

V-221 シールド工法覆工材に用いる現場打設用レジンモルタルの高強度化

NTTアパックス研究所

丸山 孝志

NTT盛岡支店

桜田 孝喜

同上

○正会員 小林 康雄

日本コムシス（株）

龍神 勉

1. はじめに

近年、通信をはじめとした社会基盤の整備において、より効率的、経済的に高品質な幹線ルートを構築できる技術の確立が望まれている。その主要技術の一つであるシールド工法は、都市トンネルの構築工法として多用されているが、この工法においても建設費の節減および、より一層の施工の合理化、安全化が求められている。NTTでは、エス・エル・M200-M2工法（以下、M2工法）で使用実績のあるレジンモルタルの特性を生かすことにより、従来のシールド工法が抱える課題を解消することを目的として、レジンモルタルを用いた現場打ちシールド工法（レジンシールドシステム）の開発に取り組んでいる。

本工法の実現には、ライニング材料の高強度化をはじめとした、大幅な材料特性の向上が不可欠であり、M2工法で得られたレジンモルタルの材料特性に関するノウハウをベースに開発に取り組んだ。その結果、骨材表面処理方法の改良、新しい添加剤の付加等により、大幅な強度UPを実現し、高深度、高水圧下で要求される厳しい条件をクリアできた。ここでは、新たに完成した高品質レジンモルタルの特性について報告するものである。

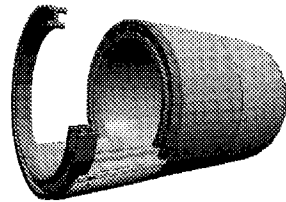


図-1 覆工イメージ図

2. 高強度化の目標値

これまでのNTTにおけるトンネル工事の実績を踏まえ、図-2に示す設計条件を設定した。その結果、覆工体に要求される引張り強度は表-1に示す通りである。現状のレジンモルタルでは、粘性土の場合、引張り強度不足であるため、リング強度向上対策が必要である。なお、覆工厚さについては、現行のシールド工法の建設費コストとの比較より、20cmとした。

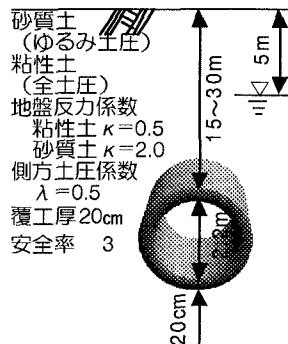


図-2 設計条件

表-1 必要引張り強度

土被り (m)	土 質	引張強度 (kgf/cm ²)
1.5	砂質土	8
	粘性土	15.9
2.0	砂質土	16
	粘性土	21.2
2.5	砂質土	24
	粘性土	26.5
3.0	砂質土	32
	粘性土	31.9
現状のリング強度		22.0

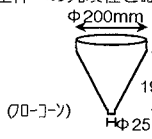
3. レジンモルタルの必要特性

本工法で覆工材料として使用しているレジンモルタルの組成を表-2に、必要特性を表-3に示す。

表-2 レジンモルタル組成

骨材	砂 炭酸カルシウム
結合材	不飽和ポリエステル樹脂
硬化促進剤	有機過酸化物
分離防止剤	超微粒子状無水シリカ
硬化剤	MEKPO
《砂の表面処理》	
シラン処理剤	シランカップリング剤 水 アルコール

表-3 レジンモルタルの必要特性

特性	必要性	必要値
強度 早期強度	トンネル本体強度及び、打設50分後のリングに反力をとるため、早期強度が必要	《永久構造物としての強度》 設計条件により変化（※表-1参照） 《早期強度》 圧縮強度 95kgf/cm ² （50分）
長期耐久性	永久構造物として長期耐久性が必要	水酸、アルカリ浸漬による強度低下を減少とする
低収縮性	収縮によるクラックを防止するため	硬化時 24時間後）-0.1%～+0.2%
流動性	打設時、型枠への充填性を確保するため 	・フロー値・・・300秒以内 ※レジンモルタルの粘性試験は現場での測定の手易さを考慮しフローコーンによるフロー試験を行っている。 ・樹脂粘性は200～300cp
ゲルタイム	打設時、型枠からの漏れ防止	4分～10分
材料分離	マシン推進に先行してモルタル混練を行うため、トラブル等により未硬化状態で放置する場合があるため	混練後、未硬化状態で3日間放置可能

4. 特性向上対策

高強度対策を施すにあたり、強度に起因する以下の4点について検討した。

- ①使用材料の変更
- ②配合の変更
- ③添加剤の混入
- ④補強材の混入

この4点についての具体的対策案を表-4に示す。この具体的対策案の中で、砂の粒径の変更については、以前検討した結果、流動性・収縮性・分離性に大きな影響を与え、必要特性を満足できなかった。また樹脂量の増加についても、コスト面に大きく影響を受けること、収縮性・分離性にも影響を受けることが想定されるため、今回の検討から除くこととした。

5. 実験結果

5.1 イソ系不飽和ポリエステル樹脂の適用

強度向上、耐水性向上等のメリットは大きいものの、表-5に示すとおり収縮率が大きく、トンネル覆工材としては、まだ適用できない結果となった。

5.2 シラン処理の変更

骨材の樹脂に対する接着性を増すための骨材表面処理方法として、シラン処理を行っている。シランカップリング反応は、図-3に示すとおり、シラン処理剤のメトキシ基が加水分解を起こし、シラノールを形成する。これと骨材表面の水酸基が縮合反応し、結合する反応である。従来のシラン処理は、シラン処理剤と水とのメタノール溶液を砂に噴霧し、乾燥させる方式をとっていたが、作業性は優れているものの反応が十分ではないという課題が残っていた。そこで、シラン処理剤のメトキシ基の加水分解を積極的に促進させるため、酸性条件下にてシラン処理を行う方法を検討した。その結果、表-6に示すとおり、大幅な強度向上が得られた。

5.3 消泡剤の添加

本システムで用いるレジンモルタルは高粘性でゲルタイムが早いいため、ミキサーによる攪拌の際、微細気泡が混入することは避けられない。この気泡は強度低下はもちろん、耐水性低下に悪影響を及ぼすことは明確である。そこで、樹脂の粘性を変えずに気泡を取り除くことが可能な消泡剤の適用を検討した。なお、シラン処理剤は5.2にて検討したものをを使用した。その結果、表-7に示すとおり、更に大幅な強度向上が得られた。

5.4 繊維補強材の混入

今日、繊維補強セメントおよびコンクリートは多くの構造物に適応されており、すでに一般的に用いられている建築材料として位置付けられている。一般的な繊維としては鋼繊維(SF)、ガラス繊維(GF)、炭素繊維(CF)等があげられるが、レジンモルタルの材料特性（危険物第4類、硬化発熱約120℃等）の条件に適合する繊維補強材としては、SFが最適である。そこで主なSFの形状毎に最適混入率と強度を検証した。表-8に主なSF形状別の曲げ引張り強度試験結果を示す。その結果、AのSFを2%混入した場合、最も強度が向上した。他のSFは強度向上につながらず、また混入率も1%が限界であった。AのSFは、水溶性接着剤によってホッチキス状に結束されているため、投入時に鋼繊維のみかけ容積が小さいことにより、攪拌しやすく、また均一に分離するためと考えられる。（使用SF径：0.6mm、長さ：30mm、混入率：容積百分率）

6. まとめ

本検討で行った、各対策案の実施結果グラフを図-4に示す。この結果、レジンシールドシステムの確立に向け、その主要な構成要因である、レジンモルタルの材料特性の向上において、大幅な高強度化を実現することができた。また寸法効果・耐水性の影響も実験により把握しており、若干の強度不足があるものの、軽微な補強によりカバーする予定としている。今後は、ライニング打設技術等、施工面からの検討も積み重ね、早期に技術を完成し、現場導入を図る予定である。

表-4 特性向上具体的対策案

検討項目	具体的対策案
①使用材料の変更	砂
	粒径の変更
	シラン処理の変更
	樹脂
	イソ系不飽和ポリエステル樹脂の適用
②配合の変更	樹脂量の増加
③添加剤の混入	消泡剤の添加
④補強材の混入	繊維補強材の混入

表-5 イソ系樹脂の適用結果

	イソ系	従来(ポリ系)
曲げ引張強度 (kgf/cm ²)	310	220
最大収縮率(%)	-0.23	-0.06

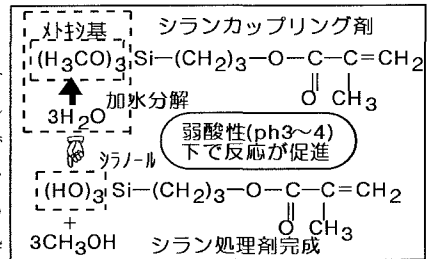


図-3 シランカップリング反応

表-6 シラン処理改良結果

曲げ引張強度 (kgf/cm ²)	従来方式	改良シラン処理
	220	280

表-7 消泡剤適用結果

曲げ引張強度 (kgf/cm ²)	従来方式	消泡剤入
	220	320

表-8 鋼繊維混入結果

SF種別	混入率	曲げ引張強度 (kgf/cm ²)
A	1.0%	271
	2.0%	350
B	1.0%	250
	2.0%	混練不能
C	1.0%	233
	2.0%	混練不能

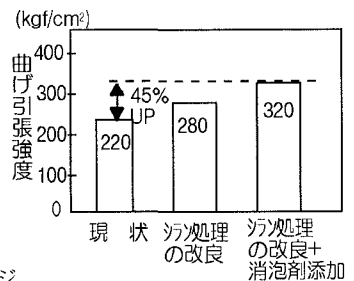


図-4 各対策実施結果