

トンネル内装工に適用される洗浄促進試験方法の検討 (首都高速道路㈱「トンネル構造物設計要領の 長期耐久性に関する促進試験」の紹介)

首都高速道路㈱ 技術管理室 設計技術G：白 鳥 明
開発コンサルタント㈱ 道路環境部：國 分 修 一
佐 藤 泰 昭
(財)日本塗料検査協会 技術開発部：藤 田 庫 雄

1. まえがき

トンネル内装工には、従来、タイル構造、ホーロー・ステンレスパネル構造が採用されてきた。また、最近、新設路線において適用する場合は、経済的で、比較的施工の容易な塗装構造が採用され始めている。塗装構造によるトンネル内装工の適用例を写真1.1に示す。

トンネル内装工に要求される主な性能は、以下のとおりと考えられる。

- ・通常時において運転者の視認性の向上および走行快適性の向上に有効であること
- ・異常時（火災時）において人体に影響の無いこと

- ・所要の耐久性・耐火性能があること
 - さらに、維持管理を容易とするための性能としては、
 - ・トンネル内の排気ガス等の汚れに対する耐汚染性(汚れのつきにくさ)
 - ・トンネル壁面洗浄車による汚染物除去性と耐磨耗性(洗浄に対する回復性)
- などが求められる。これまでは、これらの性能が長期的に要求されるにも関わらず、それを評価する試験方法が確立されていないのが現状であった。

本報告では、供用されたトンネルのトンネル内装工が、汚れの付着と壁面洗浄車（ウニモグ洗浄車）により

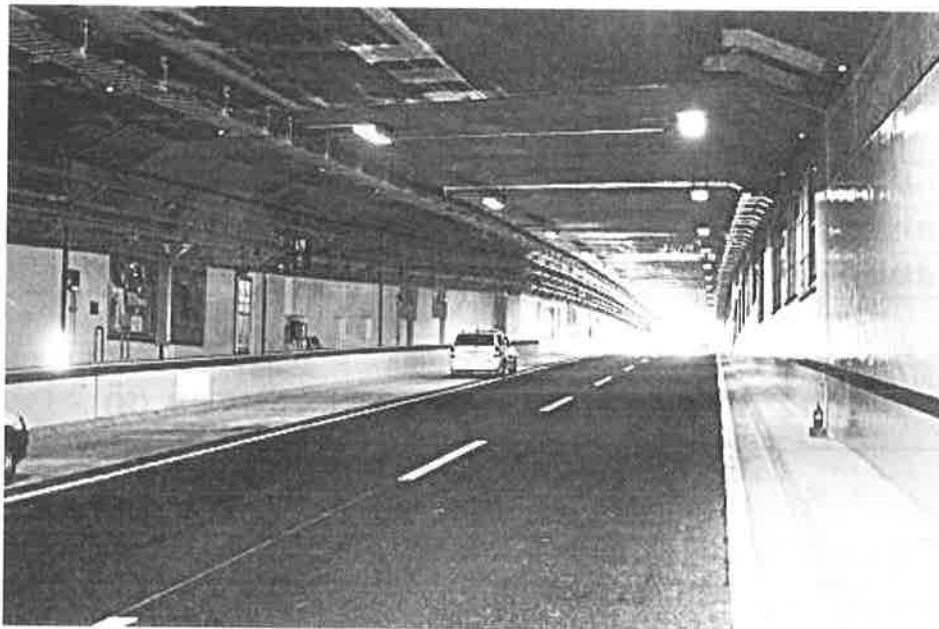


写真 1.1 トンネル内装工
(地面から壁面約2mの白い部分)

繰り返し洗浄されることに着目し、ウニモグ洗浄車（写真1.2参照）による汚染物の除去性及び耐摩耗性を実験室で再現し、トンネル内装工に要求される洗浄耐久性を評価できる「長期耐久性に関する促進試験」の検討を行った。

2. トンネル内装工の洗浄促進試験方法の検討

試験方法は、トンネル内装工の確認試験方法¹⁾の報文を参考にして、洗浄車による汚染物の除去性及び耐摩耗性を実験室で再現するため洗浄試験機を用いた。写真2.1に洗浄試験機本体、写真2.2に洗浄ブラシと汚染水循環散水パイプを、また、検討手順を図2.1のフローチャートに示す。



写真 1.2 ウニモグ洗浄車とブラシ

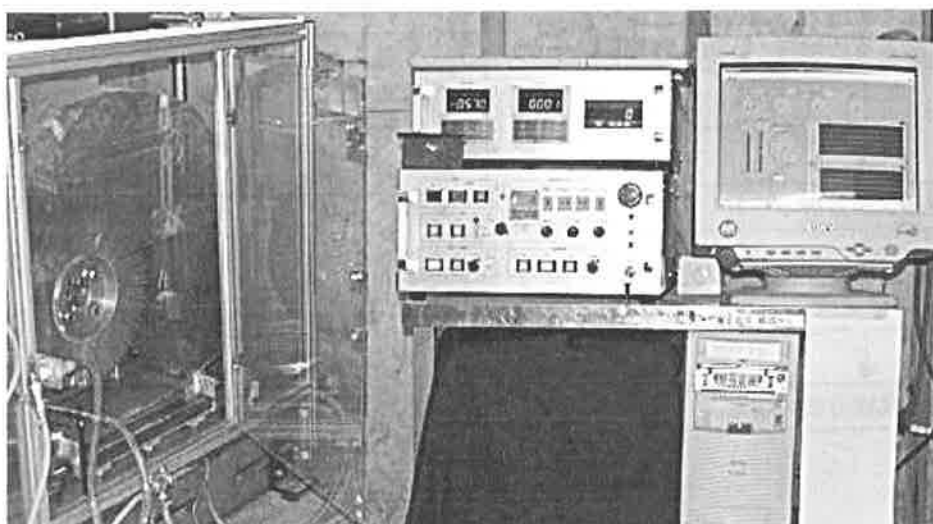


写真 2.1 洗浄試験機本体

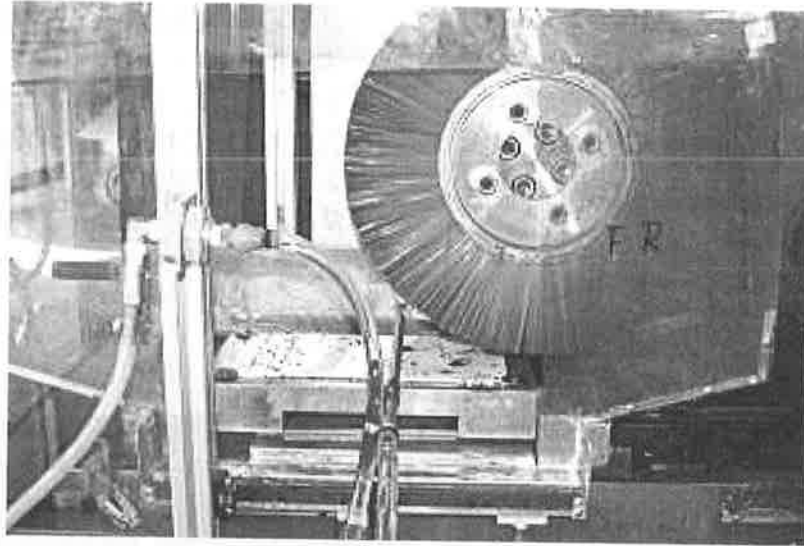


写真 2.2 洗浄ブラシと汚染水循環散水パイプ*

汚染水循環散水パイプ*：散水した汚染水を回収して循環する方式

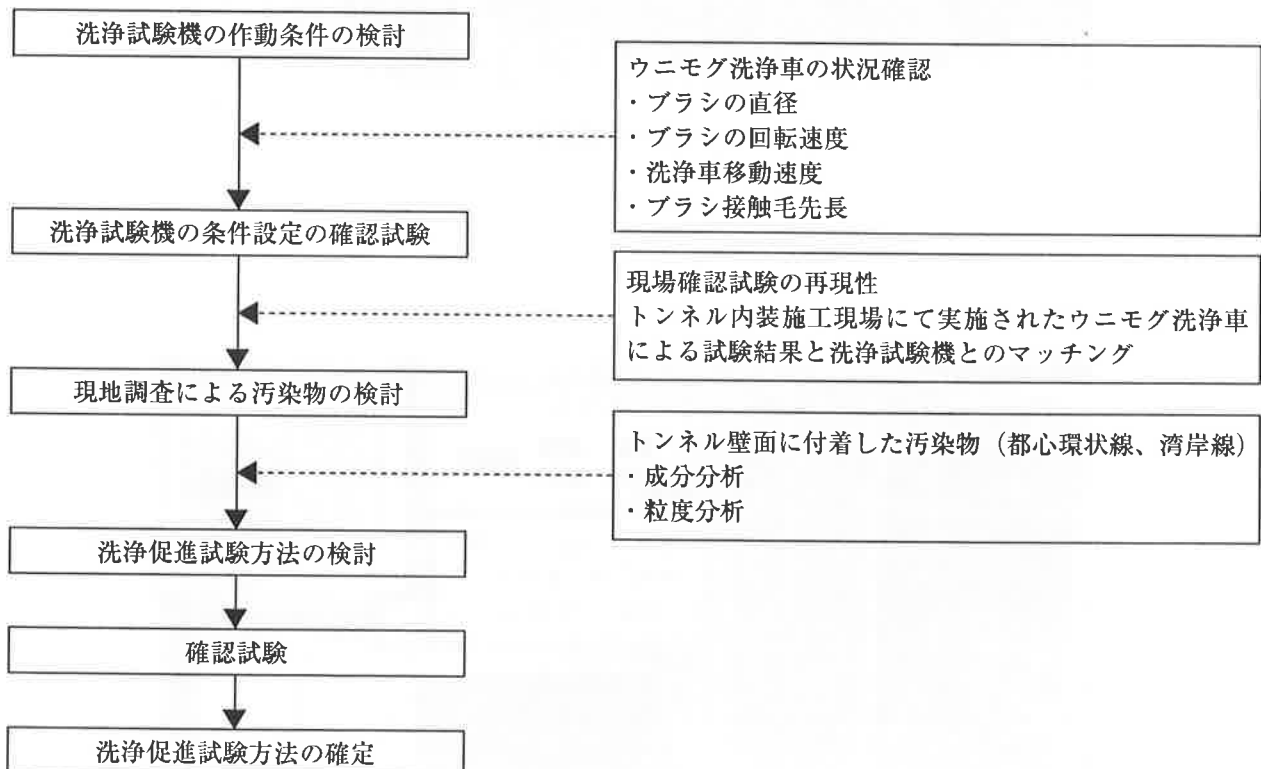


図 2.1 洗浄促進試験方法の検討フローチャート

(1) 洗浄試験機の作動条件の検討

首都高速のトンネル壁面洗浄に使用される一般的なウニモグ洗浄車は、洗浄用ブラシ（直径：φ 1400mm）を 500rpm の速度で回転させながら 5～6 km/h の速度で移動する。また、壁面へのブラシ接触毛先長は、20～30mm（図 2.2 に示す洗浄用ブラシが試験面に接触した際に、φ 1400mm のブラシが欠ける部分の長さ）であり、洗浄の際、対象壁面を散水する方式が採用されている。

ウニモグ洗浄車のブラシによるトンネル内装工の磨耗には、ブラシの接触圧力と接触時間が影響すると想定される。しかし、ブラシ洗浄時の接触圧力を測定して再現することは難しいことから、洗浄試験機の洗浄条件はブラシの接触時間がウニモグ洗浄用ブラシと同等になるように設定し、接触圧力は、ブラシの接触毛先長と回転

数のファクターを変化させてマッチングを図ることにした。

洗浄試験機において、ウニモグ洗浄車とブラシの接触時間が同等になる条件を表 2.1 に示す。

表 2.1 の条件の洗浄試験機と実際のウニモグ洗浄車を用いて実施されたトンネル内装施工現場での洗浄試験結果とを比較した（図 2.3 参照）。評価は拡散反射率：Y 値*で行った。

*：CIE 標準表色系で、Y は色の明度に相当し、洗浄後の Y 値が初期値より低下が少ないほど洗浄回復性が大きく、汚れが少ない

まず、ブラシ上部から散水する上部散水方式にて、ブラシ接触毛先長が 15、20、30 mm の 3 条件について検討した。その結果、いずれの毛先長においても、

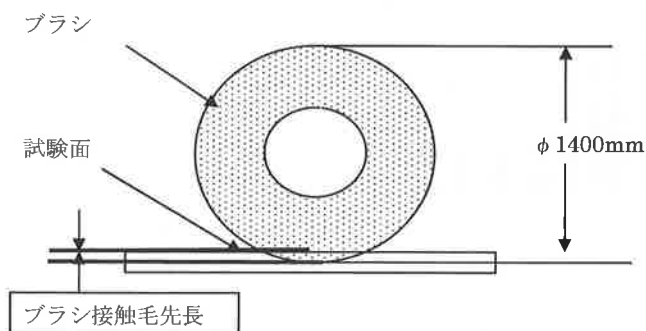


図 2.2 ブラシ接触毛先長部分

表 2.1 洗浄車と洗浄促進試験機の条件

機種	洗浄車	洗浄試験機		
ブラシ直径 (mm)	φ 1400	φ 400		
移動速度	6 km/h (1677mm/s)	37.1mm/s		
ブラシ接触毛先長 (mm)	30	30	20	15
ブラシの回転数 (rpm)	500	75	90	104

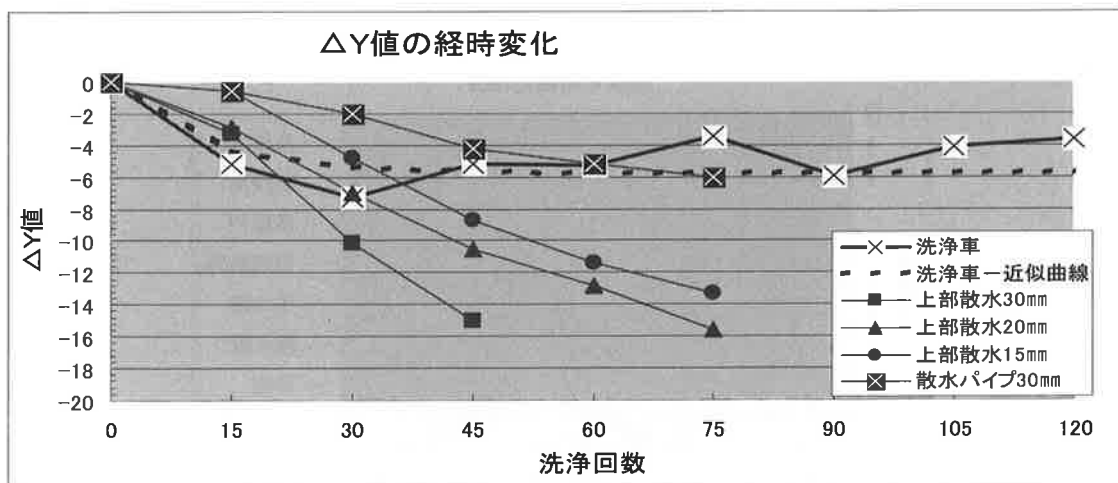


図 2.3 洗浄車と洗浄試験機のΔY値の経時変化

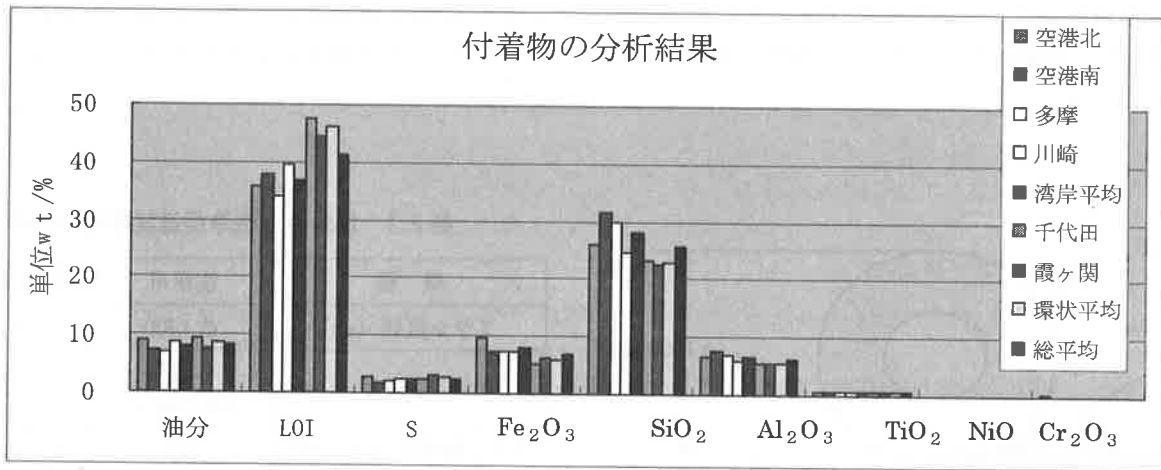
△Y値（Y値の変化量）が初期から大きく低下し、洗浄回数が増えるに従い洗浄車の結果との乖離が大きくなった。実際の洗浄車ではブラシの前壁面に散水されるので、次に、ブラシの前試験面に散水されるように散水パイプ方式（写真2.2参照）に変更して、ブラシ接触毛先長を30mmにして試験を行ったところ、洗浄初期の段階では洗浄車の結果と異なる傾向を示したが、洗浄回数が増加したところでは、洗浄車と同等の△Y値を示した。以上の結果から、ブラシ接触長30mm、ブラシ回転数75rpm、散水パイプ方式を組み合わせた条件が洗浄

車による洗浄状況を再現する可能性が高いと判断して、この条件を採用することとした。

(2) 現地調査による汚染物の検討

・現地調査の分析結果

試験用汚染物質の組成を設定するために、首都高速の都心環状線（千代田、霞ヶ関トンネル）、高速湾岸線（空港北、空港南、多摩川、川崎航路トンネル）の壁面に付着していた付着物を採取して分析した。分析結果を図2.4に示す。



〈分析方法〉

油分：試料をアセトンに浸漬し、アセトン可溶の有機物を抽出し、抽出前後の重量差を油分とした。

LOI：油分測定後の試料を電気炉（1000℃）内で恒量になるまで加熱し、加熱前後の重量差をLOI（強熱減量）とした。

金属成分：試料を直接酸溶解し、原子吸光分析法により定量（⇒Ni、Cr）した。

試料をアルカリ溶解し、蛍光X線分析法により定量（⇒その他金属成分）した。

図2.4 トンネル内壁面の付着物の成分分析結果

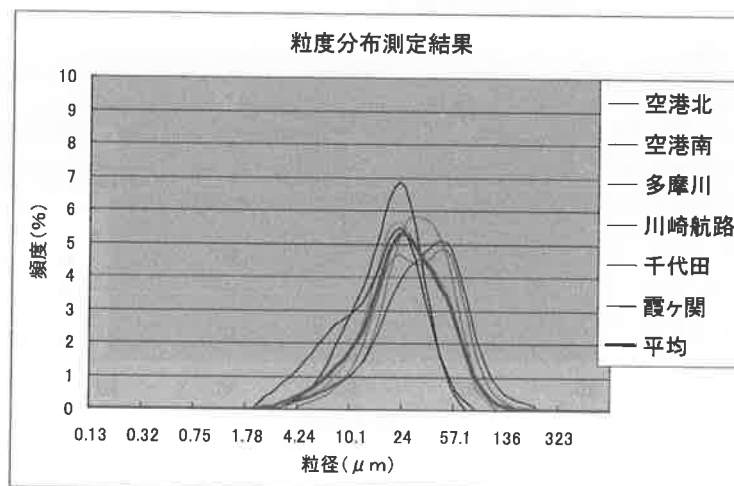


図2.5 トンネル内壁面の付着物の粒度分布測定結果

図 2.4 のデータより、トンネル内壁面付着物の平均は、下記に示す組成であった。

- ・油分 : 約 8 %
- ・炭素化合物 (LOI) : 約 42 %
- ・シリカ (SiO₂) : 約 26 %
- ・金属化合物 : 約 13 % (Fe₂O₃、Al₂O₃、TiO₂、NiO、Cr₂O₃)

また、上記付着物の粒度分布についても測定した。図 2.5 に粒度分布測定結果を示す。

・汚染物配合の検討

試験用汚染物質の配合は、トンネル壁面の分析結果を

基に、

- 炭素化合物→カーボン、
- シリカ→関東ローム+ケイ砂の混合、
- 金属化合物→関東ローム

として計画した。また、試験用汚染物質の粒度分布についても、トンネル壁面から採取した付着物の粒度分析結果を参考にして決定した。上記成分分析及び粒度測定による検討結果から決定した試験用汚染物質の組成を表 2.2 に示す。

さらに、この試験用汚染物質を試験面に均一に塗付するために、上記の試験用汚染物質を表 2.3 の要領で水中に懸濁させて、これを汚染物とした。

表 2.2 試験用汚染物質の組成

壁面付着物の組成	成分	比率
LOI : 汚れの主成分と想定 (炭素化合物→炭素に置換)	試験用ダスト 12 種 (カーボン) (JIS Z 8901)	42%
油分	油 (エンジンオイル)	8 %
金属化合物 (Fe ₂ O ₃ SiO ₂ Al ₂ O ₃ 等)	試験用ダスト 7 種 (関東ローム) (JIS Z 8901)	31%
シリカ追加成分 (注) (→ SiO ₂ の追加)	試験用ダスト 2 種 (ケイ砂) (JIS Z 8901)	19%
	合計	100%

(注) 関東ロームに含まれるシリカ成分だけでは足りないのでケイ砂を別途追加した。

表 2.3 汚染物の組成

混合成分	比率	調合目的
試験用汚染物質	5 %	—
脱イオン水	95%	希釈
湿潤剤	1 %	濡れ性向上
乳化剤	1 %	分散性・濡れ性向上
増粘剤	1.9%	沈降防止

(3) 洗浄促進試験方法の検討

・洗浄回数と循環式洗浄

実トンネルの内装工では、「汚れの付着→一定期間の乾燥状態」を経てウニモグ洗浄車による洗浄が行われる。従って、洗浄促進試験を検討する上においては、実トンネル内装の環境と同様の「汚染物1回塗付→乾燥→1回洗浄（1回塗付1洗浄）」を試験方法の基準とした。この基準をもとに、試験方法のある程度簡略化する目的で、表2.4に示す汚染物の塗布・洗浄回数の条件で試験を実施し、30回洗浄試験後の ΔY 値を比較した。なお、試験片は汚染性の大きい一般的なウレタン塗膜を用い、汚染水循環式洗浄以外の散水は水道水を使用した。また、試験の汚染性に関わる汚染物のカーボン量は、表2.4に示す量とした。試験結果を図2.6に示す。

洗浄試験の結果、各洗浄条件（塗付回数～洗浄回数）の ΔY 値（拡散反射率の低下）は、

- 1回塗付1回洗浄（*） > 1回塗付15回洗浄（*）
- > 循環式洗浄 > 1回塗付10回洗浄（*）
- （*）水道水を使用

の傾向を示した。この結果から、検討の上で基準とした「1回塗付1回洗浄」と同様な傾向を示したのは、「塗付回数～洗浄回数」を「1回塗付15回洗浄」とした試験条件であった。しかしながら、試験結果にまだ乖離が見られたため、「汚染水循環式洗浄」を組み合わせる必要があると考えられた。

・試験回数の検討

「1回塗付1回洗浄：100回洗浄」と、「1回塗付-汚染水循環式15回洗浄：300回洗浄」で試験を行い比較検討した。

その結果、1回塗付-汚染水循環式15回洗浄の300回洗浄は、1回塗付1回洗浄に近い傾向となり、試験の回数を重ねると反射率は定常状態になることを確認した。（図2.7参照）

従って、洗浄試験は、「1回塗付-汚染水循環式15回洗浄」にて合計300回の洗浄を行うこととした。なお、試験回数については、長期的な耐久性を充分把握できるよう安全側に考えて300回に設定した。

表2.4 洗浄方法による汚染物のカーボン量

洗浄方法	1回塗付1回洗浄	1回塗付15回洗浄	1回塗付10回洗浄	汚染水循環式洗浄 ^(注2)
汚染物のカーボン量	基準量 ^(注1)	汚染物原液 (約基準量×15倍)	汚染物1.5倍希釈 (約基準量×10倍)	散水量が 基準量 ^(注2) / 1回

(注1)：多摩川トンネル内壁で採取した付着物の量と壁面面積から算出した汚染物の量 (g/ m²)

(注2)：汚染物の塗付工程がなく、規定洗浄回数を汚染水の散水-回収を循環しながら連続的に行う洗浄方法

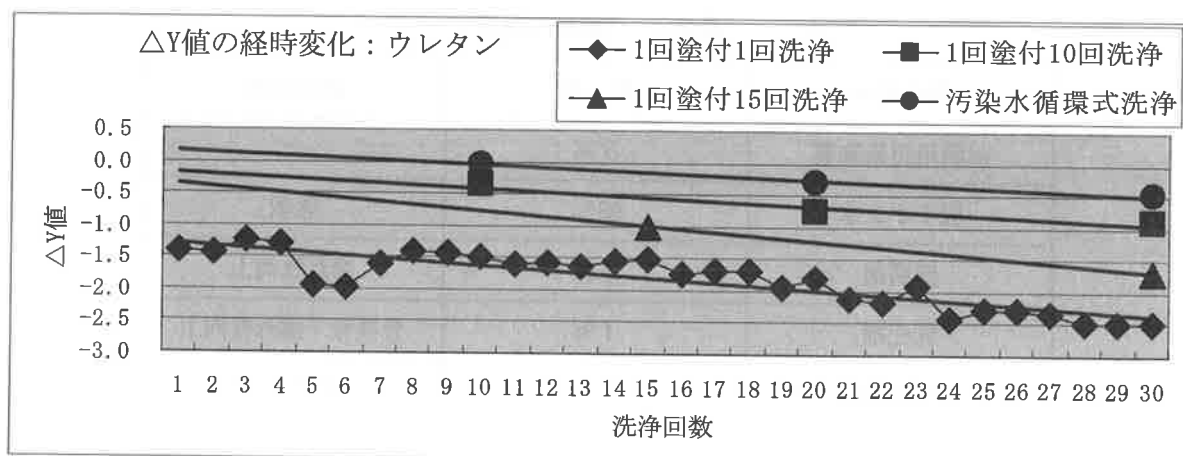


図2.6 洗浄条件（塗付回数～洗浄回数）と循環式洗浄

3. 確認試験

2. で検討した促進試験方法の適用性を確認するため、塗装構造の供試体を用いて確認実験を行った。確認試験の着眼点は、試験の目標値である「300回洗浄後にY値40%」を満足するかどうか、また、試験結果が「定常性」の傾向を示すかどうか、という点である。図3.1に3種類の供試体 (n=2) についての拡散反射率 (Y値) の経時変化を示した。

各製品の拡散反射率 (Y値) は、試験前の目標値 (60%以上) を満足していたが、300回洗浄後の目標値 (40%以上) を満足しない製品があることが確認された。また、製品によっては、拡散反射率が著しく低下するものも確認された。事前検討において確認されていた「定常性」の傾向については、各供試体の試験結果からも判断された (定常ライン)。

このようなことから、促進試験の結果、拡散反射率 (Y値) の低下傾向が製品により異なること、「定常性」の傾向を示すことが確認され、トンネル内装の長期耐久性を把握する方法として妥当であるとともに、十分に有用であることが確認された。

4. 洗浄促進試験方法の確定

以上述べてきたように、トンネル内装工の長期耐久性に関する促進試験方法を確立させた。以下に試験方法をまとめる。

まず、洗浄促進試験方法は、「1回塗付-汚染水循環式15回連続洗浄」を選定した。これを20サイクル (合計洗浄回数: 300回) 繰り返し、サイクルごとに拡散反射率 (Y値) を測定することによって汚染の状況及び汚染除去性を評価し、計300回の洗浄試験終了後に試験片

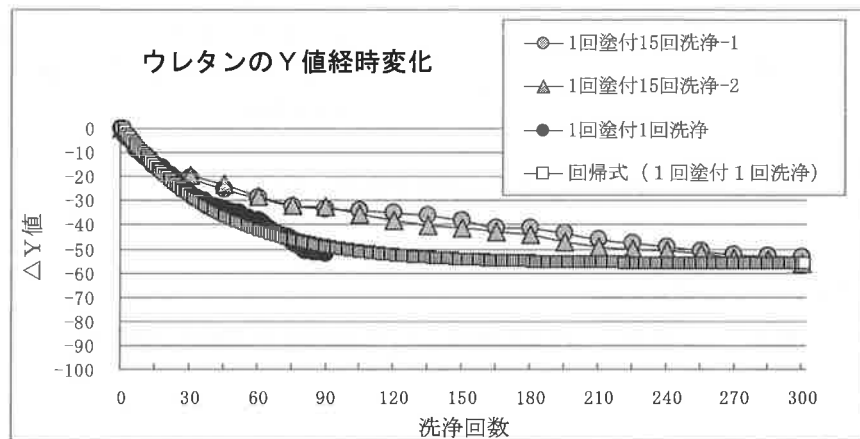


図 2.7 1回塗付1回洗浄-100回洗浄と1回塗付-汚染水循環式15回洗浄-300回洗浄

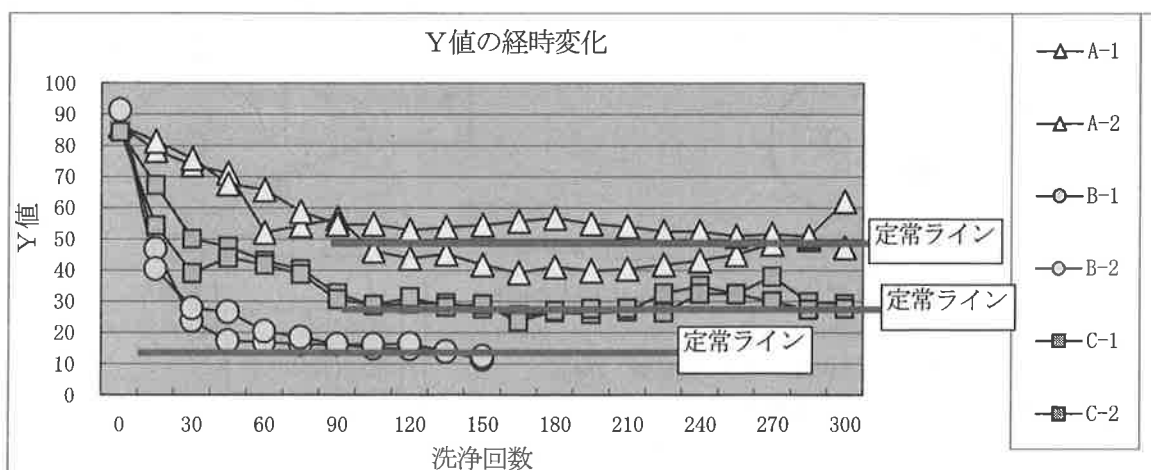


図 3.1 拡散反射率 (Y値) の経時変化と定常性

の外観観察を行うこととした。

洗浄促進試験方法に関する試験手順を図 4.1 に、洗浄試験機の工程模式図を図 4.2 に示した。

5. おわりに

本報告では、トンネル内装工の長期耐久性に関する洗浄促進試験方法を提案した。本試験方法では、ユニモグ洗浄車を想定した室内試験機で洗浄回数 300 回を実施し、試験片の外観観察、及び拡散反射率の低下傾向と 300 回洗浄後の拡散反射率により耐久性を評価する。

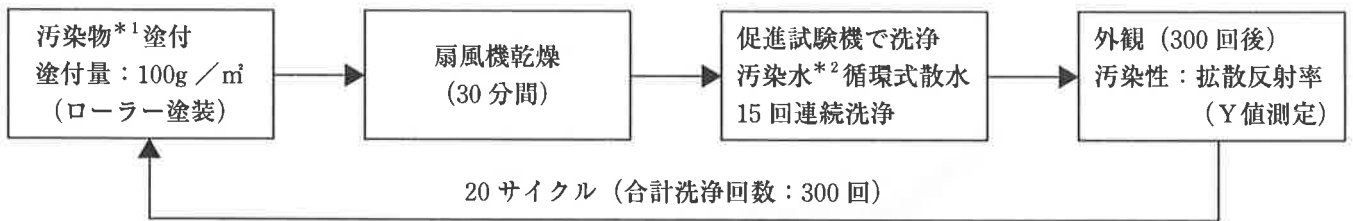
実際のトンネル内装工の耐久性と本試験方法の結果との相関性については当然のことながらデータが不足しているため現段階では明らかではない。また、供用後のトンネルの交通量 (= 汚染物の付着の程度) や壁面洗浄回数によっても耐久性は影響を受けることになるであろう。

今後、塗装構造によるトンネル内装の施工実績が増加し、試験結果と現地内装の比較データを蓄積された後に、本試験方法の妥当性についても改めて検証が必要となると思われる。

なお、本試験方法は、首都高速道路(株)の「トンネル構造物設計要領 (トンネル内装設計編)」(H18.4) に制定されている。今後、洗浄促進試験を行ったトンネル内装材料について、実施工部の追跡調査を行い、洗浄促進試験方法との相関性などについて更なる考察を加えたい。

参考文献

- 1) 赤木、伊藤、城間、「トンネル内装工の長期耐久性確認試験方法の研究」、日本道路公団試験研究所報告, Vol. 40 (2003-11)



*1 : カーボン、油、関東ローム、ケイ砂を水に混合・分散させたもの

*2 : 汚染物を水で 16 倍に希釈したもの

図 4.1 1 回塗付-汚染水循環式 15 回連続洗浄試験の試験手順

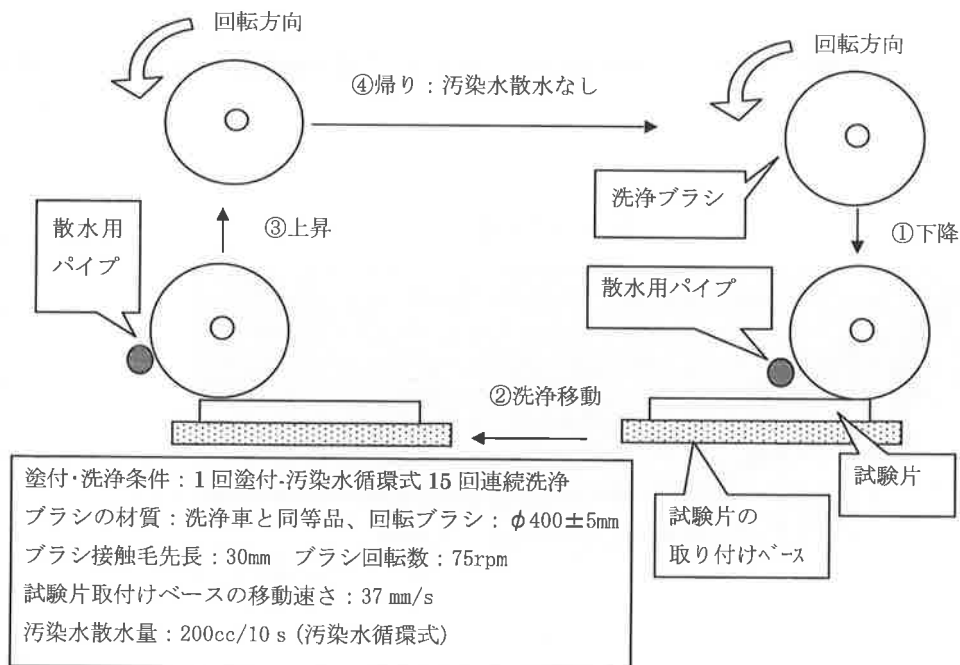


図 4.2 洗浄試験機の工程模式図 (工程順: ①→②→③→④)