

論文 炭素繊維巻立て工法の施工時の欠陥が耐久性に及ぼす影響

宇佐美 惣*¹・長田 光司*¹・井ヶ瀬 良則*¹・斉藤 誠*²

要旨：RC橋脚の耐震補強工法の一つである炭素繊維巻立て工法の施工においては、万全の施工管理体制で施工しても、施工時には繊維の浮きや樹脂の白化現象などの不具合が生じることが避けられない。そこで、筆者らは浮きがFRP化した炭素繊維とコンクリートとの一体化構造物としての耐久性に及ぼす影響及び白化が施工後の性能に及ぼす影響を把握し、その対処方法について検討を行った。浮きについては、凍結融解試験の結果ある程度の大きさの範囲内であれば、欠陥の拡大などにはつながらないことが示された。また、白化については本研究の範囲内では白化による明確な付着強度の低下は認められなかった。

キーワード：炭素繊維シート、施工、耐久性、施工欠陥、凍結融解試験、白化、付着強度

1. はじめに

日本道路公団では平成7年1月に発生した兵庫県南部地震以降、全国の高速道路及び一般有料道路で固定橋脚を中心として緊急に耐震補強を実施しており、既に所定の成果を得つつある。また、今後更なる耐震安全性を目指して主に可動橋脚の補強対策を計画しており、これらの橋脚の中には炭素繊維シートを用いて補強される橋脚も多数ある。

炭素繊維シートを用いて既設RC橋脚の耐震補強工事を施工する場合、入念な施工管理下にあっても、炭素繊維シート貼付け時における気泡の発生（以下浮きと記す）や低温高湿度時にエポキシ樹脂中の硬化剤と二酸化炭素とが化合して硬化後のエポキシ樹脂表面が白く濁る現象（以下白化と記す）の発生確率をゼロにすることは困難である。土木構造物として使用される範囲内ではFRP化した炭素繊維シート単体の耐久性は高く¹⁾また、炭素繊維シートと躯体コンクリートとの一体化には躯体コンクリートの引張強度が支配的に影響するため、一定の範囲内の欠陥が補強効果に及ぼす影響は小さい²⁾と考えられる。しかし、施工時に生じる欠陥が一体化構造物としての耐久性に及ぼす影響につ

いてはこれまでほとんど研究が行なわれていないため、現状では発見された全ての欠陥に対して補修対策を実施しているが、軽微な欠陥も含めてすべて手直しすることが必ずしも適切とは限らない。そこで本研究では施工中に生じた欠陥に対し、その許容範囲や処置方法を定めることを目的として、意図的に浮きを作ったコンクリート片の凍結融解試験や白化させた炭素繊維シートの引張強度試験及び付着強度試験を実施し、施工管理に反映させることとした。

2. 浮きが耐久性に及ぼす影響

2.1 試験供試体

試験供試体の形状を図-1に示す。また、炭素繊維シートの物性を表-1、エポキシ樹脂の物性を表-2にそれぞれ示す。

供試体は100mm×100mm×400mmの寸法で炭素繊維シート補強する前のコンクリート片を作製し、ケレン処理、プライマー処理後、意図した形状寸法の浮きを作るためシリコンスペーサーを設置し、ゴムシートで回りを囲った上でパテ材を流し込み、パテ材が硬化してからシリコンスペーサーを取り除くこととした。浮きは1供試体の3面を使用して、各面に3個合計9

*1：日本道路公団 試験研究所 道路研究部 橋梁研究室（正会員）

*2：炭素繊維補修・補強工法技術研究会

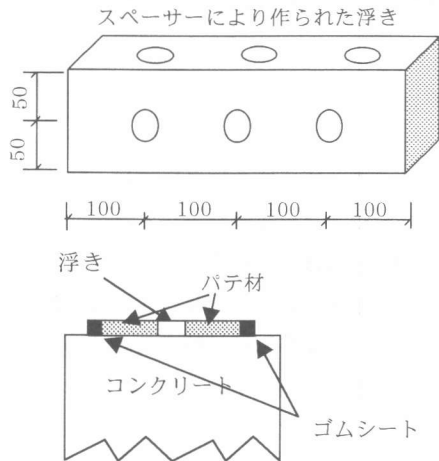


図-1 供試体の形状

個同様の方法により作製することとした。

作製した供試体種別を表-3に示す。

表-3に示された供試体は以下の項目を変化させ、それぞれが耐久性に及ぼす影響を確認する目的で作製されている。

①浮きの大きさ

SE-2,3,7,9,10,13 は浮きの大きさが耐久性に及ぼす影響を確認するための供試体であり、浮きの直径をそれぞれ 60, 40, 30, 10, 5, 2 mm と変化させることとし、厚さを 1 mm とした。

②浮きの厚さ

SE-4 は浮きの厚さが耐久性に及ぼす影響を確認するための供試体であり、浮きの厚さを

表-1 炭素繊維シートの物性

項目	規格値	試験方法
繊維重量, g/m ²	300 以上	JIS K 7071 JIS R 7602
引張強度, MPa	3,400 以上	JIS K 7073
弾性率, GPa	230±35	JIS K 7073

表-2 エポキシ樹脂の物性

項目	規格値	試験方法
引張強さ, MPa	30	JIS K 7113
曲げ強さ, MPa	40	JIS K 7203
引張せん断強さ, MPa	10	JIS K 6850

2 mm とし、直径を 30 mm とした。

③炭素繊維シートの層数

SE-5,8 は炭素繊維シートの層数が耐久性に及ぼす影響を確認するための供試体であり、炭素繊維シートを 3 層貼付けることとし、浮きの厚さを 1 mm、直径をそれぞれ 30, 10 mm とした。

④炭素繊維シートの外的要因による傷

SE-6 は炭素繊維シートに孔があいたことを想定した供試体であり、浮き中央部に直径 1 mm の孔をあけることとし、浮きの厚さを 1 mm、直径を 30 mm とした。この孔により凍結融解試験中水が自由に浮きの中に浸入することができる。

⑤浮きの補修

SE-11,12 は浮き補修した場合を想定した供試体である。浮きの厚さを 1 mm とし、直径をそれぞれ 30, 10 mm とし、浮きの補修はエポキシ樹脂を注射器で充填することにより行った。

表-3 凍結融解試験供試体種別

供試体番号	浮きの直径 (mm)	浮きの厚さ (mm)	炭素繊維シート積層枚数	供試体の数	補修の有無	備考
SE-1	0	1	1	3	補修なし	標準施工試験体
SE-2	40	1	1	1	補修なし	浮きの大きさ
SE-3	30	1	1	1	補修なし	浮きの大きさ
SE-4	30	2	1	1	補修なし	浮きの厚さ
SE-5	30	1	3	1	補修なし	炭素繊維シートの層数
SE-6	30	1	1	1	補修なし	削孔(1mmφ孔), 水の浸入
SE-7	10	1	1	1	補修なし	浮きの大きさ
SE-8	10	1	3	1	補修なし	炭素繊維シートの層数
SE-9	5	1	1	1	補修なし	浮きの大きさ
SE-10	2	1	1	1	補修なし	浮きの大きさ
SE-11	30	1	1	1	エポキシ樹脂注入	浮きの補修
SE-12	10	1	1	1	エポキシ樹脂注入	浮きの補修
SE-13	60	1	1	1	補修なし	浮きの大きさ
SE-14	30	1	1	1	補修なし	エポキシ樹脂製造会社の違い
SE-15	30	1	1	1	補修なし	シートの加工方法
SE-16	未補強	-	-	3	補修なし	

⑥基本供試体

比較対照のため浮きを作らない基本供試体として SE-1 を作製した。また、炭素繊維シートを貼付ける前のコンクリート自体の性状を確認する目的で SE-16 を作製することとした。

⑦炭素繊維シートの加工方法及びエポキシ樹脂

SE-14, 15 は炭素繊維シートの加工方法及びエポキシ樹脂の製造会社の違いが耐久性に及ぼす影響を確認するための供試体である。これらの供試体は浮きの厚さを 1mm、直径を 30mm としているが、SE-14 は SE-1~SE-13 の供試体と比較し使用しているエポキシ樹脂の物性値はほぼ同じであるが製造会社が異なる。また、SE-15 は SE-1~SE-14 の供試体と比較し炭素繊維シートの加工方法が異なる。

SE-1~14 の供試体に使用した炭素繊維シートは、炭素繊維のストランドを一方向に引き揃え薄層の粘着樹脂によって網目状の繊維に固定したシート形状となっている。SE-15 に使用した炭素繊維シートは縦糸に炭素繊維、横糸にガラス繊維を編込んだシート形状となっている。

なお、全ての供試体のコンクリート片は材齢 28 日以上常温で気中養生し、その後 SE-1~15 の供試体は炭素繊維シートを接着させ、7 日間以上常温で気中養生を行なった後、試験を開始した。

2.2 耐久性試験方法及び試験結果評価方法

耐久性試験については、JSCE-G 503「コンクリートの凍結融解試験方法」に準じ、5~18℃の凍結融解を 300 サイクル実施するものとした。

試験結果は、浮きの拡大、水の浸入の有無、炭素繊維シート変状の有無により評価することとし、これらの確認は目視による検査、鉄製打撃棒を用いて炭素繊維シート表面の打音の差を検査する方法（以下打音検査法と記す）及び文献 3) に示された魚本らの研究成果を参考にし、赤外線カメラを用いて炭素繊維シート表面の温度差を検出する方法（以下赤外線撮影による検査と記す）の 3 方法により行なった。

図-2 に赤外線撮影による検査概要図を示す。

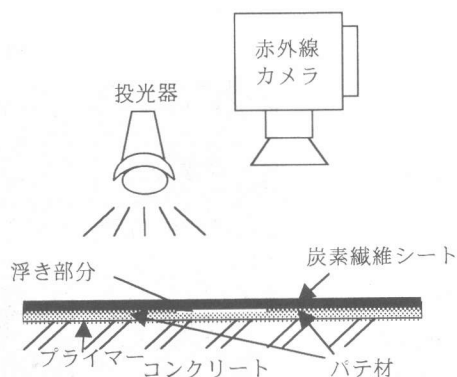


図-2 赤外線撮影による検査概要図

赤外線撮影による検査では、炭素繊維シート表面の温度差を明瞭化する目的で市販の投光器を使用し、また赤外線カメラは供試体から概ね 1 m 離れた位置で撮影した。

2.3 試験結果

①目視による検査結果

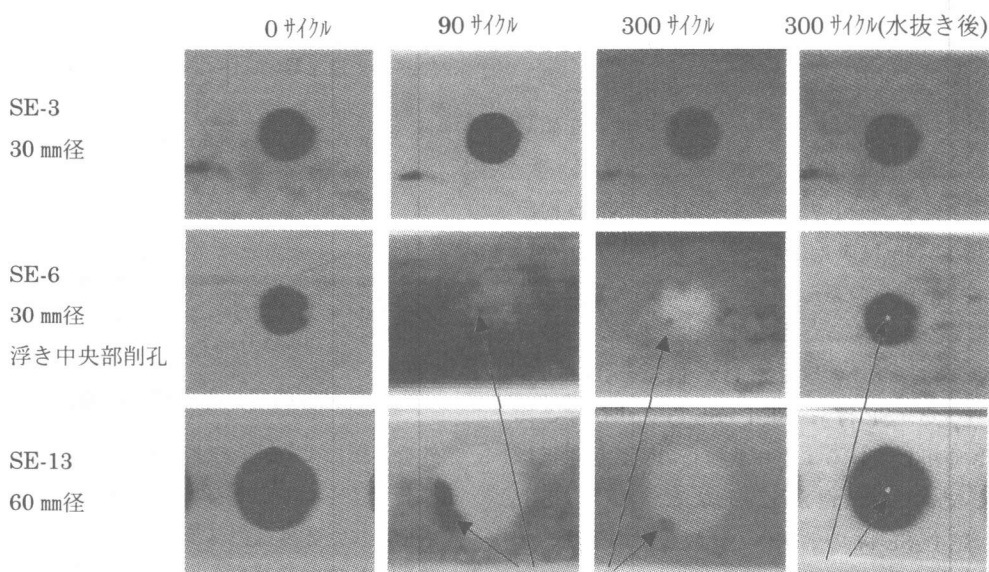
目視による検査では、全ての供試体で浮きの拡大についての外見上の変状は確認されなかった。また、はがれ等の炭素繊維シートの変状も見られず、凍結融解試験後の補強効果の低下につながる欠陥の進行は認められなかった。

②打音検査法による検査結果

打音による検査では、全ての供試体で欠陥の拡大は確認できなかった。打音による検査は実施では浮きの有無の特定ができるため有力な検査法であるが、今回の試験では浮きの範囲の拡大を厳密に特定することは困難であり、検査法として必ずしも適切な方法でなかったと考えられる。

③赤外線撮影による検査結果

赤外線撮影による検査結果を写真-1 に示す。写真-1 の凍結融解試験開始前の映像に示されたとおり供試体に作製した浮きの範囲は映像の濃淡により明確に判別することができる。また、0 サイクルの映像から判読される浮きの直径はシリコンスペーサの直径とほぼ一致していた。更に、凍結融解試験実施中の映像の一部に見られるように、浮き箇所が水が浸入すると周辺部より浮き箇所が低温となり浸入前と比べ濃淡が



水の浸入によって明暗が逆転している。 水抜き後の孔

写真-1 赤外線撮影結果

逆転することから、浮きに水が浸入した場合の判定も明確に行うことが可能であった。以上のことから赤外線撮影による検査は、本研究で実施した他の検査方法と比べ浮きの拡大及び水の浸入を明確に判定することができ、信頼性が高いと思われる。

写真-1 に示されたとおり、水の浸入により画像が不鮮明になった場合、試験終了後水抜き孔を削孔し浮き内部の水を除去した後、再度赤外線撮影を行っている。この結果、浮きの大きさ、厚さ、炭素繊維シートの層数、浮き中央に削孔した孔の有無、浮きの補修、炭素繊維シートの加工方法及びエポキシ樹脂の製造会社に関係なくすべての供試体で凍結融解試験後の浮きの拡大は認められなかった。炭素繊維シートを貼付けずに凍結融解試験を実施した SE-16 供試体の重量減少率は 2%程度で、コンクリート表面の劣化が認められたが、炭素繊維シートを貼付けた供試体は試験後の重量減少も表面の劣化も認められなかった。このことからコンクリート表面に炭素繊維シートを貼付けることにより、凍結融解に対しての抵抗性が増加する傾向が示唆された。ただし、本試験で使用したコ

ンクリートは健全なコンクリートであり、損傷を受けたコンクリートで同様の傾向があるか否かは本試験の結果からは判断できない。

水の浸入の有無については、直径 10mm 以下の浮きでは凍結融解試験が終了するまで水の浸入が認められなかったが、浮き中央に穴をあけた供試体を除く直径 30mm の浮きでは 13%、直径 40mm 以上の浮きでは 100%凍結融解試験中に水が浸入していた。

浮きの厚さと水の浸入の有無との関連性は本研究の範囲内では認められなかった。

表-4 に試験結果を一覧表として示す。

長期間の供用により炭素繊維シートが損傷を受けた場合、炭素繊維シート表面にはエポキシ樹脂の紫外線劣化防止及びシートの傷防止を目的とした表面保護が施工されているため外見上の変状が出にくく、発見が遅れる可能性がある。このため、許容できる浮きの大きさについては安全側の判断に基づき規定する必要がある。

本試験で浮きの内部に水が浸入した供試体は長期間の供用や極寒冷地を想定して凍結融解サイクルを増加させたり、試験温度を変化させ、本研究で実施した試験条件より更に厳しい条件

表-4 凍結融解試験結果

供試体番号	浮き拡大の有無	備考
SE-1	—	標準施工試験体（浮きなし）
SE-2	拡大なし	9個中9個に水浸入
SE-3	拡大なし	9個中2個に水浸入
SE-4	拡大なし	9個中4個に水浸入
SE-5	拡大なし	水浸入無し
SE-6	拡大なし	9個中9個に水浸入（穿孔）
SE-7	拡大なし	水浸入無し
SE-8	拡大なし	水浸入無し
SE-9	拡大なし	水浸入無し
SE-10	拡大なし	供試体作製時に浮き消失
SE-11	注入残し部の拡大なし	水浸入無し（エポキシ注入）
SE-12	注入残し部の拡大なし	水浸入無し（エポキシ注入）
SE-13	拡大なし	9個中9個に水浸入
SE-14	拡大なし	水浸入無し（B社品）
SE-15	拡大なし	水浸入無し（C社品）
SE-16	—	表面劣化（未施工品）

で試験を行うと浮き内部の水が凍結し体積膨張することにより浮き周辺部で炭素繊維シートのはがれ等が発生させ欠陥が拡大する可能性がある。しかし、凍結融解試験後も水の浸入が認められなかった供試体は本研究で実施した試験条件より更に厳しい条件で試験しても欠陥の拡大は生じる可能性は低いと考えられる。

以上の事項から直径 30mm 以下の浮きは耐久性に及ぼす影響は小さいが、直径 30mm 以上の浮きはエポキシ樹脂注入等の補修を実施するのが望ましいと判断できる。ただし、集中的に浮きが発生している場合は本研究の結果とは異なる結果となる可能性があるため注意が必要である。

3. 白化の影響とその対処方法

3.1 試験供試体

本研究では、白化及びその対処方法による炭素繊維シートの物性の変化を検討するための引張強度試験及び白化が一体化性状に及ぼす影響を明らかにするための付着強度試験を実施することとした。

意図的に白化させた供試体は、初期硬化に必

要な一日間は霧吹き後濡れタオルを接近させることにより高湿度を確保し、5℃の冷蔵庫中で養生することにより低温状態を確保した。その後室温に取り出し濡れタオルに巻いた状態で7日間以上養生を行なうこととした。

引張強度試験片は離型フィルム上で含浸接着樹脂を含浸させることにより作製し、積層枚数は1層とした。また、付着強度試験片は300mm×300mm×60mmのJISコンクリート平板に炭素繊維シートを貼ることにより作製した。なお、供試体作製に用いた炭素繊維シート及びエポキシ樹脂は、凍結融解試験で用いた3種類の材料である。

本試験供試体は以下の項目を変化させ、それぞれの項目が一体化性状に及ぼす影響を確認する目的で作製されている。

①白化させない供試体

白化させた供試体との比較のため白化させない供試体を作製した。

②白化後未処理供試体

白化後何らかの処理を行なった供試体との比較のため白化後未処理供試体を作製した。

③白化後溶剤処理供試体

白化後アセトンを用いた拭取り（以下溶剤処理と記す）により、白化部分を取り除く処理の効果を確認する目的で白化後溶剤処理供試体を作製した。

④白化後研磨及び溶剤処理供試体

白化後サンドペーパーによる研磨及び溶剤処理により、白化部分を取り除く処理の効果を確認する目的で白化後研磨及び溶剤処理供試体を作製した。なお、サンドペーパー処理を行う場合は、炭素繊維シートが損傷しないように十分な注意を払って行った。

3.2 試験方法

引張強度試験はJIS K 7073「炭素繊維強化プラスチックの引張強度試験方法」に準拠して実施し、試験片の幅と炭素繊維の換算厚み（繊維重量を比重で除した値）による繊維断面積ベースでの引張強度及び引張弾性係数を求めた。

表—5 引張強度試験及び付着強度試験結果

試験片状態	引張強度 MPa	引張弾性率 GPa	付着強度 MPa				破壊形態
			A社*1	B社*1	C社*1	平均	
標準	4,510~4,900	254~261	3.9	4.6	3.1	3.9	母材破壊
白化未処理	4,120~5,090	251~265	3.3	4.1	4.5	4.0	母材破壊
白化溶剤処理	4,510~4,940	260~262	4.2	4.2	3.4	3.9	母材破壊
白化サントペール+溶剤処理	4,210~4,790	251~263	3.6	4.5	3.3	3.8	母材破壊

*1 : A社, B社, C社はエポキシ樹脂の製造会社の違いによる

付着強度試験は JIS A 6909「建築用仕上塗材」に準拠し、40 mm×40 mmの断面寸法の鋼製接着端子を炭素繊維シート施工面に接着した後に、4辺をコンクリートに届くまで切込みを入れ、専用の油圧ジャッキにて引き抜いたときの付着強度を測定し破壊モードの観察を行った。

3.3 試験結果

引張強度試験及び付着強度試験結果を表—5に示す。白化の発生の有無及び白化対策の差による引張強度及び引張弾性率の低下は認められず、本研究で生じた白化はFRP化した炭素繊維シートの繊維方向の引張性能を低下させなかったことが示された。FRP化した炭素繊維シートの引張性能に明確な差が生じなかったのは白化によりエポキシ樹脂の物性が変化した深さの範囲がごく表層部に限定していたことが原因と考えられる。また付着強度試験の結果、白化の発生の有無及び白化対策の差による明確な付着強度の差は認められなかった。白化した部分は粉状でほとんど強度を有しないにもかかわらず、白化の有無に関係なく付着強度に差が生じなかったのは、一体化性状がコンクリートの引張強度に支配されたため、母材破壊したことが原因であると考えられる。今後の課題として、鋼材等を用いて処理方法を比較した付着試験を実施し、白化対策に関する最終的な結論を出す必要があるが、付着性状に問題が生じた場合の手直しの手間を考慮すると当面の間は実施工で生じた白化は全て溶剤処理又は、サンドペーパーと溶剤との併用処理により撤去するのが良いと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた結論は次の通りとなる。

- (1) 通常橋脚の耐震補強工事に使用されている材料を用いてコンクリート片を炭素繊維シート内部に意図的に作られた厚さ 1~2 mm, 直径 60 mm以下の浮きは、凍結融解試験後も拡大せず、炭素繊維シートのはがれ等の新たな欠陥も発生しないことが示された。
- (2) 直径 30 mm以上の浮きは凍結融解試験後、内部に水が浸入する可能性が高く、将来浮きが耐久性に及ぼす影響を否定できないことが示された。この結果から、30 mm以上の浮きはエポキシ注入等の方法により補修することが望ましいと判断される。一方 30 mm以下の浮きについては集中的に発生している等の理由により本研究の適用が困難な場合を除き、浮きが耐久性に及ぼす影響は小さいと判断される。
- (3) 本研究で再現された白化の範囲内では炭素繊維シートの物性の変化及び付着強度の低下は認められなかった。ただし、白化と付着性状に関する実験結果の蓄積がなされるまでは付着性状に問題が生じた場合の手直しの手間を考慮した白化に対する処理が必要と思われた。

参考文献

- 1) 田嶋尚志ほか：大型アンテナ用 CFRP 部材の耐久性評価，宇宙科学技術連合講演会講演集，VOL.26th，pp.60~60, 1982
- 2) 鹿毛忠継・柘田佳寛：RC はりの CFRP シートによる曲げ補強効果に及ぼす浮きの影響コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20, No.1, pp.425~430, 1998
- 3) 相良健一・魚本健人：炭素繊維シートで補修・補強された RC 構造物の欠陥の検知について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.1203~1208, 1996