

シールドトンネルの内面被覆工法 C Rライニング工法の開発と施工

小林修¹・西田与志雄²・金子範彦³・野本康介⁴・岩城圭介⁵・三浦勝和⁶

¹正会員 戸田建設株式会社 土木工事技術部 (〒1048388東京都中央区京橋17-1)

²正会員 大成建設株式会社 土木本部土木技術部 (〒1630606 新宿区西新宿125-1)

³正会員 西松建設株式会社 技術研究所技術研究部 (〒1058401東京都港区虎ノ門120-10)

⁴正会員 前田建設工業株式会社 土木事業本部 (〒1028151東京都千代田区富士見2-10-26)

⁵正会員 グレースケミカルズ株式会社 技術部 (〒2430807神奈川県厚木市金田100)

⁶正会員 株式会社湘南合成樹脂製作所 (〒2540807神奈川県平塚市台官町3127)

下水道シールドトンネルにおけるコンクリート二次覆工には、蛇行修正、防水・防食等の機能が求められているが、近年のシールド掘進精度やセグメント止水性の向上により、防食以外の機能の必要性は縮小している。一方、硫化水素に起因するコンクリートの腐食の問題に関しては、コンクリートの二次覆工では根本的に解決することができないため、耐久性の高いシールドトンネルの構築には防食性能の高い被覆工法の開発が必要である。C Rライニング工法は、コンクリートによる二次覆工の機能を併せもつ内面被覆工法として開発したものである。本論文では基本的な性能確認試験結果、実物大セグメントの製作・試験および実証施工結果について報告する。

キーワード：内面被覆，下水道，防食，硫化水素

1. はじめに

下水道シールドトンネルの二次覆工には、蛇行の修正、防水・止水やセグメントの防食等の機能が求められ、一般的にはコンクリートによる二次覆工が施工されてきた。しかし、近年のシールド掘進精度・セグメント止水性の向上等による技術の進展に伴い、二次覆工省略型のセグメントや50mmの防食層を有する二次覆工一体型のセグメントが採用されるようになってきている。しかし、これらの内面にコンクリートが露出するセグメントでは硫化水素に起因するコンクリートの腐食の問題を根本的に解決することはできず、耐久性の高いシールドトンネルの構築には、防食性能の高い被覆工法の開発が不可欠である。

シールドトンネルの防食被覆工法には、シールドトンネル構築後、内面に樹脂材料を貼り付けるもの、吹き付けるもの、およびボルトで固定するものなどが開発されているが、セグメント製造時に内面被覆材を一体化成形する工法は、品質・施工性に優れ、耐久性についても有利な工法と考えられる。ただし、現在開発されている一体化成形工法では、シート裏

面に突起を設けてコンクリートと付着する複雑な構造になっていることが多いため、材料費が高価であった。

そこで今回は、より簡易的な方法でコンクリートと固着し、防食性能を有する高密度ポリエチレンシートを、セグメント製造時に一体化する内面被覆工法の開発を行った。当工法の概念図を図1に示す。

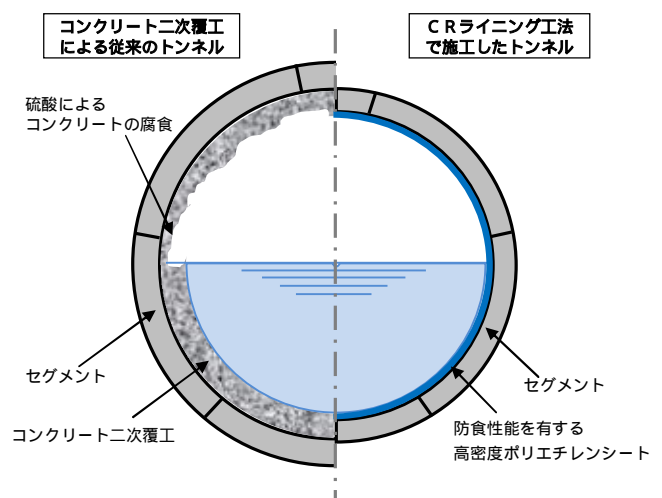


図1 C Rライニング工法概念図

なお本工法は、戸田建設（株）、大成建設（株）、西松建設（株）、前田建設工業（株）の建設会社4社と、シート製造会社のグレースケミカルズ（株）、シート加工会社の（株）湘南合成樹脂製作所の6社による共同研究で開発したものである。

2. C Rライニング工法の概要

(1)工法概要

C Rライニング工法で使用する被覆材は、コンクリートと全面で接着する特殊接着層と防食性能を有する高密度ポリエチレン樹脂層の2層からなるプレブルーシート（以下、シートという）である。このシートは地下構造物の外防水シートとして海外での実績が豊富であるとともに、耐薬品性に優れること、コンクリートに簡易に接着し固着性が高いことから、下水道シールドトンネルのセグメントに適用できると判断した。

本工法は、このシートをセグメント製作時に型枠内にあらかじめ設置した状態でコンクリートを打設することで、セグメントとシートが一体化するシールドトンネル内面被覆工法である。適用に際しトンネル内径や施工延長等に制限はなく、RCセグメントおよびコンクリート中詰め鋼製セグメント（以下、合成セグメントという）への対応が可能である。

また、当工法を採用することで、管渠の長寿命化が図れるとともに、コンクリート二次覆工のシールドトンネルに比べ、掘削断面の縮小化によるコスト縮減、工期の短縮が可能となる。

(2)シート構造

シートは 0.8mm の高密度ポリエチレン樹脂層と 0.4mm の特殊接着層から構成されており（図2）、幅 1.20m、延長 30.0mのロール形状で搬入される。

コンクリートとの接着面である特殊接着層の表面は微細な凹凸形状（写真1）をしており、内部に微細な孔も空いている。その孔にセメントペーストが浸透し固結すること、水和反応にともなうエトリンガイトの生成により針状水和物が凹凸部に浸透し、そのアンカー効果が発揮されることにより、コンクリートと全面的に接着する。

(3)目地材

セグメント継手間（リング間・セグメント間）の目地材には、防食性能を有する特殊変成シリコン・エポキシ樹脂を使用する。目地材は3面接着を防ぐため、バックアップ材を取付け、プライマーを塗布

したのち、目地材を充填する。図3 に目地材の模式図を示す。

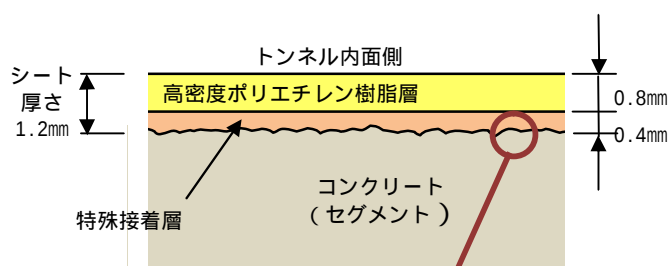


図2 シートの構成

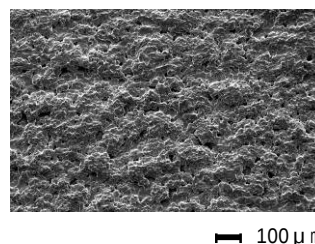


写真1 特殊接着層の接着面拡大写真

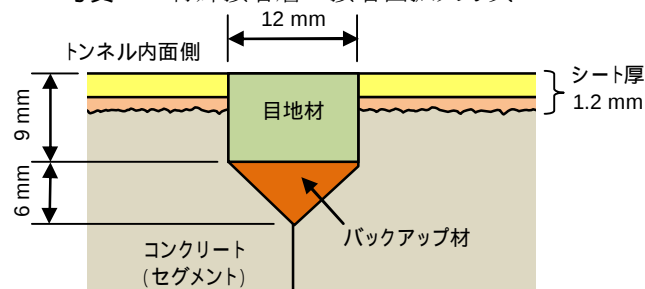


図3 目地部模式断面図（例）

3. C Rライニング工法の品質性能

(1)要求品質性能

C Rライニング工法の性能は、日本下水道事業団「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル」（以下、防食マニュアルという）に規定される要求性能のうち最も耐酸性能の高いD種を満足するものとした。

(2)シートの性能

シートにおいては下記の1）および2）に該当する試験を行い、所定の性能を有することを確認した。

1）シートは、防食マニュアルのシートライニング工法「D₂種」の品質規格に定める性能を有する。

①外観

シートにしわ、むら、はがれ、われがない。

②コンクリートとの固着性

コンクリートとの固着力は 0.24N/mm² 以上を有

する。（試験結果では 0.48N/mm^2 ）。

③耐酸性

10%硫酸水溶液に 60 日間浸せきしてもシートにふくれ、われ、軟化、溶出がない。

④硫黄侵入深さ^{*1)}

10%硫酸水溶液に 120 日間浸せきした時の硫黄侵入深さが設計厚さに対して 1%以下である。

（試験結果では 0.2%以下）。

⑤耐アルカリ性

水酸化カルシウム飽和水溶液に 60 日間浸せきしても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がない。

⑥透水性

0.29Mpa の水圧を 1 時間保持した後の透水量が 0.15g 以下である。（試験結果では 0.01g ）。

2) 防食マニュアルに定められた確認項目以外に、内面被覆工法としての必要性能を有する。

①セグメントとの固着性

セグメントとの固着性では、 0.40N/mm^2 の接着性を有する。（試験結果では RC セグメントが 0.58N/mm^2 、合成セグメントが 0.72N/mm^2 ）（写真2）。

②耐摩耗性

試験砂を 1,100mm の高さから 10kg 落下させた後の摩耗量が塩ビ管と同等以下である。（試験結果では塩ビ管が 0.02g に対してシートが 0.00g ）。

③耐衝撃性

重さ 1kg の鉄球を 50cm の高さから落下させてもシート表面にひび割れ、はがれがない。



写真2 セグメントの固着性試験状況

*1) ここで、硫黄侵入深さは、E PMA（電子線マイクロアナライザー、試料表面に電子線を照査して発生する X 線を検出し試料を構成している元素とその量を測定する分析器）により測定している。

(3)目地材の性能

目地材の性能は下記の 1) および 2) に該当する試験を行い、所定の性能を有することを確認した。

1) 目地材は、防食マニュアルの塗布型ライニング工法「D₁種」の品質規格に準ずる品質を有する。

①外観

目地材にしわ、むら、はがれ、われがない

②コンクリートとの接着性

コンクリートとの接着力は標準状態で 1.5N/mm^2 以上、湿潤状態で 1.2N/mm^2 以上を有する。（試験結果では標準・湿潤ともに 1.7N/mm^2 ）。

③耐酸性

10%硫酸水溶液に 60 日間浸せきしてもシートにふくれ、われ、軟化、溶出がない。

④硫黄侵入深さ

10%硫酸水溶液に 120 日間浸せきした時の硫黄侵入深さが設計厚さに対して $1,000\mu\text{m}^{*2)}$ 以下である。（試験結果では $378\mu\text{m}$ ）（写真-3）。

*2) 今回の目標値は $1,000\mu\text{m}$ とした。

⑤耐アルカリ性

水酸化カルシウム飽和水溶液に 60 日間浸せきしても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がない。

⑥透水性

0.29Mpa の水圧を 1 時間保持した後の透水量が 0.15g 以下である。（試験結果では 0.00g ）。

2) 防食マニュアルに定められた確認項目以外に、内面被覆工法としての必要性能を有する。

①セグメントとの固着性

セグメントとの固着性では、 0.40N/mm^2 の接着性を有する。（試験結果では RC セグメントが 0.58N/mm^2 、合成セグメントが 0.72N/mm^2 ）。

②耐摩耗性

試験砂を 1,100mm の高さから 10kg 落下させた後の摩耗量が塩ビ管と同等以下である。（試験結果では塩ビ管が 0.02g に対してシートが 0.00g ）。

③耐衝撃性

重さ 1kg の鉄球を 50cm の高さから落下させてもシート表面にひび割れ、はがれがない（写真4）。

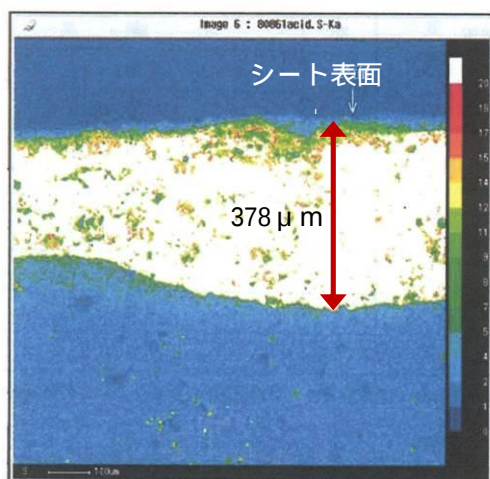


写真3 目地材の硫黄侵入深さ状況
(E PMA分析結果)



写真4 耐衝撃性試験

(4)セグメントとシートの接着性・変形性

セグメントと一体化したシートが、設計荷重の強度試験（単体正・負曲げ試験およびジャッキ推力試験）で剥離・破断しないことを確認した。各セグメントに実施した試験は以下のとおりである。

- ・ R Cセグメント：単体正・負曲げ試験，
ジャッキ推力試験
- ・ 合成セグメント：ジャッキ推力試験

（ここでいう合成セグメントは、供用時の応力は鋼製セグメントが受け持ち、施工時のジャッキ推力はシートが接着しているコンクリートが受け持つため、今回はジャッキ推力試験のみ実施した。）

表1 セグメント仕様

種別	外径 (mm)	厚さ (mm)	幅 (mm)	載荷設計荷重 (kN)		
				正曲げ	負曲げ	推力
R C	3,900	200	1,300	105	127	1,000
合成	2,150	185	750	600		

1) 正曲げ試験

設計荷重載荷時にシートの外観に異常はなかった。

さらに破壊荷重以上の荷重を載荷しコンクリートを破壊させたが、シートに一部剥離が確認されたものの亀裂等は見られなかった。試験状況を写真5に示す。



写真5 単体正曲げ試験状況

2) 負曲げ試験

設計荷重載荷時にシートの外観に異常はなかった。

さらに破壊荷重以上の荷重を載荷しコンクリートを破壊させたが、シートに一部剥離が確認されたものの亀裂等は見られなかった。

3) ジャッキ推力試験

設計荷重載荷時にシートの外観に異常はなかった。なお、ジャッキ推力試験時の偏心量は、R Cセグメントは実証施工仕様に合わせ 48mm、合成セグメントは「シールド工事前標準セグメント」に従い、10mmとした。試験状況を写真6に示す。



写真6 合成セグメント載荷状況

(5)粗度係数測定試験

C Rライニング工法における流下能力を確認するため、粗度係数測定試験を実施した（写真7）。

試験はφ300mm、長さ6mの塩ビ管の内面にシートを貼り付け、10～70m³/hの7ケースの流量、3.0%

と 5.0‰の 2 ケースの勾配で行い（写真8），各流量，勾配ごとの粗度係数をマンニングの式より算出した（表2）。C Rライニング工法の粗度係数は 0.0085 であり，塩ビ管の粗度係数（0.010）と同等であることを確認した。



写真7 粗度係数測定装置



写真8 試験状況（流量 40m³/h,
勾配 3‰のケース）

表2 粗度係数測定結果（C Rライニング工法）

管 勾 配	流量 (m³/h)	粗度係 数	管 勾 配	流量 (m³/h)	粗度係 数
3‰	10.0	0.00862	5‰	10.0	0.00834
	19.8	0.00834		19.8	0.00852
	29.8	0.00817		30.1	0.00848
	40.0	0.00826		39.9	0.00899
	50.1	0.00833		50.1	0.00908
	60.0	0.00825		60.0	0.00938
	69.8	0.00792		70.1	0.00856
平均値		0.00827	平均値		0.00876
全平均値				0.00852	

なお，今回は試験方法の妥当性を確認する目的で塩ビ管の粗度係数も測定したが，その結果は 0.0085 であり，試験方法も妥当であったと考える。

4．R Cセグメントの製作

シートは，型枠底面外周に両面テープを貼付け固定した．その後の工程は，通常のスラブ製作と同様で，鉄筋かご設置後に硬練りコンクリート（スランプ2cm，水セメント比39%）を打設しテーブルバイブレーターで締め固め，仕上げ後に気中養生を行い翌日脱型した．



写真9 シート敷設状況

一般的にセグメントは促進養生を行い，1日2リング製作する．促進養生とは打設後2時間程度の気中養生後，室内で20℃/hの温度上昇速度で蒸気をかけ，60℃程度の温度を2～3時間保持する養生方法であり，約8時間後には脱型が可能な強度（セグメントでは15N/mm²を目安）以上となる．



写真10 C Rライニングセグメント製作完了

今回の製作では，夏季期間のため，促進養生は行わず，一日1リングの製作とした．なお，C Rライニング工法は硬練りコンクリートや高流動コンクリートで促進養生を実施してもコンクリートとの固着性に問題がないことを確認している（図4）．

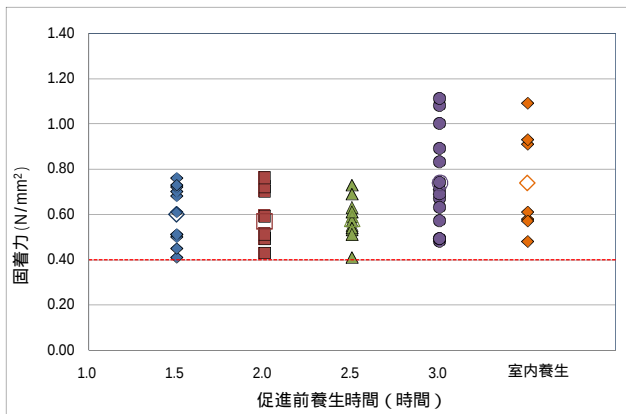


図4 促進前養生時間と固着力の関係

今回の製作で、問題となった点は以下の3点である。

- ①シート固定のために両面テープの貼付け、撤去に手間が必要。
- ②シート表面へのセメントミルクの流出防止対策と流出した場合の清掃に手間がかかる。
- ③脱型時に型枠への衝撃（大ハンマーで打撃しないと脱型できない）が必要であり、型枠の歪みを発生する要因となる。

これらはすべて、シートの固定方法によるものであり、今回は5リングの製作であったため手間をかけることもできたが、実際の製造では製作費の増大を招くこととなる。

現在、製作方法の改善案として以下の2点を検討中である。

- ①低振動打設
高流動コンクリートを使用することで、強震型のテーブルバイブレーターの使用をやめ、補助的に棒状バイブレーターを使用することで、シートを固定する両面テープの使用量を半減し手間を抑える。
- ②吸引型枠（バキューム型枠）の開発
型枠底部からシートを吸引し、型枠内にシートを固定する。

以上の2点の検討を行うとともに、これらの方法を組み合わせることで製作費用の低減を目指している。

5. 実証施工

C Rライニング工法のセグメントは、基本的には通常のセグメントと同じように運搬し組み立てる（写真11）。実証施工現場では、掘進・組立の1サイクルを約40分程度で行っている。

各リング毎の所要時間は下記のとおりである。

1 リング目：85 分

2 リング目：70 分

3 リング目：65 分

4 リング目：70 分

5 リング目：85 分

5 リング目はB 1 セグメントの組立に手間取り時間を要したが、1～4 リングに関しては、リング数が進むごとに施工時間が短縮された。

作業に時間を要した項目は以下の2点である。

- ①新しいセグメントに慣れていないため、慎重に作業したこと。
- ②荷降ろし時は掘進を一旦中断し、切羽作業員全員でセグメントの荷降ろしをしたこと。

今回は5リングの施工であるため、注意深く施工したが、今後は取り扱いに慣れることにより通常の施工時間の40分まで短縮が可能と予想される。なお、組立後はセグメント間、リング間に防食性能を有する目地を施工した（写真12）。



写真11 K型セグメント組立



写真12 目地材充填状況



写真13 目地材充填状況

6. 合成セグメントの製作・組立

合成セグメントは、鋼製セグメントの内部にコンクリートを打設する構造であり、急曲線部や取付け管部に使用される場合が多い。その製作方法は鋼製セグメントを舟形に置いて上から打設する方法、山形において打設する方法等がある。しかし、CRライニング工法の場合、舟形打設ではシートの固定が困難であり、また山形打設では生コンクリートを打設する開口を作成することが出来ない。

このため合成セグメントの製作は、セグメントを縦置きし、コンクリートかさ上げ部分から高流動コンクリートを流し込む方法とした。図5に概念図を示す。

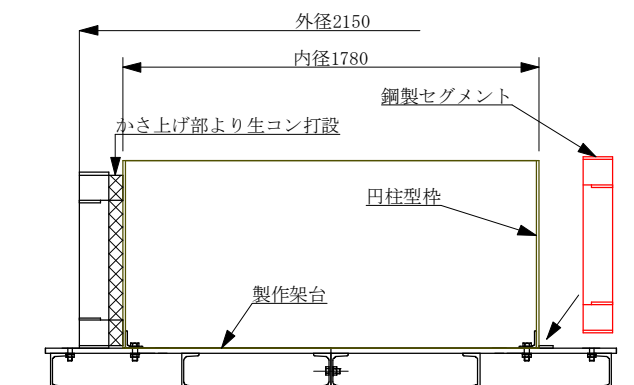


図5 セグメント縦形打設構造図

合成セグメントは、仕上がり内径 1,780mm、外径 2,150mm、幅 750mm のセグメントを2リング分（計 10 ピース）製作した。合成セグメントの製作は、写真 - 14 ~ 16 に示すように、①架台上に鋼管内型枠を組立て、セグメント内面に相当する面にシートを設置、②外側に鋼製セグメントを組立て、真円に位置を固定、③鋼製セグメントと鋼管内型枠の間に

高流動コンクリートを打設、養生および脱型の手順で行った。製作したセグメント（写真 - 17）を平組みで2リング組立てたのち（写真 - 18）、ボルトボックスおよび目地部を目地材で充填した。

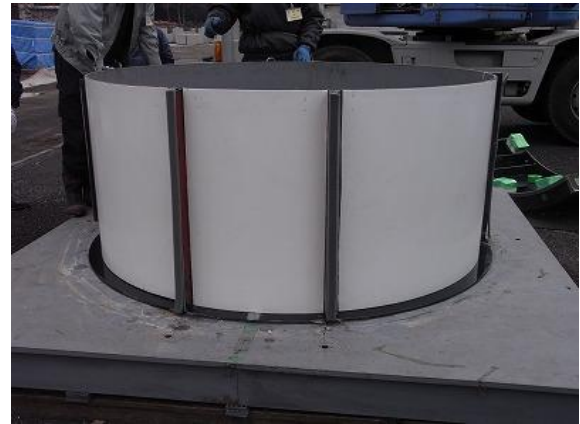


写真14 円柱型枠シート貼付け



写真15 鋼製セグメント組立



写真16 高流動コンクリート打設状況

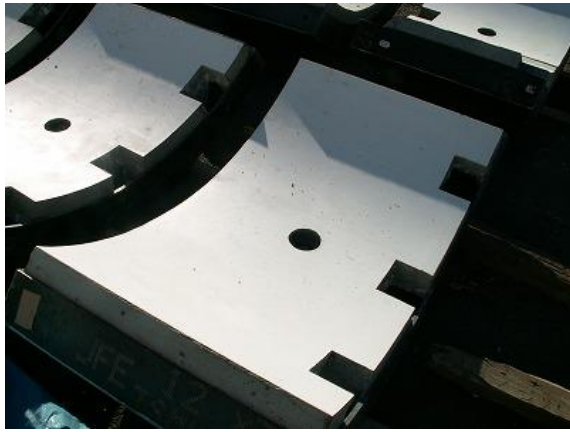


写真17 合成セグメント完成



写真18 合成セグメント組立完了

7. おわりに

本工法を下水道シールドトンネルに適用することで、従来のトンネルに比べ、長寿命化が図れるとともにトンネル外径の縮小にともなう工期短縮・コスト縮減が図れる。今回実証施工で製作したRCセグメントでは、シートの固定を簡易的な方法で行い、問題がないことを確認しているが、さらなる工事費の縮減に向け、セグメント製作における効率的なシートの設置方法等について検討を進めている。

なお、CRライニング工法は、平成20年度に財団法人下水道新技術推進機構から建設技術審査証明を取得している技術である。

参考文献

- 1) 日本下水道事業団，下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル，平成19年7月
- 2) 財団法人下水道新技術推進機構，下水道シールドトンネルの内面被覆工法，2002年3月