

# トンネル内コンクリート舗装の摩擦係数低下要素と粗面化技術による対策効果

## —ダイヤモンドグラインディング工法による改善効果—

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○井谷 雅司  
上野 千草  
大浦 正樹

トンネル内コンクリート舗装は、供用からの時間経過に伴い路面摩擦が低下する事例が見られる。本報告では、コンクリート舗装の表層成分の変化に着目し、すべり抵抗値の低下に起因する要素について考察する。また、北海道開発局管内の国道231号のトンネル内コンクリート舗装において、ダイヤモンドグラインディング工法による路面摩擦改善に関する試験施工を実施しており、その追跡調査結果についても併せて報告する。

キーワード：コンクリート，摩擦係数，化学分析，表面研削技術

### 1. はじめに

トンネル内（以下、「TN内」と称す。）のコンクリート舗装（以下、「Co舗装」と称す。）は、供用からの時間経過に伴い路面摩擦が低下する事例が見られる。この原因としては、海岸部のTN内Co舗装においては表面に結晶物質カルサイトが生成すること<sup>1)</sup>や、タイヤ走行によるすり磨きの影響で車輪走行部（OWP, IWP）のマイクロテクスチャが平滑になり、すべり抵抗値が低下すること<sup>2)</sup>など報告されている。しかしながら、内陸部のTNや車輪非通過部（BWP）においてもすべり抵抗値の低下が確認されている。また、その対策として、近年は、路面摩擦の改善効果や効果の持続性の観点から、明色（白色）アスファルト（以下、「As」と称す。）混合物による切削オーバーレイ（以下、「OL」と称す。）などが実施される例があるが、コストが高いことが課題であり、より安価で効果的な路面摩擦改善技術の検討が求められている。このような問題を解決するため、平成25年度より北海道開発局管内の国道231号のTN内Co舗装において、ダイヤモンドグラインディング（以下、「DG」と称す。）工法等の表面研削技術による路面摩擦改善に関する試験施工を実施している。また、平成27年度よりショットブラスト（以下、「SB」と称す。）の試験施工を実施している。本報告では、Co舗装の表層成分の変化に着目し、すべり抵抗値の低下に起因する要素について考察する。また、北海道開発局管内のTN内舗装の補修の実態、過年度報告した試験施工の追跡調査結果についても併せて報告する。

### 2. 北海道開発局管内のトンネル内舗装の実態

TN内Co舗装の表面は粗面化によるすべり防止を主な

目的としてほうき目仕上げが実施される（写真-1左）。しかしながら、ほうき目部はコンクリート表面のモルタルの凹凸で構成されるため耐摩耗性は低く、供用に伴いタイヤによるすり磨き等により消失していく。その結果、供用に伴い光沢を帯びたすべりやすい路面が形成される場合がある<sup>1)・2)</sup>（写真-1右）。図-1にほうき目仕上げを行ったTN内Co舗装のすべり抵抗値を長期的に観測した結果の一例を示す。供用後数年ですべり抵抗値が道路維持修繕要綱<sup>3)</sup>に示される要修繕の目標値を下回る場合があることを示すものである。

積雪寒冷地のTN内舗装がどの程度の割合で、どのような工法で補修されているのかは、管理台帳には記録されていない場合もあり把握されていないのが実態である。そのため、TN内舗装でどのような補修が施工されているかに着目し、現地における目視調査により北海道開発局管内の63本のトンネルの実態調査を行った。図-2にTN内舗装の補修の実態調査を行った結果を示す。ここから以下のことがいえる。

- ① TN内Co舗装の約半数は何らかの原因（すべり以外にも構造的損傷も含まれる）で補修されている。
- ② 補修工法はAs混合物でOLされる例が7割以上。



写真-1 左：施工直後のCo舗装のほうき目仕上げ  
右：供用に伴い光沢を帯びたCo舗装路面

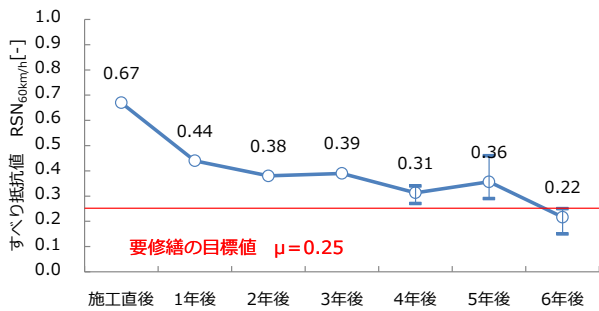


図-1 TN内Co舗装のすべり抵抗値の推移の一例

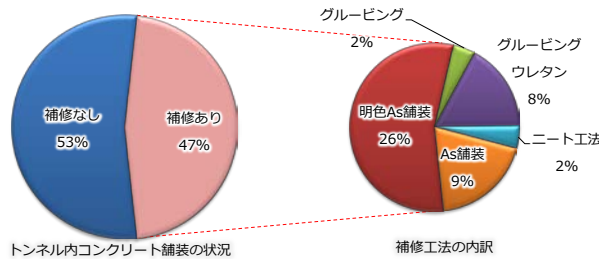


図-2 TN内Co舗装の補修の実態

### 3. 化学成分の変化に着目した摩擦低下原因分析

現地測定結果からも確認されたとおり、TN内Co舗装は、供用からの時間経過に伴い路面摩擦が低下する事例が見られる。この原因としては、海岸部のTN内Co舗装においては表面に結晶物質カルサイトが生成すること<sup>1)</sup>や、タイヤ走行によるすり磨きの影響で車輪走行部(OWP, IWP)のマイクロテクスチャが平滑になり、すべり抵抗値が低下すること<sup>2)</sup>などが報告されている。

しかしながら、内陸部のTNや車輪非通過部(BWP)においてもすべり抵抗値の低下する例が確認されておりこれらの原因だけでは説明がつかない例も見られる。

そこで、舗装の表層成分の変化に着目し、すべり抵抗値の低下に起因する要素について考察する。

#### 3.1 Co舗装の表層成分の分析について

セメントの主成分は図-3に示すとおり、主に①ケイ酸三カルシウム(エーライト:  $3CaO \cdot SiO_2$  (略称  $C_3S$ )), ②ケイ酸二カルシウム(ビーライト,  $2CaO \cdot SiO_2$  (略称  $C_2S$ )), ③アルミン酸三カルシウム( $3CaO \cdot Al_2O_3$  (略称  $C_3A$ ))であり<sup>3)</sup>、これらを構成する主成分は、カルシウム(Ca)、シリカ(Si)、アルミニウム(Al)である。よって、表面成分(二次生成物: 環境により変化した成分)と舗装内部(一次生成物: 環境影響を受けていない成分)から採取した粉末試料を酸抽出処理し、不溶解残分を除去(骨材を除去)した後、溶出した成分からCa, Si, Alの測定を行い、構成元素の含有量(重量比)を測定した。測定に使用した試料は、Co舗装から以下のとおり採取したものをを用いた(写真-2)。

① 表層成分: Co表層を薄くケレンで削り採取した粉末試料

② 舗装内部成分: 無水コア( $\phi 50mm \times H 10cm$ )の下部から採取した粉末試料

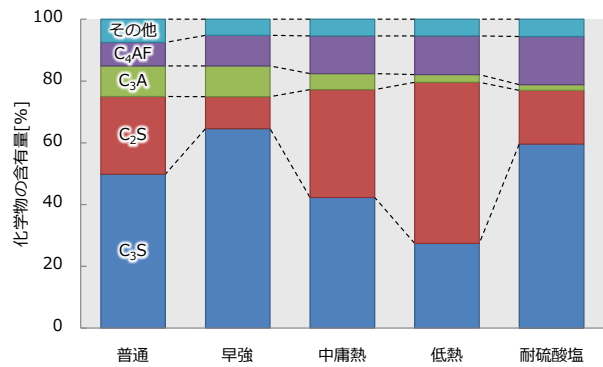


図-3 各ポルトランドセメント中のクリンカー構成化学物の構成比率<sup>3)</sup>



写真-2 試料採取状況

#### 3.2 表面成分の変化

図-4に表面部及び舗装内部から採取した試料の主成分分析を行った結果を示す。舗装内部の主成分(黄色網掛け)は明かり部、海岸部TN内、内陸部TN内、いずれの箇所においても、主成分の重量比率は同程度であり、セメントペースト部が同様の成分で構成されており変質作用を受けていないことが示唆される。一方、表面成分は、明かり部においては内部に比べ、カルシウムの減少が顕著である。文献<sup>2)</sup>で示される雨水によるカルシウム分の溶脱の影響と推察される。また、TN内においては、明かり部で見られるようなカルシウム分の顕著な減少は見られない。

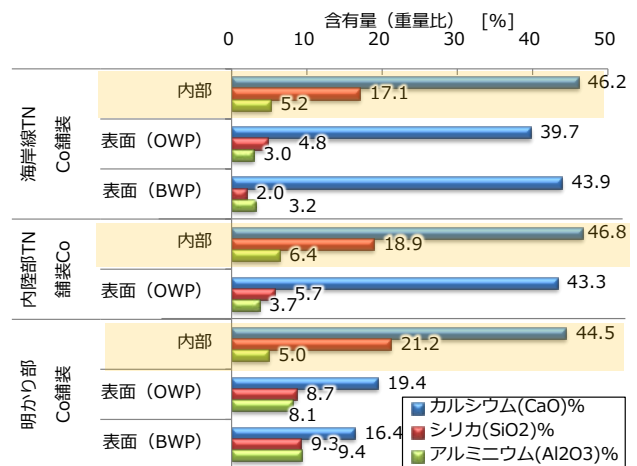


図-4 Co舗装表面・内部の主成分分析結果

### 3. 3 有機態炭素、無機態炭素の測定

すべり抵抗が低下している TN では路面表面に光沢部分が観察される場合が見られる。これが、二次生成したカルサイト（炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$ ）<sup>1)</sup> であれば表面部分における無機態炭素（炭素）の量は増加しており、また、路面表面光沢部分が排気ガス成分や油脂等であるならば、有機態炭素量が増加することが想定される。図-5 に表面及び内部の粉末試料の有機態炭素と無機態炭素の濃度比較図を示す。すべての地点において舗装内部の有機態炭素、無機態炭素の濃度は低い。これは、打設時のセメントペースト組成中に有機態炭素と無機態炭素が少ないことを意味している。表面部は、内陸部 TN、海岸部 TN いずれにおいても無機態炭素の増加がみられ、TN 内では特に無機態炭素の増加が顕著である。明かり部においては TN 内に比べて無機態炭素の増加が少なく、有機態炭素が増加していることが特徴である。無機態炭素、有機態炭素がいずれも、供用後に増加したことが伺える。

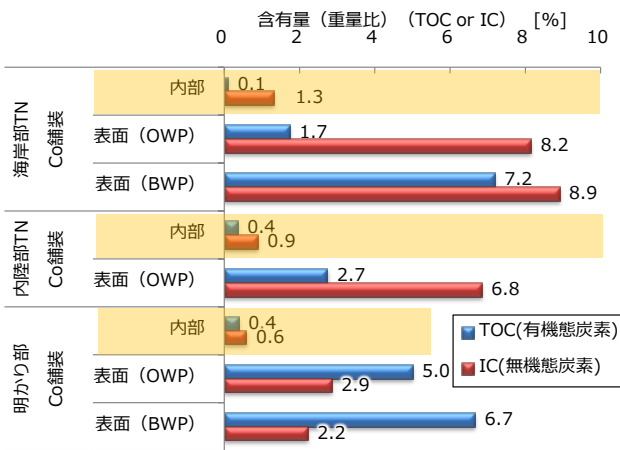


図-5 表層、内部の TOC, IC 濃度の比較

### 3. 4 X線回析試験による無機態炭素の分析

表面に生成している結晶物質が何であるか検証するため、粉末 X 線回析試験を実施した。試験結果を表-1 に示す。粉末 X 線回析結果から方解石（カルサイト）が TN 内 Co 舗装の OWP, BWP に検出された。明かり部の Co 舗装からは微量しか検出されていない。

表-1 X線回析による結晶物質同定結果

場所	部位	鉱物名								
		骨材由来							その他	
		Mi	Chl	Tri	Qz	F	Am	Px	Cal	Dol
内陸部TN	内部	-	-	-	+	++	-	-	-	-
	表面OWP	-	-	-	++	+	tr	-	++	-
	表面BWP	-	-	++	+++	+++	-	-	-	-
海岸部TN	内部	-	-	++	+++	+++	-	-	-	-
	表面OWP	tr	+	+	+++	++	-	-	+++	-
	表面BWP	tr	tr	+	+++	++	-	-	+++	tr
明かり部	内部	-	tr	-	+++	++	-	-	-	-
	表面OWP	tr	+	-	+++	++	-	-	-	-
	表面BWP	tr	+	-	+++	++	-	-	-	-

※凡例 ++: 多量 ++: 中量 +: 少量 tr: 微量 -: 不検出

### 3. 5 光学顕微鏡による表面物質の観察

X 線回析にて確認された方解石（カルサイト）の生成状況を観察するため、現場採取した無水コアを光学顕微鏡により非同軸落射法（斜め上方から光源を照射）にて拡大率 100 倍で表面物質の撮影を行った。この手法は目視実体に則した観測ができるのが特徴である。撮影された舗装表面の状況を写真-3 に示す。TN 内の舗装表面には光沢物質が観察され、天然方解石との目視比較や X 線回析等の分析結果等により光沢物質はカルサイトと推察される。カルサイト結晶は黒い汚れのようなものを内包しつつ、骨材の表面に覆いかぶさるように生成している。また、明かり部にはこのような光沢物質の生成は観測されない。骨材表面に生成するカルサイトが、すべり抵抗値を低下させる明確な因果関係は明らかにはされていないが、石灰石や大理石のような摩擦が低下しやすい鉱物がカルサイトを主成分とする鉱物であることを勘案すると、すべり抵抗値の低下に影響を与える一要因となることが推察される。

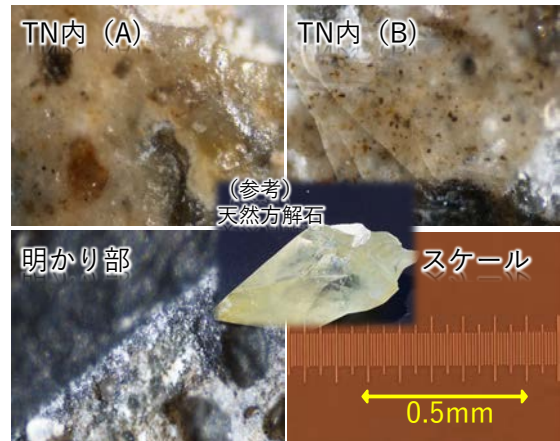


写真-3 Co 舗装の光学顕微鏡撮影結果

### 3. 6 分析箇所ですべり抵抗値

図-6 に表層成分箇所のすべり抵抗値  $\text{RSN}_{60\text{km/h}}$  を示す。カルサイトが検出された TN 内においてはすべり抵抗値が低く、道路維持修繕要綱<sup>9)</sup> に示される修繕の目安値  $\mu=0.25$  を下回っている。一方、カルサイトの検出が微量であった明かり部においてはすべり抵抗値の低下が見られないことがわかる。カルサイトの存在が、すべり抵抗値の低下に影響を与えている可能性が示唆される。

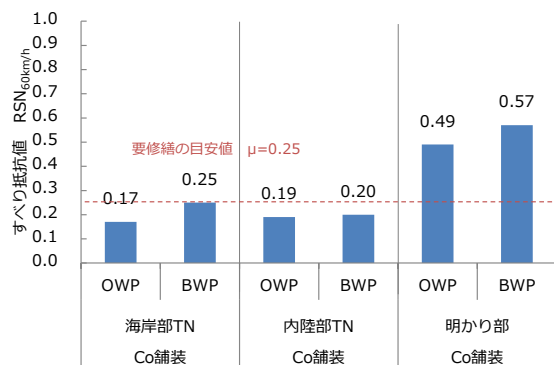


図-6 分析箇所ですべり抵抗値

#### 4. 表面研削技術による摩擦改善効果について

TN内Co舗装のすべり抵抗値回復には、表面のすべりやすい成分（カルサイト等）を除去し、新たなテクスチャを形成する表面研削技術による対策が有効である。

既設路面に対する表面研削技術にはSB工法（※新設路面に適用する骨材露出工法とは異なる技術であることに注意）やDG工法が比較的安価に実施することができる技術としてあげられる。しかし、これらの技術の効果や持続性が定量的に検証された例は少ない。そこで、現場における試験施工により効果の検証を行った。

##### 4. 1 ダイヤモンドグラインディング工法の試験施工

平成25年度に国道231号の海岸線沿いのTN内Co舗装にて国内で初めてDG工法によるすべり抵抗値改善に関する試験施工を実施した（※試験施工の詳細については、過年度報告<sup>6)</sup>を参照のこと）。DG工法は、数mmピッチで組み合わせたダイヤモンドブレードにより、Co舗装表面を数mmの薄層で研削する工法である。

DG工法は、米国においては、Co舗装の表面のリフレッシュ工法として20年近い実績のある一般的な工法であるが、日本においては、比較的新しい工法であり施工事例も少ないが、主な効果として、コンクリート表面のきめを増大させ路面摩擦を改善する効果があるが、それ以外に雨水の表面排水性も向上しドロプレーニング現象の抑制や平坦性の改善による走行性の向上、表面形状の修復などに使用される。

本試験施工で使用したダイヤモンドブレードは、3mm幅のブレードを2mmピッチに180枚組み合わせたもの（幅1m）を使用した。また、路面摩擦の持続性及び排水機能の強化等を目的として5cmピッチに4mm突起した大きめのブレードを配置し、縦グルーピングが切れる形状とした。DG施工後の表面の仕上がり状況を写真-4に示す。

また、DG工法の効果の持続性について、施工から本年度までの3年間のすべり抵抗値（DFテストにて測定）の推移を図-7に示す。また、路面状況の推移を写真-5に示す。DG施工直後においてはすべり抵抗値は大きく改善するが、1年経過後にはある程度低下する。2年目以降においては、すべり抵抗値の平均値はほぼ横ばいで推移しており、安定している。道路維持修繕要綱<sup>9)</sup>では“交通量の多い一般道路”においてはすべり摩擦係数が0.25を下回ると維持修繕が必要とされる目安とされているが、それを下回る箇所は見られず、安全な走行に問題ないレベルで推移しているといえる。また、DG工法を適用したTNでは、スリップ事故は発生しておらず、すべり対策に有効な技術と考えられる。



写真-4 DG工法施工後の表面の仕上がり

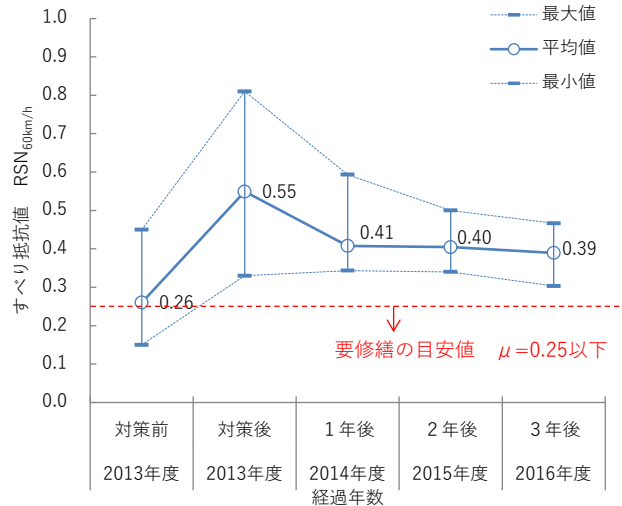


図-7 DG対策後のすべり抵抗値の推移

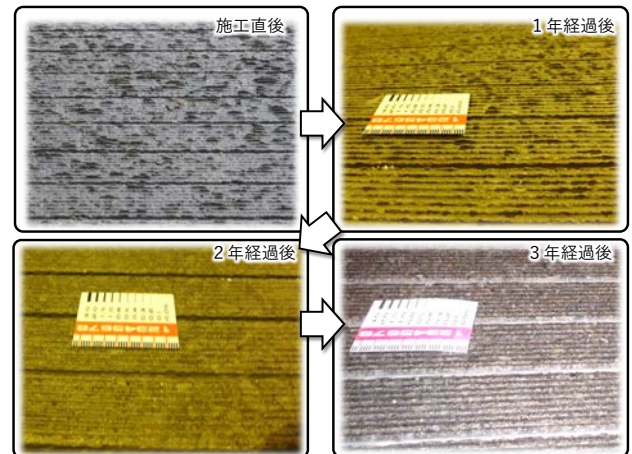


写真-5 DG工法の路面テクスチャの変化

##### 4. 2 表面研削方法の違いと摩擦改善効果の検証

先にも述べたとおり、表面研削技術にはDG工法及びSB工法が安価な技術として有効と考えられるが、これらの技術の効果や持続性が比較検証された例はない。そこで、平成27年度に北海道開発局管内のTNにおいて、SB工法、DG工法による対策を行い効果の検証を行った。また、試験施工実施にあたり、SB工法は文献<sup>2)</sup>により有効性が検証されているブラスト鉄玉を2.0mmに改良したものを使用した（従来は1.3mmが標準）。SB工法の仕上がり路面を写真-6に示す。既設路面に見られる黒い光沢物質は除去され、骨材による凹凸が形成される。DG工区は、効果や持続性等に変化が見られるか検証するためダイヤモンドブレードのピッチを2.0mmと

2.35mmに変更した2つの工区を設定した。試験施工工区は同一TN内に連続した3工区とし各々100mずつ施工を行いすべり抵抗値の測定を行った。すべり抵抗値の推移を図-8に示す。いずれの工法も対策によりすべり抵抗値は大きく回復し、有効な対策効果が得られているといえる。すべり抵抗値は、いずれの工法も供用に伴い低下する傾向が見られる。DG工法の方がSB工法と比較し、すべり抵抗値は若干大きく推移しているが、大きな差ではなく、ほぼ同程度と考えられる。供用後1年目であり、明確な差は発生していないが、初期対策効果は明らかであり、今後は、長期的な路面性状の推移を観察し、効果の持続性等を検証していく必要がある。

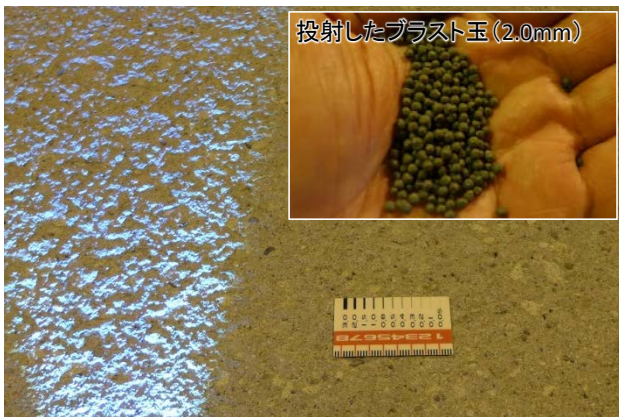


写真-6 ショットブラスト実施後の路面状況

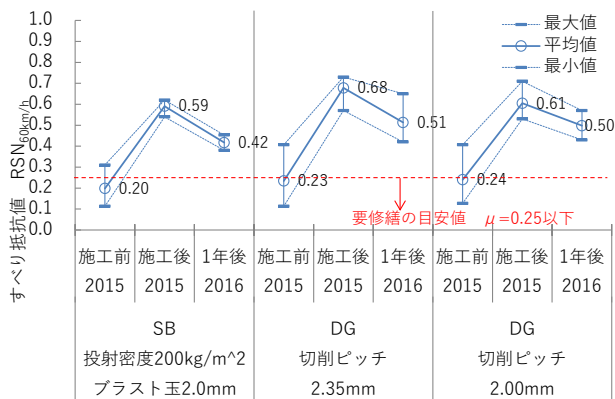


図-8 表層研削方法の違いとすべり抵抗値の推移

## 5. 結論

一連の検討より以下のことが判明した。

- ① TN内Co舗装は、海岸部のみならず、内陸部のTNにおいてもCo舗装表面にカルサイトが生成される場合がある。
- ② 車輪通過部（OWP, IWP）のみならず、タイヤによる摩耗の影響を受けにくい非通過部（BWP）においても、すべり抵抗値が低下する場合があり、カルサイト生成による影響が原因の1つと考えられる。
- ③ TN内舗装のすべり抵抗値回復には、表面附着物を除去する表面研削技術が有効な手法となり得る。

- ④ DG工法施工後は湿潤路面のすべり抵抗値は改善され、3年経過後においても $\mu = 0.25$ を上回るすべり抵抗値が確保されることを確認された。
- ⑤ SB工法、DG工法ともに対策後はすべり抵抗値は大きく改善され、1年経過後においても $\mu = 0.25$ を上回るすべり抵抗値が確保されることを確認された。

## 6. おわりに

TN内Co舗装の路面摩擦の改善に対して、有効な解決策を検討している。TN内Co舗装のすべり抵抗値の回復には、表層成分の除去（ショットブラストやダイヤモンドグラインディング等）が有効であることが判明した。

また、過年度報告<sup>8)</sup>に示すように、DG工法は凍結路面対策としても有効であることがわかっており、積雪寒冷地のTN内Co舗装の対策として有効であると考えられる。

DG工法は平成25年にTN内Co舗装で国内で初めて採用されて以来、施工実績が増加しこれまで10本の道内TNで採用されており、また、道外の実績も増えつつある。今後、これまでの知見を現場技術者に役立つ技術資料として取りまとめる予定である。また、既設路面に対するSB工法も有効な対策となる可能性があり、今後も継続し耐久性や適用条件を整理し、取りまとめていく予定である。

最後に、本調査にご協力を頂いた国土交通省北海道開発局の関係各位に感謝の意を表す。

## 【参考文献】

- 1) 森ら：海岸付近のコンクリート舗装のすべり抵抗低下の要因とその対策について、北海道開発局技術研究発表会発表概要集 第43巻, pp.55-60, 2000
- 2) 中村ら, 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 E1 (舗装工学), Vol.70, No.3, 2015
- 3) コンクリート技術の要点'06, 日本コンクリート工学協会, p5, 2006
- 4) 森一宏, 高橋守人：海岸付近のコンクリート舗装のすべり抵抗の要因とその対策について、北海道開発局技術研究発表会概要集 第43巻, 2000
- 5) 中村和博, 松本大二郎：道路構造によるコンクリート舗装のすべり特性, 第68回土木学会年次学術講演会, 2013
- 6) 井谷雅司, 磯田卓也, 丸山記美雄, 熊谷政行：ダイヤモンドグラインディング工法によるトンネル内コンクリート舗装の路面摩擦改善に関する試験施工報告, 第69回土木学会年次学術講演会, 2014
- 7) 井谷雅司, 佐藤秀人, 東英俊：トンネル内コンクリート舗装の補修実態と対策技術について, 平成26年度北海道開発局技術研究発表会, 2015.2
- 8) 井谷雅司, 上野千草, 磯田卓也, 木村孝司：粗面化工法によるトンネル内コンクリート舗装の湿潤路面・凍結路面の摩擦抵抗改善効果について, 平成27年度北海道開発局技術研究発表会, 2016.2
- 9) 道路維持修繕要綱, (社)日本道路協会, S53.7