

3. 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

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

技術支援課 狹間 博、峰岸 順一

1. まえがき

東京都では、都道においてアンダーパス形式のものも含むと約 100 箇所（島しょ部を除く）のトンネルを保有・管理している。これらのトンネル内の路面の舗装形式は耐久性等を考慮して、以前は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等に主眼をおいてアスファルト舗装に移行する傾向にある。

ただし、近年においても地域性等を考慮してコンクリート舗装が採用されることもあり、また以前に構築されたトンネルではまだ路面がコンクリート舗装のままである箇所も比較的多く残っている。

トンネル内のコンクリート舗装は路面の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路面のテクスチャ（舗装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¹⁾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路面を安定して快適に走行するためにはある程度のすべり抵抗性の確保も必要な要因の一つであることを踏まえ、供用中のトンネル内におけるコンクリート舗装路面が現在どの程度のすべり抵抗性を保有しているか実態把握をするために現地測定により確認したのでその結果を報告する。

2. 調査内容

(1) 測定対象としたトンネル

島しょ部を除いた東京都で管理している約 100 箇所のトンネルのうち、内部の路面がコンクリート舗装となっているのは、施設台帳をもとに平成 28 年 5 月に現地調査を行ったところ、この時点で多摩地区における

27 箇所（表-1 及び図-1 を参照）であることを確認した。

このうち、トンネル内だけでなく連続して近接する明り部もコンクリート舗装であることや経過年数等を考慮し、測定対象のトンネルとしては表-1 の測定対象の欄に整理番号を記入した 10 箇所を選定した。

なお、図-1 における矢印（数値は施設台帳における No. を表記）は内部がコンクリート舗装のトンネルを示

表-1 内部がコンクリート舗装のトンネル

施設台帳 No.	路線名		トンネル名	測定対象
63	45号	吉野街道	御岳トンネル	西-4
64			払沢トンネル	
35	411号	青梅街道	白丸トンネル	
36			新水川トンネル	西-1
	184号	多摩川南岸道路	城山トンネル	西-7
69			愛宕トンネル	
70	204号	日原街道	日原トンネル	
57	33号	檜原街道から分岐	甲武トンネル	
58			栗坂トンネル	
59	53号	小曾木街道	青梅坂トンネル	
61	53号	成木街道	新吹上トンネル	西-3
62			滝成トンネル	
56	32号	秋川街道	権田トンネル	
77			新小峰トンネル	南西-1
65	61号	山田通り	上川トンネル	
66			網代トンネル	西-5
67	61号	秋川南岸道路	五日市トンネル	西-6
78	61号	美山通り	美山トンネル	南西-2
79			小田野トンネル	
55	411号	滝山街道	新満地トンネル	西-2
84	46号	新滝山街道	戸吹トンネル	南西-3
72	158号	多摩ニュータウン通り	小山内裏トンネル	
81	155号	平山通り	堀之内第一トンネル	
82			堀之内第二トンネル	
83			堀之内第三トンネル	
85			北八幡寺芝トンネル	
75	18号	鎌倉街道	綾部原トンネル	

しており、このうち塗り潰した矢印は測定対象としたトンネルである。

測定対象である 10 箇所のトンネルの概要は表-2 に示すとおりである。

なお、表中の車線数は“片-1”が片側 1 車線、“片-2”が片側 2 車線を表している。

(2) 測定項目

測定項目は静的なすべり抵抗性及び車両の走行時を想定した動的なすべり抵抗性、またこれらに関連すると思われるものを選定している。選定した測定項目及び測定機器等は表-3 に示すとおりである。

(3) 測定地点及び位置

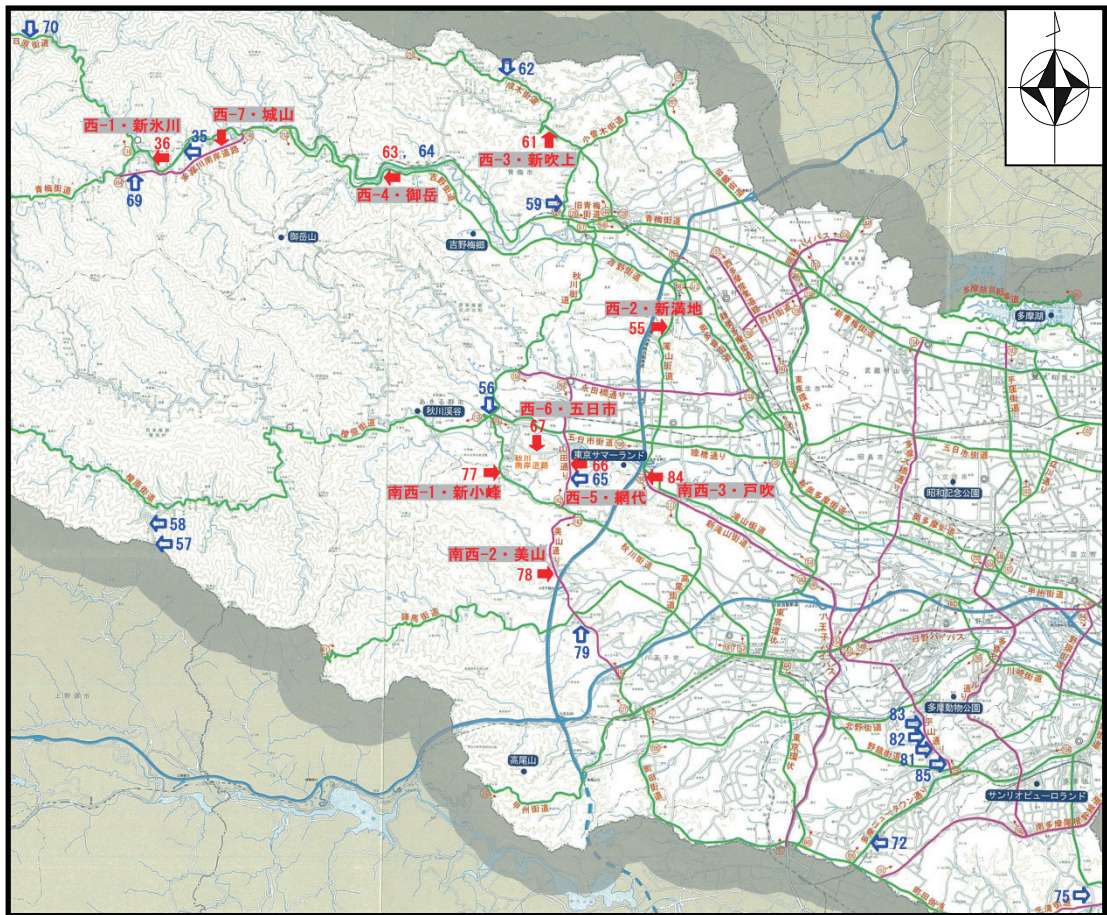


図-1 内部がコンクリート舗装のトンネル

表-2 測定対象としたトンネルの概要

No.	施設台帳 No.	トンネル名	路線名	竣工年月	竣工後経過年数	トンネル延長 (m)	住所		車線数	事務所
西-1	36	新氷川トンネル	一般国道411号	青梅街道	1983年12月	33年	605.0	奥多摩町氷川	片-1	西多摩建設事務所
西-2	55	新満地トンネル		滝山街道	1991年10月	25年	396.0	青梅市友田町一丁目	片-1	
西-3	61	新吹上トンネル	主要地方道53号 青梅秩父線	成木街道	1989年12月	27年	604.0	青梅市黒沢二丁目	片-1	
西-4	63	御岳トンネル	主要地方道45号 奥多摩青梅線	吉野街道	1986年5月	30年	89.0	青梅市御岳一丁目	片-1	
西-5	66	網代トンネル	主要地方道61号 山田宮の前線	山田通り	1991年12月	25年	563.0	あきる野市網代	片-1	
西-6	67	五日市トンネル		秋川 南岸道路	1999年3月	17年	1,223.6	あきる野市網代	片-1	
西-7		城山トンネル	一般都道184号 奥多摩あきる野線	多摩川 南岸道路	2014年1月	3年	1,908.0	奥多摩町海澤	片-1	
南西-1	77	新小峰トンネル	主要地方道32号 八王子五日市線	秋川街道	1999年2月	18年	656.0	八王子市上川町	片-1	南多摩建設事務所
南西-2	78	美山トンネル	主要地方道61号 山田宮の前線	美山通り	2001年3月	15年	199.0	八王子市美山町	片-1	
南西-3	84	戸吹トンネル	主要地方道46号 八王子あきる野線	新滝山街道	2003年10月	13年	600.0	八王子市戸吹町	片-2	

測定地点はおのおのの条件の違いによる差を把握するために、各トンネルの上下車線における入口・出口及び中間付近で、それぞれの地点において車線の外側車輪通過位置（車線の中心線から進行方向左側に1m離れた位置。以下、「OWP」と称す）と車線の中央位置（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」と称す）とした。

また、トンネルに隣接する明り部もコンクリート舗装である“No. 西-2 新満地トンネル”と“No. 西-4 御岳トンネル”はこの明り部も測定地点とした。

これらの測定地点及び測定位置を整理すると図-2 に示すとおりとなる。図に示すように、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。

なお、片側2車線である“No. 南西-3 戸吹トンネル”は車両の走行速度が速いと思われる中央側の追越車線を測定の対象車線とした。

3. 測定方法

(1) すべり抵抗値 (BPN)

静的なすべり抵抗値（以下、「BPN」と称す）は振り子式スキッドレジスタンステストによって測定した。測定は(社)日本道路協会の「舗装調査・試験法便覧」

2)（以下、「便覧」と称す）に準拠して行っている。

テストの外観は写真-1 に示すとおりである。

なお、測定に際し、車両の走行に対するすべり抵抗性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。

(2) 動的摩擦係数 (μ)

動的なすべり抵抗性を示す動的摩擦係数（以下、「 μ 」と称す）は回転式すべり抵抗測定器（以下、「DF テスタ」と称す）によって測定した。測定は「便覧」に準拠して行っている。

DF テスタの外観は写真-2 に示すとおりである。

(3) コンクリート圧縮強度

表-3 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ト
動的摩擦係数 (μ)		回転式すべり抵抗測定器 (DF テスタ)
コンクリート圧縮強度	N/mm ²	シュミットハンマー
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)
路面の勾配及び温度	%・℃	角度計・温度計

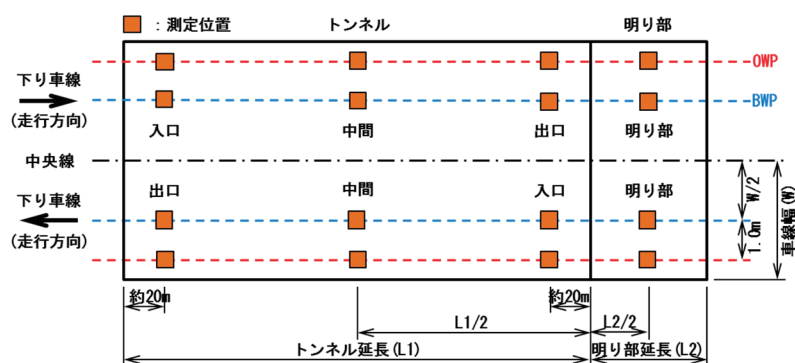


図-2 測定地点及び測定位置

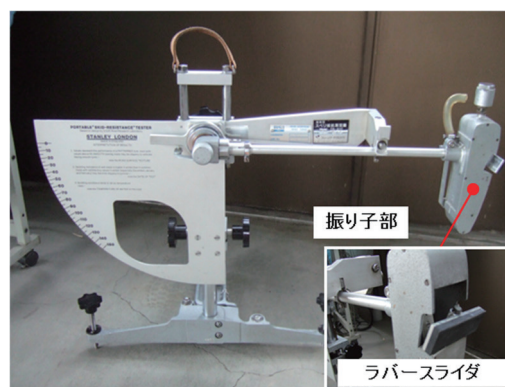


写真-1 スキッドレジスタンステストの外観

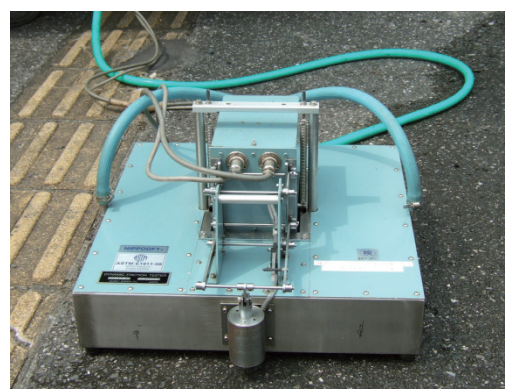


写真-2 DF テスタの外観

コンクリート舗装路面の圧縮強度はシュミットハンマーを用いた反発度法により反発度を測定し、その反発度から圧縮強度を推定した。測定や推定等については「JIS A 1155:2012」に準拠して行った。

(4) 平均プロファイル深さ (MPD)

平均プロファイル深さ (以下、「MPD」と称す) は回転式きめ深さ測定装置 (以下、「CT メータ」と称す) できめ深さを測定し、それより算出した。測定は「便覧」に準拠して行っている。

CT メータによるきめ深さの測定状況は写真-3 に示すとおりである。



写真-3 CTメータによるきめ深さの測定状況

4. 測定結果

ここではそれぞれの測定結果をグラフに整理しており、各測定位置については表-4 に示すような略称を用いている。

なお、明り部は車両走行の連続性を持たせるため進行方向に沿った順序でプロットしている。

(1) すべり抵抗値 (BPN)

各トンネルでのそれぞれの測定位置における BPN は図-3 に、またそれぞれの測定位置における 10 箇所のトンネルの最大・平均・最小値は図-4 に示すとおりである。

これらからは以下のようなことが読み取れる。

- ① 明り部は同じトンネルで他の測定地点と同程度か、それ以上のすべり抵抗性を有している。なお、これについては参考文献¹⁾においても報告されている。
- ② 竣工後年数が最も新しい(約3年)城山トンネルは上下車線とも車輪通過位置であるOWPよりも非車輪通過位置であるBWPの方がすべり抵抗性は低い。しかし、その他のトンネル(竣工後経過年数は13~33年)ではすべてOWPの方がすべり抵抗性は低い。
- ③ 全体的な傾向として、上下車線とも車両の進行方向(入口・中間・出口)に従ってすべり抵抗性は低くなっている。
- ④ BPN に対する補修等の管理基準は特に見当たらないが、NEXCO の「舗

表-4 測定位置の略称

車線	車輪通過位置	位置	測定位置略称	車線	車輪通過位置	位置	測定位置略称
下り車線	OWP	明り部	下0明り	上り車線	OWP	明り部	上0明り
		入口	下0入口			入口	上0入口
		中間	下0中間			中間	上0中間
		出口	下0出口			出口	上0出口
	BWP	明り部	下B明り		BWP	明り部	上B明り
		入口	下B入口			入口	上B入口
		中間	下B中間			中間	上B中間
		出口	下B出口			出口	上B出口

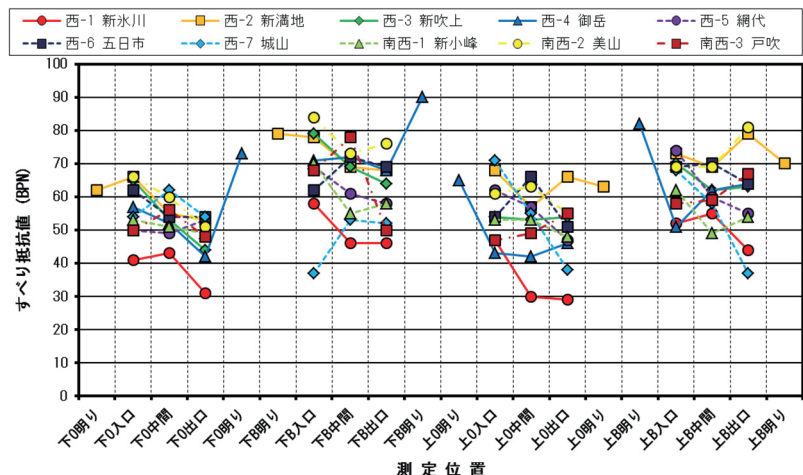


図-3 各トンネルにおける調査位置ごとのBPN

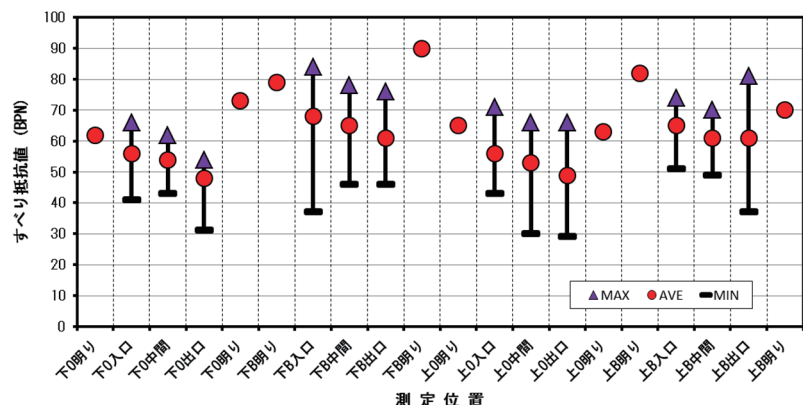
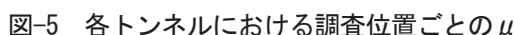


図-4 BPNの各調査位置における最大・平均・最小値

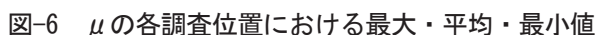
参考までに、この基準を測定結果に適用してみると、明り部はすべてこの基準を満たしているが、BWP で約 35%、OWP では約 80%の地点で下回っている。



DF テスタによる速度 60km/h のとき
 μ についてすべり抵抗値と同様に
 整理した測定結果は図-5、図-6 に示す
 とおりである。

① BPN と同様に、明り部は他の測定地点と同程度か、それ以上のすべり抵抗性を有している。また、車両の進行方向に従ってすべり抵抗性は低くなっている。

- 発行年が昭和 53 年 7 月とやや古い(社)日本道路協会の「道路維持修繕要綱」⁴⁾ (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、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)」⁵⁾ (以下、「性能評価法」と称す)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



また、参考文献⁶⁾によると、DF テスタによる μ 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“ μ =すべり摩擦係数”の関係があると判断している。

④ 上記した③において 0.25 を下回ったのは竣工後経過年数が 30 年以上である新冰川トンネルと御岳トンネル、また新吹上、網代、戸吹の各トンネルの一部である。

– 31 –

すべり抵抗の低下に対し何らかの対策を選定するようにしている。ただし、これには“維持補修行為の実施の要否を判断する管理目標値とは異なる”との注意書きがあるため、ここでは参考として取り扱う。

参考までにこの目安を今回の測定結果に適用してみると、明り部はすべての地点、BWP では約 80%、また OWP では約 50%の地点で 0.33 以上となっている。

- ⑤ また、上記した④で、上下車線の OWP のすべての地点において 0.33 を上回ったのは新満地トンネルと美山トンネルである。
- ⑥ なお、「NEXCO 要領」では出来形基準としてすべり抵抗測定車によるすべり摩擦係数が 0.35 以上と示されている。ただし、これは測定車による測定速度 80km/h における係数であり、今回の測定は速度 60km/h までとしていることや各トンネルでの法定速度はこれ以下であること等を考慮し、ここでは適用しない。

(3) コンクリート圧縮強度

シュミットハンマーにより測定した反発度より推定したコンクリートの圧縮強度についてすべり抵抗値と同様に整理した結果は図-7、図-8 に示すとおりである。

これらからは以下のようなことが読み取れる。

- ① すべてのトンネルの圧縮強度は $16.3 \sim 35.5 \text{ N/mm}^2$ とややばらついており、また同じトンネルでも測定位置によりばらついている。
- ② 全体的な傾向として、圧縮強度は上下車線ともに BWP よりも OWP の方が大きい結果となった。

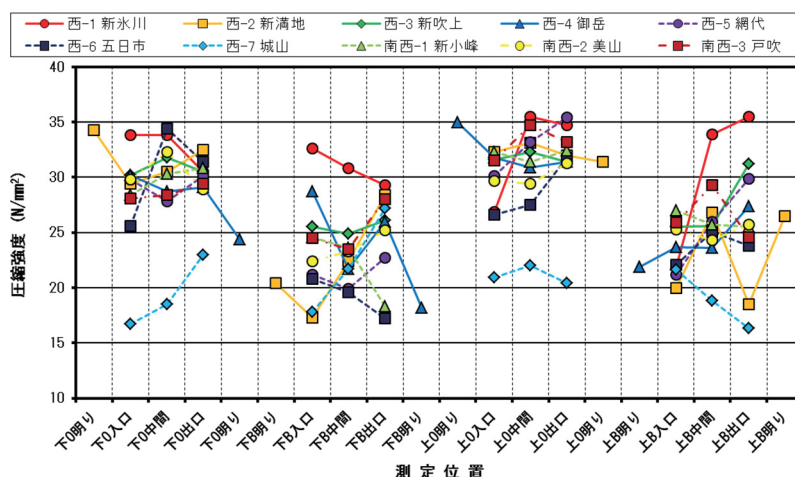


図-7 各トンネルにおける調査位置ごとの圧縮強度

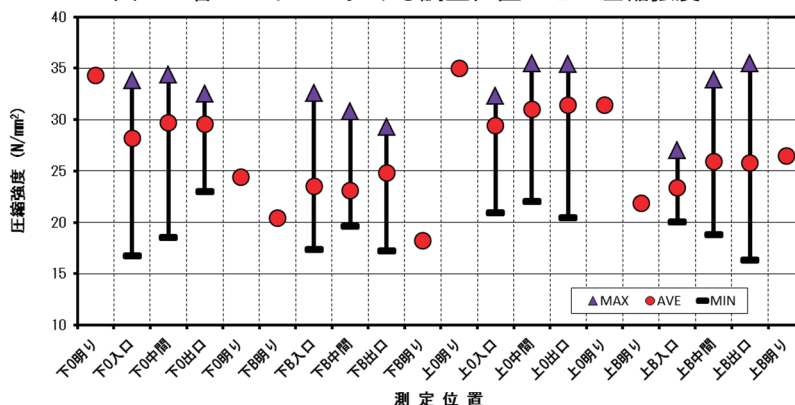


図-8 圧縮強度の各調査位置における最大・平均・最小値

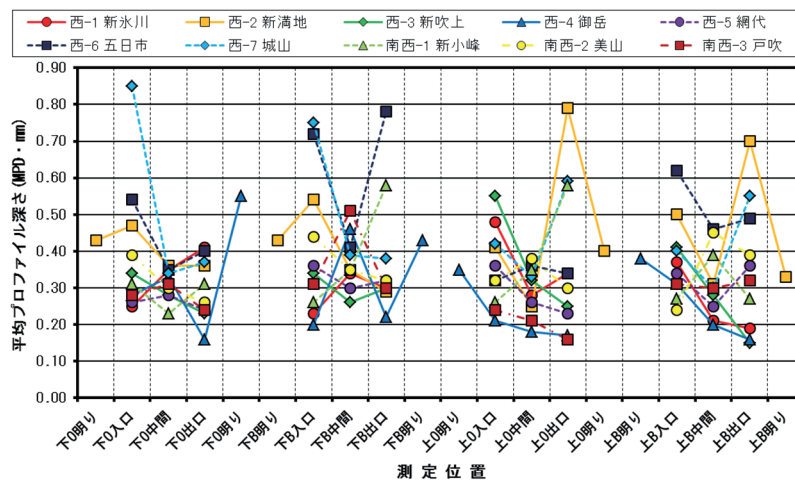


図-9 各トンネルにおける調査位置ごとの MPD

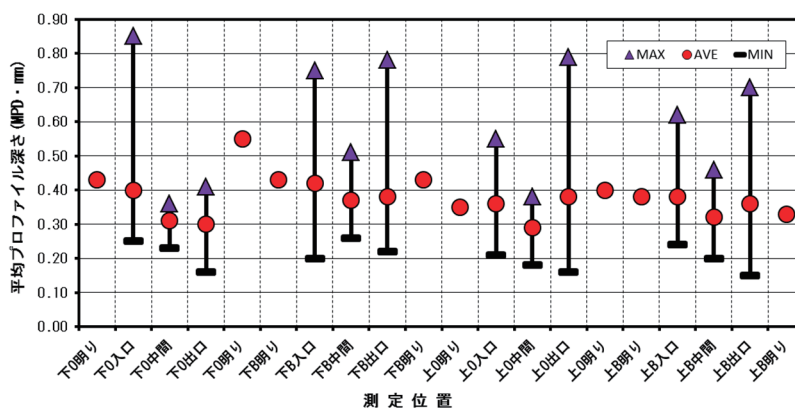


図-10 MPD の各調査位置における最大・平均・最小値

- ③ 明り部については前述した BPN や μ のような他の測定地点との違いはほとんどない。
- ④ 竣工後年数が最も新しい（約 3 年）城山トンネルの圧縮強度は $16.3 \sim 27.2 \text{ N/mm}^2$ と他のトンネルよりも小さくなっている。

(4) 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 についてすべり抵抗値と同様に整理した結果は図-9、図-10 に示すとおりである。

これらからは以下のようなことが読み取れる。

- ① すべてのトンネルでの MPD は $0.15 \sim 0.85 \text{ mm}$ で、一部のトンネルの入口や出口で大きな値となっているが、これらを除くと比較的同程度の値となっている。
- ② OWP や BWP、また入口や出口、明り部等の測定地点や位置での違いはあまりなく、全体的な傾向としてほぼ同程度の値となっている。

5. 各測定項目における相関性の分析

ここではそれぞれの測定項目どうしの関係性を確認するためにその相関性について分析・検討した。

(1) すべり抵抗値 (BPN) と動摩擦係数 (μ)

BPN と μ の関係は図-11 に示すとおりである。図によると、これらの両者には比較的高い相関性が認められる。これは静的、あるいは動的の違いはあるものの、それぞれがすべり抵抗性を表していることによるものである。

(2) すべり抵抗値 (BPN) とコンクリートの圧縮強度

前述した(1)において BPN と μ との間には比較的高い相関性が認められたので、圧縮強度との関係性の確認は BPN についてのみ行った。

BPN と圧縮強度との関係は図-12 に示すとおりである。図によると、両者の間には個々のトンネルである程度の相関性がみられるものもあるが、各トンネル全体としての相関性はあまり高くない。ただし、相関性は高くないものの圧縮強度は BPN

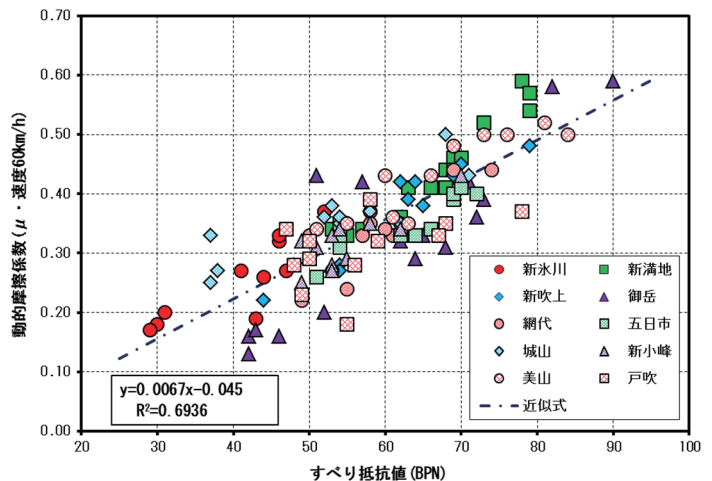


図-11 BPN と μ の相関

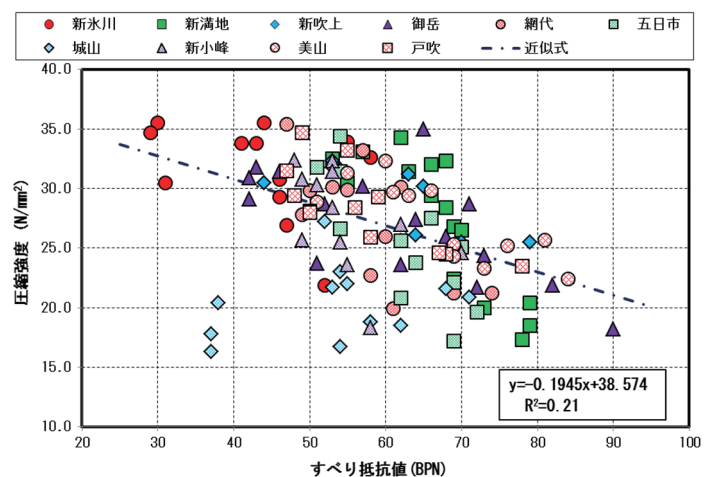


図-12 BPN と圧縮強度の相関

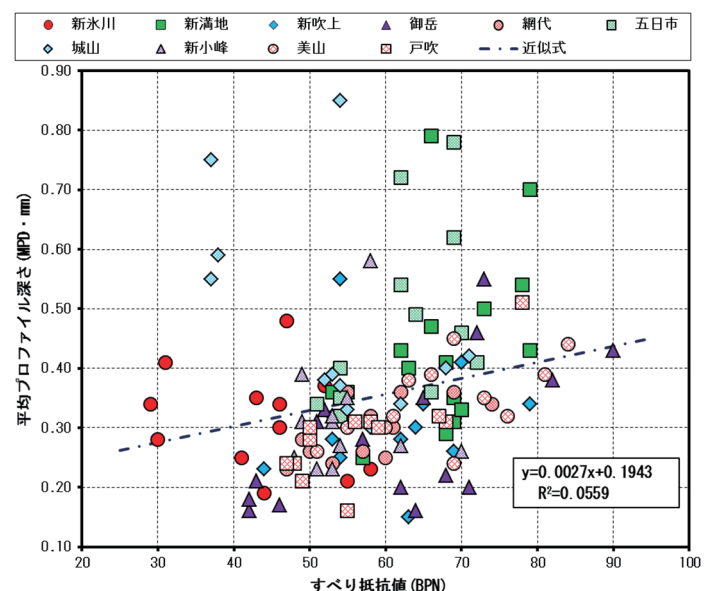


図-13 BPN と MPD の相関

が低くなると大きくなるという大局的な傾向がみられる。

この傾向は BPN が低いということはコンクリート舗

装表面の凹凸がなく滑らかとなり、その結果として反発度法により推定した圧縮強度が大きくなったものと推定できる。

(3) すべり抵抗値 (BPN) と平均プロフィール深さ (MPD)

前述した(2)と同様に MPD との関係性の確認も BPN についてのみ行った。

BPN と MPD との関係は図-13 に示すとおりである。図によると、両者の間には個々のトンネルにおいても、また各トンネル全体としても相関性はほとんど確認できない。

(4) 平均プロフィール深さ (MPD) とコンクリートの圧縮強度

MPD と圧縮強度との関係は図-14 に示すとおりである。図によると、両者の間の関係は前述した(2)の“すべり抵抗値 (BPN) とコンクリートの圧縮強度”とほとんど同様であり、相関性は高くないものの圧縮強度は MPD が低くなると大きくなるという大局的な傾向がみられる。

この傾向についても BPN と同様に、MPD が低いということはコンクリート舗装表面の凹凸がなく滑らかとなり、その結果として反発度法により推定した圧縮強度が大きくなったものと推定できる。

(5) 竣工後経過年月の間の大型車通行量とすべり抵抗値 (BPN) の差分

ここでは OWP と BWP の違いが車輪の通過位置、非通過位置であることに着目し、すべり抵抗値 (BPN) における BWP と OWP の差分は竣工後経過年月の間の大型車通行量と関係があるとの予測を立て、両者の相関性を確認してみた。

大型車通行量については東京都建設局道路建設部が監修・発行している「交通量調査報告書」⁸⁾ (以下、「交通センサス」と称す) を参考に、各トンネルの直近における観測地点での通行量を適用した。ただし、今回該当する観測地点での交通量は昼間 12 時間のみでの観測値であるため、東京都建設局総務部が編集・発行している「道路工事設計基準」⁹⁾ (以下、「設計

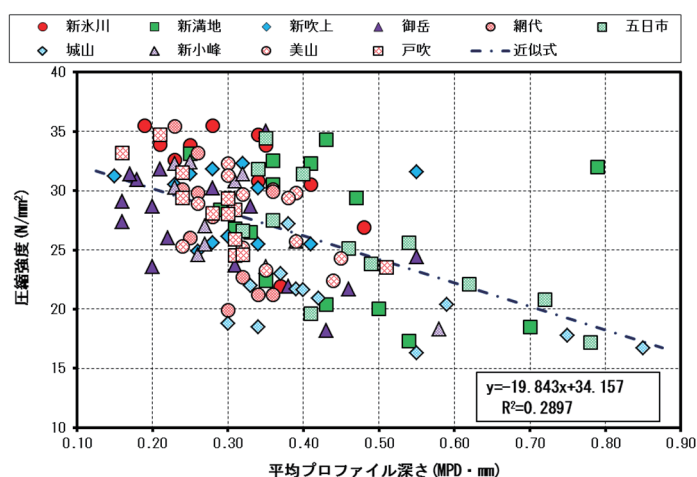


図-14 MPD と圧縮強度の相関

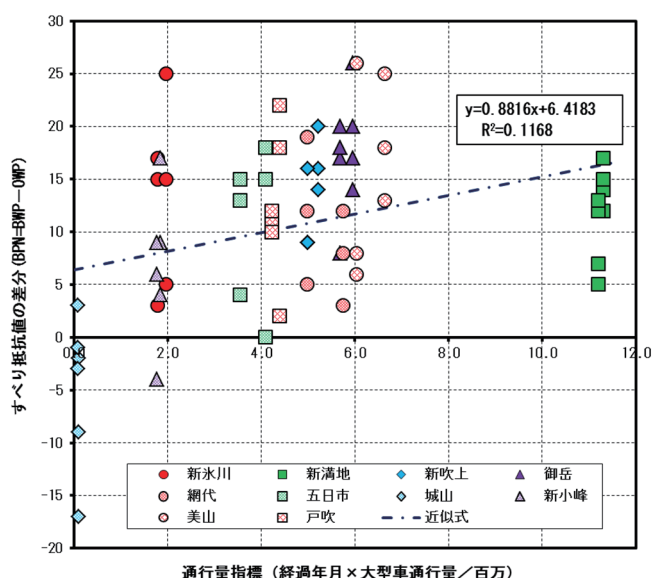


図-15 通行量指標と BPN の差分の相関

基準」と称す) を参考に昼夜率を 1.5 とし、24 時間の交通量に換算した。

竣工後経過年月の大型車通行量に関する指標は以下の式のように定義し、算出した。なお、百万で割っているのは数値が大きくなったため便宜的に行ったものである。

$$\text{通行量指標} = \text{竣工後経過年月 (月)} \times 30 (\text{日/月}) \times \text{大型車通行量 (台/日)} / 1,000,000$$

ここで定義した通行量指標と BPN における差分 (BWP - OWP) との関係は図-15 に示すとおりである。図にもあるように、個々のトンネルにおける BPN の差分はばらつきが大きく、通行量指標と BPN の差分との相関性は事前に立てた予測と異なり、ほとんど関係がないことが分かった。

6. まとめ

今回実施した測定によりトンネル内のコンクリート舗装におけるすべり抵抗性等に関しては下記のような現状が把握できた。

- ① 明り部におけるすべり抵抗性（BPN と μ ）は既往の文献¹⁾の報告のとおり、トンネル内よりも同程度か、それ以上となっている。
- ② すべり抵抗性（BPN と μ ）は車輪通過位置である OWP の方が非車輪通過位置である BWP より低い。
- ③ また、すべり抵抗性（BPN と μ ）は全体的な傾向として、上下車線とも車両の進行方向（入口・中間・出口）に従って低くなっている。
- ④ すべり抵抗性に関する BPN と μ の間には比較的高い相関性が認められた。
- ⑤ 反発度法により推定したコンクリート舗装の圧縮強度及び舗装路面での MPD のそれぞれはばらつきが大きく、また明り部も含め測定地点や位置による明確な違いはない。
- ⑥ 圧縮強度は BPN 及び MPD のそれぞれとの関係において、相関性は弱い、非常に近似した傾向を示し、BPN、あるいは MPD が低くなると圧縮強度が大きくなった。
- ⑦ BPN と MPD の両者には相関性がほとんど確認できなかった。
- ⑧ また、竣工後経過年月の間の大型車通行量と BPN における差分（BWP-OWP）にも相関性がほとんど確認できなかった。
- ⑨ BPN に対し「NEXCO 要領」では竣工直後の出来形基準として 60 以上（暫定運用）としている。

なお、これはあくまでも竣工直後の出来高基準であるが、参考として、この基準を今回の測定結果に適用してみると、明り部はすべて満たしているが、BWP で約 35%、OWP では約 80%の地点で下回っている。

- ⑩ μ に対しては特に明確な管理基準がない。ただし、「要綱」において維持修繕の要否判断の目標値とし

て 0.25（これはすべり抵抗測定車によるすべり摩擦係数）としている。

“ μ ＝すべり摩擦係数”の関係があるとしている報告⁶⁾もあることから、「要綱」の目標値を今回の測定結果に適用してみると、この目標値を下回ったのは竣工後経過年数が 30 年以上である新冰川トンネルと御岳トンネル、また新吹上、網代、戸吹の各トンネルの一部である。

- ⑪ 「ガイドブック」にはすべり抵抗測定車によるすべり摩擦係数（走行速度 60km/h）が 0.33 以下ですべり低下に対し何らかの対策を選定するようにしている。ただし、これには“維持補修行為の実施の要否を判断する管理目標値とは異なる”との注意書きがある。
- ⑫ 「NEXCO 要領」には竣工直後の新設の出来形基準としてすべり抵抗測定車によるすべり摩擦係数が 0.35 以上と示されている。ただし、これは測定車による測定速度が 80km/h における係数である。

コンクリート舗装路面におけるすべり抵抗性に対して、最新の知見を取り入れた明確な維持補修判断の管理目標値は確認できなかったものの、調査した範囲内での基準を参考までに今回の計測結果に適用してみると、すべり抵抗性がやや低いトンネルが確認・特定できた。

ただ、このような現況においても法定速度を踏まえた安全走行を遵守すれば特に支障も生じておらず、安定した走行性は確保できている。

今後は今回実施した実態把握結果を踏まえて、「要綱」等で修繕判断の目標値としているすべり抵抗測定車によるすべり摩擦係数と今回実施したような比較的簡易な方法によるすべり抵抗性との関係性を検証するとともに、すべり抵抗性を向上させる工法について室内や現道での実証実験を含めた調査・開発等を進め、実効性があり、効果的で持続性を有する工法を特定することで、コンクリート舗装路面においてさらなる快適な走行性の提供を目指したい。

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) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、平成 19 年 6 月
- 3) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：舗装施工管理要領、平成 18 年 10 月
- 4) (社)日本道路協会：道路維持修繕要綱、昭和 53 年 7 月
- 5) (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
- 6) 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
- 7) (公社)日本道路協会：コンクリート舗装ガイドブック 2016、平成 28 年 3 月
- 8) 東京都建設局道路建設部：平成 22 年度 全国道路・街路交通情報調査(道路交通センサス) 一般交通量調査 交通量調査報告書(2/2・市郡部)、平成 24 年 3 月
- 9) 東京都建設局：平成 28 年度 道路工事設計基準、平成 28 年 7 月