

粘着シートを用いた トンネル内装工の付着性能評価法の提案

鈴木 俊雄¹・八木 弘²・道上 剛幸³・林 承燦⁴・木村 定雄⁵

¹正会員 中日本高速道路株式会社 (〒914-0014 敦賀市井川17号字稲荷藪8-1)
E-mail: t.suzuki.an@c-nexco.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 中日本高速道路株式会社 (〒460-0003 名古屋市中区錦二丁目18-19)
E-mail: h.yagi.aa@c-nexco.co.jp

³正会員 株式会社ケー・エフ・シー技術研究所 (〒347-0838 加須市大桑1-19)
E-mail: michigami.takayuki@kfc-net.co.jp

⁴正会員 株式会社デーロス・ジャパン (〒921-8005 金沢市間明町2-70)
E-mail: sclim@deros-japan.co.jp

⁵正会員 金沢工業大学教授 工学部環境土木工学科 (〒924-0838 白山市八東穂3-1)
E-mail: s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

高速道路トンネルでは、通行車両の視環境の確保、視線誘導および照明効果の向上を目的として内装工が設置されている。従来、この内装工にはタイル直張り工法、パネル浮かし張り工法および塗装が適用されてきた。これまで設置されている内装工をみると、タイルのはく離、パネルの破損、固定金具の腐食および塗膜のはがれ等の変状がみられる。そこで、筆者らはタイルやパネル等を主材とする内装工に代替するものとして粘着シートを用いた内装シート工の適用を考えた。本稿は粘着シートの適用にあたり、重要な基本性能の一つである覆工コンクリートとの付着性を引きはがし粘着力としてとらえ、その基本性能を確認するための試験法と現場適用性について検討したものである。

Key Words : tunnel interior system, deterioration of tunnel lining, interior sheet, resistance of peeling-off

1. はじめに

高速道路トンネルには、通行車両の視環境の確保や視線誘導および照明効果の向上を目的として、トンネル内装工が設置されている。トンネル内装工はトンネル壁面の輝度の保持、前方車両の視認性や走行の快適性を確保し、構造上の強度はもとより、耐火性の他、耐蝕性および耐候性等の耐久性が求められる。新設トンネルにおける内装工の施工法はタイル直張り工法を基本とされている。しかし、既設トンネルにおいて大規模に内装工を取り替える場合においては、覆工表面の凹凸や湧水状態等の現場条件を加味した上、施工性、経済性を勘案して内装材料、施工法を検討するものとされており¹⁾、これまでタイルを用いた直張り、繊維強化セメント板や金属板を用いた浮かし張りが主に採用されてきた。

北陸地域における高速道路トンネルの変状部位別の割合でみると、図-1に示すとおり、約6割が内装板の変状

であるとの報告もされており²⁾、特に直張りタイルのはがれ、浮かし張り取付金具の腐食等の事象が見受けられる。

他方、浮かし張り内装工の落下事象の発生報告^{3,4)}もあり、第三者被害のリスク低減が強く望まれていることから、近年、塗装を用いた内装工のニーズも高まっているが、長期耐久性等の課題がある。

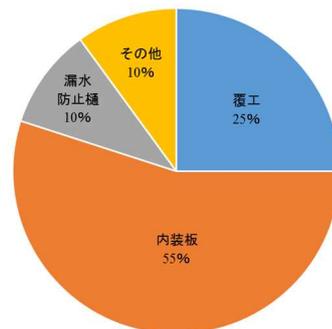


図-1 高速道路トンネルの変状部位別の割合

そこで、筆者らは第三者被害リスクの低減および長期耐久性確保を目的とした新たな材料に着目し、粘着シートを用いた内装工（以下、粘着シート工）の適用の検討を行った⁵⁾。粘着剤はコンクリート等の多孔質を被着体とした場合、接着面積が少なくなるため、適用が難しいものの、粘着シートは端部から剥がれることで早期に変状確認が可能であること、また、他の材料と同等に汚れが付着しにくく、汚れが付着した場合でも、水洗いでの洗浄が可能である等の利点があり、通行車両への安全性や維持管理性の向上が大幅に期待できる。しかしながら、粘着シートを覆工コンクリート表面に貼付した実績はなく、内装工として粘着シートを適用する際の規格等も存在しない。本論文では、粘着シート工の重要な基本性能の一つである覆工コンクリートへの付着性を引きはがし粘着力としてとらえ、その基本性能を確認するための材料試験法と現場適用に当たっての性能評価のための試験法（施工管理基準）について提案し、現場適用性について検討したものである。

2. 内装工の種類とその課題

(1) 現行の内装工の種類とその課題

現在まで、主に用いられているトンネル内装工の施工法、材種、採用実績および課題を表-1に示す。表-1はNEXCO中日本金沢支社が管轄する高速道路トンネルの採用実績およびこれまで採用されてきた内装工の課題を列挙している⁶⁾。

(2) 塗装材を用いたトンネル内装工

近年では内装材の落下による第三者被害のリスク低減のため、従来工法に代わる新たな工法として、塗装を用いた内装工が現場で採用されている（写真-5）。しかし、道路トンネル内は結露の発生が多く、結露水がコンクリート表面の未処理のピンホール付近への浸透や維持管理に伴う水洗いによる清掃を実施した場合、塗膜剥離の原因となり塗装耐久年数に大きく影響されるとの報告もある⁷⁾⁸⁾。また、近年においては耐火性があり、塗膜硬度の高い無機質顔料を用いた材料が各社から開発され、実トンネルで施工されているものの、ライフサイクルコストを踏まえた長期的な耐久性については検証段階である。

表-1 内装工の実績と課題

施工法	内装板の材種	採用実績	課題 ⁶⁾
タイル直張り	タイル	230,555m ²	・施工条件がよくないと将来的にタイルの浮き・はく離が発生しやすい ・内装工の更新が困難
パネル直張り	繊維強化セメント板	—	・パネル背面の覆工の状態が困難 ・トンネル内の環境作用による取付金具の腐食が多い
	金属板	—	
	タイルパネル	179m ²	
	その他	—	
パネル浮かし張り	繊維強化セメント板	11,437m ²	・パネル背面の覆工状態確認が困難 ・トンネル内の環境作用による取付金具の腐食が多い
	金属板	41,456m ²	
	タイルパネル	—	
	その他	17,843m ²	



写真-1 タイル直張りの変状事例⁴⁾



写真-2 パネル浮かし張り（金具）の変状事例



写真-3 パネル浮かし張りの落下事例³⁾



写真-4 内装塗装の変状事例



写真-5 塗装材を用いた内装工の施工事例

(3) 粘着シートとトンネル内装工への適用課題

粘着シートとは図-2に示すとおり、粘着剤と基材（シート）を一体成形させたものである。粘着シートはセパレーターをはがして貼付するという簡易施工が可能であり、また、シート表面に汚れが付着しにくく、水洗いによる洗浄が可能である等の利点がある。粘着シートをトンネル内装工に適用する場合の断面構成は、覆工コンクリートにプライマーを塗布し、粘着シートを貼付する構造とした（図-3）。

粘着シートの粘着とは「接着の一種で、特徴として水、溶剤、熱などを使用せず、常温で短時間、わずかな圧力を加え、接着すること」と定義されている。液体で塗れ、固体で接着するのが接着剤であり、これに対し、粘着剤は貼り合わせるときもゲル状の柔らかい個体で、そのままの状態では被着体に塗れ、その後も態の変化を起こさずはく離に抵抗するという特徴があるとされている⁹⁾。

粘着剤は半導体、ディスプレイ、光学機器、医療、自動車、情報関連等、様々な分野で使用されているが、粘着シートをトンネル内装工として、覆工コンクリートに貼付した実績や規格は存在しない。また、内装工として粘着シートを適用する場合の最大の課題は引きはがし粘着力の評価であると捉えているが、粘着シートの性能を把握するための試験法や引きはがし特性を検討した事例^{10),11)}は確認できるものの、これらの検討は被着体をSUSプレートとしており、被着体をコンクリートとした場合の基本性能を評価する試験法の検討および現場適用性について検討が必要である。

3. 粘着シート工の要求性能と試験法

(1) 粘着シート工の要求性能および性能評価法

粘着シート工の要求性能を整理し、その性能を評価する方法と指標を整理したものを表-2に示す。NEXCO設計要領第3集(4)トンネル内装工¹²⁾に示される内装工の具備すべき条件をトンネル内装工の要求性能と解釈し、粘着シート工の要求性能のうち、もっとも重要な性能評価項目を引きはがし粘着力であると考え、長期に亘り、粘着力を発揮することについては、引きはがし粘着力で評価し、また、雨水、凍結防止剤を含んだ路面水及び湧水については各環境作用試験後の引きはがし粘着力により評価するものとした。

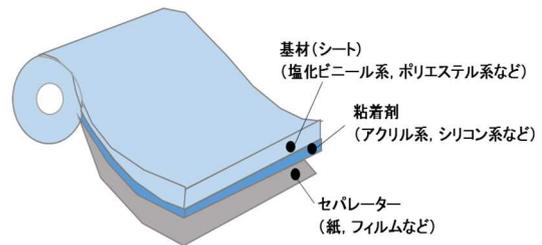


図-2 粘着シートの構成



図-3 粘着シート工の断面構成

表-2 粘着シート工の要求性能と評価法

トンネル内装工の要求性能 ¹²⁾	粘着シート工の要求性能	性能評価法とその指標	
構造上、所要の強度を有し、耐蝕、耐候性、美観に優れていること	長期に亘り、粘着力を発揮すること	引きはがし粘着力	本研究で検討
	雨水、凍結防止剤を含んだ路面水及び湧水により、粘着シートに劣化が生じないこと	耐液体性 引きはがし粘着力	JIS K 5600 ※引きはがし粘着力は本研究で検討
	紫外線により基材表面に変色等の劣化が生じないこと	耐候性	JIS K 5600Iに準拠
凍結融解による材質劣化が少ないものであること	凍結融解により、粘着シートの劣化が生じないこと	凍結融解抵抗性 引きはがし粘着力	JIS A 1435に準拠 ※引きはがし粘着力は本研究で検討
耐火性に優れ、有害ガスが発生しないこと	延燃性・自己消火性に優れ、有害ガスが発生しないこと	延燃性 自己消火性	NEXCO試験法738 ¹³⁾
		発生ガスの安全性	建築基準法に定める防火材料の性能要求基準
表面は煤煙等の汚れが付着しにくく、かつ付着した清掃等によって容易に除去でき、表面反射率は長期的に良好であること	表面は煤煙等の汚れが付着しにくく、清掃によって容易に除去でき、表面反射率は長期的に良好であること	反射率耐久性	NEXCO試験法732 ¹⁴⁾
自動車等の接触があった場合でも、内装構造の破壊により走行車への被害を引き起こす恐れが少ないもの	自動車等の接触があった場合でも、粘着シートの損傷により走行車への被害を引き起こす恐れが少ないこと	-	-
限られた内空断面を有効に利用できる形状を保持するものであること	限られた内空断面を有効に利用できる形状を保持するものであること	-	-
効率的な維持管理ができるものであること	清掃が容易であり、目視点検および補修が可能であること	-	-

(2) 引きはがし粘着力の試験法の検討

一般的な粘着シートの引きはがし粘着力を評価する試験法として、JIS Z 0237が考えられ、被着体はJIS G 4305に規定するSUS304鋼板とされている。しかし、今回の粘着シート工の被着体は覆工コンクリートとしているため、直接的にこの試験法を適用することができない。そのため、被着体をプライマーにより下地処理されたコンクリート板とした場合の引きはがし粘着力を評価する新たな試験法の検討をおこなった。試験法の検討に向けて、JIS Z 0237で規定されている項目および内容を整理し、新たな試験法を整理したものを表-3に示す。被着体は無筋覆工コンクリートを想定し、JIS A 5371に基づく、無筋コンクリート平板とした。既往の研究^{10,11)}で引きはがし粘着力は引きはがす時の角度や速度に影響されるとの報告もあり、本検討においては、試験片の幅、角度、試験機の運転速度およびデータの計測区間に着目して検討することとした。

表-3 既存の試験法と新たな試験法(案)

項目	JIS Z 0237の規定内容	新たな試験を提案するための検証事項	
試験片	幅	24±0.5mm	20±0.5mm, 24±0.5mm, 30±0.5mm
	長さ	約300mm	250mm
被着体	SUS304鋼板	JIS A 5371 コンクリート平板	
貼付方法	圧着方法	質量2000gの圧着ローラーで2往復	同左
	圧着速度	10±0.5mm/sec	同左
	圧着後の放置時間	圧着後、1分以内 圧着後の放置時間は目的によって意図的に長い時間を選択してもよい	24時間後
試験装置	引張試験装置	JIS B 7721に規定する引張試験機	変位制御可能な引張試験機
	読み取り間隔	1mm以下の間隔で読み取る自動式の装置であることが望ましい	同左
引きはがし方法	タブの形成	1端を粘着剤と粘着剤が付くように12mm折る	同左
	角度	90°, 180°	90°, 180°
	試験機の運転速度	5±0.2mm/s	3mm/sec, 5mm/sec, 7mm/sec
データの計測区間	25~75mmの50mm間の平均値		実験結果により検討

表-4 プライマーの仕様

粘着シート種別	プライマーの種類	混合比		塗布量
		主剤	硬化剤	
粘着シートA	2液混合エポキシ樹脂A	100	43	70g/m ²
粘着シートB	2液混合エポキシ樹脂B	2	1	75g/m ²

表-5 粘着シートの仕様

シート種別	シート層			粘着剤層		合計層厚(mm)
	材質	層厚(mm)	弾性係数(N/mm ²)	材質	層厚(mm)	
粘着シートA	塩化ビニール系	0.25	2.1×10 ³	アクリル系	0.03	0.28
粘着シートB	ポリエステル系	0.05	6.2×10 ²	アクリル系	0.3	0.35

4. 試験法の検討に向けた確認実験

(1) 実験概要

本実験は、覆工コンクリートをモデル化したコンクリート平板をプライマーにより下地処理を行い、粘着シートを貼付した供試体を用いて、引きはがし粘着力を評価するための試験法の確立に向けた確認実験を行った。

a) 供試体の作製

供試体の概要を写真-6に示す。覆工コンクリートをモデル化したコンクリート平板(300×300×60mm)の表面をサンドペーパー(#80)のディスクサンダーを用い、約60秒間研磨した。次に研磨した表面を水洗いし、その後、気中養生(温度23°C±2°C, 湿度65%±10%)で48時間の自然乾燥を施して、高周波容量式水分計を用いて、1つのコンクリート平板あたり5か所測定したが、その平均表面水分率は5±2%であった。

下地処理は、表-4に示す二液混合エポキシ樹脂系のプライマーを用いて、刷毛塗りの一層を施した。その後、研磨した表面の水洗い後と同様な条件下で48時間の気中養生後、あらかじめ短冊状に切断した粘着シートを実施工と考え、圧着ローラー(質量2000g)を用いて2往復(転圧速度10±0.5mm/sec)の転圧処理を施した。粘着シートの寸法は長さ250mmとし、うち100mmはあらかじめ供試体表面に裏紙を設置して、引きはがし実験時の把持部とし、引きはがし実験は150mm区間で実施するものとした。

本実験で用いた粘着シートの仕様を表-5に示す。粘着シートは、一般的に製品化されているシート層の材質が塩化ビニール系とポリエステル系にそれぞれアクリル系の粘着剤を重ね合わせた2種類とし、粘着シートの合計層厚は粘着シートBの方が厚いものとなり、粘着シートAはシート層が厚く、粘着シートBは粘着剤層が厚いという特徴がある。

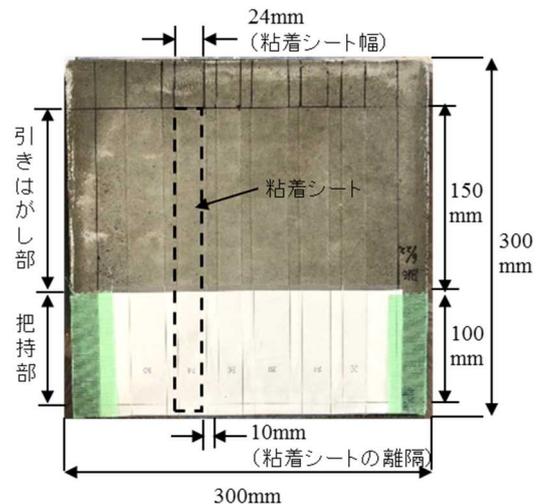


写真-6 引きはがし試験の供試体

b) 実験方法

引きはがし試験機は JIS Z 7721 に規定されている引張試験機 (写真-7) を用い、粘着力の測定は、デジタルフォースゲージを使用した (写真-7, 表-6) . 引きはがし実験の状況を写真-8 に示す. 引きはがしはあらかじめ指定した角度に供試体をセットし、把持長 100mm の内、12mm 折り曲げタブを形成し、タブをフィルムチャックにより固定後、引きはがしを実施した. あらかじめ設定した角度及び速度は一定とし、引きはがし区間長である 150mm の引きはがしを実施した. なお、サンプリング速度は 0.0005 秒として、変位制御により引きはがし荷重を計測することとした.



写真-7 試験機およびデータ測定装置

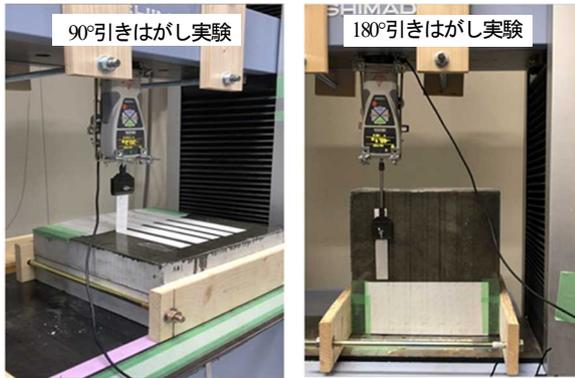


写真-8 引きはがし実験状況

表-6 デジタルフォースゲージの仕様

型式	ZTAシリーズ
精度	±0.2%F.S±1digit
測定単位	N(mN,kN)
荷重表示	符号付4桁 (有機EL)
表示更新	16回/秒
サンプリング速度	最大2000回/秒
バッテリー動作時間	8時間
オーバーロード値	定格約200%
使用環境	温度: 0-40°C 湿度: 20-80%RH

c) 実験ケース

引きはがし基本性能の把握、粘着シート幅の影響および引きはがし速度および角度の影響について、検討を行った.

引きはがし基本性能の把握については、JIS Z 0237 で規定されている、粘着シート幅 24±0.5mm, 引きはがし速度 5mm/s, 引きはがし角度 90°, 180°を適用し、引きはがしを行い、引きはがし基本性能の把握および4つの区間 (0~25mm, 25~75mm, 75~125mm, 125~150mm) 毎に引きはがし粘着力の平均値と標準偏差を算出し、データ計測区間の検討を行った (表-7) .

粘着シート幅の影響については、JIS Z 0237によると粘着シート幅は 24±0.5mm と規定されている. 本検討では、表-8 に示すとおり、20±0.5mm, 24±0.5mm, 30±0.5mm の粘着シート幅を設定し、粘着シート幅が引きはがし粘着力に及ぼす影響を検討した. なお、引きはがし速度 5mm/s, 引きはがし角度 90°, 180°を適用した (表-8) .

引きはがし速度および角度の影響については、JIS Z 0237 では引きはがし速度すなわち試験機の運転速度は 5mm/sec, 引きはがし角度は 90°または 180°と規定されている. 引きはがし速度を 3mm/sec, 5mm/sec, 7mm/sec とし、引きはがし角度は 90°, 180° と設定し、引きはがし速度および角度が引きはがし粘着力に及ぼす影響を検討した. なお、粘着シート幅は 24±0.5mm を適用した (表-9) .

表-7 引きはがし基本性能の把握 実験ケース

粘着シートの種別	引きはがし角度	引きはがし速度 (mm/sec)	粘着シート幅 (mm)	試験片数
粘着シートA および 粘着シートB	90°	5	24±0.5	各3
	180°		24±0.5	

表-8 粘着シート幅の影響 実験ケース

粘着シートの種別	引きはがし角度	引きはがし速度 (mm/sec)	粘着シート幅 (mm)	試験片数
粘着シートA および 粘着シートB	90°	5	20±0.5	各3
			24±0.5	
	180°		30±0.5	
			20±0.5	

表-9 引きはがし速度および角度の影響 実験ケース

粘着シートの種別	引きはがし角度	粘着シート幅 (mm)	引きはがし速度 (mm/sec)	試験片数
粘着シートA および 粘着シートB	90°	24±0.5	3	各3
			5	
			7	
	180°		3	
			5	
			7	

(2) 実験結果とその考察

引きはがし基本性能の把握を行うため、粘着シート A および B の引きはがし粘着力と引きはがし長さの関係について整理したものを図-4,5 に示し、各シートを引きはがした粘着面の状態の 90°, 180° の一例を図-4,5 に示す。粘着シート A および B とも引きはがし角度に関係なく、引きはがし開始から 10mm 程度までは、粘着剤層とプライマー層ではく離し、引きはがし粘着力が高い傾向を示した。一方、10mm 以降については、粘着剤層とシート層ではく離した状態となり、引きはがし開始から 10mm 程度の粘着力と比較すると約 5 割低下し、引きはがし粘着力は安定して推移した。また、粘着シート A の引きはがし角度 90° の一部の供試体については、プライマーとコンクリート層のはく離が確認され、その影響から引きはがし粘着力が低下したものが一部確認された。

上記結果より、引きはがし粘着力は、はく離界面が影響することが考えられることから、はく離モードを図-6 に定義した⁹⁾。はく離モードは 3 つのモードに分類することができ、シート層と粘着剤層間のはく離 (B はく離)、粘着剤層とプライマー層間のはく離 (D はく離)、プライマー層とコンクリート層のはく離 (F はく離) と定義した。各シートとも B はく離のモード区間の粘着力が安定した理由として、各層間の中で、シート層と粘着剤層は工場で製造 (加工) されることから粘着力が安定したものであると考えられる。

次にデータ計測区間について検討した。JIS Z 0237 では測定開始後、最初の 25mm の長さの測定値は無視し、その後、試験板から引きはがされた 50mm の長さの粘着力測定値を平均し、引きはがし粘着力として使用すると規定されているものの、本実験においてその妥当性を検討した。表-10 に示す平均粘着力は、シート種別および角度別に各引きはがし区間の試験片数 3 本の平均粘着力を合計し、試験片数で除した値とし、その平均粘着力から標準偏差を算出したものである。0~25mm および 125~150mm は、ばらつきが大きい結果となった。0~25mm のばらつきが大きくなる理由として、D はく離から B はく離への移行により、引きはがし粘着力が低下することでばらつきが発生したものと考えられる。また、125~150mm のばらつきが大きくなる理由として、本実験で採用した基材は弾性率が比較的高いものであり、引きはがし長が長くなるほど、基材が伸長し、引きはがす力を吸収してしまうことで、粘着剤への荷重伝達が一定とならず、粘着力がばらついたものだと考えられる。25~75mm および 75~125mm は、はく離モードが安定していることより引きはがし粘着力も安定したことから、ばらつきが小さい結果となった。以上の結果より、次項の検討をしていくためのデータ計測区間の適用については JIS Z 0237 と同様の 25~75mm 区間の適用が妥当である。

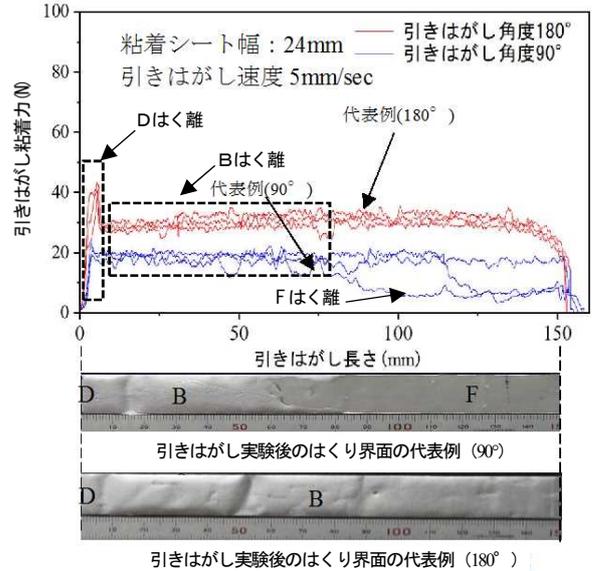


図-4 粘着シート A 実験結果

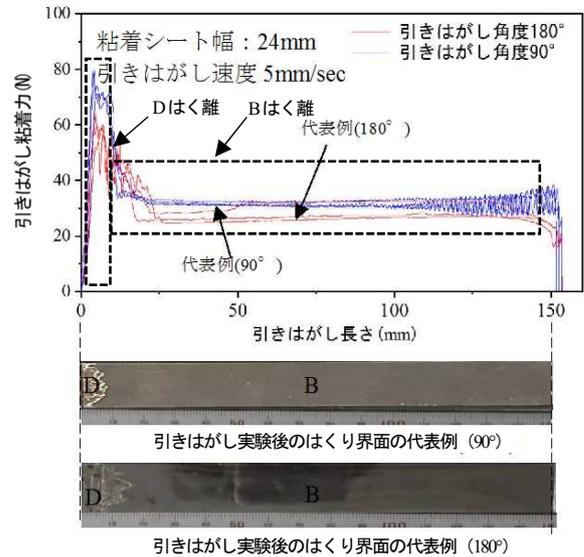


図-5 粘着シート B 実験結果

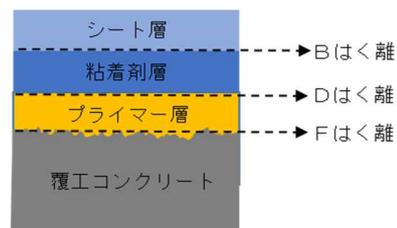


図-6 粘着シート工のはく離モード

表-10 引きはがし区間別の平均荷重とばらつき

シート種別	引きはがし角度	試験片数 (本)	引きはがし区間							
			0~25mm		25~75mm		75~125mm		125~150mm	
			平均粘着力 (N)	標準偏差 (N)						
粘着シート A	90°	3	16.7	4.5	19.0	0.9	18.5	1.3	16.8	4.4
	180°	3	27.7	7.2	30.4	1.0	31.1	0.6	27.5	4.5
粘着シート B	90°	3	42.6	18.0	31.3	0.4	30.9	1.1	31.1	3.0
	180°	3	36.1	13.7	26.4	0.4	27.5	0.3	25.2	2.9

粘着シート幅の影響を検討するため、各シートの引きはがし荷重、粘着力および粘着シート幅の関係について整理したものを図-7, 8に示す。図中では引きはがし角度別で結果を記載し、あわせてはく離形式も示している。粘着シート幅が広い場合、被着体と接している粘着面積が広いことから、幅に比例して引きはがし荷重が高くなる傾向を示したものの、各幅の平均した引きはがし荷重を粘着シート幅で除した値（以下、平均引きはがし粘着力）で評価するとほぼ同様となることから、粘着シート幅は JIS Z 0237 と同様の $24 \pm 0.5\text{mm}$ の適用が妥当と考えられる。

引きはがし速度および角度の影響を検討するため、各シートの引きはがし荷重と引きはがし速度および角度の関係について整理したものを図-9, 10に示す。

粘着シート A については、速度による荷重への影響は見られなかったが、 90° に比べ、 180° の方が、引きはがし荷重が約 1.5 倍高くなる傾向を示した。これは、 180° の $25 \sim 75\text{mm}$ 区間で、D はく離が部分的に発生した影響であると考えられる（写真-9）。

粘着シート B については、 3mm/sec のみはく離モードの違いによる荷重への影響が見られたものの、 5mm/sec および 7mm/sec については、速度及び角度が引きはがし荷重への影響が少なく、特に 5mm/sec については、はく離モードについても安定した結果が得られた。

以上の結果より、引きはがし速度については、速度の違いによる引きはがし荷重への影響は小さいと考え、引きはがし速度は JIS Z 0237 と同様の 5mm/sec を適用が妥当である。また、角度については、既往の研究¹⁰⁾より、 180° は粘着シートの厚さや弾性係数の影響を受けやすい傾向であると報告されており、本実験で採用した粘着シート A では同様な傾向を得られたため、今後、厚さや粘着剤等の仕様を変更する際は、引きはがし角度の影響を受ける可能性があることから、 90° および 180° の両方の条件で引きはがし試験を実施し、引きはがし荷重の小さい値を採用した方がよいと考えられる。

(3) 試験法の提案

前項で実施した引きはがし基本特性を踏まえたデータ計測区間の検討、粘着シート幅の影響および引きはがし速度、角度の影響の検討結果より、引きはがし粘着力を把握するための試験法を提案する（表-11）。

被着体は JIS A 5371 に基づく、コンクリート平板とし、圧着後の放置時間は粘着シートの養生期間として一般的に想定されている 24 時間、試験片の幅は $24 \pm 0.5\text{mm}$ 、引きはがし角度は 90° および 180° 、試験機の運転速度、所謂、引きはがし速度 5mm/sec 、引きはがし実験によるデータ計測区間は $25 \sim 75\text{mm}$ の 50mm 間の平均値を用いるものとした。

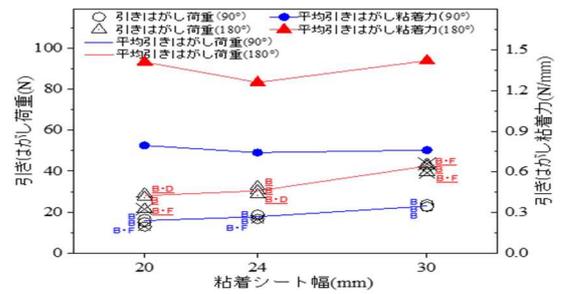


図-7 粘着シート A 実験結果

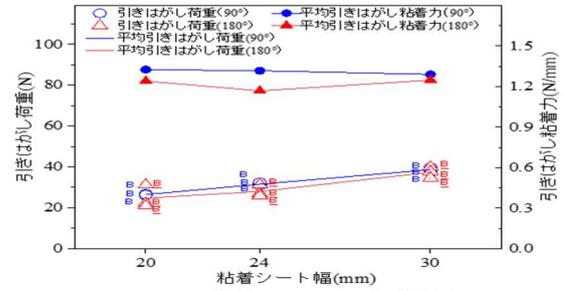


図-8 粘着シート B 実験結果

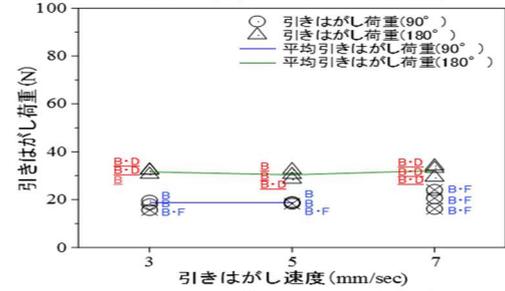


図-9 粘着シート A 実験結果

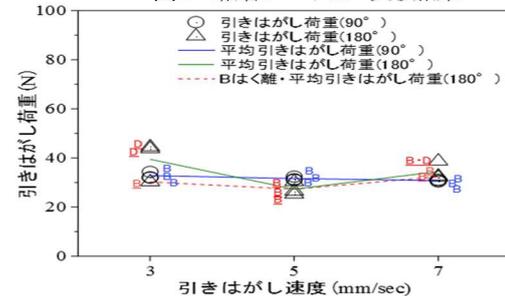


図-10 粘着シート B 実験結果

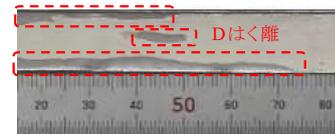


写真-9 粘着シート A はく離界面一例

表-11 粘着シート工の引きはがし試験法

項目	引きはがし 試験法	
試験片	幅	$24 \pm 0.5\text{mm}$
	長さ	250mm
被着体		JIS A 5371 コンクリート平板
貼付方法	圧着方法	質量 2000g の圧着ローラーで 2 往復
	圧着速度	$10 \pm 0.5\text{mm/sec}$
	圧着後の放置時間	24 時間
試験装置	引張試験装置	変位制御可能な引張試験機
	読み取り間隔	1mm 以下の間隔で読み取る自動式の装置
引きはがし方法	タブの形成	1 端を粘着剤と粘着剤が付くように 12mm 折る
	角度	$90^\circ, 180^\circ$
	試験機の運転速度	5mm/sec
データの計測区間		$25 \sim 75\text{mm}$ の 50mm 間の平均値

5. 各種環境作用による影響の検討

(1) 実験概要

本実験は、表-2に示した各環境作用のうち、耐液体性および凍結融解抵抗性について、各環境作用後、引きはがし粘着力により評価を行ったものである。

(2) 供試体の作製および実験方法

供試体の作製は、前章の引きはがし基本特性の確認実験と同様な作製方法を行ったが、本実験においては耐液体性実験に用いる溶液や凍結融解抵抗性実験に伴う水分が粘着界面への浸透を防ぐため、先に供試体全面に粘着シートを貼付し、供試体の四隅をシリコンシーラントを端部に塗布し、各試験後に粘着シートを長さ 250mm、幅 24±0.5mm に切断後、引きはがし試験を行った。なお、本実験において、引きはがし速度は 5mm/sec、引きはがし角度は 90°とした。

(3) 実験ケース

a) 耐液体性実験

実験ケースを表-12に示す。本実験は JIS K 5600 を準拠し、作成した供試体を 420ml の各種溶液に 30 日間浸漬を行った。なお、表-12 に示す、標準状態とは浸漬していない供試体のことである。

b) 凍結融解抵抗性実験

実験ケースを表-13 に示す。本実験は、現在状況を考慮して JIS A 1435 3.3 気中凍結水中融解法を準拠し、初回のみ 20°C±2°C の水中に 48 時間浸漬後、凍結温度 -20°C±2°C 環境下で 2 時間凍結し、その後、融解水温 20°C±2°C 環境下で 1 時間、凍結融解を 200 サイクル実施した。

(4) 実験結果

a) 耐液体性実験

30 日間の溶液浸漬後にシート表面の状態を目視および触診により確認した結果、粘着シート A 及び B ともにシート表面の割れや膨れは確認されなかった。

溶液浸漬後の引きはがし試験結果を表-12、図-11 に示す。粘着シート A の平均引きはがし粘着力については、標準状態が 21.6N に対し、飽和 Ca(OH)₂ 溶液が 21.5N、5% HNO₃ 溶液が 20.9N であった。また、粘着シート B は標準状態が 25.2N に対し、飽和 Ca(OH)₂ 溶液が 28.3N、5% HNO₃ 溶液が 44.7N、5% H₂SO₄ 溶液が 30.2N、3% NaCl 溶液が 28.2N であった。5% HNO₃ 溶液が 44.7N と高い平均引きはがし粘着力を示した理由として、25~75mm のデータ計測区間で D はく離が部分的に発生した影響であると考える。

以上の結果より、粘着シート表面からの各種溶液成分による引きはがし粘着力への影響はないと考えられる。

b) 凍結融解抵抗性実験

200 サイクル後にシート表面の状態を目視および触診により確認した結果、粘着シート A 及び B ともにシート表面の割れや膨れは確認されなかった。凍結融解抵抗性後の引きはがし試験結果を表-13、図-12 に示す。粘着シート A の平均引きはがし粘着力について、標準状態が 26.0N に対し、凍結融解試験後は 23.5N であった。また、粘着シート B は標準状態が 29.9N に対し、凍結融解試験後は 28.3N であった。なお、粘着シート B の標準状態の試験片数 3 本の内の 1 本について、切断の不具合が原因により引きはがし試験中にシートが破断してしまったため、試験片数を 2 本としているが、試験値は各々、29.9N と 29.8N とほぼ同等であることから、試験値として適正であると考えられる。

以上の結果より、各シートとも凍結融解試験後の引きはがし粘着力に若干の低下が確認されたものの、ばらつきの範囲内であり、影響はないと考えられる。

表-12 耐液体性 実験ケースと結果

シート種別	溶液の種類	試験片数 (本)	平均引きはがし粘着力 (N)
粘着シート A	標準状態	3	21.6
	飽和 Ca(OH) ₂	3	21.5
	5% HNO ₃	3	20.9
粘着シート B	標準状態	3	25.2
	飽和 Ca(OH) ₂	3	28.3
	5% HNO ₃	3	44.7
	5% H ₂ SO ₄	3	30.2
	3% NaCl	3	28.2

表-13 凍結融解抵抗性 実験ケースと結果

シート種別	溶液の種類	試験片数 (本)	平均引きはがし粘着力 (N)
粘着シート A	標準状態	3	26.0
	凍結融解作用後	3	23.5
粘着シート B	標準状態	2	29.9
	凍結融解作用後	3	28.3

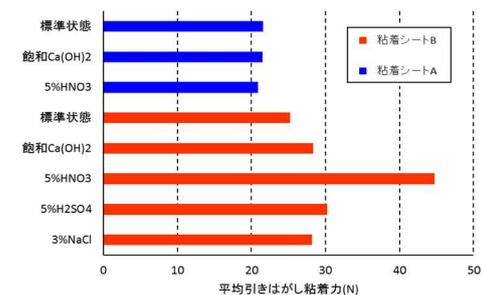


図-11 耐液体性 実験結果

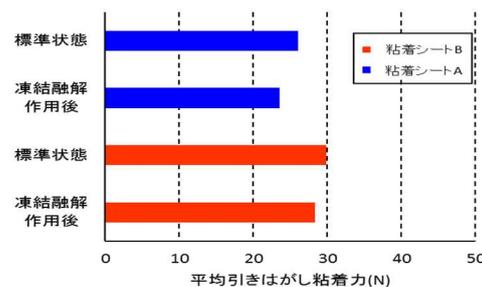


図-12 凍結融解抵抗性 実験結果

6. 粘着シート工の現場適用性

(1) 概要

提案した試験法に基づき、供用から約 40 年経過した矢板工法トンネルの覆工表面の表面処理を行い、プライマーを塗布した上、室内実験と同等の粘着シートを貼付し、提案した試験法に基づき、引きはがし試験を行い、試験法の現場適用性を確認した。また、実トンネルで小規模の試験施工を実施し、その結果、一部の粘着シートに剥がれが生じたため、その原因の検証を行った。

(2) 実トンネルにおける引きはがし試験

本検討で採用した実トンネルの覆工表面状態は、著しい煤やエフロッセンスの付着があったため、ダイヤモンド研磨材と 12000 回転/min のディスクグラインダーを用いて表面処理を行った。その後、室内試験と同様な材料および方法で、表-14 に示すプライマーを塗布した翌日に粘着シートの貼付し、24 時間養生後、引きはがし試験を実施した。表面処理、貼付および引きはがし試験のトンネル内環境は温度 20°C、湿度 60%、コンクリート表面の含水率は 4% という条件であった。また、引きはがし区間 150mm に対し、引きはがし速度は 5mm/sec としたため、ストップウォッチで 30 秒間計測し、引きはがし角度 90° については引きはがし中の角度を維持するため、三角定規を設置し、人力により引きはがしを実施した。

(3) 引きはがし試験結果

粘着シート A および B について、90° および 180° を各 3 本の引きはがし試験を実施し、引きはがし区間長は 150mm、データ計測区間は室内試験と同様の 25~75mm 区間とした。試験結果を図-13, 14 および表-15 に示す。粘着シート A については、90° は B はく離、180° は B, D 混合はく離となり、室内試験と同様な傾向を示した。また、引きはがし粘着力についても室内試験と同様に 180° の方が 90° より 1.5 倍程度、高くなる傾向を示した。粘着シート B については、90° および 180° とともに引きはがし区間 0~10mm は D はく離となり、その後 B はく離へと移行した。また、粘着力についても 90° の方が 180° より 1.3~1.4 倍程度、高くなる傾向を示し、室内実験と同様な傾向が得られた。また、粘着シート A, B の粘着力の変動を比較すると、粘着シート B の粘着力の変動が大きいことが分かる。この理由として、実トンネルの覆工表面は粗く、その粗さに粘着剤が食い込んだこと、また、引きはがし時に粘着剤の粘りが発生したことで、引きはがしによりはがされるという繰り返し現象により、変動が大きくなったと考えられる。粘着シート A の実トンネルでの引きはがし粘着力が室内試験の引きはがし粘着力と

比較して減少したのは、被着体の覆工面が室内試験でのコンクリート板よりも粗く、粘着シートと被着体とが接触していない面積が増加したことが影響したと推察できる。

表-14 プライマーの仕様

粘着シート種別	プライマーの種類	混合比	塗布量
		主剤：硬化剤	
粘着シートA	2液混合 エポキシ樹脂A	100 : 43	140g/m ²
粘着シートB	2液混合 エポキシ樹脂B	2 : 1	150g/m ²

表-15 実験ケースおよび結果

シート種別	シート幅	引きはがし速度	引きはがし角度	試験片番号	引きはがし区間 25~75mm 平均引きはがし粘着力 (N)	角度別平均粘着力 (N)	
粘着シートA	24±0.5mm	5mm/sec	90°	A-1	13.2	11.9	
				A-2	12.0		
				A-3	10.7		
			180°	A-4	17.2		17.5
				A-5	18.0		
				A-6	17.5		
粘着シートB	24±0.5mm	5mm/sec	90°	B-1	36.6	33.1	
				B-2	31.1		
				B-3	31.8		
			180°	B-4	23.9	23.0	
				B-5	22.8		
				B-6	22.4		

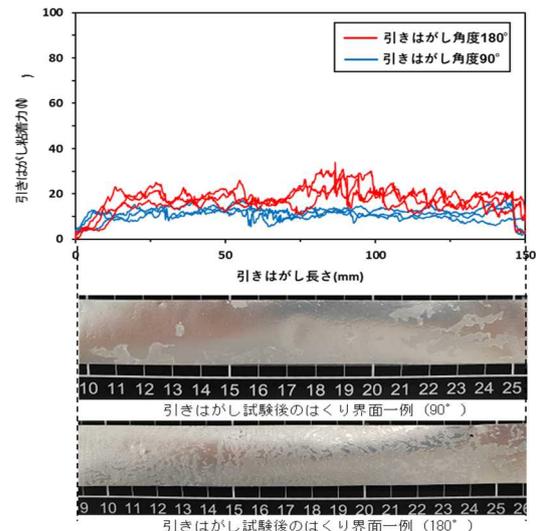


図-13 粘着シート A 試験結果

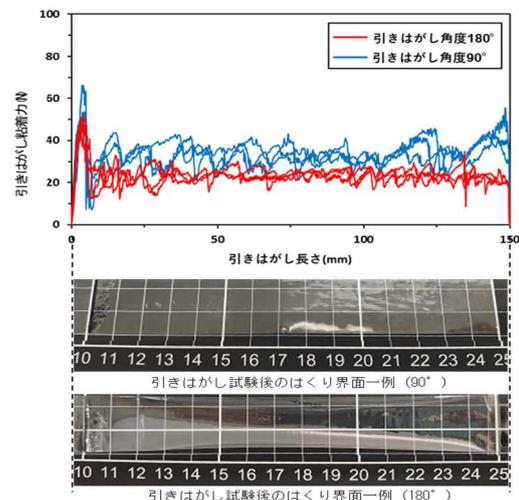


図-14 粘着シート B 試験結果

(4) 引きはがし粘着力の基準値の検討

粘着シート工を現場で適用する場合は品質管理として、引きはがし粘着力を確認する必要があるため、その基準値の検討を行った。粘着シートは貼付後、端部からはく離が始まり、はく離した粘着シート部分に風荷重が作用することで、はく離が進行することを仮定した。

道路トンネルを走行中の車両は、トンネル空間内でピストンのように作用し、トンネル壁面に正負圧を発生させ、圧力の振幅の大きさを 1600N/m^2 と設定されている¹⁵⁾。また、浮かし張り内装工を採用する場合、浮かし幅は少ない方が望ましく、建築限界を考慮し、下地を含めて 10cm 以内とされている¹⁶⁾。本検討ではこれらの考え方を準用し、 24mm 幅である粘着シートが端部からはく離し、 10cm はく離した状態で風荷重 1600N/m^2 が作用しても、それ以上はく離が進行しないための粘着力を基準値として設定した(図-15)。基準値は、風荷重 1600N/m^2 にはく離した粘着シート長さ(0.1m)と粘着シート幅(0.024m)の面積を乗じ、 3.84N と設定し、品質、施工のばらつきおよび環境作用の影響を踏まえ、安全率 2 を考慮し、 $7.64\text{N} \approx 8.0\text{N}$ を引きはがし粘着力の基準値として提案する。

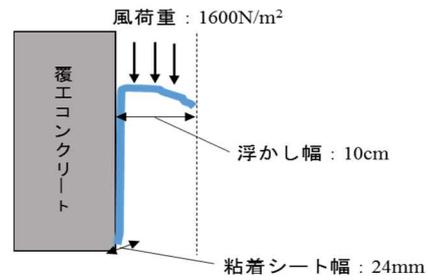


図-15 基準値検討図

表-16 試験施工箇所の概要

	試験施工A	試験施工B
位置	TN入口から約40m	TN入口から約450m
数量	18m^2	18m^2
覆工表面状態	煤、エフロレッセンスの付着少	煤、エフロレッセンスの付着大
覆工表面処理方法	水による高圧洗浄	ウォータージェット (150MPa)

試験施工A

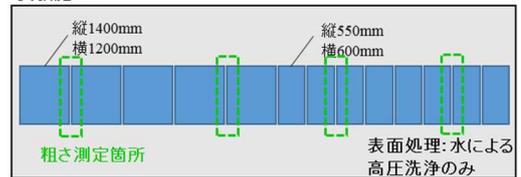


図-16 試験施工Aの概要

試験施工B

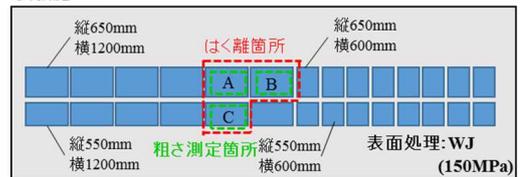


図-17 試験施工Bの概要

(5) 実トンネルにおける試験施工

a) 概要

粘着シート工の適用を検討している矢板工法トンネルの覆工表面はエフロレッセンスや煤等の汚れが著しい箇所があるため、粘着シート工を施工する前に適切な表面処理が必要となる。そこで、同一トンネル内で覆工表面状態が異なる箇所において、試験施工を実施し、表面処理方法の違いによる耐久性の影響を検討した。

b) 試験施工状況

図-16, 17, 表-16 に示すとおり、6種類のサイズの粘着シートを用いて、約 20m^2 の試験施工を2箇所実施した。試験施工Aの覆工表面にはエフロレッセンスや煤の付着が少ない状態であったことから、覆工表面処理は、水による高圧洗浄のみとした。一方、試験施工Bの覆工表面にはエフロレッセンスや煤等により著しく汚れている箇所が広範囲にあったため、使用圧力 150MPa としたウォータージェットにより表面処理を施した、施工で用いた粘着シートは前章の実トンネルにおける引きはがし試験で用いた粘着シートAとし、プライマーについても同様の仕様のもを用いた。表面処理、プライマー塗布および貼付時トンネル内環境は温度 30°C 、湿度 65% 、コンクリート表面の含水率は 5% という条件であった。

c) 試験施工後のモニタリング

試験施工後は近接目視によるモニタリングを実施した。写真-10 に示すとおり試験施工から数日後粘着シート A および C がはく離し、約 1.5 ヶ月後に粘着シート B がは

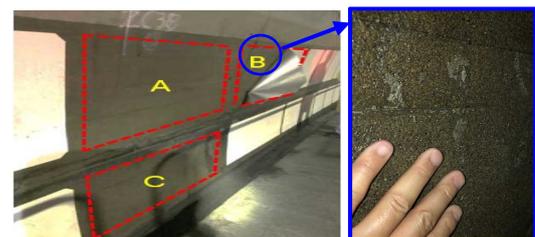


写真-10 各はく離状況とはく離箇所Bの覆工表面状態

く離した。AおよびCの覆工表面状態を触診にて確認すると、覆工表面が粗い上、覆工表面のひび割れから湧水の浸み出しが確認され、覆工表面の粗さと湧水が複合要因となり、はく離したのではないかと考えられる。また、Cについては湧水の浸み出しが確認できなかったものの、触診により A および B よりも粗いと確認できたことから、覆工表面の粗さが要因となり、はく離したものではないかと考えられる。さらに、ウォータージェットにより表面処理を施した場合、覆工表面が削られることで粗くなってしまう、その粗さを少しでも平滑にするためにプライマー塗布するが、粗い箇所が残存することで、粘着シートが面ではなく点で粘着する箇所がある場合、そこが弱点となり、はく離の原因になったのではと考えられる。

なお、はく離した3枚以外の粘着シートについては、試験施工から約2年経過しているが、はく離は発生しておらず、状態は良好である。

d) 表面粗さとはく離の関係性

はく離した原因は覆工表面粗さではないかという考察を検証するために、コンクリート表面の凹凸を簡易に測定できるデプスゲージを用いて、覆工表面粗さ計測した。使用したデプスゲージの写真と仕様を写真-11、表-17に示す。計測面はプライマー塗布されている表面とし、試験施工Aについては、図-16, 17に示すとおり粘着シートの目地部について、各4点ずつ、計16点計測した。また、試験施工Bについては、はく離したシート箇所毎に対し、各16点計測を行った。

表面粗さの測定結果を表-18に示すとおり、試験施工Aのはく離していない箇所の平均値に対し、はく離した箇所の表面粗さの平均値が大きく、粗いことが確認できる。また、図-18に示すとおり、はく離箇所Bについては、ばらつきも大きく、他の箇所と比較しても、粗いことが確認できた。

粘着シート工の長期耐久性を確保するためには、表面の粗さを低減させることが重要であり、本試験施工においては、表面平均粗さが0.26mmではく離した結果を受け、プライマー塗布後の表面平均粗さを0.2mm以下程度を確保できれば、はく離を防げるのではと考えられる。

本検討で用いたデプスゲージは、測定範囲が小さく、点での把握しかできないものであるため、表面粗さを評価できる測定点数の検討および面で粗さを把握できる手法について、今後、詳細に検討する必要がある。

7. まとめ

本論文では、粘着シートの適用に向けて、要求性能を整理し、その性能を評価する方法と指標を整理するとともに、重要な基本性能の一つである覆工コンクリートと

の付着性を引きはがし粘着力としてとらえ、基本性能を確認するための試験法と現場適用性について検討した。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 従来の内装工の課題等を整理するとともに、粘着シートをトンネル内装工への適用する場合の課題を上げ、要求性能の設定、その要求性能を評価する方法と指標を整理し、粘着シート工の要求性能の基本的な評価項目となる引きはがし粘着力の試験法を提案した。
- (2) 引きはがし基本性能の把握では、はく離モードが引きはがし粘着力に影響を及ぼすことが考えられ、はく離モードを定義した。また、粘着シートの仕様異なることで、引きはがし中の挙動や粘着力に影響を及ぼすことが確認された。



写真-11 デプスゲージ

表-17 デプスゲージの仕様

項目	仕様
測定範囲(mm)	0~10
目量(mm)	0.01
指示誤差(μm)	±15
測定力(N)	1.4以下
長さ(mm)	40
幅(mm)	16
平面度(μm)	5
ダイヤルゲージ取付部	1箇所

表-18 表面粗さ測定結果

項目	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)
試験施工A：はく離箇所無	0.11	0.04
試験施工B：はく離箇所 A	0.30	0.14
試験施工B：はく離箇所 B	0.35	0.23
試験施工B：はく離箇所 C	0.26	0.13

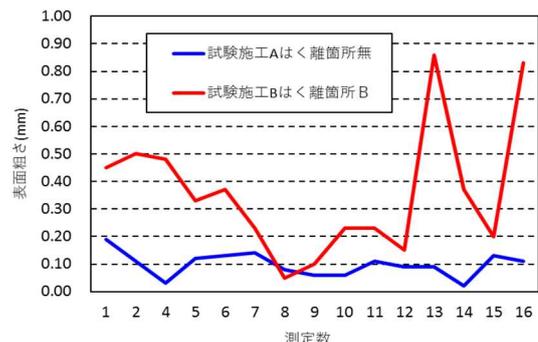


図-18 表面粗さ状況

- (3) 試験法の検討にむけた確認実験では、粘着シート幅、引きはがし速度について、引きはがし粘着力への影響は小さいと考え、JIS Z 0237 と同様の粘着シート幅は $24\pm 0.5\text{mm}$ 、引きはがし速度は 5mm/sec の適用が妥当である。また、引きはがし角度については、粘着シートの厚さや弾性係数の影響を受けることが想定されるため、 90° および 180° の両方の試験を行い、引きはがし粘着力の小さい値を採用した方がよいと考える。
- (4) 耐液体性実験および凍結融解抵抗性実験については、シリコンシーラントを端部に塗布することで、端部からの水分の浸透を防止し、シート表面からの環境作用による影響はないことが確認されたが、他の種類の粘着シートについても同様な結果が得られるとは限られないため、今後、同様な実験を他の種類の粘着シートで実施する場合には、本実験の供試体の作製方法を適用した上、検討する必要がある。
- (5) 粘着シート工の引きはがし試験法を適用し、実トンネルで引きはがし試験を実施した結果、室内試験結果と比較した場合、引きはがし粘着力の低下が確認され、被着体の覆工面が室内試験のコンクリート板よりも粗いことが影響したと考えられる。
- (6) 粘着シートは貼付後、端部からはく離が始まり、はく離した粘着シート部分に風荷重が作用することで、はく離が進行することを仮定し、過去の文献を用いて算出し、引きはがし粘着力の基準値を提案した。
- (7) 実トンネルに粘着シート工を適用した場合、約1.5ヵ月経過時に一部はく離が発生したものの、約2年経過したが、一部はく離した箇所以外についてははく離は発生しておらず、粘着シート端部をシリコンシーラントによる養生および覆工粗さの平坦性を目的としたプライマー塗布を実施すれば、耐久性は確保できると考える。
- (8) 一部はく離した原因を調査した結果、はく離箇所については、はく離していない箇所と比較し、覆工表面が粗くなっていることが確認された。また、貼付後のはく離を防ぐには、プライマー塗布後の覆工表面粗さを 0.2mm 以下に抑えることが重要である。

粘着シート工の長期耐久性を確保するためには、漏水による影響を避け、プライマー処理後の覆工表面粗さを抑えることが重要である。また、本論文では、圧着後の

放置時間を24時間後と設定したが、粘着剤は短時間で接着可能である特性もあることから、施工性の向上を目的とした、さらに放置時間の短縮を目的とした、強度特性の把握、走行車両による雨水の引き込みや煤等により、粘着シートの表面が汚損に対し、反射率耐久性を確保するための洗浄方法等についても検討していく予定である。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、スリーエムジャパン(株)の方々にご協力頂いた、ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 中日本高速道路(株): 設計要領第三集(4)トンネル内装工, pp. 6-3, 2016.8.
- 2) 道路構造物ジャーナル NET: 金沢支社管内の高速道路における構造物の維持管理, <https://www.kozobutsu-hozen-journal.net/series/13371/?space=2>, 2015.11.
- 3) 西日本高速道路(株): <https://corp.w-nexco.co.jp/corporate/release/chugoku/h26/0618/>, 2018.6.
- 4) 日経クロステック: <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00142/00827/>, 2020.9.
- 5) 鈴木俊雄, 大橋将太, 道上剛幸, 林承燦, 木村定雄: トンネル内装となるシート工の付着性の評価, トンネル工学報告集, 第29巻, I-27, 2019.11.
- 6) 国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所: トンネル内装板に関する検討会第二回検討会資料, <https://www.hrr.mlit.go.jp/hokugi/file/mijika/ken-tousiryou2>, 2013.12.
- 7) (社)日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会: トンネル内壁面塗装工事の課題技術報告, 2005.5.
- 8) 山崎忠明, 南出忠利, 佐々木秀男: トンネル内(フッ素系)の壁面塗装について, 第33回北海道開発局技術研究発表会, pp. 74, 1989.
- 9) 浦濱圭彬: 特論講座 粘着テープの基礎と物性(1)粘着テープの概要, 日本ゴム協会誌, pp. 42, 2003.7.
- 10) 中村吉伸, 下島康平, 野田昌代, 高倉和希, 藤井秀司, 浦濱圭彬: 粘着強さにおよぼす剥離角度の影響の糸曳き現象からの検討, 日本接着学会誌, Vol. 53, No. 1, 2017.
- 11) 鈴木翔伍: 引きはがし速度が接着剥離力に及ぼす影響, 中央大学大学院研究年報, 2017.7.
- 12) 中日本高速道路(株): 設計要領第三集(4)トンネル内装工, pp. 3-1, 2016.8.
- 13) 中日本高速道路(株): NEXCO 試験方法 第7編 トンネル関係試験方法, pp. 60-61, 2017.7.
- 14) 中日本高速道路(株): NEXCO 試験方法 第7編 トンネル関係試験方法, pp. 43-45, 2017.7.
- 15) 首都高速道路(株): トンネル構造物設計要領(トンネル内装設計編), p18, 2006.4.
- 16) 中日本高速道路(株): 設計要領第三集(4)トンネル内装工, pp. 6-4, 2016.8.

(Received September 15, 2021)

(Accepted December 21, 2021)

PERFORMANCE EVALUATION METHOD FOR TUNNEL INTERIOR SHEETS

Toshio SUZUKI, Hiroshi YAGI, Takayuki MICHIGAMI, LIM Seungchan
and Sadao KIMURA

Interior works are installed in highway tunnels for the purpose of ensuring the visual environment of passing vehicles, guiding the line of sight, and improving the lighting effect. Conventionally, the tile directing method, the panel floating method, and the painting have been applied to this interior work. Looking at the interior sheets that have been installed so far, there are some deformations such as peeling of tiles, damage to panels, and corrosion of fixing brackets. Therefore, the authors considered the application of an interior sheet worker using an adhesive sheet as an alternative to the interior worker who mainly uses tiles and panels. In this paper, when applying the adhesive sheet, the adhesiveness, which is one of the basic performances of the adhesive sheet, is peeled off and the adhesive force is grasped.