

報告

RC床版における炭素繊維補強工の不具合事例

白石元紀\*, 三島啓吾\*, 千々和辰訓\*, 住吉孝一\*, 矢野豊信\*

\*福岡北九州高速道路公社, 福岡事務所保全課 (〒812-0055 福岡県福岡市東区東浜 2-7-53)

福岡北九州高速道路公社(以下「福北公社」)が管理する福岡高速道路では,平成24年度から「老朽化・予防保全対策」の取組みを行っており,その中で鉄筋コンクリート(以下「RC」)床版の炭素繊維シートを用いた補強を実施しているところである。

今回,RC床版の補強のために実施した炭素繊維シートの接着箇所には大量の不具合(炭素繊維シートの浮き)が確認された。その不具合の概要と対応について報告すると共に今後の課題について共有する。

キーワード: 炭素繊維, 不具合, アミンブラッシング, エポキシ樹脂

1. はじめに

福北公社が管理する福岡高速道路は,橋梁の占める割合が延長比で93.3%である。また,建設後40年を超える橋梁数の割合は現在0%であるが,20年後には約39%と大幅に増加する(平成29年12月31日現在)。

このため,福北公社では平成24年度から福岡高速道路の効率的な維持管理を目的として,顕在化した損傷への対策(老朽化対策)と軽微な段階の損傷への事前対策(予防保全対策)を合わせて実施する「老朽化・予防保全対策」の取組みを行っている(図-1参照)。

現行設計(平成24年時点)に基づく照査の結果,昭和48年の道路橋示方書により設計・施工されたRC床版の耐力不足が確認されたため,「老朽化・予防保全対策」の取組みの1つとして,RC床版の補強対策を行っている。RC床版の補強は,炭素繊維シート接着(格子貼り)により実施している(図-2参照)。

福北公社で行っているRC床版の補強工事は,平成29年度末時点で11工事(施工面積3.4万㎡)が施工完了しているが,その内の隣接する2工事(施工面積0.8万㎡)において,大量の不具合(炭素繊維シートの浮き0.05万㎡,当該工事施工面積の約6%)が確認された。

今回は,この不具合の概要とその対応,対策について報告すると共に今後の課題について共有する。

2. 不具合の概要

炭素繊維シートの不具合が発生した場所は,図-3に示す福岡高速1号線の工事現場である。この工事現場では,平成28年11月から平成29年3月に炭素繊維シート補強工を各径間ごとに順次施工しており,その径間の施

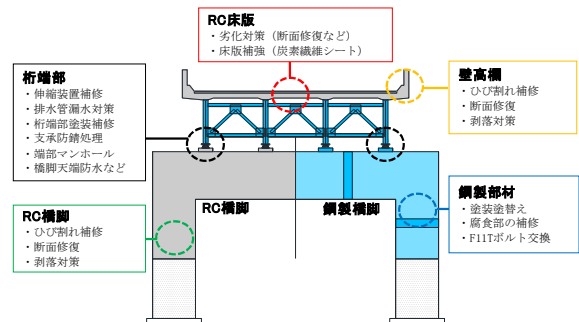


図-1 「老朽化・予防保全対策」の取組み一例

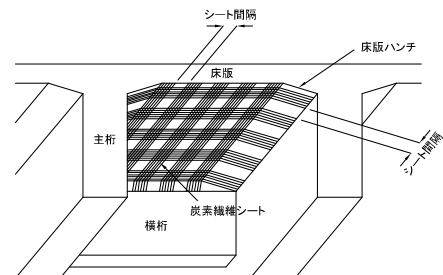


図-2 炭素繊維シート接着(格子貼り)のイメージ



図-3 炭素繊維シートの不具合発生場所

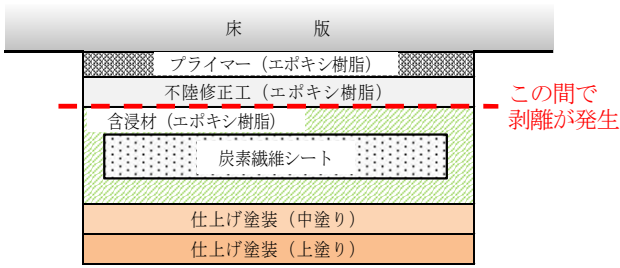


図-4 剥離が発生した部分 (断面図)

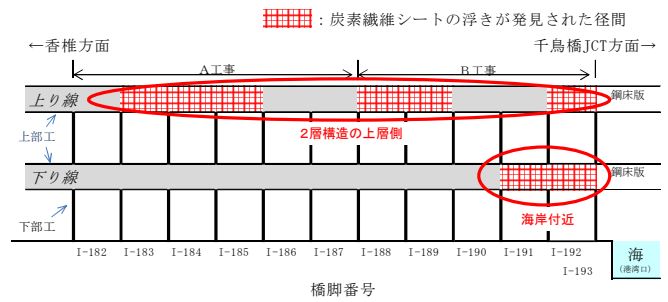


図-5 浮きが発生した径間 (側面図)

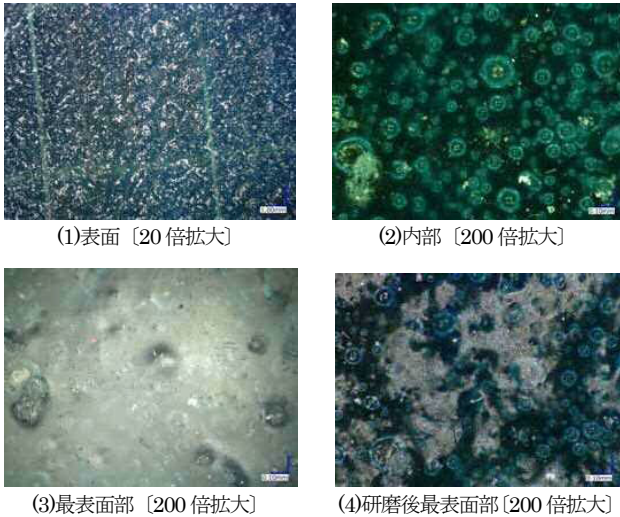


写真-1 光学顕微鏡による含浸材界面の拡大画像

工が完了した直後に、パルハンマーを用いた打音による炭素繊維シート接着面の全面点検を行い、浮き等の異常が生じていないことを確認していた。

しかし、塗装塗替え等の補修が完了した約半年ほど後の平成29年8月から12月に、同様の方法で再点検を行ったところ、平成29年1月から平成29年2月の冬期に炭素繊維シート補強工を施工した箇所に大量の浮きが確認された。この浮きは、エポキシ樹脂のパテ材による不陸修正工（以下「パテ材」とエポキシ樹脂の含浸材の界面（図-4参照）で剥離が生じたために発生したということが調査により判明した。

また、剥離した含浸材の表面には白い粒状物が付着していることが目視で確認できた。その含浸材の表面を光学顕微鏡により観察を行ったものを写真-1に示す。

写真-1の撮影に使用した光学顕微鏡は、焦点距離を深さ方向に変化させることが可能で、内部の状況を観察できるものである。写真-1(1)は、含浸材の剥離面を倍率20倍で撮影したもので、含浸材表面に多数の気泡が確認できる。これらの気泡は、含浸材の攪拌時に巻き込んだものと考えられる。次に、焦点を気泡に合わせ含浸材の内部を撮影したものが写真-1(2)である。また、同じ倍率で最表面部を撮影したものが写真-1(3)である。写真-1(3)では、全面に灰白色の層が確認される。更に、この含浸材の表面をサンドペーパーで軽く研磨した後、

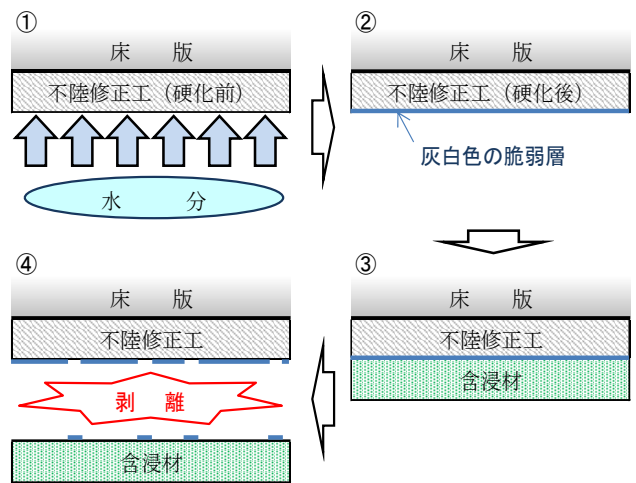


図-6 想定される剥離のメカニズム (断面図)

再度最表面部を撮影したものが写真-1(4)である。写真-1(3)で確認された灰白色の層が部分的に除去され、含浸材の緑色の面が確認できた。この結果により、不具合が生じた含浸材の表面には、ごく薄い灰白色の脆弱層が存在することが確認された。この脆弱層は、エポキシ樹脂の硬化剤中の成分であるアミン類が水と反応し、炭酸塩を生成したもの（以下「アミンブラッシング」）であると推察される。

次に今回の浮きが発生した位置を図-5に示す。図-5より、浮きが発生した位置は、2層構造の上層側（上り線側）と海岸付近に集中していることが分かる（海上の径間は鋼床版のため、炭素繊維シート補強工を行っていない）。2層構造の上層側は、直接日光に当たるため昼夜の寒暖差が大きい。また、海岸付近についても他の位置に比べ湿度が高い。このような環境は結露が生じやすく、浮きが多く発生した要因になったと考えられる。

以上から、今回浮きが発生した経緯をまとめると以下のように推察される（図-6参照）。①パテ材が完全硬化前に結露等より水分に接触した。②アミンブラッシングが発生し、パテ材の下側に灰白色の脆弱層が生成された。③パテ材の色と脆弱層の色が近似色であった（写真-2参照）ため、脆弱層に気付かず次工程の含浸材塗布を行った。④車両走行による振動や温度変化による伸縮などの要因により脆弱層が剥離し、炭素繊維シート補強工に



写真-2 パテ材の通常時と異常時の色比較

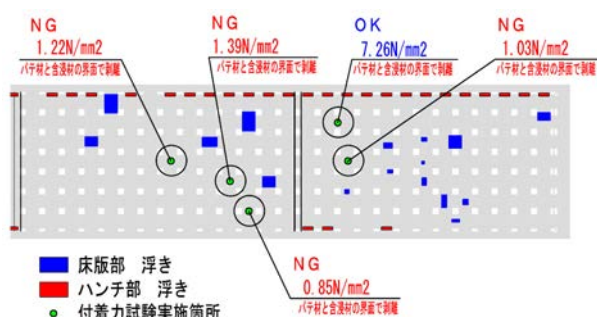


図-7 浮き発生箇所と付着力試験実施箇所の一例

浮きが発生したと推察される。

また、大量に浮きが発生した箇所付近の浮きが発生していない地点において、シートの付着力試験（引張試験）を実施したところ（図-7 参照）、ほとんどの箇所で規定の強度  $1.5\text{N/mm}^2$  を下まわり、付着力試験を実施したすべての箇所で、パテ材と含浸材の界面での剥離が確認された。この結果により、この付近では、浮きが発生していない地点でも、ほぼ全面でアミンブラッシングが発生していたと推察される。

### 3. 不具合発生の際の経緯整理

今回、不具合が大量に発生した経緯を以下に整理した。

- (1) パテ材の硬化前に、パテ材表面に結露が生じ、アミンブラッシングが発生した。その結果、パテ材表面にごく薄い灰白色の脆弱層が形成された。
- (2) 脆弱層は灰白色であったため、パテ材の本来色に近く、その異常に気付くことができずに次工程の含浸材塗布を行った。
- (3) 施工途中に不具合が生じていたが、低い付着力ではあるが接着していたため、施工完了直後の打音による点検では、その異常を発見することができなかった。施工は各径間ごとに行っていたため、早期に異常が発見できていれば、不具合は限定的なものとなっていたと考えられる。

### 4. 不具合の補修

補修は、損傷の程度に応じ3通りの方法で行った。

#### (1) シート全面貼替え

この補修方法は、浮き部が広範囲に連続している場合に適用した。補修手順は以下のとおり。①シートを剥がし、パテ材面を露出する。全面貼替えの際は、パテ材と含浸材が密着して剥がれない箇所があり、パテ材ごと剥離した。このため、結果的にパテ材の前工程の床版の下地より再施工した。②パテ材の表面を目粗し、脆弱層を除去する。また、今回の補修では実施していないが、目粗し後にアミン類が溶け込むアセトンで表面を拭き取るのも有効な手段である。③パテ材の表面状況を確認し、炭素繊維シートを再度貼付ける。

#### (2) シート部分貼替え

この補修方法は、浮き部が限定的で連続していない場合に適用した。施工手順は1つ目の全面貼替えと同様。

#### (3) 注入器による樹脂注入

この補修方法は、浮き部が単独で比較的小さく、アミンブラッシングの影響が少ないと考えられる場合に適用した。補修手順は以下のとおり。①浮き部に千枚通しにて  $2\text{mm}$  程度の削孔を行い、注入孔とエア抜き孔を設ける。孔は浮き部の対角線上の両端になるように施工する。また、ドリル等は削孔の際に炭素繊維に損傷を与えるので使用禁止とした。②注入器にて注入孔より含浸材（エポキシ樹脂）を注入する。含浸材は、エア抜き孔より流出するまで注入する。③孔を養生テープで塞ぐ。④含浸材の硬化を確認し、タッチアップを行う。

以上の方法で補修を行い、それぞれの補修方法ごとに引張試験を行い、付着力が規定の強度  $1.5\text{N/mm}^2$  以上であることを確認した。

## 5. 今後の対策と課題

前述で整理した経緯より、今回発生したような不具合の予防対策として、以下のものが考えられる。

#### (対策1) 施工環境の確認と改善

エポキシ樹脂の使用時には、材料メーカーの管理基準<sup>1)</sup>に基づき温湿度管理を行い、気温  $5^\circ\text{C}$  以上・湿度  $85\%$  以下にて作業を行っている。しかし、エポキシ樹脂が完全硬化するまでの養生期間中は、材料メーカーで管理基準を特に規定していないため、気温・湿度を常に管理しているわけではない。不具合が生じた箇所は、冬期に施工しており、養生中の夜間に気温  $5^\circ\text{C}$  以下となっていた箇所があったことが確認された（湿度は不明）。養生中に気温  $5^\circ\text{C}$  以下となっていたことと、アミンブラッシングが発生したことは直接的には関係はないが、気温が  $5^\circ\text{C}$  以下になったことで通常よりも樹脂の硬化に時間を要したため、結露等による水分との接触によりアミンブラッシングが発生するリスクが高くなったことは否定できない。

この対策として、アミンブラッシング発生低減のため



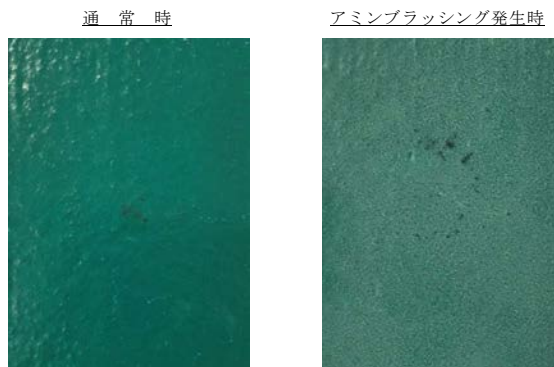


写真-3 緑色粉入パテ材の通常時と異常時の色比較

に、冬期施工の制限やエポキシ樹脂養生時に結露対策を実施すること（換気や除湿）が考えられる。また、作業環境の管理として、24時間温度・湿度を記録することも望ましいと考える。

#### （対策2）アミンブラッシングの処置

アミンブラッシングが発生した場合の一般的な対策は、エポキシ樹脂の表面をサンドペーパー等で目粗しし、ブロー等で清掃すること。更に、アセトンなどの溶剤を用い、樹脂表面を拭きあげることが推奨されている<sup>2)</sup>。養生中の気温が5℃以下になった場合など、アミンブラッシングの疑いがあれば、このような対応を行うことが望ましいと考える。

#### （対策3）材料の改良

アミンブラッシングが発生したことを視認できるように、パテ材に着色を行い改良することが考えられる。現状用いられているパテ材は通常時には灰色で、アミンブラッシングが発生すると灰白色となる。この2つを直接比較すれば、その違いに気付くことができるが、個別でその違いを見分けるのは難しい。そこで、より違いが分かりやすくなるように、パテ材の品質に影響を及ぼさない色粉を混ぜ、視認性の向上を図った。実際に緑色の色粉を混ぜたものが写真-3である。福北公社で現在稼働中の1工事にて、色粉入りのパテ材を用いて施工を行っている。今のところ、現場ではアミンブラッシングが発生していないが、発生した場合は、今までよりも、その異常を発見しやすいと考えられる。

実際、（対策1）を実施したとしても、エポキシ樹脂を使用する際は、その硬化剤にアミン類が含まれるため、アミンブラッシングが発生する可能性はゼロではない。そうした場合、現場の対応として、アミンブラッシングが発生することを前提に、（対策2, 3）のようなことを事前に計画しておくことは、重要であると考えられる。

#### （今後の課題）施工完了時の付着力確認

今回の結果より、通常行う打音による浮きの確認だけでは、今回のような脆弱層発生時の付着力不足が確認で

きないことが分かった。現在、付着力を確認する方法として、代表箇所での引張試験を実施している。しかし、この方法では、試験を行った部分しか強度の確認ができないことや、破壊試験であるため、その後に補修が必要となるという問題がある。このため、引張試験に代わる効率的な非破壊検査方法を確立することが今後の課題であると考えられる。

## 6. まとめ

近年、RC構造物の補強を目的として、炭素繊維シート補強工が多く用いられている。炭素繊維シート補強工を行う際は、一般的にエポキシ樹脂を使用するが、エポキシ樹脂を使用する場合にはアミンブラッシングが発生するリスクは避けられない。

アミンブラッシングが発生すると、それにより生成される脆弱層のため、炭素繊維シート補強工の要である付着力が低下することが懸念される。このことから、炭素繊維シート補強工を行う上で、アミンブラッシング対策は非常に重要であると考えられる。

その対策としては、アミンブラッシングを発生させにくくする対策（冬期施工の制限、養生中を含む温湿度管理）やアミンブラッシングが発生したことを容易に確認できるようにする材料の改良などが考えられる。なお、炭素繊維シート補強工完了後にアミンブラッシングが発生していたかどうかは、浮き等の不具合が発生しない場合は確認が難しいため、施工中の各工程ごとにその対策を確実に実施しなければならないと考えられる。

また、施工中にアミンブラッシングが発生し、RC構造物と炭素繊維シートの付着力が低下している場合でも、施工後の打音による点検では、その異常を発見することができない場合がある。そのため、施工後に炭素繊維シート補強工の要となる付着力を確認できる簡便な非破壊検査方法の確立が今後の課題として挙げられる。

## 謝辞

本報告を作成するにあたり、資料提供にご協力いただいた材料メーカーや施工業者の方々に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 繊維補修補強協会：「シート貼付け工事の留意点」について
- 2) 日鉄コンポジット株式会社：FORCA トウシート工法技術資料 白化現象の対処について

(2018年7月20日受付)