

# 論文 床版 CFRP 補強の不具合事例調査およびメカニズムの検証

大屋 貴生\*1・川島 陽子\*2・佐々木 巖\*3・百武 壮\*4

**要旨:** コンクリート構造物の補強で用いられる CFRP が、施工後約 3 年で不具合が生じた橋梁床版の事例を調査した。変状箇所 の CFRP を採取し、赤外分光分析した結果、パテ表面でのアミンブラッシングの発生が示唆された。エポキシ樹脂試験片を低温高湿度環境下で硬化させると、現場採取樹脂と同様の赤外吸収スペクトルが観測され、アミンブラッシングの発生を再現できた。同試験片を温冷繰り返し試験に供すると、サイクルの途中から浮きが発生し現場と類似した現象が観測された。これらの結果より、調査した橋梁の CFRP 断面の不具合発生箇所と原因の特定、および室内での再現・検証する方法を見出した。

**キーワード:** CFRP, エポキシ樹脂, 不具合, 湿度, アミンブラッシング, 赤外分光分析

## 1. はじめに

高強度・高耐食性・軽量などの優れた特性からコンクリート構造物の耐震補強工法として広く用いられている炭素繊維シート強化プラスチック(CFRP)接着工法は、橋脚や建築柱に適用されるだけでなく、鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性向上やトンネルの剥落防止工法にも使用されている。

CFRP を床版下面に施工する際、形状の追従性に優れるなどの理由から現場で貼付・積層する工法が広く採用されている。使用されるエポキシ樹脂は、2 液常温硬化型の接着剤であり硬化までに 1 日程度要することから、硬化時の環境の影響を受けやすいことが知られている。特に硬化中のエポキシ樹脂表面に対して、空気中の水分や二酸化炭素によって引き起こされる「アミンブラッシング」と呼ばれる現象によって浮きや剥離などの不具合が生じることが報告されている<sup>2)</sup>。また、CFRP は多層化して施工することが多いため積層数に応じて界面が増え、施工環境の影響を受ける機会が増加する。CFRP 補強部の不具合は応力伝達の欠陥となり構造物の補強効果を低減させる要因となる。

CFRP 補強に関する不具合は、いくつか報告されているが<sup>3,4)</sup>、その発生メカニズムは未だ明らかになっていない。本報告では、CFRP 施工後早期に不具合が生じている実橋梁の床版を調査し、発生原因を検証した。

また、調査にて得られた分析結果を基に再現試験を行い、不具合発生メカニズムの解明を試みたので報告する。

## 2. 橋梁諸元と不具合の状況

### 2.1 橋梁諸元

調査対象となった橋梁は、1963 年竣工の 17 径間単純鋼合成板桁橋梁であり、4 車線、有効復員 14.5 m、5 主

桁、床版支間 3.2 m、床版厚 180 mm の断面構成であった。大型車交通量は、2015 年時点で約 5,800 台/12h と厳しい交通条件にある。

床版の疲労耐久性向上を目的とした CFRP 補強がされており、右岸側から順に 2008 年、2010 年、2011 年と 3 回に分けて施工された。幅 250 mm の CFRP を 100 mm の間隔を空けて格子状に貼り付けられていた。積層数は、橋軸方向に 2 層、橋軸直角方向に 2 層の計 4 層である。補強にあたっては、事前に断面修復、ひび割れ注入が実施されており、健全なコンクリート面に復旧してから、施工された。施工工程断面図を図-1 に、CFRP の現況を写真-1 に示す。

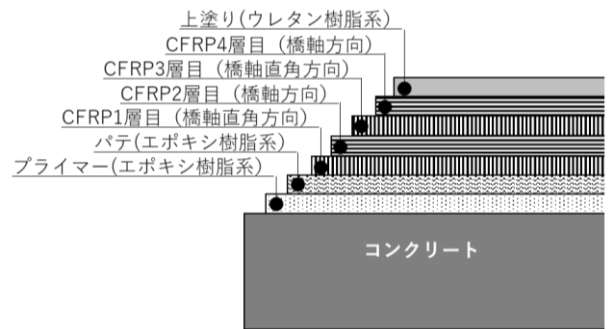


図-1 施工工程断面図

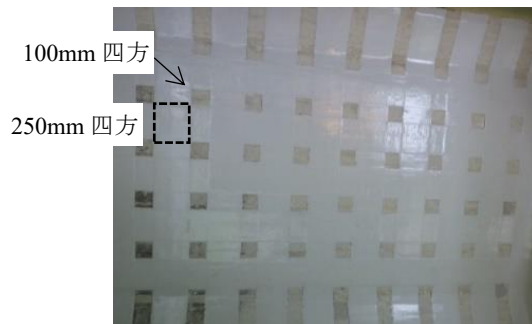


写真-1 床版下面に施工された CFRP の現況

\*1 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 交流研究員 (正会員)

\*2 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 主任研究員 博士 (農学)

\*3 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 総括主任研究員 博士 (工学)

\*4 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員 博士 (工学)

## 2.2 不具合の状況

3回のCFRP補強工事のうち、2011年に施工された範囲において、施工から3年後の定期点検の打音検査結果からCFRPの浮きが記録されており(図-2)、本報告ではP12-P13間に着目した。

浮きの発生状況を整理すると、(1)施工からの経過年数が3年と短い、(2)CFRPの変状の発生は図-2に示す通り一部にとどまらず、広範囲におよんでいる、(3)対応する舗装上面に変状は確認されていない、(4)床版にひび割れや水の染み出し等の変状は確認されていない。以上から、確認されたCFRPの浮きは供用環境による劣化ではなく、施工時に起因する変状・不具合であると考えた。

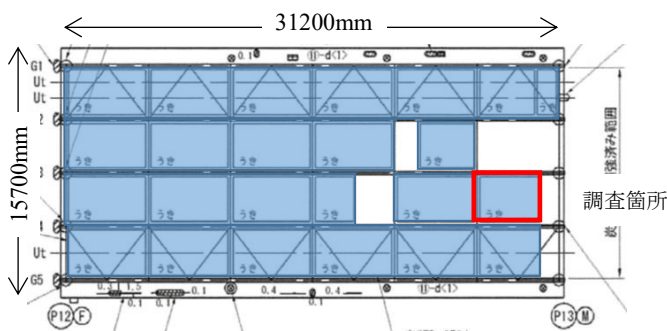


図-2 CFRP変状発生状況(着色部が変状部)

## 3. 調査

### 3.1 調査概要

定期点検でCFRPの変状が報告された箇所において、詳細な調査を2024年に実施した。調査箇所は、図-2のP12-P13間のうち、G3-G4径間のP13側から5mの範囲(赤囲い)とした。調査項目は以下のとおりである。

- (1) 打音検査
- (2) コンクリート含水率測定
- (3) 接着試験

### 3.2 打音検査

詳細な「面方向の浮き範囲」の把握(格子単位のマッピング)、および、「深さ方向の浮き範囲」の把握(下地コンクリートの内部、もしくはCFRPの内部、または両者の界面)のため、打音検査を実施した。打音検査の状況を写真-2に示す。検査はCFRP、下地コンクリートのマス目ごとに実施し、打音から①全面的な浮き、②部分的な浮き、③異常なしの3段階で浮きを判定した。



写真-2 打音検査状況

打音検査の結果を図-3に示す。CFRP接着部はほとんど「全面的な浮き」と判定され、一方で、下地コンクリートではほとんど「異常なし」と判定されたことから、変状はCFRPとコンクリートの界面あるいはCFRP内部に生じていると判断できた。

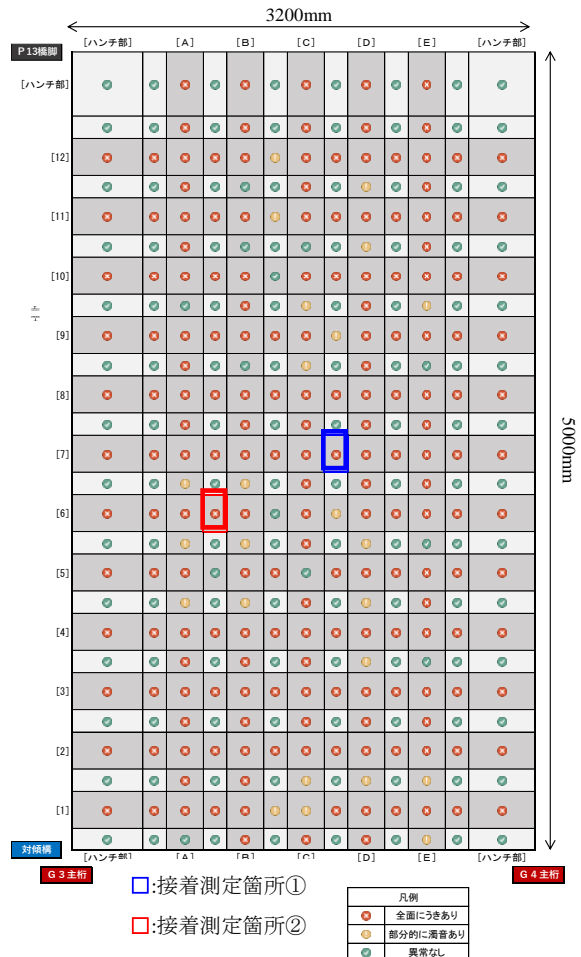


図-3 打音検査結果

### 3.3 コンクリート含水率測定

コンクリート床版からの水分の影響を検証するため、同調査範囲における床版下面の含水率を測定した。測定は道路橋床版水分計 HI-100(ケツト科学研究所製)を用い、CFRP格子貼りの隙間から露出している下地コンクリート表面で測定した。水分計は、乾燥状態のときに最小40、湿潤状態のときに最大990の電気抵抗換算値(以下、カウント値と記す)が表示される。既報では、カウント値と表面の含水状態の関係として、表-1が示されている<sup>5)</sup>。

表-1 水分計のカウント値と含水状態の関係

カウント値	10~55	60~132	137~230	235~520	521~744
含水状態	絶乾	乾燥	表面乾燥	湿潤	滞水

含水率測定結果を図-4に示す。測定前日に降雨があったが、コンクリート表面の含水率に偏在はなく、ほぼ一様であった。また、P13直上にはジョイントが設置されているが、その付近においても高い数値は観測されなかったことから、床版上面から下部への水の供給は少ないと考えられる。

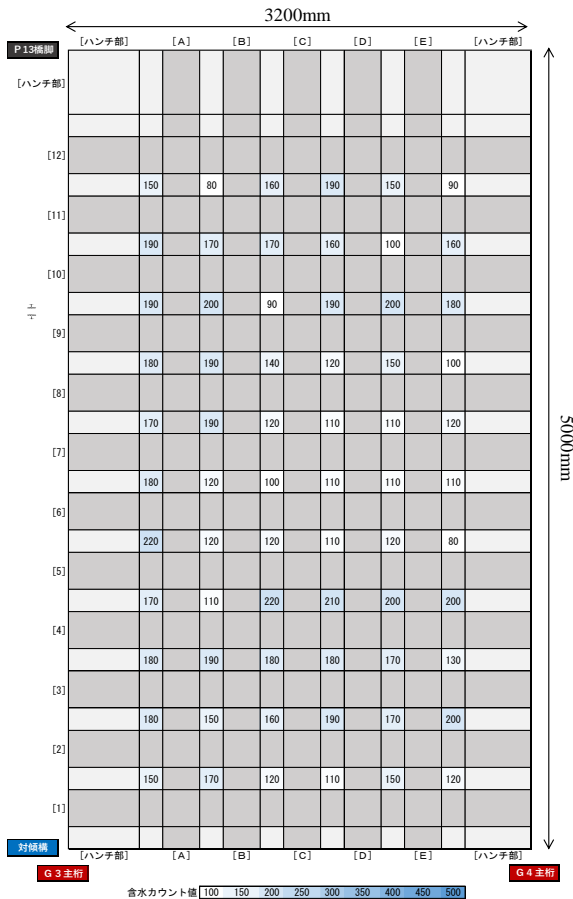


図-4 含水率測定結果

### 3.4 接着試験による浮き箇所の特定

打音検査で「浮き」と判定された CFRP 補強箇所の接着力を測定し、断面のどの層で浮きが生じたか把握するため、接着試験を実施した。JSCE-E 545 (連続繊維シートとコンクリートとの接着試験方法(案))<sup>6)</sup>に準拠し、図-3で示した箇所(赤、青の囲い)で接着強度を測定した。

測定箇所①(橋軸方向 [7] - 橋軸直角方向 [C-D])においては、縁切りを行った段階でパテと CFRP1 層目含浸樹脂間の界面で剥離が生じた(写真-3)に示す。

試験後の状況を写真-4に、測定箇所②(橋軸方向 [6] - 橋軸直角方向 [A-B])における接着試験(n=3)の結果を表-2に示す。最大荷重 1300~4600N、接着強度 0.8~2.9 N/mm<sup>2</sup> と試験結果に荷重のばらつきが見られた。繊維補修補強協会によると、CFRP の接着強度の管理値は

1.0~1.5 N/mm<sup>2</sup> 以上、もしくはコンクリート母材破壊<sup>7)</sup>とされており、n=3のうち2箇所ですべて上記を満たす接着強度を示した。しかし、測定箇所①と同様、いずれもパテと CFRP1 層目含浸樹脂間との界面で破壊が生じたことから、パテ表面と含浸樹脂間の接着不良が不具合の原因であると推測された。

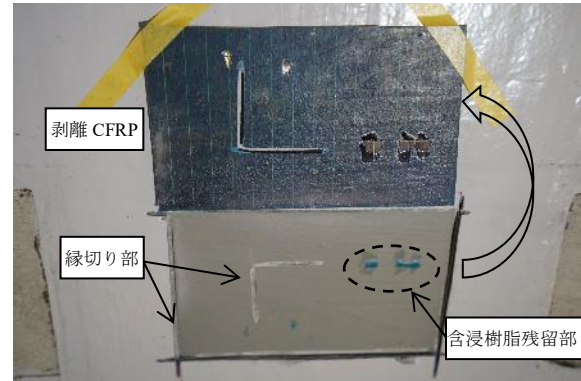


写真-3 測定箇所① 縁切りによる剥離の状況



写真-4 測定箇所② 接着試験後の状況

表-2 測定箇所②接着試験結果

	No.1	No.2	No.3
最大荷重(N)	1313	4622	4674
接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	0.82	2.89	2.92
破壊箇所と割合	パテ-CFRP1 層目含浸樹脂間 界面破壊 100%		

### 3.5 赤外分光分析

接着試験の結果、パテと含浸樹脂の界面に注目して赤外分光分析を行った。接着試験後に露出したパテ表面を削り取ったもの「表面」と、パテ内部から削り取ったもの「内部」を測定試料とした。また、参考試料として室内で硬化させたパテ「室内硬化」も併せて比較した。赤外分光光度計 FT/IR-6600 (日本分光製)を用い、ATR法で測定した。

測定結果を図-5に示す。「表面」は、「内部」や「室内硬化」と比べ1420 cm<sup>-1</sup>付近に強い吸収が観測された。この吸収はカルバミン酸塩類に由来することが知られている<sup>8)9)</sup>。カルバミン酸塩類は、式(1)、(2)で示される R-NH<sub>2</sub>CO<sub>2</sub>、R-NHCO<sub>2</sub><sup>-</sup>の総称であり、エポキシ樹脂中のアミン硬化剤が空気中の水、二酸化炭素と反応するアミンブラッシングにより生成すると報告されている<sup>8)</sup>。そのため、本橋梁においてもパテ施工後にカルバミン酸塩類が生じたと考えられる。

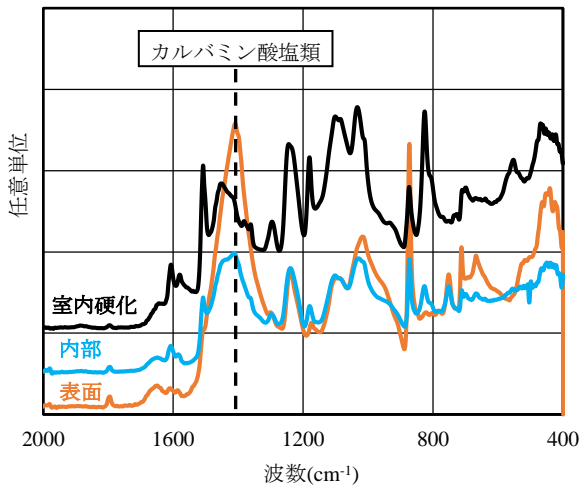
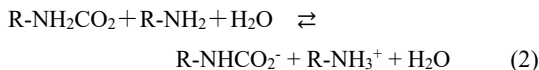


図-5 現場採取パテの赤外吸収スペクトル



### 3.6 施工時の環境

一連の工事におけるパテ施工日は工事記録から、1月9～14日、2月8～14日の厳寒期であることがわかった。現場に最も近い気象台の観測結果によると、この期間の気温は最高気温5℃、最低気温-6℃であった。

工事記録によると、施工時の足場内はジェットヒーターによる採暖養生がなされていた。施工状況写真から、施工時の温湿度は温度5-6℃、湿度45-75%と推測される。エポキシ樹脂の施工管理基準は気温5℃以上、湿度85%以下<sup>7)</sup>の条件が求められていることから、本施工では下限温度付近の厳しい環境での施工であった。また、採暖養生は火災防止のため、夜間は止めることが多く、気温の低下や湿度の上昇が考えられる。また、気温の低下に伴いエポキシ樹脂の硬化に必要な時間は5℃環境において約48時間と延び、樹脂硬化中の環境は低温高湿度であったと推測される。

Shenk,T によるとエポキシ樹脂硬化時、水蒸気の存在下で低温であれば、カルバミン酸塩類の形成が熱力学的に有利であると報告されていることから<sup>8)</sup>、今回の施工環境は、アミンブラッシングが発生しやすい状況であったと考えられる。

## 4. 室内試験

これらの考察を基に、低温高湿度を模して、CFRP施工不具合の室内再現試験を行った。

### 4.1 環境条件探索

低温高湿度環境を再現するため、恒温恒湿槽を5℃に設定し、湿度を30%RH、98%RH、および硬化中の樹脂表面が結露するよう恒温恒湿槽内に加湿器を設置した環境(飽和湿度)の3条件に設定し、塗布後48時間静置することで樹脂硬化への影響を確認した。使用した樹脂は、本橋梁で施工されたパテと同じ製品を用いた。

硬化後のパテ表面を測定した赤外吸収スペクトルを図-6に、硬化後の外観を写真-5に示す。

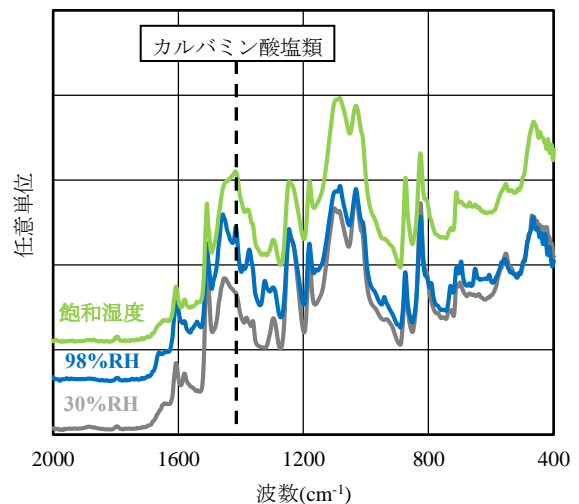


図-6 各湿度条件にて硬化させたパテの赤外吸収スペクトル

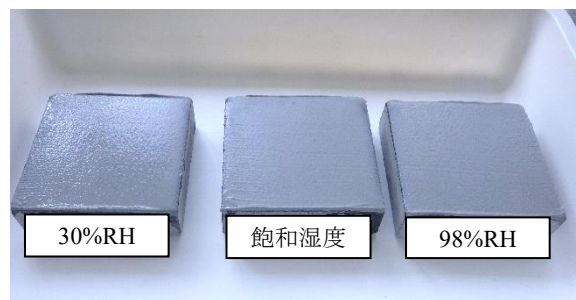


写真-5 各湿度条件にて硬化させたパテの外観

カルバミン酸塩類の存在を示す波数  $1420\text{ cm}^{-1}$  に注目すると、硬化条件 30%RH よりも、98%RH、飽和湿度の吸収が増加し、室内試験においてもアミンブラッシングの発生が再現できたと考えられる。また、写真-6 に示す通り硬化条件 30%RH に比べ、98%RH、飽和湿度で樹脂表面の光沢の減少が見られ、変状が外観からも観察された。

#### 4.2 低温高湿度環境暴露時の経時変化

樹脂硬化中に低温高湿度環境に曝される時間の影響を検証した。

4.1 で示した  $5^\circ\text{C}$  飽和湿度条件下に塗布直後の樹脂を静置し、3, 6, 8, 24, 48 時間後に取り出して  $5^\circ\text{C}$ 、30%RH で硬化させた。また、飽和湿度に暴露せず、 $5^\circ\text{C}$ 、30%RH 環境で硬化させた暴露無しも併せて作製・評価した。使用した樹脂は、本橋梁で施工されたパテと同じ製品を用いた。

一連の条件で硬化させたパテの赤外吸収スペクトルを図-7 に示す。飽和湿度条件にて硬化させた樹脂はいずれも暴露無しに比べアミンブラッシング由来の吸収が増加し、暴露時間に比例して吸収が増加する傾向が見られた。吸収の増加について、 $1350\sim 1500\text{ cm}^{-1}$  のベースラインで補正した  $1420\text{ cm}^{-1}$  付近のピーク高さの変化率を求めた (図-8)。

飽和湿度条件への暴露時間が 3-24 時間までは変化率が上昇しており、その後の変化はほぼ一定であった。これは、硬化初期には未反応のアミンが多く存在するためカルバミン酸塩類が生成されやすく、24 時間以降では硬化反応の進行に伴いアミンが減少し、カルバミン酸塩類の生成が抑制されたためと考えられる。

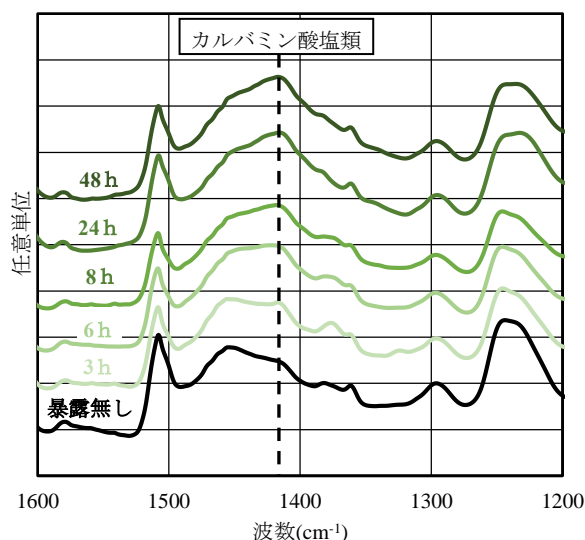


図-7 飽和湿度環境暴露時の赤外吸収スペクトル経時変化

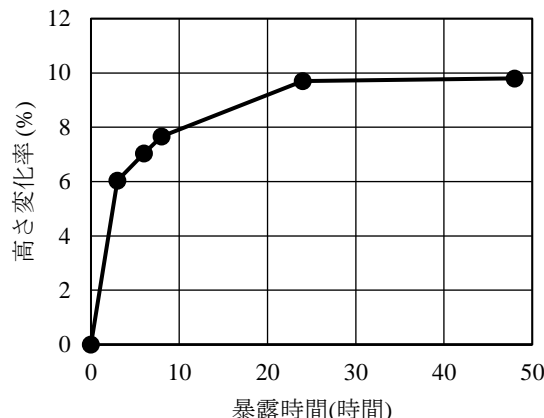


図-8 飽和湿度環境暴露時間と  $1420\text{ cm}^{-1}$  付近のピーク高さ変化率

#### 4.3 浮き発生の再現

低温高湿度環境で硬化させた場合に、不具合発生現場と同様な層間剥離による浮きの発生を再現できるか検証した。材料の塗布量は全て施工要領に準じた。試験の手順を図-9 に示す。

表面処理した  $70\times 70\times 20\text{ mm}$  のモルタル板 (JIS R 5201 配合) に、室内環境でプライマーを塗布・硬化させたのち、4.1 で示した 3 条件 ( $5^\circ\text{C}$  30%RH、98%RH、飽和湿度) でパテを塗布・静置した。硬化後、パテの上部に含浸樹脂を塗布し、 $5^\circ\text{C}$ 、30%RH 環境下で静置した。硬化後室内環境で 7 日間養生させたのち、促進的な温冷負荷を与えるために、JIS K 5659 (鋼構造物用耐候性塗料) の耐湿潤冷熱繰り返し性<sup>10)</sup>を参考に、 $20^\circ\text{C}$  水中 18 時間  $\rightarrow$   $-20^\circ\text{C}$  気中 3 時間  $\rightarrow$   $50^\circ\text{C}$  気中のサイクルを 10 回繰り返した。評価材料は調査対象とした橋梁で施工された製品一式を用いた。

また、上記サイクル試験で  $50^\circ\text{C}$  気中条件が終了するごとに供試体を観察し、浮きが発生した供試体数を記録した。

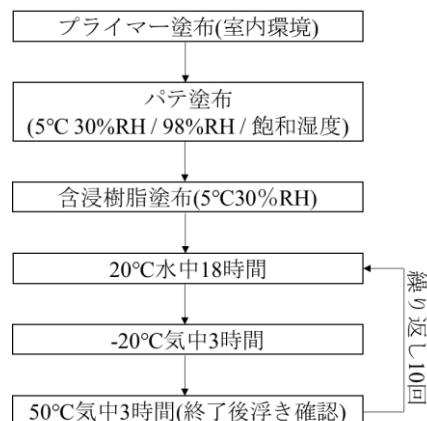


図-9 浮き発生再現試験の手順

サイクル回数と浮きが発生した供試体の割合（浮き割合）の結果を図-10に示す。硬化条件 30%RH はサイクルを 10 回繰り返しても浮きは発生しなかったのに対し、飽和湿度はサイクル回数 4 回目以降で浮きが徐々に発生し、最終的には全数で浮きが発生した。また、98 %RH では 9 回目以降に半数で浮きが発生した。浮き箇所にて打音を聴くと健全部よりも高い音が観測でき、現場の浮きに近い現象が再現できているものと考えられる。

上記の結果から浮き発生メカニズムは、パテ表面において発生したアミンブラッシングにより、積層される樹脂と十分な接着力が得られず、温冷サイクルによって同界面の浮きが発生・進行すると推測される。

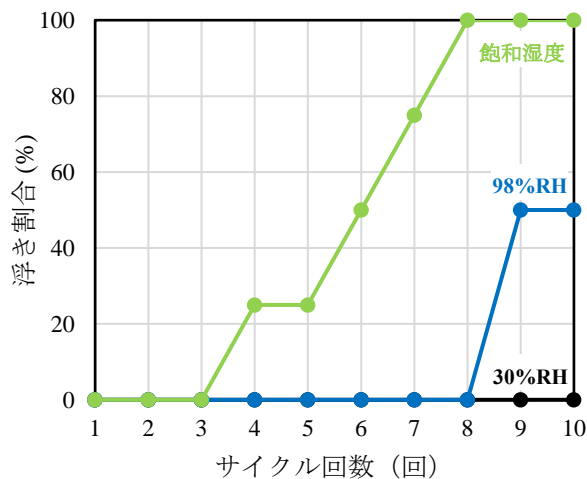


図-10 サイクル回数と浮き割合

## 5. まとめ

CFRP 不具合発生メカニズムを解明するため、実橋梁を調査し、計測した情報を基に室内にて再現試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 施工後約 3 年で不具合が報告されている実橋梁を調査し、打音検査や接着試験の結果、パテと含浸樹脂間の浮きが生じていることが分かった。
- 浮き箇所から試料を採取し、赤外分光分析を行った結果、カルバミン酸塩類の生成が確認された。施工時や樹脂硬化時の環境は 5 °C 以下の低温および高湿度環境下であり、アミンブラッシングの発生が推測された。
- 調査によって得られた情報を基に室内再現試験の方法を見出した。促進的な繰り返し温冷負荷を与えた結果、アミンブラッシングが発生した場合、浮きの発生・進行が顕著であった。

以上から、CFRP 不具合発生メカニズムは、

- (1) 低温高湿度環境下にて樹脂表層にカルバミン酸塩類の生成 (アミンブラッシング) による接着不良層の形成
  - (2) 日々の温度変化による、接着不良層からの浮き・剥離の発生と進行
  - (3) 浮き範囲拡大による不具合の顕在化
- という流れで進行すると推測される。

施工直後に検出できない接着不良層が温度変化の繰り返しによって、浮きなどの不具合が顕在化することから対策が難しい。今後、樹脂の接着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、得られた知見を実際の施工現場で反映できるよう努めていく。

## 参考文献

- 1) 川島陽子, 西崎到: コンクリート構造物補強用 FRP の長期耐久性に関する最近の研究について, 強化プラスチック, Vol.68, No.12, 2022
- 2) 白石元紀, 三島啓吾, 千々和辰訓, 住吉孝一, 矢野豊信: RC 床版における炭素繊維補強工の不具合事例, 第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.227-230, 2018.11
- 3) 国立研究開発法人土木研究所, 一般社団法人繊維補修補強協会, 積水化学工業株式会社: 連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書 (III), 2022.7
- 4) 内藤勲, 田口史雄, 野々村佳哲: 北海道における繊維シート接着コンクリートの変状調査, 寒地土木研究所月報, No. 692, pp.11-19, 2011.1
- 5) 谷倉泉, 榎園正義, 後藤昭彦: 床版防水工における水分計の適用性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1112-1123, 2013.3
- 6) 社団法人土木学会: JSCE E-545 (連続繊維シートとコンクリートとの接着試験方法 (案)), 2000
- 7) 一般社団法人繊維補修補強協会: 実務の手引き, 一般社団法人繊維補修補強協会, 2022
- 8) Timothy, M. Shenk, Kenneth, M. Benjamin, Robb, M. Winter: Impact of carbamate formation on the surface tension of epoxy - amine curing systems, Polymer Engineering and Science, Vol.63, pp.1347-1358, 2023.2
- 9) 鈴木宣暁, 小森篤也: 連続繊維シート接着工法に用いる剥離防止シートの開発, 第 75 回 2023 (令和 5 年度) 土木学会中国支部研究発表会, VI-3, 2023.5
- 10) 日本規格協会: JIS K 5659 (鋼構造物用耐候性塗料), 2018