断し、②に対して基礎実験を行った。その結果、送給されるモルタルは脈動するために MEKPO の配合管理が難しくなり、ライニングに未硬化部が残ることが判った。そこで、脈動が起らない方式である③に対し、装置の小型化について調査検討した結果、空気送給量が多く、レシーバータンクの必要のないロータリーコンプレッサーを見出すことができ、本格検討に入った。なお、コンプレッサーは吐出圧が 0.98 MPa を境に高圧用、低圧用に分類されて高圧用については使用上の制約が多いので低圧用を使用することにした。

送給に必要な特性を把握するために送給実験を実施した。トンネル内での配置を前提として、図-7 に示すような実験系を定め、送給圧力、圧力損失、送給量の関係を調べた。送給管路の径は実装できる最大径の 8 cm を使い、2重円筒型粘度測定器<sup>9)</sup>で評価した。実験結果を表-4 に、送給圧力と圧力損失の関係を図-8 に示す。この図から① 圧力損失は送給圧力に比例する、② モルタル吐出口とタンク送給口の高さの差が 1 m 程度で、しかも送給圧力がこの程度ならば、曲管、水平、垂直の各損失は同程度とみなせる、といった事柄が確認できた。

図-9 に送給圧力と送給量の関係を示す。未硬化状

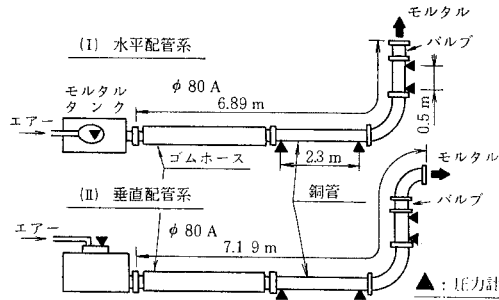


図-7 送給実験概要図

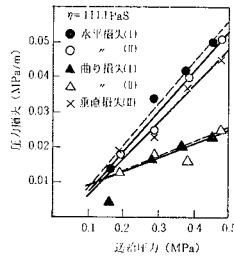


図-8 送給圧力と圧力損失

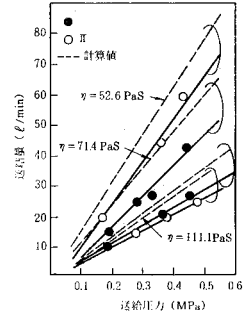


図-9 送給圧力と送給量

表-4 送給実験結果

	$\gamma$ (PaS)	$\tau$ (Pa)	$\Delta P$ (MPa)	実験値	理論値	$Q_1/Q_2$
				$Q_1$ (ℓ/min)	$Q_2$ (ℓ/min)	
水平 配 管 系	71.4	5.0	0.185	15.4	22.4	0.69
				24.9	33.8	0.74
				26.9	39.5	0.68
				42.7	52.6	0.81
	111.1	8.3	0.163	9.0	9.9	0.91
				14.7	18.8	0.79
垂 直 配 管 系	52.6	8.0	0.186	19.7	25.7	0.77
				44.6	55.7	0.80
				59.1	66.9	0.88
				9.3	11.2	0.83
	111.1	8.3	0.186	14.4	17.9	0.81
				19.3	25.2	0.77
			0.466	24.7	32.2	0.77

REM はビンガム流体の挙動を示すので、管内流動における圧力と送給量の関係を示す *Bukingham-Reiner* の式<sup>11)</sup> (1) を用いて実験値と比較した。その結果、実験値

$$Q = \frac{\pi a^4 p}{8 L \eta} \left\{ 1 - \frac{8}{3} \left( \frac{L \tau}{a p} \right) + \frac{16}{3} \left( \frac{L \tau}{a p} \right)^2 \right\} \dots \dots \dots (1)$$

- Q: 送給量,  $\eta$ : 塑性粘度
- a: 管内半径,  $\tau$ : 降伏応力
- L: 送給長, p: 送給圧力

は理論値に対して一定比率を示すことが明らかになった。理論値に対して小さいのは、タンク送給圧力には、タンク吐出部における損失が含まれており、管路部に対する送給圧力は小さくなっていることが原因として考えられる。これは管路部での単位長さ当りの損失をもとに、管路部始点での圧力を求めると約3割小さいことから説明できる。実際の装置ではタンク圧が基本となるので、タンク圧を基準にした送給量の調整を行うこととした。

また、筆者らの配合になる未硬化状 REM の降伏応力  $\tau$  の値が小さい。そのため、(1) 式の第2, 3項が 0.01 程度になり、省略しても問題はない。第2項以下を省略した式は、ニュートン流体の管内流動における圧力と送給量の関係を示した *Hagen-Poiseuille* の式に他ならない。したがって、このような送給系で送給量を論じる場合、ニュートン流体として扱っても実用上問題はない。

この実験により、未硬化状 REM の粘度を 60 PaS 以

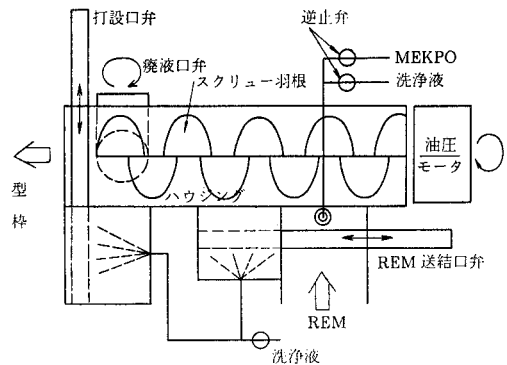


図-10 混合打設機の基本構成

下に押えることができれば、内径 8 cm、送給長 700 cm の送給系に対して、低圧用圧力設備で対応できると判断した。また、MEKPO は空気圧送およびペローズポンプの併用で、洗浄液はギャポンで送給することとした。

b) 混合打設機: 送給系の末端部に位置する混合打設機は未硬化状 REM と MEKPO を混合した型枠内へ打設する役割を有する。また、REM は速硬性を示すので打設機内の残留付着物を容易に洗浄できることが必要である。図-10 に基本構想で定めた混合打設機の基本構成を示す。ハウジング内径はライニング厚さ 10 cm および装備上の制約より 8 cm と定めた。スクリー羽根の諸元を表-5 に示す。押出理論式<sup>12)</sup>を用いて設定打設速度 (=送給量) 42 l/min よりスクリー羽根の回転数を求めると、出入口での圧力差がないので、推進流だけに規定されて約 560 r.p.m となる。実際に運用する時は空気圧送で送給される量より多く型枠内へ打設して、ハウジング内の圧力上昇を防止するため、計算値より高い回転数である 650

r.p.m を設定下限値とした。

混合性は手練りによって作成した試料の強度と混合打設機

表-5 スクリューの諸元

項目	寸法(mm)
外径	76
溝深さ	20.5
ピッチ	40
厚さ	7

表一六 混合方法の違いによる曲げ強度比較

混合方法	試料数 (本)	試験結果 (MPa)	
		平均値	標準偏差
手練り	27	26.6	5.0
スクリー 羽根	26	29.5	3.0

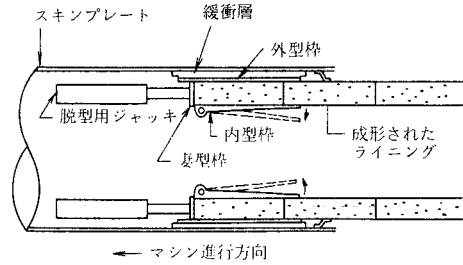
を用いたものと比較してその妥当性を評価した。未硬化状REM はモルタル混練プラントによって練り上げた同一バッチのものを用いた。6×6×24 cm の試料を用い、JIS A-1184 にしたがって曲げ試験を実施した。手練りでは MEKPO を添加後の混合時間を1分間とし、混合打設機ではスクリー羽根長 45 cm、回転数 650 r.p.m の条件で配合比制御を実施した。表一六に結果を示すように、混合打設機を用いた方が強度発現性が良好であるので、混合性は問題ないと判断した。

洗浄は混合打設機を維持する上で不可欠であり、能率の良い方法が求められる。有機溶剤を用いる方法は洗浄廃液の回収を密閉された系で実施することが難しく、火災等に対する安全性を考慮すると問題であった。そこで、温水とアルカリ性合成洗剤による洗浄効果を調査した結果、スクリーの正転、逆転の併用でハウジング内が、また、噴射流によって各弁の洗浄が良好に実施できることが明らかになった。洗剤は5% 体積比で混入し、洗浄液は 60°C で使用することに定めた。

c) その他：REM の硬化後の品質を確保するために、未硬化状 REM と MEKPO の配合量を精度よく管理する必要があり、本工法ではフィードバック制御法で対応した。一定時間内に供給される未硬化状 REM の量を、REM タンクに取り付けたロードセルで計量して、MEKPO の配合比が所定範囲に収まっているか判定すると共に、継続する次のステップでの MEKPO 供給量を定めるものである。

(2) 型枠系装置

a) 型枠構成：比較的鉄材との付着性が良いREM の型枠からの脱型が大きな課題であった。型枠装置の基本構成は 図一11 に示すようになり、片端が閉塞した二重円筒の型枠と硬化したREM を脱型するジャッキにより構成される。脱型方法には、型枠を成形面と直角に分離するセパレート方式と成形面に沿って分離するスライド方式が考えられる。セパレート方式の脱型力はスライド方式より小さいので、内型枠と妻型枠はこの方式を用いた。一方、外型枠はシールド機のスキムプレートに補強材に兼用する方がテールボイドも小さくできるのでスライド方式を採用した。また、曲線施工における脱型時にはライニングと型枠の軸方向がわずかにずれるので、ライニングに過大な応力が発生する恐れがあり、外型枠に



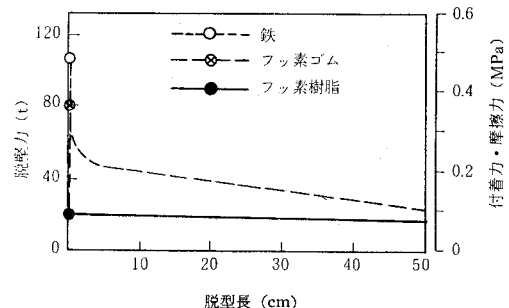
図一11 型枠装置の基本構造

弾性材を挿入して脱型における変形を許容する方式とした。

b) 型枠表面材料：型枠表面の材料選定には、UP に含まれるスチレンに対する等の耐薬品性、硬化時の発熱に対する耐熱性およびREM との付着性を調査して、フッ素ゴム、フッ素樹脂を選んだ。これを実物大の型枠装置に設置して脱型力を測定した。鉄材に対する脱型力を基準とするために型枠表面材料を3種類とした。ライニングの寸法は内径 120 cm、厚さ 10 cm、長さ 50 cm であり、脱型は打設終了45分後に、1 mm/sec の速さで実施した。型枠の断面構造および脱型長と脱型力の関係を 図一12 に示す。鉄材およびフッ素ゴムでは脱型力の最大値は RER と型枠が分離する時に表われてその後は減少する。フッ素樹脂では顕著なピーク値は表われず、鉄材に比べて 1/5 以下の値になることが明らかとなった。さらに、トンネルの曲率半径と脱型力の関係を調べると、曲率半径が小さくなる程脱型力は増すが、フッ素樹脂では曲率半径 50 m の時に 2t 程度の増加にとどまっている。これらの実験結果より型枠表面材料にフッ素樹脂を用いることとした。

外型枠は脱型中も常にREM と接触しているのでフッ素樹脂の耐摩耗性が問題となった。特に外型枠はスキム

表面材	鉄	フッ素樹脂	フッ素ゴム
構造			
A: スキムプレート B: ゴム材 C: 鋼板 D: 樹脂			



図一12 脱型長と脱型力

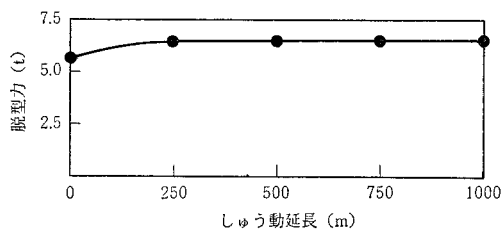


図-13 しゅう動延長と脱型力

プレートと一体となり、内側にはライニングが残存する点からも、トンネル築造途中での部品交換等の保守作業は非常に困難である。実験によって耐摩耗性を調査した。50×50×10 cm に成形した REM に対して 0.65 MPa

の上載圧を加え、0.5 mm 厚のフッ素樹脂コーティングを施した鉄板上をジャッキを用いて 50 cm の変位を繰り返し加えた。ここでジャッキのしゅう動速度は 100 mm/min とした。図-13 にしゅう動延長距離と脱型力の関係を示す。初期段階で 20% の脱型力の増加がみられるが、その後は安定して 0.5 mm のコーティング厚さで 1000 m 以上の施工に耐えることが確認できた。

c) 成型性の保障：ライニングの断面形状は完全な円の方が構造上およびテールシールの効果を期待する上で好ましいが、本工法での型枠内完全充填は機構上難しい。そこで、妻型枠部の上部に温度および電気抵抗の変化を検知できる 2 種類のセンサーを設置し、天井部の必

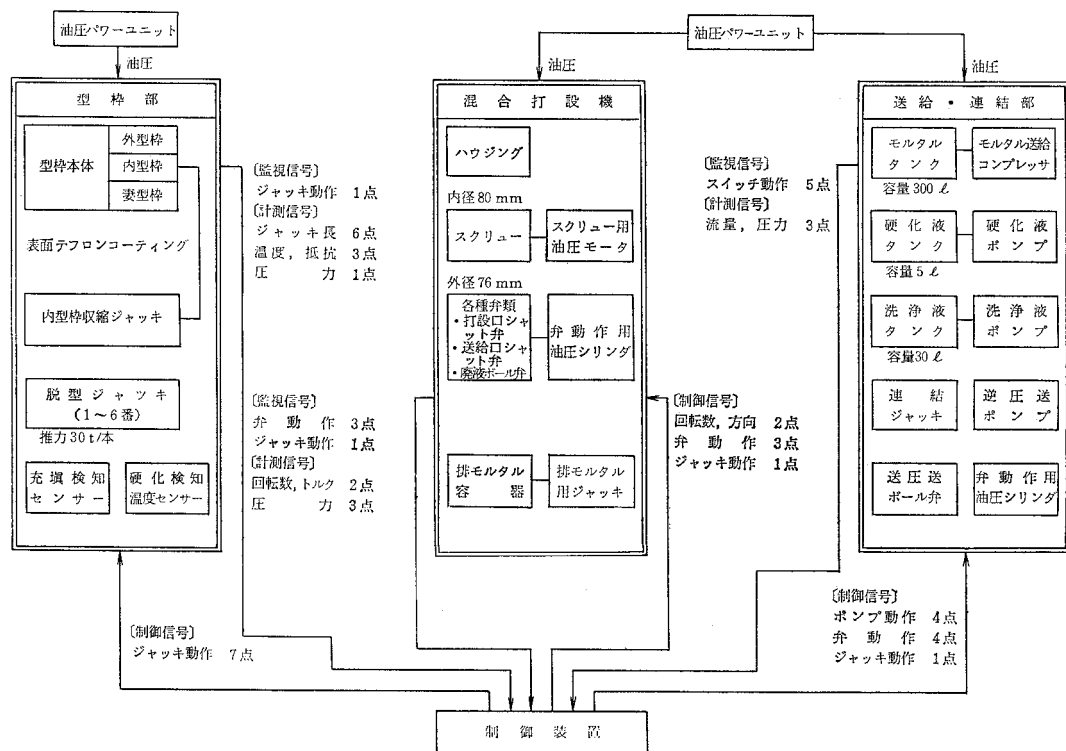


図-14 ライニングシステムの構成

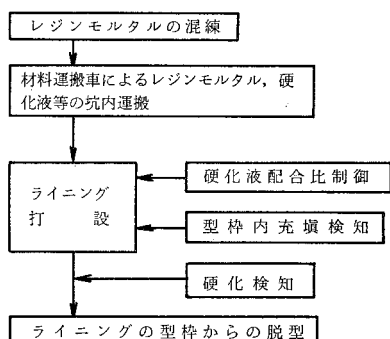


図-15 ライニング工程の概略フロー

要壁厚が確保できることを確認して、型枠内への打設を終了する方法を用いた。この方法によれば、未充填部を 3 cm 未満に押えることができたことを確認した。

### (3) システムの試作

設計検討に基づきライニングシステムの装置群の試作を行った。図-14 に装置群の構成を示し、図-15 ライニング工程の概略フローを示す。

#### 4. システムの運用実験と検証結果

試作したトンネル掘削およびライニングシステムを用いて実験の地盤内でトンネルを築造する実験を行い、本論文で述べた種々の機能についてその実用性を確認した。具体的には関東ローム層および砂層中に 107 m と 200 m のトンネルを築造した。未硬化状の REM 送給特性、ライニング強度、装置の動作性に対して検証を実施した。

##### (1) 送給特性

タンク設定圧力を 0.1, 0.2, 0.3 MPa と変えて送給量を調べた。送給長は 600 cm であり、粘度が一定になるよう温度管理を実施したが結果的に 25°C を中央値として  $\pm 5^\circ\text{C}$  の幅ができた。図-16 は約 600 回の打設記録の中から任意に抽出した 90 個のデータについて送給圧力と送給量の関係を示したものである。送給時間の平均値が 515 秒、標準偏差が 109 秒であり、おおむね REM のゲル化開始前 ( $\approx 600$  秒) に打設が終了していると判断できる。なお、送給量の目標値 42 l/min は目標施工サイクルタイムから規定されるものであり、現段階では目標値の 1.5~2 倍の時間をかけて運用している。この実験からタンク圧を上げれば目標値は十分満足できることを確認できた。

##### (2) ライニングの強度

地盤内に築造したトンネルから任意に 72 個の圧縮強度試験用試料 ( $\phi 5 \times 10$  cm) を採集して JIS A-1181 にしたがって強度を調べた。この試料の打設時条件として、MEKPO の配合比の平均値、標準偏差は 3.58 phr, 0.35 phr (phr: 樹脂量 100 に対する重量) であり、試料はトンネル底部より採集している。圧縮強度の平均値、標準偏差は

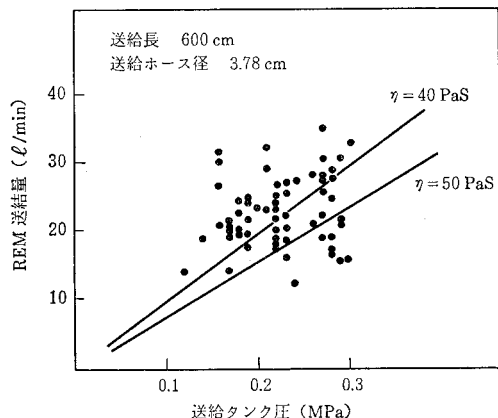


図-16 運用実験における送給特性

88.9 MPa, 11.4 MPa であり、実験室で成形したものより発現強度は大きい。

次にトンネルを 5.0 m 程度掘り出し所定の長さに分割して外圧強度を調べた。打設条件、実験結果を表-7 に示す。外圧強度試験は JIS A-5503 の鉄筋コンクリート管外圧強度試験法に基づいた。トンネルの外圧強度は試料が長くなるとやや低くなる傾向がみられるが、50 cm の長さでは 150 KN/m 程度期待できる。この外圧強度をリングの公式<sup>13)</sup>を用いて曲げ応力に換算すると 9.4 MPa となり、要求値を十分に満足できることが確認できた。なお、同径の下水道推進工法用 1 種管の圧壊強度の規格値が 86.2 KN/m であり、これよりかなり大きい耐力を有することも確認できた。

これらの結果より、ライニングの成形に関する装置の混合性および成形性における機能は問題ないと判断した。

表-7 トンネル外圧強度試験結果

リング No	200	201	202	203	204	205	206	207
MEKPO 配合比 (Phr)	3.7	4.3	5.0	6.1	4.6	5.2	4.1	4.7
圧壊リング	0.9 m		1.0 m			0.44 m		0.45 m
圧壊強度 (KN/m)	148		147			154		150

##### (3) 動作性

運用実験を通してトラブルの発生の頻度が高い項目は以下の 2 項目であった。

① ライニングが成形される場合、型枠の妻型枠部から混合打設機の打設口にかけて  $\phi 8 \times 15$  cm の凸部が同時に成形されるため、脱型時に折れて打設口前に残存して次の打設の障害となる。

② 妻型枠とジャッキシューの隙間に REM が流入して硬化し、それが工程の反復によって成長するため、未硬化状 REM が型枠外へ漏れたり、ライニングとジャッキが分離できなくなる。

①に対しては、凸部のテーパ量を大きくして脱型時の軸直角方向への変位に対する影響を小さくすると共に、トンネルの曲率半径が小さくなる部分では裏込め工程を早期に実施して、脱型時におけるトンネルの横ゆれの防止して対応している。また、②に対してはジャッキシューと妻枠が平面で接するように構造を変更し、密着性の向上を図って対応している。

装置の動作性について全体的にみると、信号系統のコネクターの接続不良およびスイッチ類の動作不良が実験初期段階に起こっていることがわかった。特に動作回数の多い可動部分を有する混合打設機の弁やスイッチ類は全期間を通じて動作不良が起きている。予防保全的な見



地より、所定の打設数を実施した時点で点検、調整を行うことが必要であることを再確認した。最少の保守間隔50を打設と設定し、脱型用ジャッキ、混合打設機の部品はこの間隔で実施することにした。

## ま と め

小口径シールドトンネルの長距離曲線施工が可能になると、地下設備を経済的に築造したり、施工面から生じる社会環境への影響を小さくできる等の利点がある。このため掘削からライニング成形に至るまでを自動で行うトンネル築造工法の研究を進めてきた。本論文ではライニング工程の自動化のために、早強性の材料を開発するとともに、この材料を送給、成形する装置群の設計試作を行い、地下での運用実験によりその実用性を確認した。

① 本配合設計によるレジンモルタルは、打設後45分で圧縮強度40MPaの強度発現があり、施工および構造上の要求値を満足している。またこの材料は曲げ強度が大きくしかも変動係数が小さいので、現場施工による曲げ部材用材料として有用である。

② 空気圧を用いた送給方式は、目標値であった42l/minを満足するレベルで実施していないが、得られた結果より圧力増加で十分対応できると判断できる。現状では打設するのに10分程度要しているが、成形上あるいは強度上の問題は起きていない。

③ 地下で打設されたトンネルを構成するレジンモルタルの圧縮強度は約90MPaを示し、トンネルの外圧強度は圧壊値(平均値)で約150KN/mを示している。要求強度は十分満足されており、混合打設機や型枠装置の機能は問題ない。

④ 実験中に発生した多くのトラブルより、実用上では混合打設機および脱型用ジャッキの可動部の点検サイクルを50打設と設定し、調整および部品取り換えを行うことが必要である。

今後、引続いてライニング材料の経済化を図るとともに、施工性・信頼性の向上にむけて研究開発を推進することを計画している。

なお、研究成果である早強性レジンモルタルおよびラ

イニング装置、さらには過程で得られた貴重な知見は、大型シールド工法等へも応用できるものであり、トンネル築造工法の発展に貢献できるものである。

## あ と が き

本研究開発を進めるにあたり、ご指導を賜りました日本電信電話公社茨城電気通信研究所福富秀雄所長、線路研究部小島伸哉部長、内田直也統括調査役、通信土木研究室山岸康利室長、並びに、元および現通信土木研究員の皆様に心から深甚なる感謝の意を表わすものであります。

## 参 考 文 献

- 1) 黒野良夫：最近の推進工法の動向，最近の推進工法 ④，総合土木研究所，pp. 1~8，1979年。
- 2) 鶴田秀典・杉本慎男・高塚外志夫・阿南修平：レジントンネル自動築造技術の開発，土木学会誌，vol. 69，No. 4，pp. 2~8，1984年。
- 3) 滝山栄一郎：ポリエスチル樹脂，日刊工業，pp. 68~102，1970年。
- 4) 高塚外志夫・松浦武利・岡田武司・中西信輔：Quick-setting resin mortar for small diameter tunnel，4th ICPIIC，pp. 195~200，1984年。
- 5) 松浦武利：レジンモルタルの流動特性，材料，第26巻，第287号，pp. 791~795，1977年。
- 6) 森光武則・藪田哲郎・辻村 健・中山知明：Nondestructive testing of resin mortar using ultrasonic pulse，ASCE，Journal of Vibration，Acoustic，Stress & Reliability in Design，(掲載予定)。
- 7) 松浦武利・小中庸夫：Quick-setting resin mortar，3rd，ICPIIC，vol. 1，pp. 584~598，1981年。
- 8) 岡田 清・坂村 果・村井信夫・佐藤泰敏：レジンコンクリートについて，材料，第16巻，第167号，pp. 667~675，1967年。
- 9) 永松静夫：コンクリートの各種破壊強度における統計的性質，コンクリート工学，第18巻，第2号，pp. 10~23，1980年。
- 10) 向井 毅：レジンコンクリートおよびレジンモルタルとその性質，コンクリートジャーナル，第11巻，第4号，pp. 10~17，1973年。
- 11) 寺田 進：固体混合液の管路輸送，理工図書，pp. 58~70，1971年。
- 12) 水谷久一ほか：プラスチック加工技術便覧，日刊工業，pp. 242~249，1960年。
- 13) 土木学会編：構造力学公式集，土木学会，pp. 406~410，1974年。

(1984.11.29・受付)