

# 1. トンネル内コンクリート舗装路面におけるすべり対策

## Evaluation of Skid Resistance on Road Surface of Concrete Pavement in Tunnels

技術支援課 橋本 喜正、○安藤 哲明、関根 淳

### 1. まえがき

東京都では、都道において約 100 箇所（島しょ部を除く）のトンネルを管理している。これらのトンネル内の舗装は、耐久性や明色性を考慮してコンクリート舗装を採用することを基本としてきたが、近年は補修時の施工性や期間短縮、振動・騒音への配慮等からアスファルト舗装に移行する傾向にある。

このトンネル内のコンクリート舗装では、コンクリートが緻密であるため、車両のタイヤ走行によるすり磨きの影響で舗装路面のテクスチャ（表面の微細な凹凸成分）が平滑になり、すべり抵抗値が低下すること<sup>1)</sup>が報告されている。

車両がトンネル内のコンクリート舗装上を安定して安全・快適に走行するためにはある程度のすべり抵抗の確保が必要であることから、供用中のコンクリート舗装がどの程度のすべり抵抗値を有するか、現地測定により確認したのでその結果を報告する。なお、本報告は平成 29 年年報での報告<sup>2)</sup>の続きである。

また、一部のトンネルを対象として、すべり抵抗を高める工法（以下、回復工法という）について検討した結果についても報告する。

### 2. 調査内容

#### (1) 舗装路面のすべり抵抗値等の実態調査

##### 1) 測定対象としたトンネル

東京都で管理している約 100 箇所のトンネルのうち、コンクリート舗装となっているのは、平成 30 年時点で多摩地区における 28 箇所（表-1）である。

このうち、2000 年より前に竣工したトンネルは 20 箇所、2000 年以降に竣工したトンネルは 8 箇所であり、最近では 2014 年竣工の城山（じょうやま）トンネルに

コンクリート舗装が舗装されている。

この 28 箇所を対象とし、平成 28 年度から 30 年度にかけて調査を実施した。

表-1 内部がコンクリート舗装のトンネル

トンネル名	路線名	通称名	竣工	延長 (m)	調査年度
新水川TN	一般国道411号	青梅街道	1984年	605.0	H28
新溝地TN	一般国道411号	滝山街道	1994年	396.0	H28
新吹上TN	主要地方道53号	成木街道	1994年	603.0	H28
御岳TN	主要地方道45号	吉野街道	1986年	89.0	H28
網代TN	主要地方道61号	山田通り	1994年	562.0	H28
五日市TN	主要地方道61号	秋川南岸道路	2001年	1223.5	H28
城山TN	主要地方道45号	多摩川南岸道路	2014年	1908.0	H28
白丸TN	一般国道411号	青梅街道	1973年	126.0	H29
青梅坂TN	主要地方道53号	小曾木街道	1977年	128.0	H29
滝成TN	主要地方道53号	成木街道	2006年	142.0	H29
弘沢TN	主要地方道45号	吉野街道	1986年	25.0	H29
愛宕TN	一般都道184号	多摩川南岸道路	2000年	1043.0	H29
日原TN	一般都道204号	日原街道	1979年	1107.0	H29
権田TN	主要地方道32号	秋川街道	1990年	45.0	H30
甲武TN	主要地方道33号	檜原街道	1990年	954.0	H30
栗坂TN	主要地方道33号	檜原街道	1985年	209.0	H30
上川TN	主要地方道61号	山田通り	1995年	347.5	H30
小山内裏TN	一般都道158号	多摩ニュータウン通り	1990年	389.9	H29
小山長池TN	一般都道158号	南多摩尾根幹線道路	1996年	129.0	H30
綾部原TN	主要地方道18号	鎌倉街道	2004年	409.5	H30
新小峰TN	主要地方道32号	秋川街道	2002年	656.0	H28
美山TN	主要地方道61号	美山通り	2002年	199.0	H28
戸吹TN	主要地方道46号	新滝山街道	2004年	812.0	H28
小田野TN	主要地方道61号	美山通り	1982年	165.0	H29
堀之内第一TN	一般都道155号	平山通り	1996年	120.0	H30
堀之内第二TN	一般都道155号	平山通り	1995年	60.0	H30
堀之内第三TN	一般都道155号	平山通り	1995年	265.0	H30
北八幡寺芝TN	一般都道155号	平山通り	1995年	49.0	H30

## 2) 測定項目及び測定機器

測定項目及び測定機器等は表-2 に示すとおりである。

表-2 測定項目及び測定機器

測定項目	単位	測定機器
すべり抵抗値 (BPN)	BPN	振り子式スキッドレジスタンステスタ
動的摩擦係数 ( $\mu$ )	$\mu$	回転式すべり抵抗測定器 (DFテスタ)
平均プロファイル深さ (MPD)	mm	回転式きめ深さ測定装置 (CTメータ)

## 3) 測定地点及び位置

測定地点は、各トンネルの上下車線における入口・出口及び中間付近とした。

また、それぞれの測定地点での測定位置は、「車線の外側車輪通過位置 (車線中央から進行方向左側に 1m 離れた位置: 以下、OWP という)」及び「車線中央の位置 (非車輪通過位置で、外側車輪通過位置と内側車輪通過位置の中央: 以下、BWP という)」とした。

これらの測定位置は図-2 に示すとおりであり、入口と出口の標記はトンネルに対する走行方向での位置を表している。

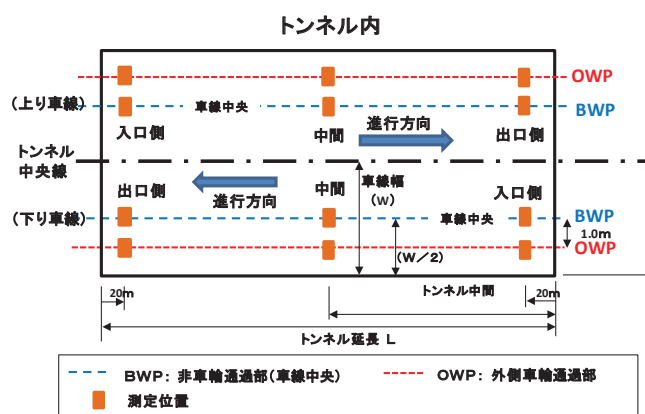


図-2 測定位置

## (2) すべり抵抗の回復工法の検討

### 1) 検討対象としたトンネル

平成 28 年度から平成 30 年度までで、全 28 箇所のコンクリート舗装のすべり抵抗値を把握した。このうちすべり抵抗値が比較的低い 5 箇所のトンネル (表-3) を選定し、すべり抵抗の回復工法の検討を行った。

表-3 すべり抵抗の回復工法の対象トンネル

トンネル名称	車線数
新氷川トンネル	片側1車線
御岳トンネル	片側1車線
網代トンネル	片側1車線
新小峰トンネル	片側1車線
戸吹トンネル	片側2車線

## 2) 回復工法実施位置と機械仕様

すべり抵抗の回復工法として、一般的に用いられるショットブラスト工法 (以下、SB 工法という) を選定した。

ここで、SB 工法は、一般通行車両の走行安全性を確保するため、OWP だけでなく「車線の内側車輪通過位置 (車線中央から進行方向右側に 1m 離れた位置: 以下、IWP という)」についても実施している。

片側 1 車線のトンネルにおける SB 工法の実施位置を図-3 に示す。戸吹トンネルは片側 2 車線のため、上り車線、下り車線のそれぞれで進行方向左側となる走行車線で試験を実施した。

また、施工機械の仕様を表-4 に示す。

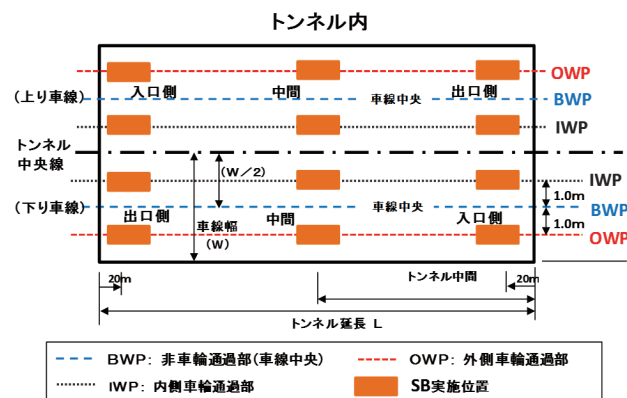


図-3 SB 実施位置

表-4 SB 工法施工機械仕様

条件	仕様
研掃幅	1,000mm
投射量	180kg/min × 2
走行速度	1~10m/min
投射速度	75m/sec
動力源	発電機
移動方法	自走式
移動制御	研掃機搭載の制御盤より
粉塵回収法	集塵機による完全回収

## 3) SB 工法の実施内容

図-3 に示した SB 工法実施位置において、試験的に投射密度を 3 段階に変化させて施工した。

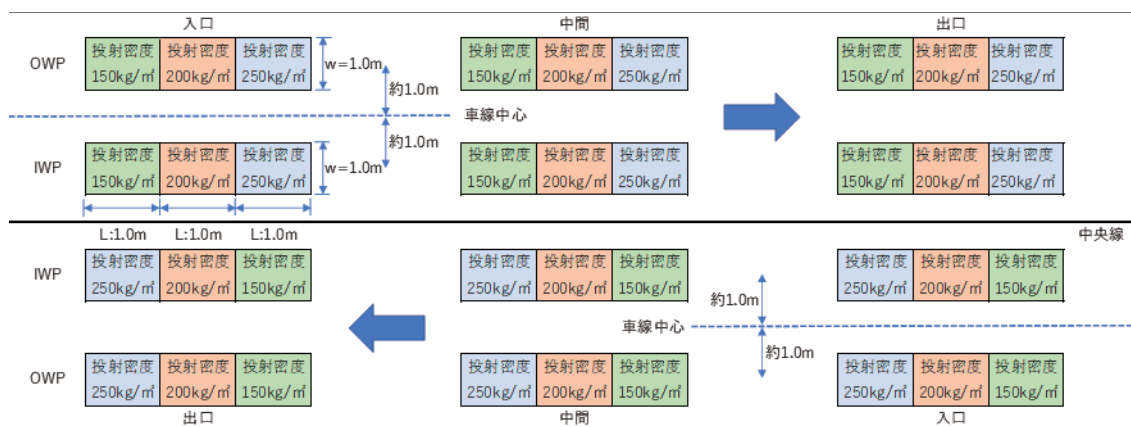


図-4 SB工法の実施例

図-4は、SB工法の投射密度実施例を示したものであり、施工幅(w)は1.0m×2列、施工延長(L)は各投射密度とも1.0mとした。

ここで、投射材はショット玉の寸法を大きくすることでSB工法の耐久性(効果の持続性)を向上できるという既往の報告<sup>1)</sup>から寸法2.0mmの鋼球を選定した。

また、投射密度は150kg/m<sup>2</sup>、200kg/m<sup>2</sup>、250kg/m<sup>2</sup>の3段階とした。

#### 4) 調査項目

SB工法を実施した箇所、表-2に示す3つの測定項目の他、SB工法を施工する前の事前調査の時点でSB工法によるすべり抵抗の回復が期待できるかを簡便に判定することが可能かを検討するため、舗装路面をデジタル写真撮影した画像の解析を実施した。

これは、舗装路面画像の二値化処理による骨材分とモルタル分の画素比率の算出を行ったものであり、各トンネルの入口のみで実施した。

### 3. 各試験の測定方法

#### (1) すべり抵抗値(BPN)

すべり抵抗値の1指標であるBPNの測定は、振り子式スキッドレジスタンステスト(写真-1)を用いて、舗装調査・試験法便覧<sup>3)</sup>(以下、「便覧」という)に示す方法で実施した。

なお、測定に際し、車両の走行に対するすべり抵抗値を求める必要があることから振り子の滑り出し方向は車両走行方向と同じとした。

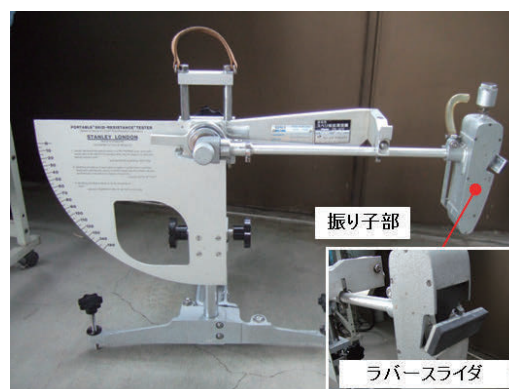


写真-1 振り子式スキッドレジスタンステストの外観



写真-2 DFテストの外観

#### (2) 動的摩擦係数(μ)

動的なすべり抵抗を示す動的摩擦係数(μ)は回転式すべり抵抗測定器(以下、DFテストという(写真-2))によって測定し、「便覧」に示す方法で実施した。

#### (3) 平均プロファイル深さ(MPD)

平均プロファイル深さ(MPD)は回転式きめ深さ測定装置(以下、CTメータという)できめ深さを測定(写真-3)し、それより算出した。測定は「便覧」に示す方法で実施した。

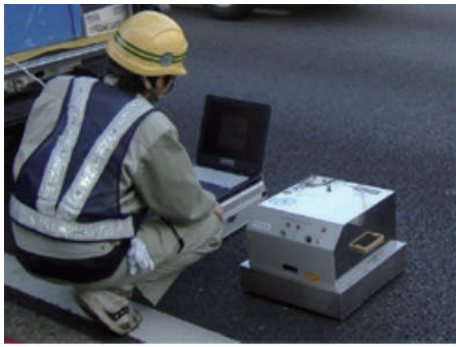


写真-3 CTメータによるきめ深さの測定状況

#### (4) コンクリート舗装路面の画像解析

表-5 に示す条件にてコンクリート舗装の路面画像を撮影し（写真-4）、骨材分とモルタル分の画素比率を画像処理ソフトにて二値化して算出した。

なお、ここでいう画像の二値化とは、濃淡のある画像を白と黒の2階調に変換する処理のことで、一定のしきい値を定めて、デジタルカメラで撮影した画像を構成する画素ごとの値がしきい値を上回っていれば白、下回っていれば黒に置き換えるものである。

表-5 画像撮影条件

項目	条件
高さ	50cm
フラッシュ・照明	無し（未使用）
デジタルカメラ	RICOH WG-60
有効画素数	約1600万画素
撮像素子	1/2.3型CMOS

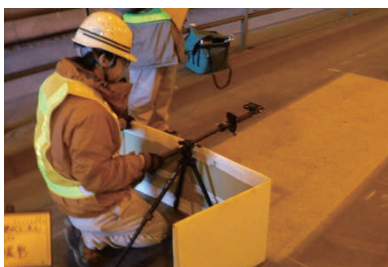


写真-4 デジタル画像の撮影状況

ここで、路面画像にあたり、暗色の骨材と明色の骨材が含まれていることから、明色の骨材を誤ってモルタル分と誤判定しないよう、この補正処理が可能な画像処理ソフト（Image J : National Institutes of Health）を使用した。

二値化及び骨材/モルタル分の画素比率算出手順の概略は以下の通りである。

##### ①二値化のためのしきい値を設定

路面画像を目視で確認しながら、モルタル分と骨材分を分離する最適なしきい値を手動にて決定する。

##### ②白黒画像化

画像処理を行うことでモルタル部分が黒色に、骨材部分が白色で示され、結果、二値化画像が得られる。

##### ③画素数の算出

この二値化画像を基に黒色のモルタル分と白色の骨材分の画素数を算出し、モルタル分と骨材分の比率を算出する。

ここで、舗装路面画像中に骨材以外の汚れ等が写っている場合には、二値化処理段階で骨材と分離することが難いため、粒径サイズ設定を調節することにより、汚れ部分を除外して骨材/モルタル分の画素比率を算出した。

二値化の一例として、新氷川トンネルにて撮影したSB工法投射密度 150 kg/m<sup>2</sup>における施工前後の路面画像とその二値化画像を写真-5 に示す。二値化画像写真のうち、黒がモルタル分、白が骨材を示す。

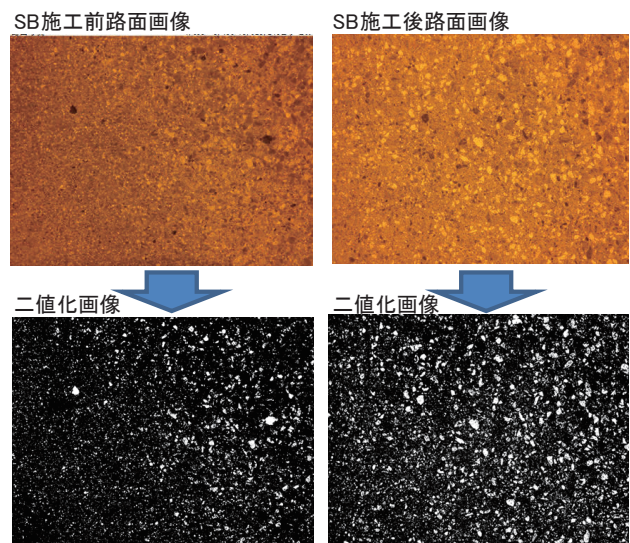


写真-5 デジタル画像の撮影状況

## 4. 調査結果

### (1) 舗装路面のすべり抵抗値等の実態調査

#### 1) すべり抵抗値 (BPN)

それぞれの測定地点と位置における 28 箇所のトンネルの BPN の箱ひげ図を図-5 に示す。

なお、この図において、28 箇所のトンネルの BPN の平均値、最大値、最小値、+σ、-σ の値を示している。以後のグラフも同様である。

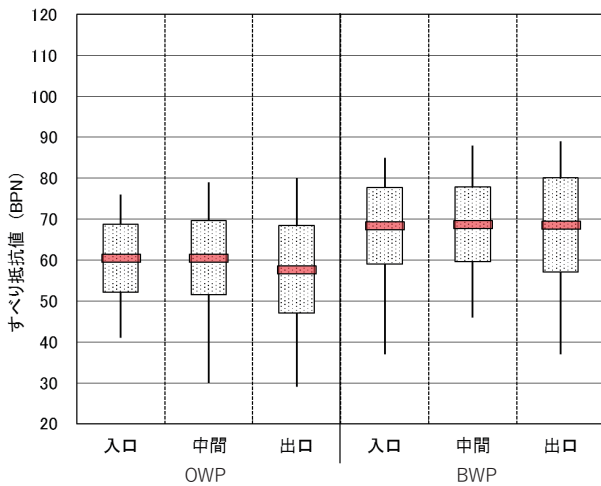


図-5 BPN 測定結果

この結果からは以下のようなことがわかる。

- ① 平均的な BPN は、OWP で 60 程度、BWP で 70 弱である。
- ② OWP よりも BWP の方が全体的にすべり抵抗値は高い。
- ③ トンネル内の測定地点別（入口・中間・出口）に大きな差は見られない。

## 2) 動的摩擦係数 ( $\mu$ )

DF テスタによる速度 60km/h のときの動的摩擦係数  $\mu$ （以下、 $\mu_{60}$  と称す）の測定結果を図-6 に示す。

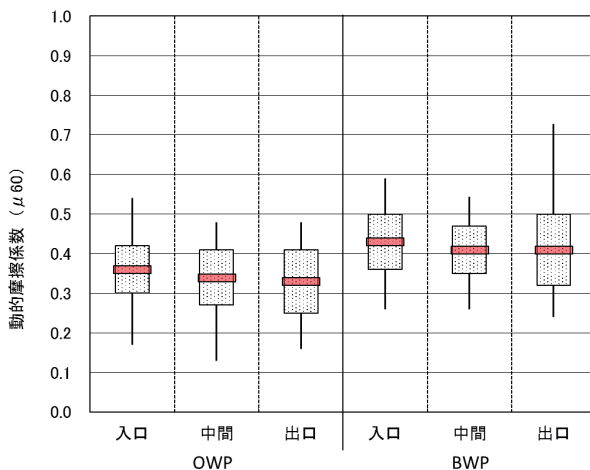


図-6 動的摩擦係数  $\mu$  測定結果

これらからは以下のようなことがわかる。

- ① 平均的な  $\mu_{60}$  は OWP で 0.35 程度、BWP で 0.4 強であり、OWP よりも BWP の方が全体的にすべり抵抗値は高い。
- ② トンネル内の地点別（入口・中間・出口）では、進行方向に進むほど平均の  $\mu_{60}$  が小さくなる傾向が見られた。

DF テスタで得られる動的摩擦係数  $\mu$  に対する補修

等の管理基準については特に明確なものが示されていない。

寺田らの報告<sup>4)</sup>では、DF テスタによる  $\mu$  とすべり抵抗測定車によるすべり摩擦係数は、測定速度 40～60km/h の範囲では相関性があり、特に 60km/h ではほぼ“ $\mu$  = すべり摩擦係数”の関係があるとの報告がある。

すべり抵抗値については、発行年が昭和 53 年 7 月の(社)日本道路協会の「道路維持修繕要綱」<sup>5)</sup>（以下、「要綱」と称す）では、維持修繕の要否判断の目標値として 0.25 としているが、この目標値については“すべり摩擦係数”とし、“60km/h で、舗装路面を湿潤状態にして測定する”との記述があるだけで、測定方法については具体的に明記されていない。ただし、これについては後年の平成 25 年 4 月に発行された(公社)日本道路協会の「舗装性能評価法 - 必須および主要な性能指標編 - (平成 25 年版)」<sup>6)</sup>において“ここでいうすべり摩擦係数はすべり抵抗測定車による測定方法による”との記述が追加されている。

この目標値を今回の測定結果に適用してみると、OWP の一部の地点で 0.25 以下となっている。

## 3) 平均プロファイル深さ (MPD)

CT メータにより測定したきめ深さより算出した MPD の結果を図-7 に示す。

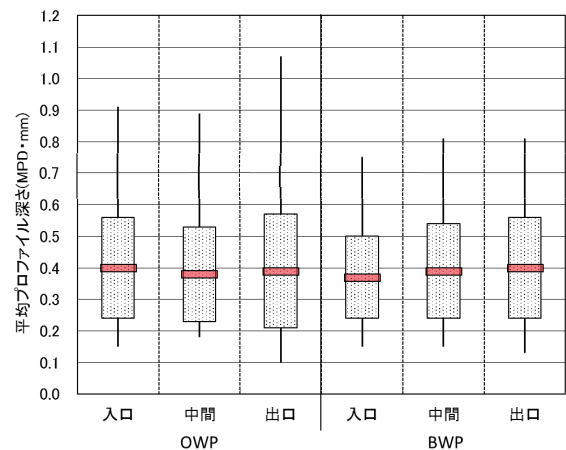


図-7 MPD 算出結果

これらからは以下のことがわかる。

- ① MPD は OWP や BWP、また入口や出口等の測定地点にかかわらず平均値は概ね 0.4mm 程度となっている。

4) すべり抵抗値 (BPN) と動的摩擦係数  $\mu_{60}$  の関係 BPN と  $\mu_{60}$  の関係を図-8 に示す。

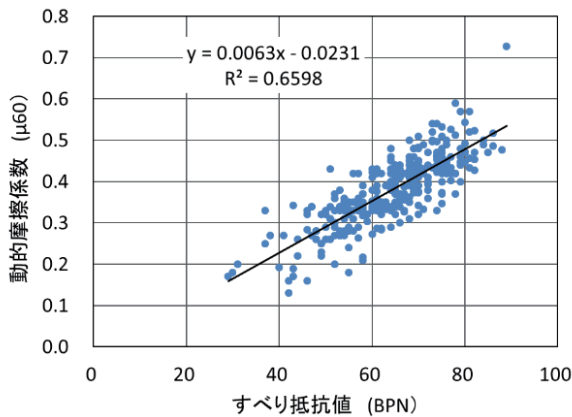


図-8 BPN と動的摩擦係数  $\mu 60$  の関係

これらの両者には既報の結果<sup>2)</sup>と同様、比較的高い相関性が認められる。これは測定メカニズムに違いはあるものの、それぞれがゴムと舗装路面とのすべり抵抗値を動的に測定するという部分で共通であるためと考えられる。

### 5) すべり抵抗値 (BPN) および動的摩擦係数 $\mu 60$ と MPD の関係

BPN および  $\mu 60$  と MPD との関係を図-9 に示す。

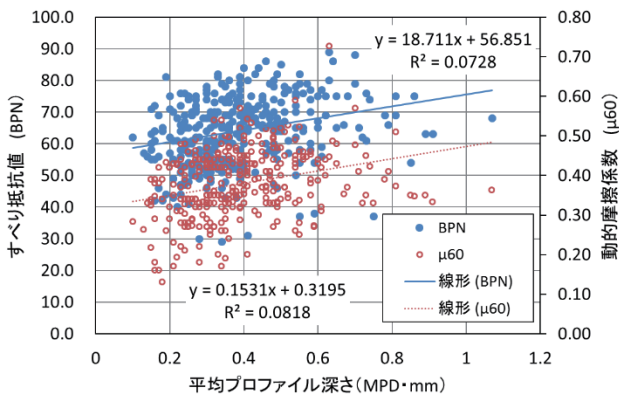


図-9 BPN および  $\mu 60$  と MPD との関係

BPN や  $\mu 60$  の結果と比較して、すべり抵抗値は明確に OWP の方がすべり抵抗値が低かったのに対し、MPD は大きな違いがない。この結果からも、コンクリート舗装において MPD とすべり抵抗値には相関がそれほど高くないことが示唆されるが、相関分析を行った結果からも相関は高くないことが確認できた。ただし、線形近似した直線の傾きから、全体的に MPD が大きくなる方がすべり抵抗値は大きくなる傾向を示している。

### (2) すべり抵抗の回復工法の検討

#### 1) すべり抵抗値 (BPN)

各トンネルにおける各測定地点での SB 工法投射密度別すべり抵抗値を図-10 に示す。

今回実施したトンネル5箇所では、入口、中間、出口と進行方向に進むにつれ施工前の BPN は低い傾向を示していた。

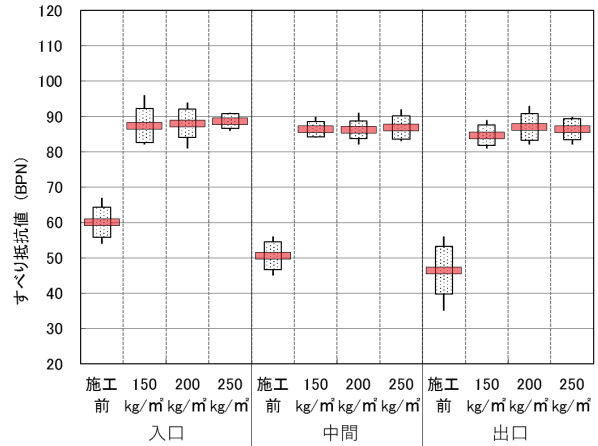


図-10 測定地点及び投射密度別 BPN

SB 工法施工後では、すべての測定地点で BPN が 80 程度まで増加した。また、投射密度による大きな差は見られなかった。

#### 2) 動的摩擦係数 ( $\mu$ )

各トンネルにおける各測定地点での SB 工法投射密度別動的摩擦係数  $\mu 60$  を図-11 に示す。なお、当該調査において、試験機器の故障のため新小峰トンネルのみ一部施工直後の測定ができなかった。

このため、図-11 では新小峰トンネルを除外し、4 箇所のトンネルでの結果としている。

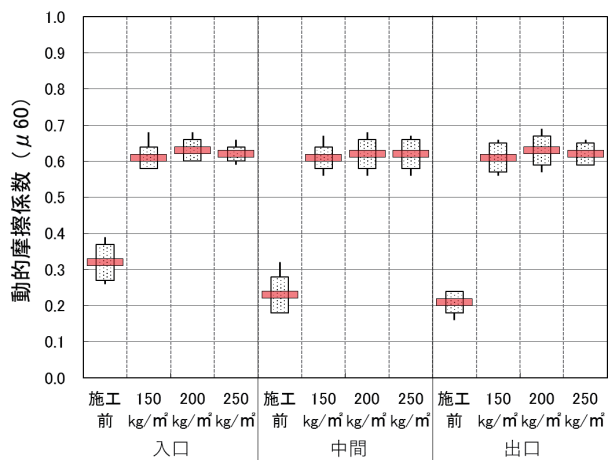


図-11 測定地点及び投射密度別  $\mu 60$

今回実施したトンネル5箇所は、入口、中間、出口と進行方向に進むにつれ施工前の  $\mu 60$  は BPN と同様低い

傾向を示していた。

SB 工法施工後では、すべての位置で  $\mu 60$  の平均値が 0.6 強程度まで増加していた。また、投射密度による大きな差は見られない結果であった。

この新小峰トンネルでは、SB 施工後の 2 週間後に再度調査を行った。下りの入口および中間の箇所のみ、施工直後のデータを計測することができたため、この箇所での施工直後と 2 週間後の  $\mu 60$  のデータを図-12 に示す。

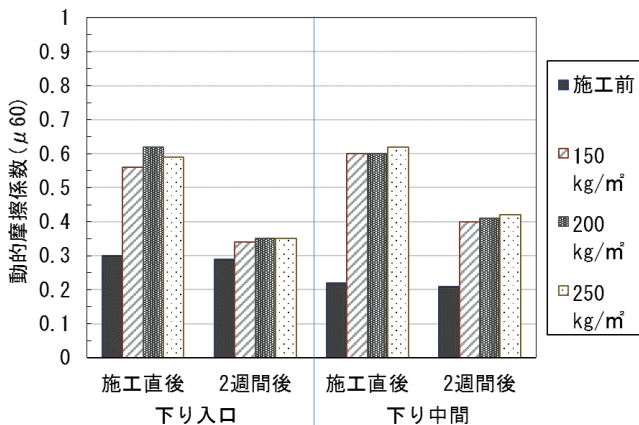


図-12 新小峰トンネルの施工直後と 2 週間後の  $\mu$

この結果をみると、施工直後に測定した  $\mu 60$  は投射密度にかかわらず概ね 0.5 から 0.6 程度を確保していたが、2 週間後では 0.3 から 0.4 程度まで  $\mu 60$  が低下していた。これは、SB 工法で得られたすべり抵抗に大きく影響するマイクロテクスチャが、車両通行による摩擦により早期に磨かれてしまい、すべり抵抗が減少したことによるものと思われる。

### 3) 平均プロファイル深さ

各トンネルにおける各位置での SB 工法投射密度別 MPD を図-13 に示す。

この結果から、SB 工法施工後では、すべての位置で MPD の値が増加した。また、投射密度を大きくするほど MPD の値が増加する結果となった。

実際に CT メータで測定した新小峰トンネルの舗装路面プロファイルの例を図-14 に示す。

この舗装路面プロファイルからも、投射密度が大きくなると MPD が大きくなる傾向がはっきり何うことができる。

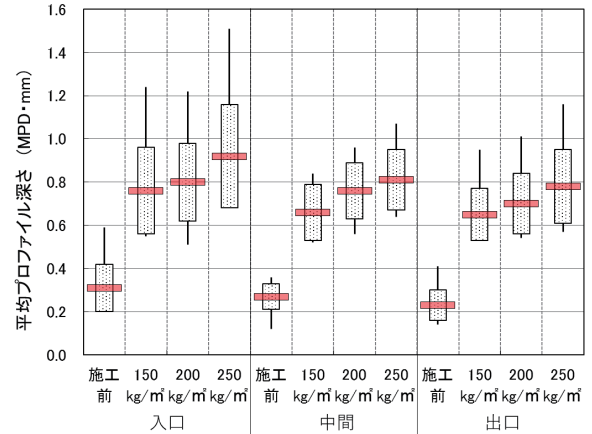


図-13 測定地点及び投射密度別 MPD

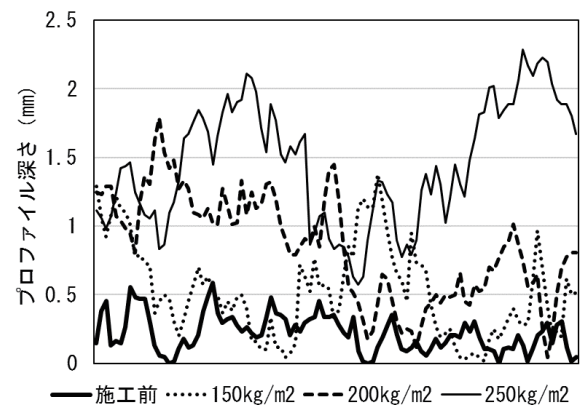


図-14 舗装路面プロファイルの例  
(新小峰トンネル)

### 4) コンクリート舗装路面の画像解析

画像処理により、路面のモルタル分比率を算出した。結果を図-15 に示す。

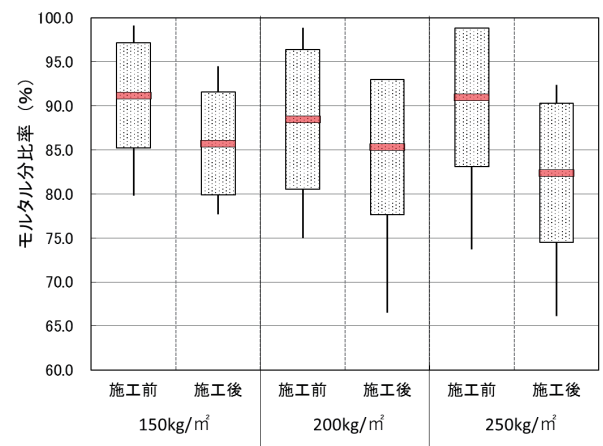


図-15 舗装路面の施工前後のモルタル分比率

写真-5 の画像でも示したように、施工位置により、施工前のモルタル分比率は若干異なるものの、施工後ではモルタル分比率が減少し、骨材が露出してくると

ということがわかる。投射密度が大きいほどモルタル分比率が減少する傾向がうかがえる。

また、様々なコンクリート舗装路面に対し、SB 工法によりすべり抵抗値が増加するかの有効性を、画像による判定でスクリーニングが可能か検討した。

これは、SB 工法施工前のモルタル分比率と施工後のすべり抵抗値の増加量との相関をみることで検証した。

図-16 に結果を示す。

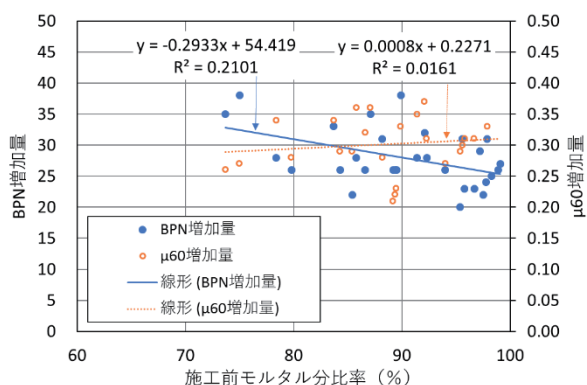


図-16 SB 工法施工前のモルタル分比率と各すべり抵抗値増加量との関係

この結果から、SB 工法施工前のモルタル分比率と、施工後のすべり抵抗値の増加量には大きな相関は見られず、本画像処理方法により SB 工法を施工する前の事前調査の時点で SB 工法によるすべり抵抗の回復が期待できるかを簡便に判定することは難しいということがわかった。

また、SB 工法施工前のモルタル分比率と、施工後のすべり抵抗値の相関分析や、投射密度別にも解析を実施したが、同様に相関は見られない結果となった。

## 5. まとめ

以下に、本検討における結果を示す。

### (1) 舗装路面のすべり抵抗値等の実態調査

・都道のトンネル内コンクリート舗装路面の平均的な BPN は OWP で 60 程度、BWP で 70 弱である。また、平均的な  $\mu 60$  は OWP で 0.35 程度、BWP で 0.4 強である。

・OWP よりも BWP の方が全体的にすべり抵抗値は高い。

・MPD は、OWP や BWP、また入口や出口等の測定地点にかかわらず平均値は概ね 0.4mm 程度である。

・BPN と動的摩擦係数  $\mu 60$  の関係は比較的高い相関

が認められる。

・コンクリート舗装路面において、MPD とすべり抵抗値には相関がそれほど高くない。

### (2) すべり抵抗の回復工法の検討

・SB 工法施工後では、すべての測定位置で BPN が平均的に 80 強程度まで、 $\mu 60$  が平均的に 0.6 強程度まで増加した。また、投射密度による大きな差は見られない。

・新小峰トンネルでの結果からは、SB 工法施工直後に測定した  $\mu 60$  は投射密度にかかわらず概ね 0.5 から 0.6 程度を確保していたが、2 週間後では 0.3 から 0.4 程度まで  $\mu 60$  が低下した。

・SB 工法施工後では、すべての位置で MPD の値が増加した。また、投射密度が大きいほど MPD の値が増加した。

・投射密度が大きくなるほど舗装路面のモルタル分比率が減少する傾向である。

・SB 工法施工前のモルタル分比率と、施工後のすべり抵抗値の増加量には大きな相関は見られず、今回適用した画像処理方法により SB 工法の有効性を事前に判定するのは困難である。

## 6. おわりに

平成 28 年度から 30 年度にかけて、都道のトンネル内コンクリート舗装路面のすべり抵抗値等について全体調査を実施し、個別のトンネルの実態を把握するとともに、全体の傾向を把握した。

また、一部のトンネルにおいてすべり抵抗の回復工法として一般的に用いられる SB 工法を適用し、試験施工を実施した。

本報告では、この全体的な傾向と SB 工法の試験施工の結果について整理したが、トンネル内のコンクリート舗装路面のすべてがすべりやすくなっているわけではなく、トンネル別、箇所・地点別にばらつきが大きいことが明らかとなった。

SB 工法については、当初のすべり抵抗値にかかわらず概ね一定のすべり抵抗値まで増加させることが可能であった。その一方で、新小峰トンネルにおける 2 週間後での測定結果からは、データ数が少ないものの早期にすべり抵抗値の減少が生じている結果と



なり、すべり抵抗の持続性に課題があることが推察された。

この結果を踏まえ、個別のすべり抵抗値については今後の維持管理にフィードバックするとともに、すべり抵抗値を増加させることができる SB 工法については追跡調査を実施し、すべり抵抗の持続性を調査することで、最適な投射密度の把握と、SB 工法の適用性を検証する予定である。

本報告が、トンネル内のコンクリート舗装の維持管理の参考になれば幸いである。

謝辞：道路管理部保全課、西多摩建設事務所、南多摩東部建設事務所、南多摩西部建設事務所には、本調査の実施に際し多大な協力を頂いた。感謝を申し上げる次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 中村、松本、佐藤、神谷：コンクリート舗装のすべり抵抗回復工法に関する研究、土木学会論文集 EI（舗装工学）、Vol. 70、No. 3、pp. I\_197～pp. I\_204、2014
- 2) 狭間 博、峰岸 順一：トンネル内コンクリート舗装路面におけるすべり抵抗性の評価検討、都土木技術支援・人材育成センター年報 平 29.
- 3) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、平成 31 年 4 月
- 4) 寺田、久保、岡本、倉持：DF テスタによるすべり抵抗測定方法に関する検討、舗装 Vol. 47 No. 6、pp. 22～pp. 26、2012
- 5) (社)日本道路協会：道路維持修繕要綱、昭和 53 年 7 月
- 6) (公社)日本道路協会：舗装性能評価法 ー必須および主要な性能指標編ー（平成 25 年版）、平成 25 年 4 月