

表面被覆工法における剝落防止性の性能規定

阪神高速技研(株)技術部設計課

正木 健太

阪神高速道路(株)建設・更新事業本部大阪建設部設計課

新名 勉

阪神高速技研(株)技術部設計課

玉置 脩人

要 旨

コンクリート構造物の劣化進行にともなう第三者損害を防止する目的で、剝落防止性を有する表面被覆工法が施工されている。表面被覆工法の剝落防止性は、コンクリート躯体との密着強度（付着性）や、剝落するコンクリート片を保持する機能によって発揮されるが、その評価は、押抜き試験による初期の押抜き変位量や耐荷重の評価に留まっているのが実情である。本稿では、長期耐久性を考慮し、初期（標準状態）と劣化後の状態を対象として、主に付着性に着目した性能確認試験を実施した。その結果、剝がれる現象を考慮した性能試験を併用することで、剝落防止性を適切に評価できる見通しを得た。また、耐荷重の評価においては、剝落による変位の増加にともない、急激な強度低下を示す表面被覆材は、変位に追従した剝落への保持機能に乏しいことを確認したため、押抜き試験における表面被覆材の回避すべき破壊形態についても規定した。

キーワード: 表面被覆工法, 剝落防止性, 性能規定, 長期耐久性, 付着性, 破壊形態

はじめに

既設コンクリート構造物における劣化の進行にともない、コンクリート片の剝落による第三者への損害が懸念されている。阪神高速道路では、コンクリート構造物表面保護要領（以下「要領」と言う）¹⁾を整備し、第三者への損害が懸念される箇所に剝落防止性を有する表面被覆工法（C種）を施工してきたが、旧要領²⁾ではC種の本質的な要求性能にあたる、剝落防止性について規定されていなかった。

表面被覆工法の剝落防止性は、コンクリート躯体と表面被覆材との一体性（付着性）や、表面被覆材が剝落片を保持する機能によって発揮される。ただし、その評価は、押抜き試験による初期の標準状態での耐荷重および押抜き変位量の評価に留

まっているのが実情であり、表面被覆材が剝落防止性を発揮する各段階での性状（付着性、剝落片の保持性）をふまえた、より適切な性能評価の体系の構築が望まれる。また、押抜き試験の試験体の寸法は、促進劣化試験機内に設置できない大きさのため、長期耐久性を考慮した促進劣化後の評価を行い難い状況にあり、この点においても、長期耐久性を考慮した剝落防止性の性能評価の体系を構築し、長期的な性能を適切に把握することが望まれる。

以上の動機から、本稿では、経年劣化を想定した促進劣化試験後の状態を評価対象として、付着性に着目した性能確認試験を実施することにより、表面被覆工法での剝落防止性の長期耐久性について考察した。併せて、剝落防止性の要求性能として、押抜き試験に基づく規定を新たに設定した。

1. 試験概要

今回実施した性能確認試験では、主に付着性に着目し、表面被覆工法の劣化後の性能低下を把握できる評価方法の検討と、剥落防止性の長期耐久性について考察した。

1-1 試験対象

性能確認試験では、PT：塗膜系、PE：ポリエチレン系、V：ビニロン系、G：ガラスクロス系、N：ナイロン系、PP：ポリプロピレン系の6種類の仕様を対象とした。

1-2 試験体作製

性能確認試験に用いる試験体は、初期性能に対応した標準状態の試験体と、長期的な性能評価を目的とした劣化試験後の試験体を作製した。後者は、以下の2種類の試験を採用した。

(1) 促進耐候性試験

従来から日本工業規格や土木学会規準等、多くの機関で塗膜の促進試験法として採用しているキセノンランプによる促進耐候性試験とした。なお、試験方法は要領に準拠し、JIS K 5600-7-7:2008 塗料一般試験方法第7部：塗膜の長期耐久性-第7節：促進耐候性（キセノンランプ法）により1500時間の照射を行った。

(2) 耐久性サイクル試験³⁾

キセノン照射による促進耐候性は、塗膜の外観、色、光沢および白亜化等の低下傾向を把握するために用いられているが、コンクリート構造物に用いられている圧膜形の表面被覆材では、付着性の低下傾向を把握し難いものと考えられる。そこで、JIS A 6909：2014 建築用仕上塗材および JIS A 6916：2014 建築用下地調整塗材の耐久性を評価する項目として採用されている湿潤状態、低温状態、高温状態を一定サイクル繰返す耐久性試験（湿潤冷熱繰返し）に（1）のキセノンランプ法による促進耐候性試験を組合せることで、複合的な劣化を想定した試験として実施した。試験は、以下に示す①を実施した後、②～④を4回繰返し

たものを1サイクル（168時間）とし、合計10サイクル（1680時間）実施した。10サイクル終了後、試験体を温度 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $50\pm 5\%$ の雰囲気中で約28日間恒量化し、その後30日間同雰囲気中で養生した。

- ①キセノンランプによる促進耐候性試験72時間
- ②水中に18時間浸せき（浸せき槽を設置した室内環境：温度 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $50\pm 5\%$ ）
- ③ -20°C で3時間静置（恒温槽設置の室内環境：設定なし）
- ④ 50°C で3時間静置（同上）

1-3 試験項目および試験方法

剥落防止性を求める表面被覆工法では、躯体との付着性が良好でない場合、一体性が望めず、塗膜の膨れ、割れや剥がれが生じ、劣化因子の進入を促すこととなる。劣化因子の遮断性を維持するためにも躯体に密着していることが要求される。

(1)～(3)に、標準状態および2種類の劣化試験後の付着性の評価に適用した試験方法を示す。各試験は、ばらつきを考慮し、3体の平均値で評価した。併せて、各試験実施後に試験体の破壊箇所を観察し、図-1のとおり、A：基板破壊（レイタンス層を含む）、AB：基板と塗布材の界面破断、BG：塗布材内の凝集破壊、BK：塗布材間の界面破断の4分類に評価した。また、(4)に標準状態のみで実施した押抜き試験について示す。

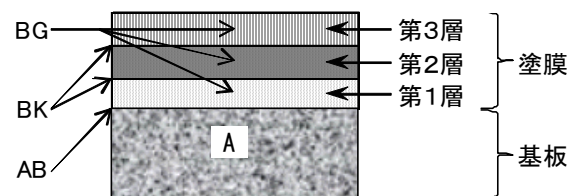


図-1 破壊箇所の模式図

(1) 付着性試験（JSCE-K 531-2013）

本試験は、単軸引張により付着強さを直接的に確認する試験である。試験体（ $150\text{mm}\times 70\text{mm}\times 35\text{mm}$ ）に、 $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ の4辺に、基板に達するまで塗膜に切込みを入れ、その試験体の表層塗膜（試験面）に接着剤を塗り、上部引張用鋼製治具を接着し、単軸引張により破断に要する最大引張

荷重 (N) を求めた。付着強さ (N/mm^2) は、最大引張荷重を治具接着面積 ($1600mm^2$) で除して算出した。

(2) カッターナイフ剥離試験³⁾

本試験は、剥離現象を考慮し、かつ、現場で実施することが可能な簡易的な付着性の評価方法として採用した。図-2 のとおり、ダイヤモンドカッターにて試験体に $50mm \times 5mm$ の 4 辺に、基板に達するまで塗膜に切込みを入れ、カット部の短辺を刃先で弾き上げることで塗膜の剥離を促し、剥離した長さを測定した。剥離長さは、3 段階に設定したレベル (I~III) として評価した。



図-2 試験状況 (カッターナイフ剥離試験)

(3) 見かけの剥離抵抗性試験³⁾

本試験は、定性的なカッターナイフ剥離試験に対し、塗膜の剥離現象を考慮し、付着性を仕事量で示し、定量的な評価を与える試験として実施した。併せて、本試験は、付着性試験で A: 基板破壊となった仕様について、塗布材の性能を評価する方法としても位置付けた。

(a) 試験体準備

試験体 ($150mm \times 70mm \times 35mm$) に、幅 $50mm \times$ 長さ $60mm$ を基板に達するまで塗膜に切込みを入れ、試験面は端部から $10mm$ を基板と塗膜の界面からカッターナイフで強制的に剥離させる。図-3 のとおり、剥離した塗膜 ($10mm$) の下面に幅 $50mm$ 、長さ $210mm$ の布粘着テープ (JIS Z 1524 相当品) を貼り、上面から長さ $260mm$ の布粘着テープ (同上) を貼り合わせ、この 2 枚のテープで塗膜を挟み込むように接着する。

(b) 試験および評価方法

試験体を図-4 のとおり、台に固定し、被覆材を 135 度方向へ引張速度 $100mm/min$ で引っ張り、剥離抵抗力を試験機で測定した。見かけの剥離抵抗性は、布粘着テープを試験体から剥離させるの

に要した仕事量 ($N \cdot mm$) を剥離面積 (mm^2) で除した値として算出した。

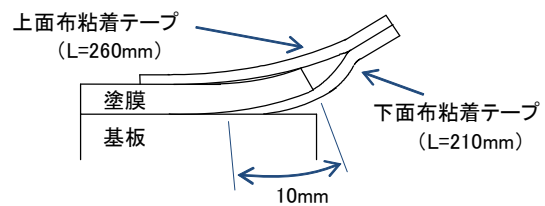


図-3 布粘着テープの貼付け方



図-4 試験状況 (見かけの剥離抵抗性試験)

(4) 押抜き試験 (JSCE-K 533-2010)

本試験は、コンクリート片に対する剥落抵抗性 (剥落片の保持性) を定量的に評価する試験である。試験体 (U 形側溝ふた $400mm \times 600mm \times 60mm$) を半浸せき状態で施工した表面被覆材 (中央部 $400mm \times 400mm$) に対し、試験体中央のコア部 (被覆材施工面を $5mm$ 残り $\phi 100mm$ にコア削孔) に面外方向の強制変位を与え、変位 $10mm$ 以上における最大荷重 (kN) を計測した。

2. 試験結果

2-1 付着性試験

図-5 に付着性試験の結果を示す。単軸引張による付着強さは、全ての仕様において 2 種類の劣化試験後も要領で規定する品質基準 $2N/mm^2$ 以上を満足する結果となった。付着強さは、標準状態と劣化試験後で仕様ごとに大小関係の違いはあるものの、概ね同程度の値となった。破壊箇所は、大半の仕様で A: 基板破壊となった。PT 仕様では、標準状態から AB: 基板と塗布材の界面破壊となり、十分な粘着強さは有するものの、塗布材内や塗布材間の界面と比較して、基板と塗布材の界面の付着が低いことを確認した。V 仕様では、複合

的な劣化を想定した耐久性サイクル試験後に破壊箇所が、A：基板破壊から AB：基板と塗布材間の界面破断に変化し、塗布材の付着強さが長期的に低下したことが認められる結果となった。

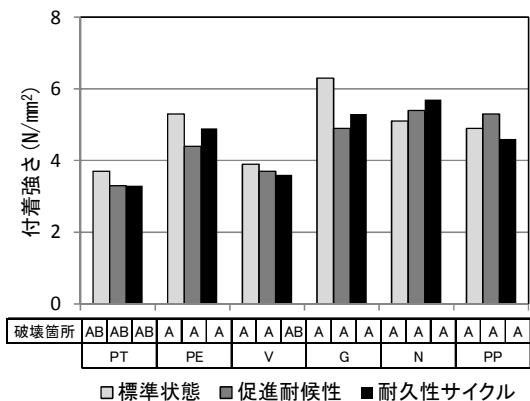


図-5 付着性試験結果

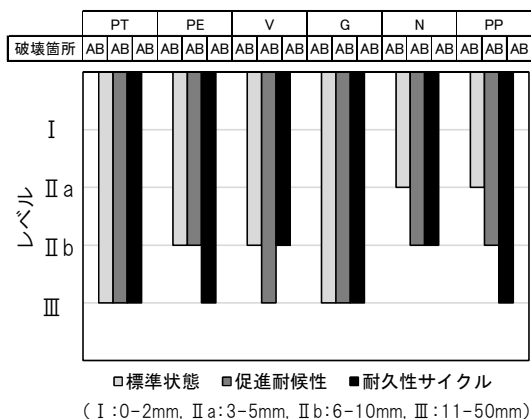
2-2 カッターナイフ剥離試験

図-6 にカッターナイフ剥離試験結果を示す。本試験は、剥がれ易さを定性的に捉える試験である。破断箇所は、標準状態を含めいずれも AB：基板と塗布材の界面破断となった。剥がれ易さについては、付着性試験で十分な付着強さを有した PT, G 仕様において、標準状態からレベルⅢの結果となり、剥がれる状態を考慮することで、単軸引張による付着性試験では把握できない仕様の違いによる塗布材の性能が把握できることを窺わせる結果となった。その他の仕様は、全体的に標準状態と比較して劣化試験後にレベルが低下する傾向となった。

2-3 見かけの剥離抵抗性試験

図-7 に見かけの剥離抵抗性試験の結果を示す。付着性試験では 6 仕様とも良好かつ優位な差が認められなかったのに対し、本試験では、仕様間で差が認められた。PT, G, PP 仕様は相対的に見かけの剥離抵抗性が小さく、鉛直方向以外の力が働く剥離に対し、破壊に介在する脆弱層の発現を窺わせる結果となった。標準状態と劣化試験後の比較では、6 仕様とも見かけの剥離抵抗性は、標準状態 > 促進耐候性試験後 > 耐久性サイクル試験後で一様に低下することが確認でき、上述のカッタ

ーナイフ剥離試験結果と概ね合致する傾向となった。破壊箇所は、大半は AB：基板と塗布材の界面破断となったが、G, N 仕様の標準状態では BG：塗布材内の凝集破壊, PP 仕様の標準状態および促進耐候性試験後は BK：塗布材間の界面破断となった。このことから、単軸引張による付着性試験では、大半の仕様 A：基板破壊となり、塗布材としては基板の強度以上の付着強さという良好な結果を示したことにに対し、剥がれる状態を考慮した本試験では、破壊に介在する塗布材の剥がれ易い箇所の特定が可能となり、仕様間の破壊モードの違いが窺える結果となった。



レベルⅠ：剥離なし、あるいは極めてわずかな剥離(0~2mm)
 レベルⅡ：剥離するが比較的短い長さ(3~10mm)で停止するもの
 レベルⅢ：比較的容易な剥離、および全面剥離(11~50mm)

図-6 カッターナイフ剥離試験結果

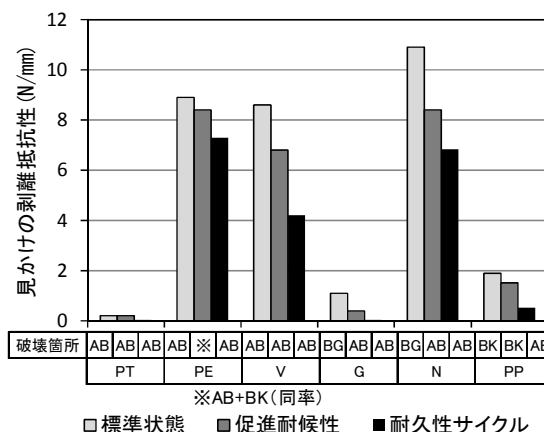


図-7 見かけの剥離抵抗性試験結果

2-4 押抜き試験

図-8 に 6 仕様の押抜き試験結果を示す。最大荷重は、一般的に適用されている品質基準 1.5kN⁴⁾ を上回っており、いずれの仕様も問題な

いことを確認した。

また、破壊形態に着目し、過年度に実施した試験結果（本稿の6仕様を含む21仕様）について確認したところ、一部、最大荷重を計測した後に、面外方向に脆性破壊（塑性変形を伴わないせん断破壊）を呈する試験体が認められた（図-9 右）。更に、面外方向に脆性破壊したこれらの試験体は、最大荷重を計測した後に急激な強度低下を示しており、面外方向への脆性破壊と急激な強度低下には一定の相関性がみられた。

一方、面内方向に延性破壊（分離破断）した試験体（図-9 左）では、表面被覆材が面外方向に追従しながら剥落片を保持することが確認できたため、これを望ましい破壊形態と位置付けた。

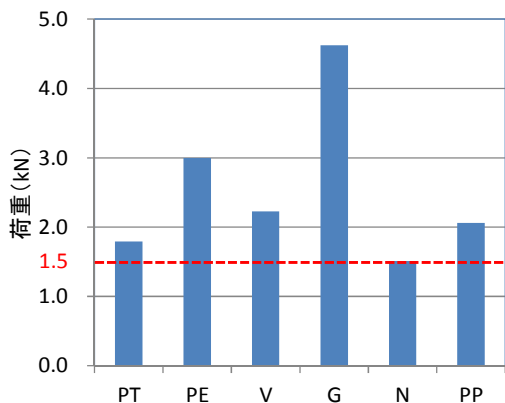


図-8 押抜き試験結果（最大荷重）

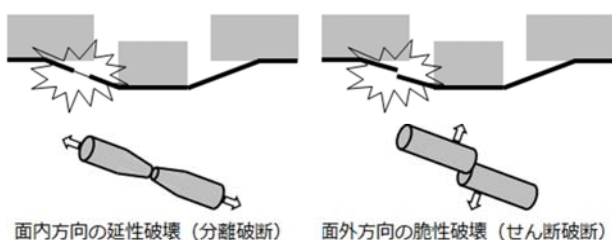


図-9 表面被覆材の破壊形態

3. 押抜き試験と付着性試験との関係

ここでは、前項の3種類の付着性試験のうち、定性的な方法であるカッターナイフ剥離試験を除く2種類について、押抜き最大荷重との相関性を確認した。押抜き最大荷重と付着強さは、比較的良好な相関傾向を示した。ただし、単軸引張によ

る付着性試験では、破壊箇所は大半の仕様でA：基板破壊を示したことから、このときの付着強さは、基板の強度に基づくものであり、塗布材自体の躯体に対する密着強さ、あるいは、押抜き試験時の押抜き抵抗性に相当するとは考え難い。即ち、押抜き試験は、単軸引張による付着性試験のように仕様間の差異が確認できる評価方法とは言い難いことが推測された。

一方、押抜き最大荷重と見かけの剥離抵抗性は、相関傾向が比較的低く、両者は互いに異なる性能を評価しているものと考えられた。前述で述べたように、剥がれる現象を考慮した見かけの剥離抵抗性試験では破壊に介在する塗布材の脆弱箇所が確認でき、劣化試験後の物性として、仕様間の性能の差異も確認できるものと推察された。これらのことから、剥落防止性の評価にあたっては、押抜き試験や単軸引張による付着性試験だけでなく、剥がれる現象を考慮した見かけの剥離抵抗性試験等を併用することで、多角的な評価ができるものと考えられた。

また、押抜き試験では、標準状態での押抜き性能は把握できるが、劣化後の物性としての評価を行う際、試験体の寸法上、促進劣化状況を再現しにくい。本稿で採用したカッターナイフ剥離試験や見かけの剥離抵抗性試験の試験体寸法であれば、劣化状況を模擬した促進耐候性試験や耐久性サイクル試験を行うことが可能であり、劣化後の物性評価が可能になると考えられる。

4. まとめ

本稿では、表面被覆工法の剥落防止性について、主に付着性に着目した性能確認試験を通して、その耐久性の考察を行った。

①単軸引張による付着性試験では、標準状態と比較して、劣化試験後の付着強さの低下傾向はあまり認められなかった。一方、剥がれる現象を考慮したカッターナイフ剥離抵抗性試験や見かけの剥離抵抗性試験では、長期的な性能値の低下傾向が確認できた。

②単軸引張による付着性試験だけでなく、剥がれる現象を考慮したカッターナイフ剥離試験や見かけの剥離抵抗性試験を併用することで、被覆材の脆弱箇所の特定など、剥落防止性について多角的な評価ができる可能性が認められた。

③押抜き試験では供試体の寸法上、劣化状況を再現することは困難であるが、カッターナイフ剥離試験や見かけの剥離抵抗性試験であれば、試験体の寸法は比較的小さく、劣化状況を模擬した促進耐候性試験や耐久性サイクル試験を行うことが可能であり、ある程度、劣化後の物性評価が可能になると思われる。

一連の検討を受け、現行の要領において、表面被覆材の剥落防止性の要求性能として規定を設けた。

①一体性

促進耐候性試験を 1500 時間行った後において

も、一体性「 $2\text{N}/\text{mm}^2$ 以上」の性能レベルを有することが望ましい。

②剥落防止性（押抜き変位・荷重）

押抜き変位 10mm 以上（点検時の損傷発見に配慮）において 1.5kN 以上を有すること。最大荷重を發揮した後に、急激な強度低下を示さないこと。表面被覆材の破壊形態が、脆性的な破壊を示さないこと。

参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社：コンクリート構造物表面保護要領，道路構造物の補修要領 第2部 第2編，2018.7.
- 2) 阪神高速道路株式会社：コンクリート構造物表面保護要領，道路構造物の補修要領 第2部 第2編，2007.1.
- 3) 山田卓司，佃洋一，山本貴士，国枝稔，宮川豊章：表面被覆工法の付着性能評価における促進劣化試験の適用に関する研究，材料，Vol.62，No.8，pp524-530，2013.8
- 4) 東・中・西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，pp.Ⅲ-57，2017.7

SPECIFICATION OF SPALLING RESISTANCE PERFORMANCE OF THE SURFACE COAT

Kenta MASAKI, Tsutomu NIINA and Shuto TAMAKI

Hanshin Expressway Company Limited uses the surface coating method as a preventive measure against deterioration of the concrete structure. Its performance is usually shown by bond strength and spalling resistivity and generally evaluated in load and deformation. A performance test focused on bond strength was conducted to consider long-term durability. The results showed that spalling resistance could be properly evaluated by bond strength tests with concrete spalling taken into account. It was also found that surface coating materials which exhibited a sudden drop in strength under load had no sufficient resistance.

正木 健太



阪神高速技研株式会社
技術部 設計課

Kenta Masaki

新名 勉



阪神高速道路株式会社
建設事業・更新本部
大阪建設部 設計課

Tsutomu Niina

玉置 脩人



阪神高速技研株式会社
技術部 設計課

Shuto Tamaki