

報告 コンクリート表面被覆工の付着不具合要因と施工管理項目について

佐々木 巖^{*1}・西崎 到^{*2}

要旨: コンクリート構造物の表面被覆工法は補修工法の一つとして広く実施されているが、期待した性能が発揮されず早期に再劣化する事例が報告されている。これは、現場条件をあまり考慮していない工法選定や施工不備等により、品質規格等で想定した性能が得られない事例が多いものと思われる。本研究では、コンクリート表面被覆材の信頼性の高い施工管理を実現するための対応策の確立を目的に、表面被覆工法の性能ならびに施工管理における不具合発生事由の要因検討と、それらの検証のための室内実験を行った。その結果、低温時や高湿度環境での被覆材の施工が表面被覆層の品質に大きな影響を与えることが示唆された。

キーワード: コンクリート, 補修材料, 表面被覆材, 施工環境, 施工管理

1. はじめに

表面被覆工法はコンクリート構造物の補修工法の一つとして、断面修復やひび割れ補修とともに古くから実施されており、外見的な健全さや美観を簡単に得られることから安易に適用してしまうこともある。しかしながら、期待した性能が発揮されず早期に再劣化する事例が見られる。これは現場条件をあまり考慮していない工法選定や施工不備等に起因したものが多くあると考えられる。

被覆材の品質は、国内の各機関が要求性能からその試験方法や規格値等を提案している。これらの指針基準類は、試験体や試験施工での経験等から設定された基準値と適用条件に基づいているものの、試験体と同様な施工が現場でも達成できることを前提とした、いわば(補修後の)使用段階の性能に基づく指標体系となっている。現場の施工環境に応じた材料選定、劣化度や環境に応じた適用条件や他の補修工法との使い分けなどは定まっておらず経験に頼っている状況である。

実際の補修工事では、施工しにくい案件への対応は現場任せにされがちで、たとえば夏/冬用樹脂の選択等、現場において仕様変更する前提で工事が進められている。また、施工中に環境変化が生じて工期の関係等から、厳しい環境条件や工期で塗装等が施工されることに起因する品質不良もあるものとみられ、施工の信頼性向上、とくに不具合発生を抑制するための施工管理の高度化をはかる必要がある。つまり、「使用段階の要求性能」ばかりでなく、現場条件を踏まえた材料工法選定を実現するための「施工段階の要求性能」と、不具合を抑制するための施工管理項目の明確化をしておくべきであると言える。

そこで本研究では、施工に起因する不具合発生要因に注目し、その要因把握と対策としての施工管理方法の向上を目的とし、要求性能や耐久性を踏まえ、不具合発生

要因を整理した。そして、これらの影響を室内試験により実験検証した。

2. 不具合発生要因と施工管理項目

表面被覆に求められる性能と対応する評価項目は、既往の資料¹⁾をもとに表-1の通り整理できる。

表-1 表面被覆工法の要求性能と評価項目の例

要求性能項目	評価項目の例
遮断性能	防水性, 水蒸気透過性 CO ₂ 遮断性, Cl ⁻ 遮断性, O ₂ 遮断性
	耐酸性, 耐アルカリ性
付着性能	ひび割れ追従性, 施工可能温度
	付着(含浸)性, はく落抵抗性 凍結融解抵抗性, 摩耗性, 表面水
美観景観	色調変化, 光沢変化, 異物付着
環境安全	有機溶剤, 有害物質
維持管理	劣化視認性, 旧膜除去, 再塗装

表-2 表面被覆工法の管理対象と項目の例

管理対象	管理項目の例
下地(基板)	下地粗度, 微細ひび割れ, 被塗面清浄度, 被塗面水分, 残存旧膜, 表面塩分量
塗装材料	可使時間, 混合比/状態, 塗布量
塗布環境	可使時間, 養生時間, 塗装機材, 気温, 湿度, 露点温度, 風速

この性能要件を達成するための表面被覆工法の管理対象として、主として施工に関する管理項目を表-2の通り整理した。

*1 土木研究所 材料資源研究グループ 新材料チーム 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 土木研究所 材料資源研究グループ 新材料チーム 上席研究員 博(工)

2.1 施工環境と表面保護工の性能

表面被覆工法は、コンクリート構造物の最外面に位置して、外部環境からの水をはじめとした劣化促進物質を遮断することが最大の性能項目である。その遮断性能を達成するためには、一般にコンクリート表面に十分に付着している必要がある。遮断性能とともに、景観演出が求められることもある。これらの被覆層は、現場でできるだけ簡易かつ信頼性をもって施工できる必要があり、その性能は所定の期間確保されるものでなければならない。さらに、屋外環境において使用するこれらの材料は、揮発性物質や有害物質といった環境安全性が担保されているものでなければならない。

2.2 表面被覆の性能を損なう施工条件と劣化要因

コンクリート表面に施工される表面保護被覆は、ほぼ全てに樹脂材料が使用されており、その樹脂が外観上硬化していれば一定の遮蔽性能があるとみられがちである。しかしながら、外見上正常な被覆層であっても、施工条件や供用環境によっては早期の剥離や十分な物質遮断性能を有していないなどの不具合が内在している可能性がある。

まず、付着性能および遮蔽性能を損なう施工条件について、事例調査、聞き取り、作業工程の確認などから、再劣化を誘発しうる要因を整理するとともに、劣化機構を勘案し供用中の早期再劣化を誘発しうる供用劣化項目について整理した。

(1) 付着性能を損なう施工条件

付着性能を損なう施工条件としては、施工面の含水状態、結露、表面塩分、塵埃、研掃、低温時塗布、塗重ね間隔などが挙げられる。とくに、樹脂系材料は表面水分の影響が大きいとされ、それを誘発する塩分や塵埃についても管理が必要である。研磨に関しては、粗面になるほど付着性能は向上することから、平滑面への付着性が確保されているかが基本なるものと考えられる。塗重ねにおいては、養生不足や硬化後の長時間経過にも注目する必要がある。

(2) 遮蔽性能を損なう施工条件

遮蔽性能を損なう施工条件には、養生時の温度条件、湿潤状態での硬化、過剰希釈、混合不良などがある。樹脂材料の反応は温度による影響が大きく、硬化物の品質は養生時の環境条件に大きく左右され、硬化した膜が外見上性状に見えても十分な遮蔽性能を有さないことが懸念される。また、被覆層は一定の膜厚をもって遮蔽性能を達成するものであるため、粗面になるほど局所的な膜厚不足のリスクが高まり面としての物質遮断性能は低下する。

(3) 長期供用時の性能低下要因

材料は長期供用中に劣化してゆくが、それを促進する

要因として、乾湿繰返し、凍結融解、膨張収縮率（温度/湿度）の相違、疲労（外力/膨張収縮）、紫外線等による分解などの材料劣化が挙げられる。これらの劣化要因は素材により基本性状がある程度定まるものであるが、現場での施工条件によりその性能低下速度が大きく異なる場合がある。その確認には多くの調査試験が必要となるが、その因果関係を把握し施工管理につなげることは、表面被覆の信頼性向上において大変重要である。

3. 被覆材施工環境の付着性能への影響

3.1 施工環境項目と評価試験方法

前項で整理した性能低下要因の施工管理条件としての影響のうち、付着性について室内試験による確認試験を行った。施工条件の評価試験項目は、湿潤状態、低温条件、表面粗度（平滑面で実施）、塵埃、未硬化分、若材合、養生不足、塗重ね日数放置、表面塩分である。本報では、被覆材塗布時における温度および湿潤環境の検証試験結果について報告する。

基板の養生条件、塗装時の温湿度環境条件を変化させて被覆供試体を作製し、付着強さ試験（JSCE-K531）を行って、塗布時の温湿度が付着性能に与える影響について評価した。

3.2 試験材料

本研究では、表面被覆材料の性能への施工環境の影響を把握することを主眼としている。したがって、湿潤面用や低温用といった高機能型や、繊維などを併用し層厚が大きくなる製品群ではなく、塩害やASR等の対策工法に用いる基本的な仕様の被覆材で遮蔽性能等の評価試験を行った。コンクリート表面保護工に用いられる市販の被覆材料から、有機系被覆3種、ポリマーセメント系1種を試験に用いた。層構成と塗布量を表-3に示す。

表面被覆材の評価試験基板には、無収縮モルタル（記号：A）を、表面水分量変化の試験については、断面修復型枠工法用のプレミックス型モルタル（記号：B）、断面修復型枠工法用のプレミックス型ポリマーセメントモルタル（記号：C）を加えた3種類を使用した。塗布面

表-3 表面被覆試料の材料と工法

記号	L	M	N	O
プライマ	エポキシ	エポキシ	エポキシ	アクリル
	0.1 kg/m ²	0.1 kg/m ²	0.1 kg/m ²	0.1 kg/m ²
中塗	エポキシ	エポキシ	エポキシ	アクリル系 ポリマーセメントモ ルタル
	0.35 kg/m ² *	0.26 kg/m ²	0.30 kg/m ²	1.60 kg/m ²
上塗	ウレタン	ウレタン	ウレタン	アクリル シリコン
	0.12 kg/m ²	0.12 kg/m ²	0.12 kg/m ²	0.16 kg/m ²
塗布方法：ポリマーセメントモルタル：ゴムベラ、その他：ハケ塗				

の素地調整は、硬化したモルタル面をダイヤモンドホイルで研削し不陸やレイタンスを取り除き、エアブローにより塵埃を除去して被塗面とした。

3.3 プライマ付着性への施工環境の影響

基板面の含水状態、塗布後の養生環境や時間を変化させた場合のプライマ付着強度を、被覆材Lとモルタル板Aにより試験した。なお、多くの機関から提案されている付着強度の（上塗りまで含めた総合膜の）基準値¹⁾は1MPaである。

まず、23℃にて基板乾燥、被覆材の塗布と養生を行った結果を図-1に示す。乾燥状態でのプライマ付着強度は、基盤破壊を呈することからモルタルの凝集力（引張強度）以上であることがわかる。また、10℃90%から23℃65%に移した供試体は、内部水のほか結露水により表面は一時的に飽水状態となるが、一定の時間乾燥した後に塗布すれば十分な付着力を有する。一方、水浸状態からの基板の乾燥時間が短い場合は、被覆材の付着強度は低下し1MPaを下回ることが懸念される。

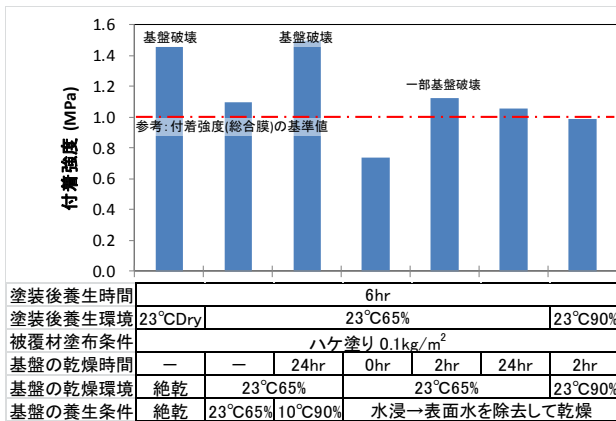


図-1 基板面の含水状態とプライマ(L)の付着強度

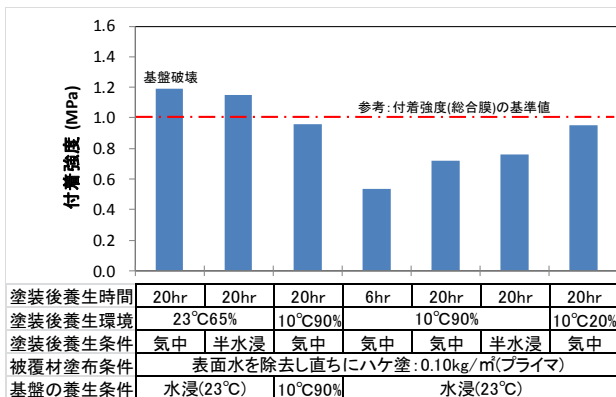


図-2 基板面の含水状態とプライマ(L)の付着強度

図-2は、基板が湿潤状態や、低温高湿条件で被覆材塗布後の養生を行った場合の影響に着目して付着試験を

行った結果である。水浸後にウェスで表面水を拭き取った直後、すなわち基板が含水した状況において、10℃90%での塗膜養生した試験体では付着力が低く、被覆膜と基板の一体性を得にくいことがわかる。塗布および養生条件の組み合わせによっては1MPaの付着力が期待できないことがわかった。

3.4 塗布時の温湿度と表面被覆層の付着性

図-3は、塗布時の温度条件に注目し、プライマから上塗りまで含めた表面被覆の総合膜の付着強度を、被覆材Lとモルタル板Aにより試験した結果である。この結果から、プライマのみの場合と同様に、施工時の温度が低くなるほど付着強度は低下することがわかる。プライマのみよりも付着力が大きい理由としては、各層一日養生であり養生期間が3日以上になること、多層膜のため応力が分散されること等が考えられる。今回の試験においては付着強度が1MPaを下回することはみられなかったが、低温時ほど値は小さくなっており、被覆工の信頼性は低下するものといえる。

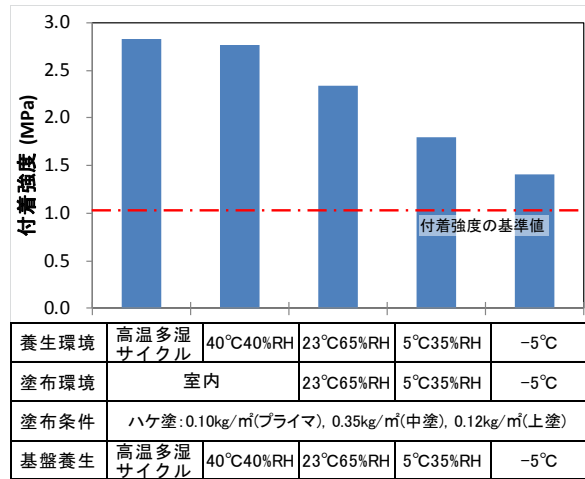


図-3 表面被覆(L)施工時の温湿度条件と付着強度

低温時は相対湿度が高いほか、温度の低いコンクリート面に湿潤空気が流れてくると結露を生じやすいことから注意を要する。化学反応により硬化する樹脂材料である表面被覆材は、湿潤状態とともに、塗布時の温度条件も重要な管理項目であることが確認できる。

これらの結果から、高分子系樹脂材料である表面被覆材の施工条件が付着強度に与える影響は大きく、とくに湿潤時や低温時に施工すると付着強度が低下することが確かめられた。施工条件を適切に管理しないと、施工直後の外観は正常であっても、早期のはがれ等の再劣化を生じる要因となりうる。

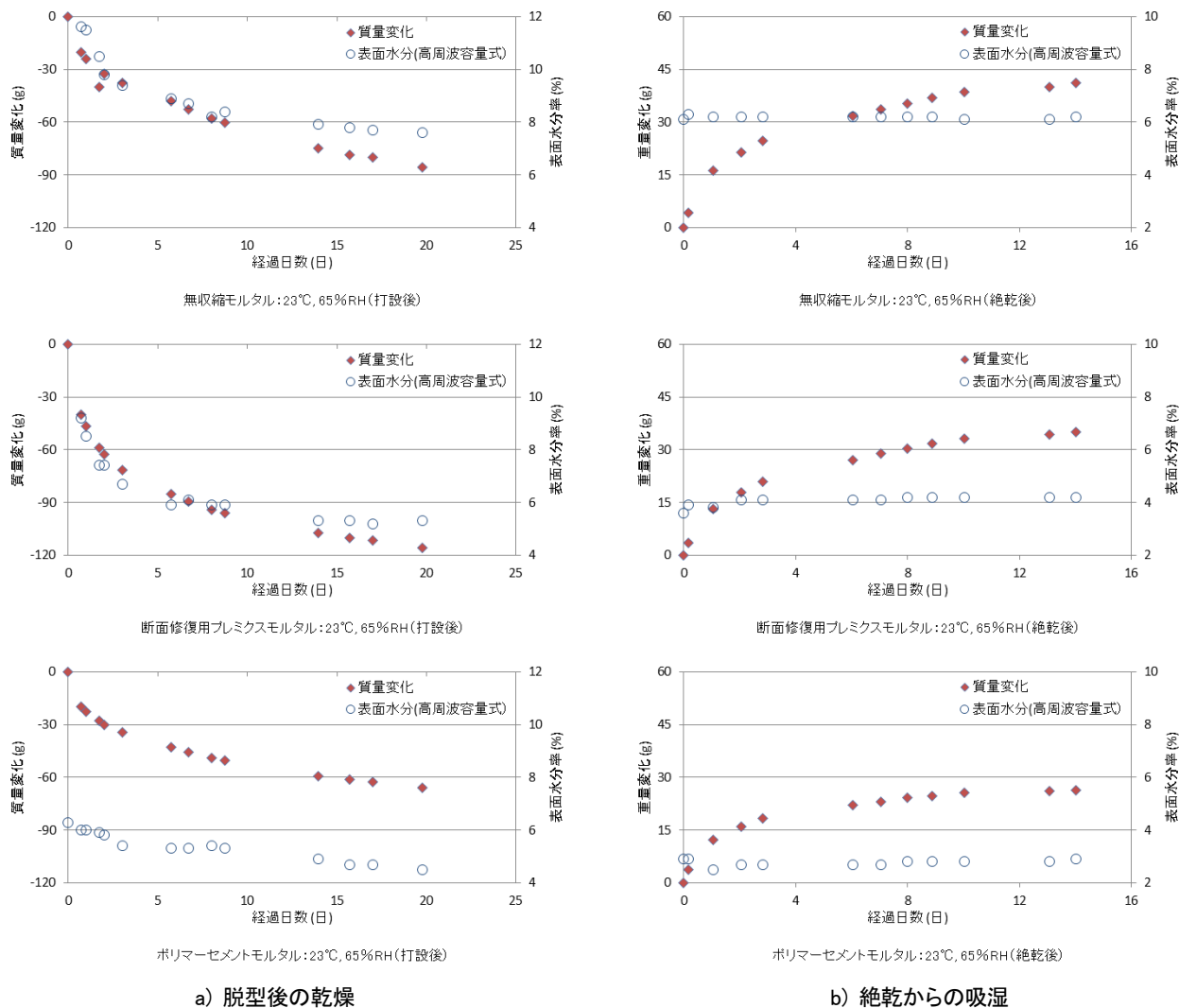


図-4 モルタル基板の含水率変化と高周波容量式表面水分計の関係

3.5 被塗面の表面水分変化

表面被覆工においては、塗布時の温度とともに基板面の湿潤状態が附着性能の確保において重要である。断面修復材の養生水分や、はつり工での散水や降雨等の影響が考えられる。図-4 a)は、30×30×6cmのモルタル板を脱型直後から23℃65%恒温恒湿槽中に静置し、水分量変化を重量変化から測定した結果である。高周波容量式の表面水分計(ケット科学 HI-520)により測定した値を併記する。

脱型後のモルタル中の水分は、水和反応により固定されない間隙水は表面から次第に蒸発してゆく。測定結果からこれが確認でき、表面水分計による測定値の変化も、ポリマーセメントモルタルを除きほぼ対応している。

一方、図-4 b)には、モルタル板を110℃で絶乾とした後に23℃65%恒温恒湿槽中に静置し吸湿させた場合の結果である。表面水分の値は試験開始後すぐに一定の値を示し、重量変化としてはかなりの量の水分を吸い込んでもその測定値は全く変化しておらず、コンクリート

が硬化乾燥した後の測定値の精度が高いとはいえない。コンクリートが水で飽和した状態でも水分量が6~8%と小さく測定されることが報告³⁾されており、供用後のコンクリートが湿潤状態に置かれた場合の表面水分の測定値の信頼性に懸念が残る。表面被覆材は、断面修復面に施工される場合を除き、硬化後時間が経過した面に塗布されることから、施工条件としての表面湿潤状態の管理方法を確認しておくことが望ましい。

3.6 塗布時の温湿度と附着性能

前項までの試験結果から、低温高湿時の塗布施工が被覆材の附着性能低下を誘発しうることがわかった。そこで、補修工事に一般に用いられている表面被覆材料4種類について、塗布時の基板養生ならびに作業環境を低温高湿とした試験を行った。

図-5は、5℃90%で施工した場合の、各被覆材の附着強度、せん断強度、ひび割れ追従性も試験結果を示す。エポキシ樹脂系の被覆材は低温になると品質不良が懸念されたが、附着性としてはある程度の性能が確保されて

いる。一方、ひび割れ追従性は低下する傾向があり、付着強度が大きいほどひび割れ追従性に劣ることがわかる。

図-6は、-5℃で施工した場合の試験結果である。付着力は5℃90%での結果と同程度であるものの、ひび割れ追従性はさらに低下することがわかる。特にポリマーセメント系は水和反応の阻害から氷点下での性能低下が非常に大きいことがわかる。

高分子系樹脂材料である表面被覆材の低温施工が遮蔽性能に大きな影響を与える²⁾ことがわかっているが、付着性能も低下することが確かめられた。低温時は相対湿度が高く被塗面に結露を生じやすく、塗布時の温度条件は重要な管理項目である。施工条件を適切に管理しないと、初期の外観は正常であっても、早期のはがれ等の再劣化を生じる要因となりうるものと言える。

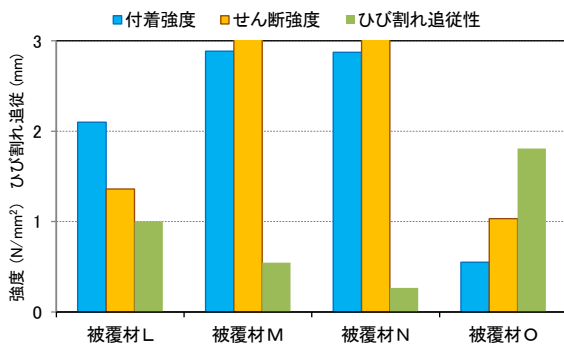


図-5 5℃90%で施工した被覆材の付着性状

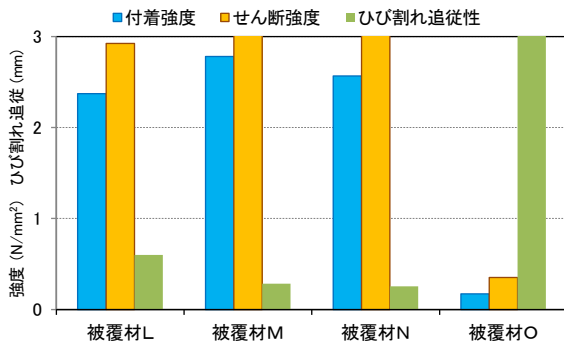


図-6 -5℃で施工した被覆材の付着性状

3.7 屋外暴露における付着耐久性

温湿度条件をはじめとした表面被覆材の施工条件は、被覆層の長期耐久性にも影響を与え、コンクリート構造物の早期の再劣化の要因となり得るものと考えられる。不具合が懸念される施工条件での供試体を屋外の実環境において長期的に観察し、必要に応じて定量的な測定評価を行う必要があるため、低温時や湿潤面塗布をはじめとした様々な施工条件における供試体を用い、つくばの土木研究所構内のほか、沖縄や日本海沿岸等の各所にて

屋外暴露試験を実施中である。

標準条件である 23℃65%にて施工した表面被覆供試体を、つくば土研構内での1年間の暴露(図-7)における付着強度の試験結果を図-8に示す。付着強度は当初から大きな値であり、暴露中にさらに増大している。付着試験での被覆材L, M, Nの破壊モードはすべてモルタル板の凝集破壊であり、セメントおよび樹脂の時間経過による硬化反応の進行によるものとみられる。また、ポリマーセメント系の強度増進割合が大きい、素材劣化による劣化硬化もあり得るものの、被覆材の硬化反応の進行による影響が大きいと考えられる。供用中の被覆材の性能をどの時点で評価すべきか検討が必要であると思われる。低温条件等のさまざまな環境条件で施工した暴露供試体の性能低下とあわせて、今後の課題である。



図-7 表面被覆供試体の暴露試験状況

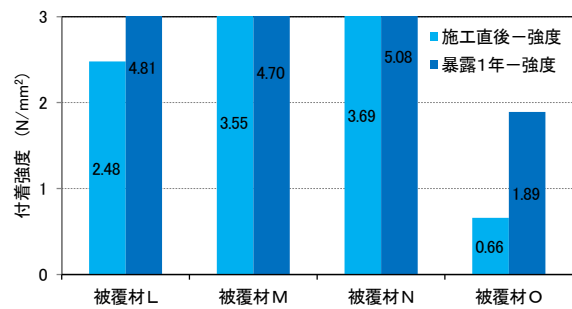


図-8 つくば一年暴露による付着強度変化

4. まとめ

コンクリート構造物の長寿命化のための表面被覆工法の適切な設計施工技術の確立を目的に、性能要件と不具合発生要因について整理し、付着性の不具合発生事由について実験的検証を行った。室内試験からは、湿潤や低温時の施工が付着性に影響を与えることがわかった。とくに、低温条件での被覆材の養生は、水分をはじめとした劣化因子の遮蔽性を低下させることもわかっている。

低温高湿環境における施工管理は重要であり、今後の調査研究の方向性として、以下のように整理できる。

- ・不具合が予見される環境条件での補修工事を設計時に適切に見込める判定基準の設定
- ・可能性のある不具合を回避できる工法と材料選定等の対策手法の体系化

施工条件を変化させた表面被覆試験体の屋外暴露試験については、暴露1年後の先行評価からは、被覆材の変化の傾向が得られているが、今後、施工条件の相違による耐久性への影響について追跡調査をすすめてゆく必要がある。

現場での施工管理を実効あるものにするためには、施工箇所における環境条件を把握し、これに即した管理項目を設定し運用することが求められる。たとえば温湿度については、表面被覆材の施工箇所全面を迅速に判定し、不具合の発生を最小限に抑えられるような面的な手法が求められる。

今後、性能に影響を与える要因についてさらに実験研究を進めるとともに、施工環境を簡易かつ信頼性の高い方法で評価し記録できるような施工管理方法の高度化が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー119 表面保護工法設計施工指針(案)，土木学会，2005
- 2) 佐々木 敏，西崎 到，守屋 進：表面保護被覆の水蒸気透過性状と施工時の環境条件の影響，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，Vol.12，pp.473-476，2012.11
- 3) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター：既設道路橋コンクリート床版の耐久性向上に関する研究-既設床版の塩分浸透状況に関する実態調査-，土木研究所資料，No.4160，pp.67-69，2012.11