

剥落防止工法に対する要求性能と各種評価試験に関する検討

藤倉裕介 秩父顕美^{*1}

概 要

近年、トンネル覆工コンクリートや高架橋コンクリートの劣化による剥落が大きな問題となり、繊維シート接着による剥落防止対策が活発に行われている。これに対し、工程を短縮して経済的な剥落防止対策を施工するために、無機系のポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法を開発し、これまでに適用実績を示してきた。本報告では、工法の概要や特徴、適用事例を示すとともに、剥落防止工法としての要求性能である施工性、劣化因子の遮断性能、剥落防止性能(強度性能)に関して検討した結果について紹介する。

Evaluation of Concrete Exfoliation Prevention Method Using Inorganic Type Mortar

Abstract

In recent years, concrete exfoliation of the tunnel linings and the concrete bridges has caused numerous problems, and continuous fiber sheets have been widely used as a preventative measure. Against such a background, in order to shorten the repair process and reduce construction costs, we have developed an exfoliation prevention method which uses an inorganic polymer cement mortar and continuous fiber sheets, and applied the method to several actual sites.

In this report, we outline the developed concrete exfoliation prevention method and show some application examples. We also show results for construction efficiency and exfoliation resistance performance for the method.

キーワード: 剥落防止工法, ポリマーセメント
モルタル, 連続繊維シート

*1 株式会社高環境エンジニアリング 工学博士

§1. はじめに

近年、トンネル覆工コンクリートや高架橋コンクリートの劣化による剥落が大きな問題となり、繊維シート接着による剥落防止対策が各方面で活発に行われている。これに対し、道路系あるいは鉄道系の各管理機関においてはコンクリート剥落防止対策および補修・補強工法のためのマニュアルが策定され、適用が図られるとともに、剥落防止効果に関する研究も多く行われている。また、補修を必要とする鉄道や道路では供用中に施工する場合が多く、時間的な制約が大きいことから、施工性が良好でかつ経済的な補修技術が強く望まれている。

このような背景から、工程を短縮して経済的な剥落防止対策を施工するために、無機系のポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法を開発し、適用実績を示すとともに、剥落防止性能を確認する基礎的な実験の結果を報告してきた^{1), 2)}。本報告では、本工法の概要や特徴、施工性および剥落防止工法としての要求性能に関して検討した結果について示すとともに、現場への適用事例について紹介する。

§2. 工法概要

本工法は無機系のポリマーセメントモルタルをライニング材として用い、連続繊維シートを接着する工法である。施工の部位によってはアンカーで固定する方法も併用され、主に施工直後に供用を開始する必要がある場合などに使用する。剥落片が小さい場合などにはアンカーを省略することも可能である。工法のご概念図を図1に示す。本工法に使用する連続繊維シートは、アラミドとビニロンの格子状のネットにポリプロピレンの不織布を一体化させた立体網目不織布を用いている。本連続繊維シートは柔軟性があり、耐アルカリ性に優れるとともに、不織布により、ライニング材に用いられるポリマーセメントモルタルのひび割れを防止する。

図2にRC構造物の場合の施工フローを示す。施工は単純であり、工程間の待ち時間が無いため、全工程を1日で終了できる。また、樹脂系接着剤を用いて繊維シートを接着する剥落防止工法と比較して、以下の特徴が挙げられる。

- a) 湿度が高く結露する場所やコンクリート表面が湿潤であっても施工可能である。
- b) 無機系材料であるため、紫外線などに対する耐久性が高く、劣化対策が不要である。
- c) コンクリート表面の小さな凹凸に対するプライマー塗布や不陸修正が不要である。

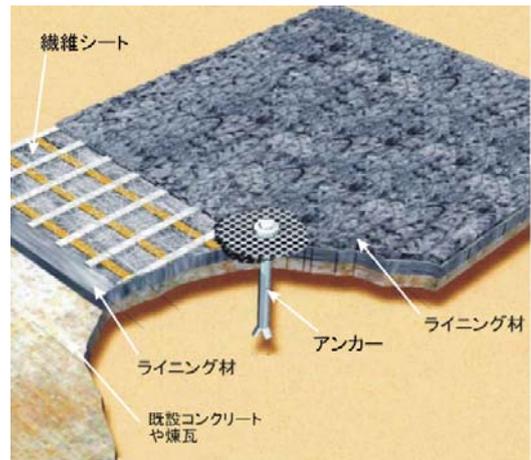


図1 工法のご概念図

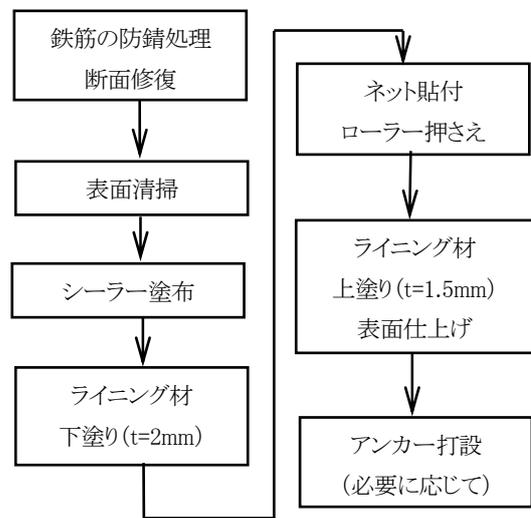


図2 RC構造物の場合の施工フロー

- d) コンクリート界面の水分を適度に発散するので、ライニング材の膨れが生じない。
- e) 無機系材料であるため、人体への影響が少ない。

§3. 剥落防止工法としての要求性能

3.1 施工性およびライニング材の仕様¹⁾

施工の対象となる道路や鉄道などでは、供用中に施工あるいは施工直後に供用を開始する場合が多く、時間的な制約が大きいことから、ライニング材として用いるポリマーセメントモルタルには、以下のような性能が要求されると考えられる。

- a) 天井あるいは壁への施工であるため、適度な粘度と流動性をもつこと。
- b) ある程度短時間で硬化すること。
- c) 硬化後の耐久性に優れること。

d) 十分な強度性能を有すること。

これらの要求性能により、材料および配合を選定した。ポリマーセメントモルタルはプレミックスされており、希釈したポリマー混和液を配合するだけでライニング材として使用することができる。プレミックスされた粉体には速硬型のセメントと珪砂、硬化調整剤が含まれている。ポリマーには耐候性と耐久性に優れたエポキシ変成アクリル樹脂を使用し、ポリマー混和液を 1.5 倍に希釈して使用することを標準とした。このプレミックスタイプのセメント系粉体とポリマー混和希釈液を用い、表 1 に示すように混和液と粉体の比率(配合比=混和液/粉体)を変化させた場合において、モルタルの性状および強度の確認のための試験を実施した。

表 1 に示すように、配合比(=混和液/粉体)が減少すると、ポリマーセメント比(P/C)および水セメント比(W/C)は低下する。表 1 に示す配合比の範囲は事前に壁や天井に対し、施工可能であるかの有無を調べた上で決定した。すなわち、粉体 1 に対する混和液の重量比が 0.27 を越えると、ライニング材はゆるい状態になり、施工中に流動し、所定の厚さを保てなくなる。また、重量比 0.21 を下回ると流動性が低く、こて等を用いた施工が不可能になる。このようなモルタルのワーカビリティを示す指標として、フロー値あるいは粘度が考えられるが、これらの計測結果を表 2 に示す。モルタルフローは JIS R 5202 に示す方法で測定し、粘度は JIS K 5400 に示されている中の回転粘度計法を用いた。回転粘度計には B8H 型を用い、ローターは No.7 のタイプを使用した。この粘度計には 0.5～100rpm まで 8 種類の回転数を変化させて計測できるが、モルタルは水のようなニュートン流体とは異なり、粘度計の回転数の増加に伴い、粘度が低下する傾向がある。表 2 には回転数 5rpm の場合の粘度の結果を示した。表 2 より、配合比の減少に伴い、フロー値は減少し、粘度は増加する傾向にあることが分かる。高架橋やトンネルなどの構造物の壁面に本工法を施工することを考えると、練り上がり直後のフロー値は 150～220mm 程度の値が必要である。また、粘度については絶対的な評価値の検討が必要であるが、50～150Pa・s 程度の値を有する性状が必要であることが分かる。(表 2 ハッチング欄を参照)

ライニング材の強度の評価については、φ 50mm × 100mm の円柱試験体を用いた圧縮強度試験を実施した。図 3 に W/C と圧縮強度の関係を示す。図 3 より、材齢 7 日程度で、剥落防止工法の施工対象である母材のコンクリートの強度(例えば、30N/mm²)と同等な強度が得られていることが確認できる。以上、施工性の検討により、ライニング材の厚さは 3.5mm とし、混和液/粉体=0.27 の配合を標準的な仕様とした。

表 1 配合比と P/C, W/C

混和液/粉体	P/C	W/C(%)
0.27	0.099	39.4
0.25	0.091	36.5
0.23	0.085	33.6
0.21	0.077	30.7

表 2 ライニング材の物性試験結果

項目	混和液/粉体				
	0.27	0.25	0.23	0.21	
練り温度(°C)	20.0(±2.0)				
フロー値 (mm)	直後	220	189	169	162
	30分後	214	168	153	140
	60分後	210	164	測定 不可	測定 不可
粘度 (Pa・s)	直後	49	56	96	152
	30分後	84	80	152	184
	60分後	88	128	192	240

注) ハッチング欄が適用可能範囲

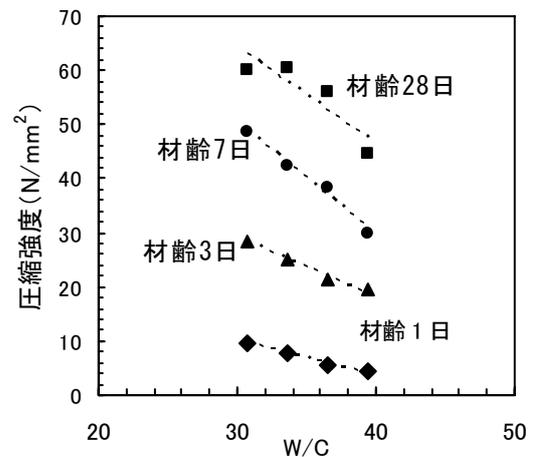


図 3 W/C と圧縮強度の関係

3.2 劣化要因の遮断性能

剥落防止工法には、コンクリート劣化因子の侵入を抑制し、耐久性を向上させる性能が要求される。そのため、管理機関ではコンクリート劣化要因の遮断性能基準を定めており、構造物内部の鉄筋腐食に関係する主な物質に関して規定している³⁾。項目としては、中性化抑止性、水蒸気透過性、酸素遮断性、塩化物イオン透過性等がある。表 3 に試験方法の一例を概説し、表 4 に各管理機関の定める基準値と本工法の標準的な仕様における試験結果を示す。

表 3 剥落防止工法のコンクリート劣化要因の遮断性能試験方法

試験項目	試験方法
中性化抑止性 (mm)	水セメント比 65%, 100×100×100mmのモルタルの 4面に塗装した後, 残りの 2面(型枠に接していた面)に剥落防止工を施し, CO ₂ 濃度 5%, 温度 20±3℃, 湿度 60%環境下で 10 週間静置する。その後, 施工面中心線に沿って割裂する。割裂面にフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧し, 赤変しない部分の最大深さを測定する。
水蒸気透過性 (mg/cm ² ・日)	厚さ 3.5mmの試験片を作成し, 「JIS Z 0208 防湿梱包材量の透湿度試験方法」により試験する。試験片を透湿カップに設置し, 試験片を境に一方の空気を 90%R.H.に, 他の側の空気を吸湿剤によって乾燥状態に保ち, 24 時間にこの境界を通過する水蒸気の質量を 1cm ² ・日あたりに換算した値を水蒸気透過性として算出する。
酸素遮断性 (mg/cm ² ・日)	厚さ 3.5mmの試験片を作成し, 「ASTM D 1434」に準拠して試験する。試験片の片側に 1 気圧の酸素ガスを加え, 他の側を真空状態にして 23℃, 50%R.H.の環境下に置く。試験片中に拡散して透過した酸素ガスによって減圧側の圧力が徐々に増加し, その圧力が時間に対して直線的に変化する時の勾配から酸素遮断性を求める。
塩化物イオン透過性 (mg/cm ² ・日)	厚さ 3.5mmの試験片を作成し, 「JIS K 5400, 8.18 塩素イオン透過度」に準拠して試験する。2 個の測定セル間に試験片を取付け, 一方のセルに脱イオン水を, 他方のセルに塩化ナトリウム 3 ³ / ₁₀₀ %溶液を満し, 20℃環境に 30 日間静置する。その後, 脱イオン水側のセルから溶液を採取し, 塩素イオン濃度を測定して, 試験片を透過した塩化ナトリウムの量を 1cm ² ・日あたりに換算した値を, 塩化物イオン透過性として算出する。

表 4 コンクリート劣化要因の遮断性能と本工法の試験結果

項目	中性化抑止性	水蒸気透過性	酸素遮断性	塩化物イオン透過性
養生方法	中性化促進 10 週間	3000 時間促進耐侯	標準養生	標準養生
本工法の試験結果	0.0mm	1.1mg/cm²・日	0.04mg/cm²・日	0.0mg/cm²・日
各管理機関の基準	東海道新幹線	3.0mm 以下	10.0mg/cm ² ・日	—
	JR東日本	1.2mm 以下	—	0.05mg/cm ² ・日
	JR西日本	1.2mm 以下	—	1.0mol/m ² ・日
	首都高速道路公団	1.0mm 以下	—	—
	日本道路公団	—	—	—

表 3 に示すように, 例えば中性化抑止性に関しては, CO₂濃度 5%の環境に 10 週間静置して, 中性化を促進する方法により中性化の抑止性を調べる。促進中性化試験の試験期間は, 一般大気中のCO₂濃度 0.03%の 166.7 倍の環境であることから, 一般大気中の 32 年(166.7×10 週間)に相当する⁴⁾。ちなみに, 東海道新幹線における中性化抑止性の基準値(3mm以下)は, 供用期間約 34 年が経過した時点で, かぶりコンクリートのうち 16mmが中性化しているという既存構造物の調査結果から, 鉄筋腐食が開始しない程度の中性化残りを 4mmとし, これを 150 年供用するものとして求めた値としている⁵⁾。室内での試験結果の範囲ではあるが, 本工法で使用するライニング材は, 劣化要因に対して

十分な遮断性能を有していることが分かる。なお, 表 4 に示す各試験は, 更なる耐久性の確認を目的として, 試験期間や負荷時間を延長し, 現在も実施中である。

さらに, 日本道路公団では平成 16 年 4 月に構造物施工管理要領が改訂されるとともに, 平成 12 年から暫定的に行われてきた「はく落防止の耐久性能試験方法(JHS425:2004)」が制定された。この試験では, キセノンランプによる紫外線照射(JIS K 5600-7-7)による促進耐侯性(1200 時間あるいは 2500 時間の照射)およびアルカリ促進温冷繰返しによる負荷後にひび割れ追従性試験と付着強度試験, 塩化物イオンの浸透性試験を実施することが定められている。この試験については着手しており, 現在実施中である。

3.3 剥落防止性能(強度性能)

剥落防止工法には、補修の対象となるコンクリートと一体化して劣化コンクリート片の剥落を防止する機能が要求される。一般にこの機能を規定する試験方法として、付着強度試験および押し抜き試験が実施される。これらの性能に関して調べた基礎的な実験結果について、以下に報告する。

付着強度試験は、300mm×300mm×60mmのコンクリート平板に剥落防止工法を施工した試験体について、建研式接着力試験機であるセンターホール型簡易油圧式ジャッキを用いて実施した。また、試験に用いる鋼製治具は40mm×40mmの大きさのものを用いた。剥落防止工法の施工は、標準的な仕様の配合である混和液/粉体=0.27の場合とし、施工から所定の材齢までの養生は、気温20℃、湿度65%に管理された恒温恒湿室内で実施した。材齢は0.5日、1日、3日、7日、28日にて実施した結果を、材齢と付着強度の関係として図4に示す。各機関では、材齢7日あるいは28日以降において、付着強度の基準値(鉄道系機関では1.0N/mm²以上、道路系機関では1.5N/mm²以上)を設けているが、図4より各機関の定める基準値を満足していることが分かる。なお、付着強度試験時の破断箇所についてはコンクリート板と補修面との境界での剥離や補修部分の層内部での引張破壊など、様々な場合が想定されるが、モルタル層内の連続繊維シートとモルタルの界面で破壊が生じた。

一方、押し抜き試験は一般的にU字溝用の蓋(400mm×600mm×60mm)の中央にφ100mmのコア抜きを行い、裏面中央部に剥落防止工法を施工する。この試験には管理機関により、基準値が押し抜き変位を考慮する場合と、考慮しないで最大値で規定する場合がある。前者は鉄筋の膨脹圧による剥落を想定して、変位10mm以上の変形後における繊維シートを破断を重視しているのに対し、後者は初期の塗膜(ライニング材)の押し抜きせん断による破壊荷重を重視している。本報告での押し抜き試験はU字溝用の蓋の中央部に底部を5mm残した状態でφ100mmのコア削孔を行い、裏面の中央部に400mm×400mmの大きさで剥落防止工を施工する方法で実施した。試験はアムスラー式万能試験機を用いて、試験体のコンクリート圧子に垂直方向に変位を与える方法¹⁾で実施した。载荷速度は、試験体のコア底部に残された部分およびモルタル(ライニング材)の破壊が生じるまで1.0mm/min、その後は5.0mm/minに調整して実施した。また、圧子の鉛直変位の増加に伴う施工面の剥離の進行過程を調べるために、鉛直変位1.0mmごとに载荷を一時中断し、剥離の状況を観察し、マーキングした。押し抜き試験後、キルビメータを用いて剥離周長を測定した。

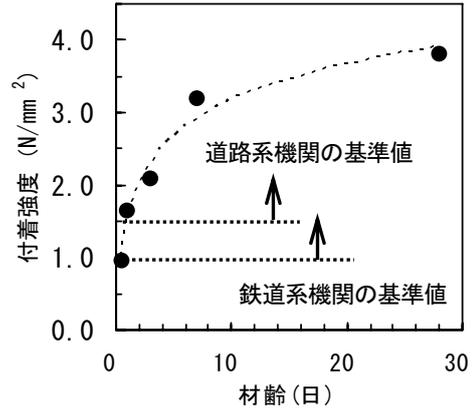


図4 材齢と付着強度の関係

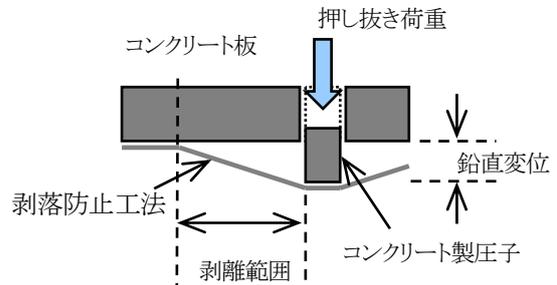


図5 押し抜き試験のイメージと剥離状況

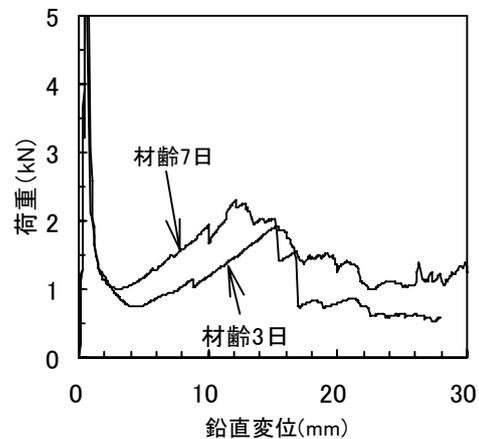


図6 圧子の鉛直変位と押し抜き荷重の関係

図 5 に押し抜き試験のイメージと剥離状況を示す。図 6 に試験結果の一例として、材齢 3 日および 7 日の場合のコンクリート製圧子の鉛直変位と荷重の関係を示す。コア底部に残された部分およびライニング材の破壊が生じた後、荷重は繊維シートに負担され、鉛直変位の増加に伴って荷重は増加する。その後、鉛直変位 10mm～15mm に達した時点で繊維束の部分的な破断が生じ、荷重は低下した。この時点で得られた最大荷重を押し抜き荷重とした。その後、コンクリート製圧子の鉛直変位の増加に伴って、剥離の進行、繊維束の伸びと部分的な破断が生じるが、荷重が大きく増加することは無かった。ちなみに、各機関では材齢 7 日あるいは 28 日について押し抜き荷重の値を規定しており、一般的にはコンクリート製圧子の鉛直変位が 10mm 以降の最大荷重が 1.5kN 以上と定めている。図 6 より、本工法において、その基準値を満足する結果が得られていることが分かる。

さらに、剥落防止性能の長期耐久性を調べる目的で、屋外暴露試験を実施している。ちなみに施工後 6 ヶ月および 10 ヶ月、15 ヶ月にて押し抜き試験、付着強度試験を実施しており、各機関の規定を満足する結果が得られていることを確認している。

§4. 施工事例

以上のように本工法は各機関の要求性能、規格を満足しており、今日までに約 40,000m²程度の施工実績を積み重ねてきている。例えば、鉄道高架橋の施工事例を図 7 に示す。施工前は内部鉄筋の発錆が部分的に生じており、鉄筋の防錆処理および被りコンクリートのはつり落し、断面修復を実施後に本工法の施工を実施した。図 8 には、大正期に構築された単線煉瓦トンネルの補修に本工法を適用した事例を示す。多くの煉瓦にひび割れが発生し、背面からの水分供給が多いことなどから、本工法を採用した。

§5. おわりに

無機系材料と連続繊維シートによる剥落防止工法について、工法概要を示すとともに、剥落防止工法としての要求性能である施工性、劣化因子の遮断性能、剥落防止性能に関して検討した結果について報告した。また、施工事例として高架橋コンクリートおよび煉瓦積み覆工トンネルの補修工事に適用した結果を紹介した。さらに、既設レンガ積み覆工トンネルへの適用性を確認する実験⁶⁾も実施している。今後は適用事例を増やすとともに、長期的な耐久性に関する検討を行う予定である。



図 7 高架橋の施工事例



図 8 煉瓦トンネルへの適用事例

参考文献

- 1) 藤倉裕介, 伊藤祐二, 秩父顕美: ポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法に関する基礎実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1487-1492, 2003.7.
- 2) 藤倉裕介, 伊藤祐二, 秩父顕美: 無機系材料による剥落防止工法の押し抜き耐力の評価法, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1487-1492, 2004.7.
- 3) 牛島栄: 各種仕様書類における規定 —各機関の規定内容の相互比較とその設定根拠—, コンクリート工学, Vol.41, No.9, pp.91-100, 2003.9.
- 4) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説.
- 5) 社団法人日本鉄道施設協会: 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準.
- 6) 藤倉裕介, 吉川和行, 岡野法之, 津野究: 無機系材料による剥落防止工法のレンガ積み覆工トンネルへの適用性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1567-1572, 2005.6.



藤倉 裕介

ひとこと

本工法を主体とした補修・補強技術の現場への適用、普及を行うとともに、コンクリートの高耐久化、劣化対策技術の開発に努めていきたいと思っています。