

コンクリート塗装材における塗膜の耐久性評価の考え方

財団法人 日本塗料検査協会
西支部 山田卓司

1. はじめに

現在、数多くのコンクリート塗装材における耐久性評価報告がなされている。しかし、その塗装材の性能評価を行うための基準および試験方法は完全ではなく、実構造物での試験塗装および暴露供試体での追跡調査を実施することにより、性能評価方法の確立に向けて情報集積を行い、軌道修正しながら試験方法の確立を図っている。また、劣化現象を早期に把握するため、様々な促進試験が試みられているが、屋外暴露との相関性はなかなか掴めないのも事実である。今回、過去の調査報告および検討結果を紹介するとともに、今後の耐久性評価のあり方について述べる。



写真1 単軸引張試験の一例

2. 試験方法の現状

現在コンクリート構造物へ適用した塗装系防食材の性能を評価する方法は、土木学会基準である「JSCE-K シリーズ」が一般的である。即ち、NEXCO (旧 日本道路公団) 塗装材料規格¹⁾を代表とする旧 公団(首都高速道路、阪神高速道路、本州四国連絡橋)、や JIS A 6909 建築用仕上塗材に示されている試験方法等が用いられている。

何れも初期性能評価に加え、長期耐久性を評価する項目も取り入れ、各方面で性能を評価できるように設定されている。

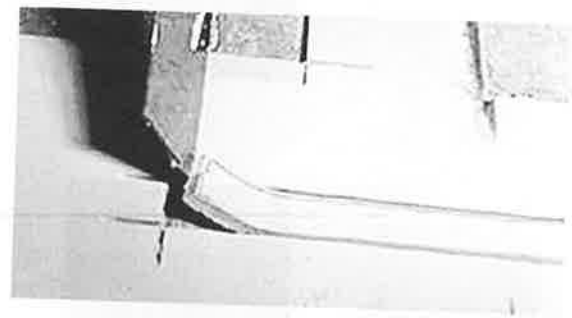


写真2 カッターナイフ剥離試験の一例

また、コンクリート構造物に適用した塗装系防食材の歴史は30年程度であり、戦後主流となった合成樹脂塗料を用いた鋼構造物に比べて歴史は浅い。しかし、コンクリート構造物の劣化・損傷事例が取り上げられ、その品質に関する問題意識が増大したことによって、耐久性に対する評価手法の確立が要望されている。



写真3 見かけの剥離強さ試験の一例

3. コンクリート塗装材に関する過去の調査結果

3.1 付着性能

塗膜面に対し鉛直方向に引っ張る、① JSCE-K 531-1999「付着強さ試験(単軸引張試験)」、②現場での簡易評価手法である「カッターナイフ剥離試験」、③塗膜を剥がすことに注目した「見かけの剥離強さ試験」^{2) 3)}について紹介する。

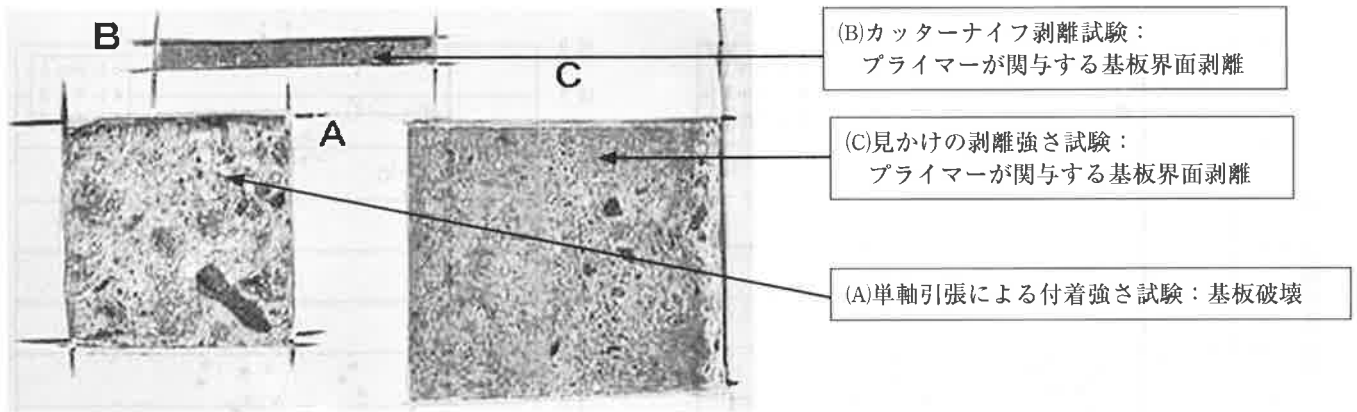


写真4 付着性能試験の破壊状況比較

表1 カッターナイフ剥離試験評価基準

剥離長さ (mm)	評価	適用
0 (最小) ~ 2	レベル I	剥離なし、あるいは極めて僅かな剥離
3 ~ 10	レベル II	剥離するが、比較的短い長さで停止
11 ~ 50 (最大)	レベル III	比較的容易な剥離から全面剥離

写真1に単軸引張による付着強さ試験（以下、「付着強さ試験」という。）、写真2にカッターナイフ剥離試験、写真3に見かけの剥離強さ試験の一例を示す。また、各試験での破壊状況を写真4（A：付着強さ試験、B：カッターナイフ剥離試験、C：見かけの剥離強さ試験）に示す。

写真4に示すように、A：付着強さ試験の破壊状況は基板破壊を起こしているが、剥離状況を想定したB：カッターナイフ剥離試験およびC：見かけの剥離強さ試験では、プライマーが関与する基板表面での剥離となり、両者では異なる破壊状況を示した。

なお、付着強さ試験および見かけの剥離強さ試験については、直接数値で評価できるが、カッターナイフ剥離試験は、表1に示す状況により3段階の剥離レベルに区別し評価している。

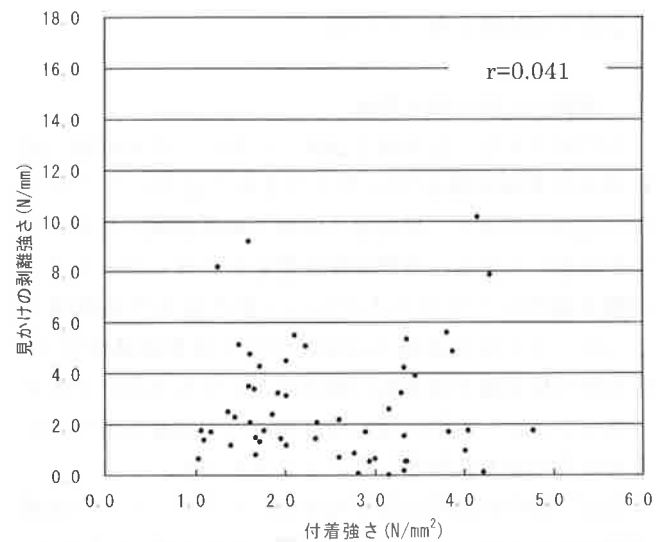


図1 付着強さと見かけの剥離強さの関係

(1) 付着強さと見かけの剥離強さ試験の関係³⁾

付着強さおよび見かけの剥離強さより得られたデータの散布図を図1に示す。

両者には相関傾向は認められず、互いに異なる物性を評価していることが判る。

(2) カッターナイフ剥離試験結果の分布³⁾

図1に示す散布図上で、カッターナイフ剥離試験結果

がどのように分布しているかを確認するため、図1に示す散布図の各データにおけるカッターナイフ剥離試験の剥離長さを、表1に示す各レベルに当てはめ、その分布状態を調べた。その関係散布図を図2に示す。

なお、図2に示す記号は、それぞれカッターナイフ剥離試験のレベル I：◇、レベル II：■、レベル III：▲を示す。

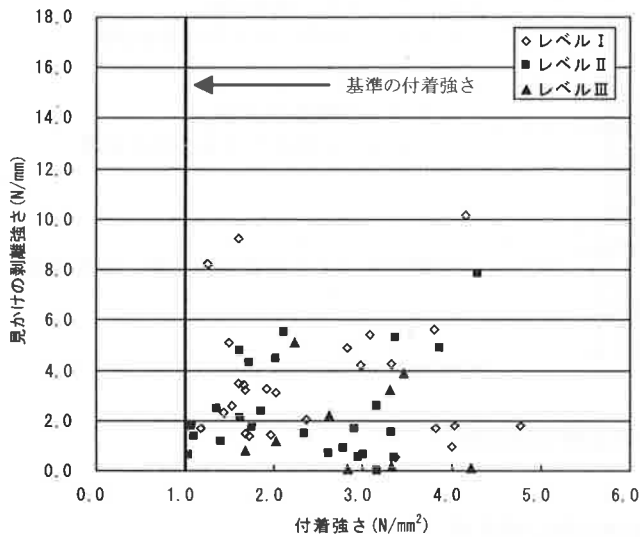


図2 付着性能試験方法間の関係 (その1)

図2において、付着性能を垂直方向での力としている「単軸引張」による付着強さ全ては、1.0N/mm²を上回っているが、現場で採用している簡易付着性能評価手法である「カッターナイフ剥離試験」では、付着性として決して良好とは云えない「レベルⅡおよびレベルⅢ」が多く存在する結果となっている。

(3) 試験方法間の相互関係³⁾

次に図2より、「付着強さ試験」において基板破壊（破断箇所中基板破壊が50%以上含まれるもの）したものを図3に示す。付着強さ試験で基板破壊したサンプルを対象としても、剥離現象を想定したカッターナイフ剥離試験のレベルⅡおよびレベルⅢが存在する結果となった。これは付着強さ試験において基板破壊が多く、防食材の付着強さは基板の破壊強さよりも大きいと判定されているが、実際には防食材界面での剥離現象の認められるものが多数存在していることを示す。

なお、図中の記号は先と同様に、カッターナイフ剥離試験のレベルⅠ：◇、レベルⅡ：■、レベルⅢ：▲を示す。

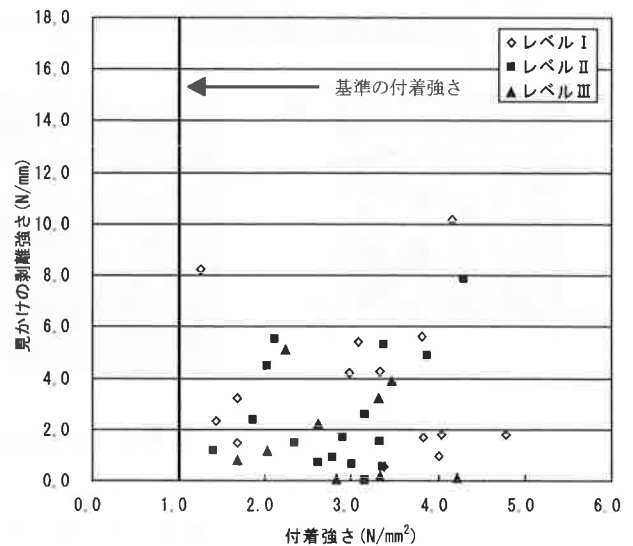


図3 付着性能試験方法間の関係 (その2)

(4) 塗膜の内部応力と破断箇所の関係²⁾

塗装系における付着性には塗装系を構成する各塗膜の内部応力が関係し、付着性試験における剥離・破壊場所としては、比較的大きな内部応力をもった塗膜の上層または下層で観察されることが多いであろうとの想定のもとに、塗膜の内部応力と付着性試験（付着強さ、見かけの剥離強さ）の関係について検討した事例がある。

その報告によると、最大内部応力を示す塗膜層が、異なる5種類の塗装系について付着性試験を行い、最大内部応力塗膜層付近での剥離・破壊発生率を比較検討したところ、「付着強さ試験」では、最大内部応力塗膜層とその層付近での剥離・破壊発生率との相関は顕著ではなかったが、「見かけの剥離強さ試験」では比較的大きな相関が認められ、最大内部応力塗膜層付近で剥離・破壊する割合が多くなる傾向が認められた（表2参照）。このことは、付着性能を評価する方法によって剥離・破壊のモードが異なることを示しており、目的に応じた適切な試験方法の選別が重要であることを示唆している。従って、塗装材の種類によっては付着強さ試験だけでな

表2 最大内部応力塗膜層と剥離・破壊発生箇所の発生率

	A	B	C	D	E
最大内部応力発生箇所	プライマー	不陸調整材	主材A	主材B	上塗り材
付着強さ (%)	52	0	28	3	0
見かけの剥離強さ (%)	55	86	70	92	72

く、剥離現象を考慮した見かけの剥離強さ試験を併用することで、より良い付着性能を評価できるものと考える。

3.2 ひび割れに対する塗膜の追従性能

安藤らは、高知県 浦戸大橋での試験塗装 10 年目の追跡調査⁴⁾の結果、コンクリート構造物の塗装系防食材のひび割れ追従性能について、以下のように報告している。一般平面部に異常は認められなかったが、橋脚の打ち継部でのひび割れ箇所が増大傾向にある。当時、供試体によるひび割れ追従性¹⁾の室内試験では規定を満足していたが、実橋では 7 年目より急速に進行しているようだ。(写真 5)。

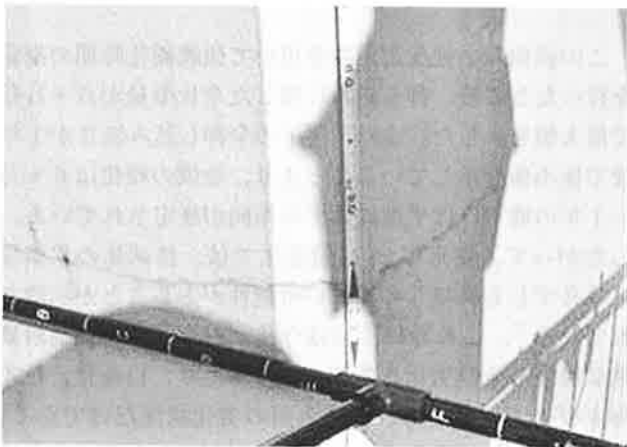


写真 5 橋脚打ち継部のひび割れ状況の一例

道路橋の場合、施工段階から自動車の荷重を受ける状況にあるため、①施工中の塗膜が硬化していない段階での荷重によるひび割れの開閉、②施工後塗膜のコンクリートひび割れに対する追従性が不足、③日間変動(温度変化)によるひび割れの動き、等が考えられる。ひび割れ幅の日間変動については、他の調査事例であるが、気温 1℃ 当り 15 μm 程度の動きがあるという調査結果⁵⁾がある。即ち、夏期に 0.1mm 幅のものが冬期には 0.5mm 程度に拡大することになる。

江成⁶⁾らは表面被覆材の耐久性能を評価する項目に、ひび割れ部における補修材料の機械的な寿命評価法を検討するため、偏心型の疲労試験機(曲げ疲労試験)を開発している。

我々もこの偏心型の曲げ疲労試験機を用いて、予め 2 つに分離されたモルタル試験体(図 4)にゼロスパン伸びの異なる 3 種類の仕様を施し、曲げ疲労試験を試みた。概念図を図 5 に示す。

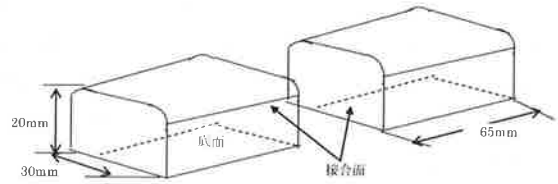


図 4 曲げ疲労試験に供する試験体

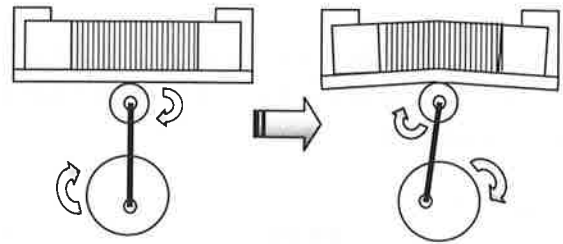


図 5 曲げ疲労試験概念図

開口幅が比較的小さな領域(ゼロスパン伸び値の約 15% 程度)では、仕様の柔軟性に応じた耐久性を示すが、比較的大きな領域(ゼロスパン伸び値の約 30% 程度)では、柔軟性だけでなく、塗膜の強靱性も必要と思われる結果が得られた。

実構造物では、振動や日間変動等によるひび割れの動きを事前に調査し、その変動幅に応じた仕様を選択することが必要であると思われる。

今後、現場を想定したひび割れに対する塗装材の耐久性は、初期のゼロスパン伸びに加え、ひび割れの開閉が繰り返される現象にも目を向け、振動・伸縮の繰り返しによる動的疲労試験によって評価することも重要と考える。

3.3 促進試験と屋外暴露試験後の物性評価

塗装材の耐久性を評価するうえで最もよく利用されるのが、JIS K 5600-7-7:1999 に示されている促進耐候性(キセノンランプ法)や、引用文献 JIS K 5400(1990)9.8 促進耐候性 9.8.1 サンシャインカーボンアーク灯式(以下「SUN WOM」という。)による促進試験である。特に後者の SUN WOM については、過去のデータが数多くあり、時間のかかる屋外暴露試験の代わりに、耐久性の評価に用いられてきた。しかし、未だに屋外暴露との相関性は明確でなく、樹脂の種類や色目によって異なるのが現状である。このことは、キセノンランプ法についても同様である。

堀江⁷⁾らによると過去の調査において、①標準養生後、② SUN WOM 後、③屋外暴露 1 年後、の 3 種類の試験片に

ついて二次物性を評価したところ、促進試験時間を考慮する必要があるものの、評価項目によって、促進試験と屋外暴露に大きな差が生じた例や、変化の少ない事例が報告されている。なお、図中のA～Iは試験に用いた塗装系の種類を表す。

図6に試験片養生後、SUN WOM700時間後および屋外暴露1年後の水蒸気透過阻止性について、また、図7に同様の方法にて水透過阻止性について報告された事例⁷⁾を示す。

報告によると、評価する試験項目によって、最良のダメージが与えられる促進の方法や時間を考慮する必要があることが示唆されている。

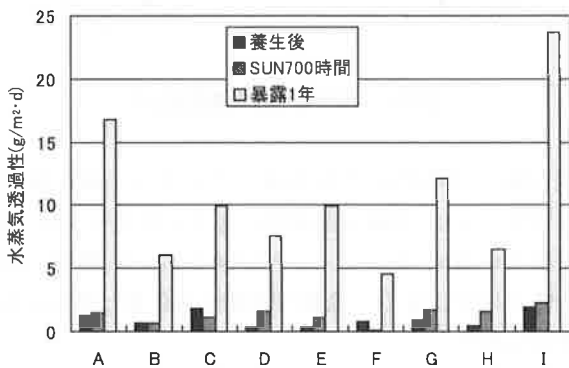


図6 水蒸気透過性

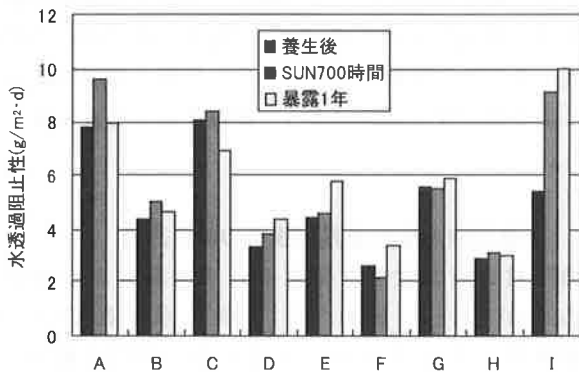


図7 水透過阻止性

3.4 塗膜の機械的性質

縦山²⁾らは、塗膜の表面状態を評価する方法として、粘弾特性⁸⁾を取り入れている。

微小硬さ測定法は、図8に示すように圧子（四角錐の先端の対面角が136°のダイヤモンド製）に最大1000mNまでの荷重を段階的に変えながら圧子を塗膜に押し込み、得られた荷重/圧子の押し込み深さのヒステ

リシス曲線から、弾性変形の仕事量および塑性変形の仕事量を含めた全仕事量等の粘弾特性値を求める。この得られた測定値の変化から、塗膜の表面状態を推定している。

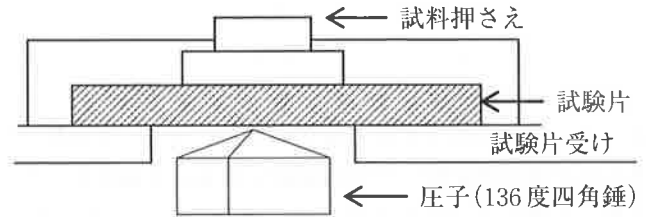


図8 表面微小硬度測定器の測定部（圧子）

この表面微小硬度測定器を用いて塗膜硬化時期の推定を行ったところ、押し込みに要した全仕事量が6ヶ月後で最大値を示した。また、圧子の全押し込み深さが1年後で極小値を示していることより、塗膜の硬化は6ヶ月～1年の間ではほぼ平衡に達する傾向が推定されている。したがって、従来の28日間養生では、供試体の架橋反応は必ずしも終結していない可能性があることが示唆されている²⁾。これらの手法は今後、屋外暴露や促進耐候性試験後の塗膜劣化を推測するにあたり、白亜化、色差および光沢保持率等、塗膜表面の劣化状況だけでなく、塗膜内部の経時変化を追ううえで利用できるものと考えられる。

4. 塗膜の耐久性評価に関する提案

塗膜の耐久性評価のあり方として、現在の評価手法に加え、以下の3点を提言したい。

①対象とする性能に適した耐久性評価が必要。

評価項目によっては、「基準等で定められた試験室での試験」だけでなく、実構造物での劣化現象を把握して、可能な限り実状に即した耐久性試験方法を選択することにより、要求性能にあった試験を行うことも重要な要素と考える。

②表面劣化のみの耐久性評価は注意が必要。

SUN WOM およびキセノンランプを用いた促進耐候性試験での促進劣化は、樹脂の種類、色によっては異なる傾向を示すものの、表面劣化としての色差、光沢、白亜化等は有効と考える。しかし、物理的性能を検討する場合、屋外暴露での物性評価とは異なる場合があり、必ずしも同等または比例した劣化傾向を示さないものもあるため注意が必要である。

③塗装材の表面状態および劣化現象の把握。

弾性変形および塑性変形の仕事を含めた全仕事量の粘弾特性値の経時変化から、塗膜硬化時期の推定が可能と考える。また、表面観察ではトップコートの変状しか掴めない可能性があるが、粘弾特性をおさえることにより、主材層の劣化状況もある程度推測可能である。

5. まとめ

現在、コンクリート塗装材における塗膜評価試験は様々なものがあるが、実構造物での調査結果、屋外暴露試験および促進試験等の関係もおさえると共に、これまでに報告されている様々な評価事例を参考に、できるだけ実構造物での知見に合う試験方法を見いだして試験の複合化を図ることも重要と考える。

今後も現場での貴重な調査結果等を参考に、コンクリート補修および予防保全に用いられる塗装材料の性能評価を行っていく。

参考文献

- 1) 日本道路公団 維持管理要領(橋梁編)、第3編コンクリート構造物[Ⅱ]高欄・地覆、塗装材料規格、1988.5
- 2) 樺山好幸、吉田幸信、吉田 敦、山田卓司、宮川豊章：塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案、日本コンクリート工学論文集、第14巻第3号、2003年9月、pp.11-22
- 3) 樺山好幸、山田卓司：塗装系防食材における付着性能評価手法の検討(その2)、財団法人 日本塗料検査協会、Vague、日塗検ニュース113、2000夏号、pp.2-5
- 4) 安藤幹也、藤原俊明、山本雅貴、山田卓司：コンクリート構造物の塗装系防食材の追跡調査報告、材料学会、第5回コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム論文報告集第5巻、pp.399-404、2005.10
- 5) 山田勝彦：本四技報、Vol.15 No.58、pp9-10、1991.4
- 6) 江成孝文、桐村勝也、町田洋人、遠藤三郎：研究開発テーマ報告 No. R54814-2、コンクリート用補修材料の耐久性評価―品質規格試験および耐疲労性評価試験方法の開発―、財団法人 鉄道総合研究所、1993,3
- 7) 堀江 悟、小川 健、小柳 洽、宮川豊章：凍結防止剤散布環境下で複合要因による損傷を受けたコンクリートの塗装材料検討、コンクリート工学、Vol140、No.3、pp43-52、2002.3
- 8) 岩井弘、吉田豊彦：ユニバーサル硬さ試験による塗膜の劣化過程に於ける物性の評価、財団法人 日本塗料検査協会、Vague、日塗検ニュース106、2000冬号、pp.2-5

