

連続繊維シート補強コンクリートの 暴露耐久性に関する検討

富山 禎仁¹・川島 陽子²・Pierre LABOSSIÈRE³・Marc DEMERS⁴・西崎 到⁵

^{1,2,5}正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: ¹tomyama@pwri.go.jp, ²y-kawashima@pwri.go.jp, ³nishizaki-i553jp@pwri.go.jp

^{3,4}Département de génie civil et de génie du bâtiment Faculté de génie, Université de Sherbrooke
(2500 boul. Université, bureau C2-2001-4, Sherbrooke, QC, J1K 2R1 Canada)

E-mail: ³Pierre.Labossiere@USherbrooke.ca, ⁴Marc.Demers@USherbrooke.ca

コンクリート構造物の補修・補強に用いられる炭素繊維シート補強材の付着性や補強効果の長期耐久性を把握するため、屋外暴露試験を行っている。供試体は、シート補強材を歩道用コンクリート平板(300×300×60mm)の全面に施工したものと、無筋コンクリートの中実円柱(直径150×高さ300mm)側面に施工したものの2つの形態とし、いずれも適切な条件で製作した。前者は暴露30年後の供試体について、シート補強材のコンクリートへの付着性をプルオフ法および引き剥がし法によって評価した。後者は暴露25年後の供試体を回収し、圧縮強度試験を実施した。これらの結果から、暴露後の供試体には樹脂の減耗等の外観変状が表れていたものの、現時点において、シート補強材の付着性や補強効果の低下は生じていないことが明らかとなった。

Key Words: carbon fiber sheet, strengthening, retrofit, durability, outdoor exposure test, adhesion

1. はじめに

コンクリート構造物の補修や耐震補強のために、炭素繊維シート(以下、CFシートと称す)補強材を用いる工法が普及している。この工法による補修・補強の力学的な効果については様々な報告がある一方で、その長期耐久性については未だ不明な点が多い。

そこで著者は、土木構造物に適用されるCFシート補強材の屋外環境における長期耐久性についての知見を得るために、CFシートにエポキシ樹脂を含浸させ板状に成形した試験片を作製し、積雪寒冷地であるシェルブルック(カナダ)、温暖な茨城県つくば市、そして亜熱帯地域に位置し海浜環境でもある沖縄県大宜味村の3箇所で、10年間にわたる屋外暴露試験を実施した^{1)~9)}。その結果、エポキシ樹脂/炭素繊維界面の劣化に起因すると思われる、シート補強材自体のわずかな強度低下が認められたものの、暴露10年後においても、実用上十分な力学的性能を保持していることなどが明らかとなった。

一方、CFシート補強材の実際の適用形態を考えた場合、上述のような補強材自体の長期耐久性に加えて、補強材とコンクリート母材との付着性や、補強材によるコンクリートの補強効果の長期耐久性についても確認して

おく必要がある。

これらのことから著者らは、歩道舗装用のコンクリート平板にCFシート補強材を施工した供試体や、CFシート補強材をコンクリート円柱に巻き立て施工した供試体を作製し、これらの屋外暴露試験も併行して実施している^{7)~10)}。前者の供試体では主に、自然気象条件下におけるCFシート補強材の付着性の経時変化を、後者では補強効果の経時変化を長期にわたって追跡調査している。

本報では、平板供試体の暴露30年後までの結果と、円柱供試体の暴露25年後までの結果についてまとめた。

2. 炭素繊維シート補強材の付着性の屋外暴露耐久性

(1) 概要

CFシート補強材とコンクリート母材との付着性の屋外暴露耐久性を評価するために、歩道舗装用のコンクリート平板にCFシート補強材を施工した供試体を作製し、長期にわたる屋外暴露試験を実施している。付着性の評価方法としては、コンクリート表面被覆材の標準的な付着性状試験として利用されているプルオフ法と、プルオ

フ法ではコンクリート表面の凝集破壊が主となりやすいことから⁹⁾、CF シート補強材/コンクリート界面での破壊がより生じやすい評価手法として、引き剥がし試験を実施した。今般、暴露 30 年の供試体を回収し、評価を行った結果について以下にまとめた。

(2) 実験方法

a) 実験材料

1992 年当時、日本国内で使用されていた製造会社の異なる 4 種類の CF シート補強材（表-1）を実験に用いた。プライマーは全ての補強材において標準的な仕様に含まれるが、パテ（不陸調整材）は製品によって使用するものとしなかった。マトリックス樹脂は、全ての製品でエポキシ樹脂を用いた。

b) 供試体

市場から入手した歩道舗装用のコンクリート平板（300×300×60mm）を、供試体の母材として用いた。このコンクリート平板の全面に、各 CF シート補強材を、製造会社の示す標準的な手順・材料に従って施工した（図-1）。コンクリート表面の前処理は動力工具処理（ディスクサンダ）とした。シート補強材の積層構成は 2 層とし、互いに直交するように配置した。シート補強材の最外層には、白色の上塗り塗料を塗付した。各補強材とも 10 個の供試体をメーカーの示す適切な条件で製作し、初期値用を除く 9 個を屋外暴露試験に供した。

c) 暴露試験

暴露試験は茨城県つくば市内の土木研究所建設材料研究施設（屋外暴露試験場）で、1992 年に開始された。供試体上面の滞水を避けるため、供試体を南向き 5 度に傾斜した暴露架台（高さ約 1 m）上に設置し、暴露した（図-2）。これまで、暴露開始から 14 年後となる 2006 年に各補強材の供試体を 1 個ずつ回収し、付着性の評価を行っている^{7,9)}。

d) 評価方法

コンクリート母材に対する CF シート補強材の付着性の暴露耐久性は、当初、プルオフ法のみで評価することが計画された。プルオフ法は、塗装や各種被覆材料等の付着力の評価に広く用いられる試験方法の一種であり、試験対象に鉛直方向の引張力を加えた時に生じる剥離や破れに必要な最小の張力を測定することによって、付着力を評価するものである（図-3）。

プルオフ法による試験では、供試体のシート補強材表面にエポキシ樹脂系接着剤で 40 mm×40 mm の鋼製アタッチメントを貼付し、約 24 時間後に、アタッチメントの周囲にコンクリート母材に達する切込みを入れ、油圧式簡易引張試験機を用いてシート補強材に鉛直方向の引張力を加えた時の最大引張荷重（N）を求めた。最大引張荷重をアタッチメントの面積（1600 mm²）で除した値を

付着強さ（MPa）とした。試験は各供試体とも 3 箇所ずつ（初期値のみ 5 箇所）行った。

表-1 実験に用いた CF シート補強材の仕様

供試体 記号	プライマー	パテ (不陸調整材)	炭素繊維 シート	マトリックス 樹脂
a	あり	あり	高強度グレード a	エポキシ樹脂
b	あり	あり	高強度グレード b	エポキシ樹脂
c	あり	あり	高弾性グレード c	エポキシ樹脂
d	あり	なし	高強度グレード d	エポキシ樹脂

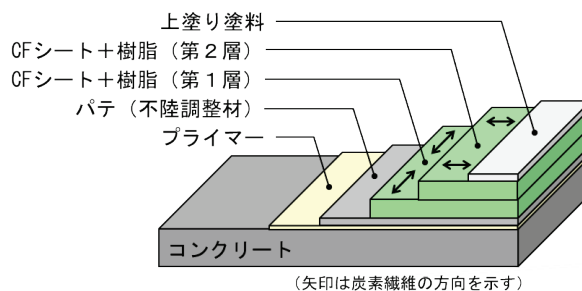
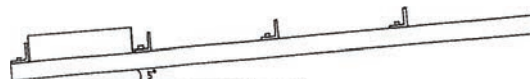


図-1 供試体の積層構成



(a) 暴露試験の状況（茨城県つくば市）



(b) 暴露架台断面

図-2 暴露試験の状況と暴露架台断面

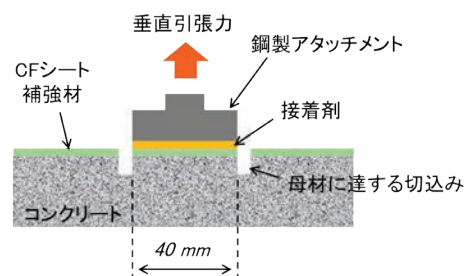


図-3 プルオフ法の概略図

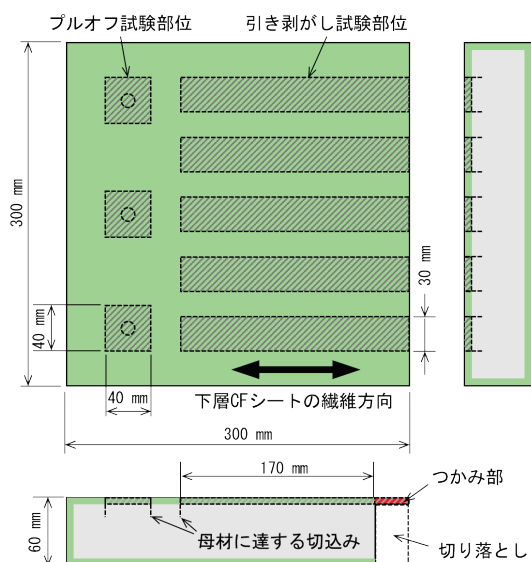


図4 プルオフ試験および引き剥がし試験のための供試体加工 (暴露14年後より)

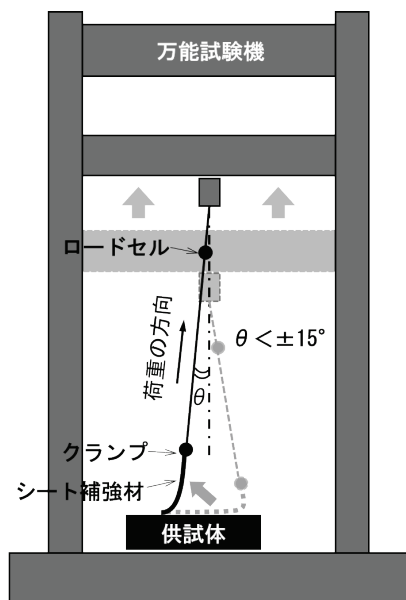


図5 引き剥がし試験の概略図

前述の通り、本暴露試験の開始当初は CF シート補強材とコンクリート母材との付着性状の耐久性をプルオフ法により評価する様に計画されていた。しかし近年では、コンクリート表面被覆材等の付着性の評価に「引き剥がし試験」を適用する試みが報告されている¹¹⁾ことから、著者らにおいても、暴露14年後の追跡調査からこの方法による試験を導入し、付着力評価法としての適用性を検討することとした。このため、引き剥がし試験においては、暴露前のデータ（初期値）は取得していない。

引き剥がし試験では、各供試体端部の約30mmをシート補強材を残してダイヤモンドカッターにより切り落と

し、つかみ部を設けた（図-4）。また、供試体表面に母材コンクリートに達する切込みを入れ、幅30mm×長さ170mmの短冊状の試験部位を5つ作製した。試験は図-5に示すように供試体を万能試験機にセットし、クロスヘッドと供試体のつかみ部を、途中にロードセルを挿入したステンレスワイヤ（長さ600mm）でつないだ。ステンレスワイヤを介してシート補強材に張力を加えていき、試験部位のシート補強材が完全に剥離するまでの経過時間と荷重の変化を記録した。試験速度（クロスヘッド速度）は100mm/min.とした。

(3) 実験結果と考察

a) プルオフ法による評価

プルオフ法により求めた付着強さを図-6に示す。このグラフでは、暴露前の供試体（未暴露）については5箇所の平均値、暴露14年後、30年後については3箇所の平均値を示している。いずれの供試体も、初期値（未暴露）はおおよそ3.0MPaであった。暴露14年後に行った試験では、2.1MPaから3.2MPaとなり、供試体a, b, cで若干の強度低下が見られた。一方、今回行った暴露30年後の試験では、2.8MPaから3.5MPaとなり、供試体dを除き暴露14年後を上回る値となった。

プルオフ法による試験では、いずれの供試体も例外なく、破壊モードはコンクリート母材の比較的深い位置での凝集破壊であった（図-7）。この結果から、暴露試験

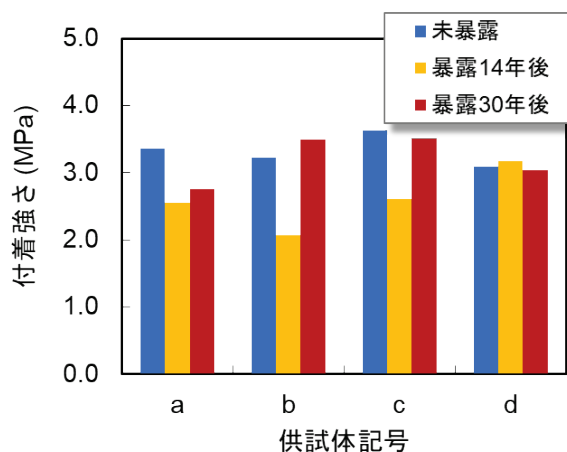


図6 暴露試験前後の各供試体の付着強さ（プルオフ法）

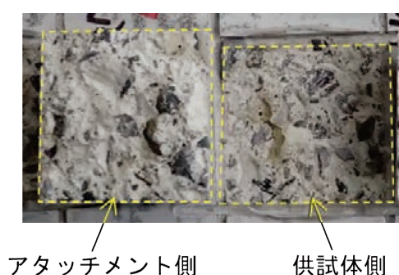


図7 プルオフ法による試験後の典型的な破断面

後に認められた付着強さの若干の低下はコンクリート母材の引張強さに起因するものであり、必ずしも CF シート補強材とコンクリート母材との付着性の低下を表すものではないと考えられる。しかしながら、暴露後に付着強さの低下が認められる供試体においても、付着強さは 2.0 MPa 以上となっており、CF シート補強材とコンクリート母材との付着強さはこれと同等以上であると見なせることから、暴露 30 年後においても実用上は十分な付着特性を維持していることが推察される。

b) 引き剥がし試験による評価

暴露 30 年後の引き剥がし試験で得られた、各供試体における荷重－時間線図の典型的な例を図-8 に示す。試験の初期にピークを示し、その後ほぼ一定の荷重を保つもの（供試体 a）、局所的にピークを示しながら段階的に荷重を減ずるもの（供試体 b）、試験終了直前にピークを示すもの（供試体 c）、ほぼ一定の荷重を保ちつつ局所的にいくつかのピークを示すもの（供試体 d）といった具合に、供試体によって荷重－時間線図のパターンが異なることがわかった。

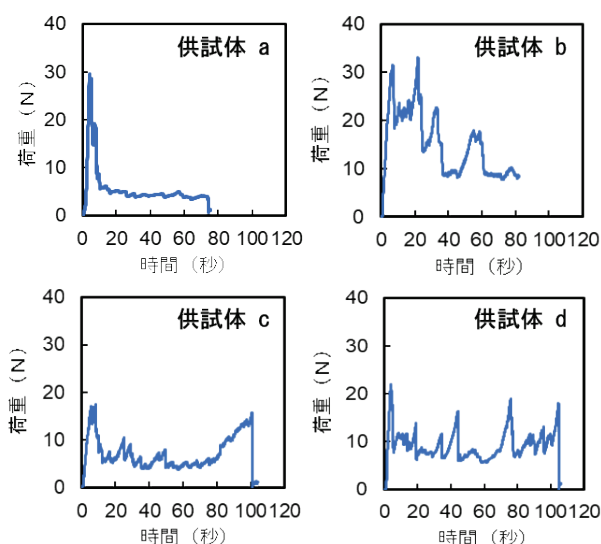


図-8 引き剥がし試験で得られた荷重－時間線図の典型的な例（暴露 30 年後）

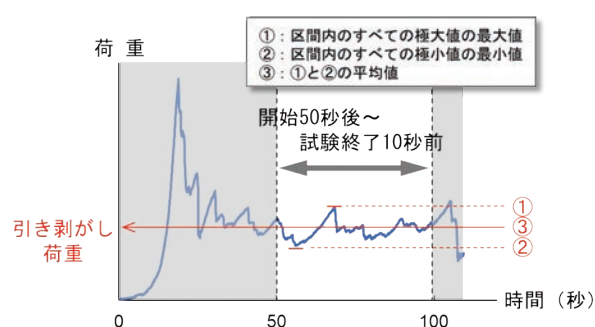


図-9 荷重－時間線図の解析方法（1）

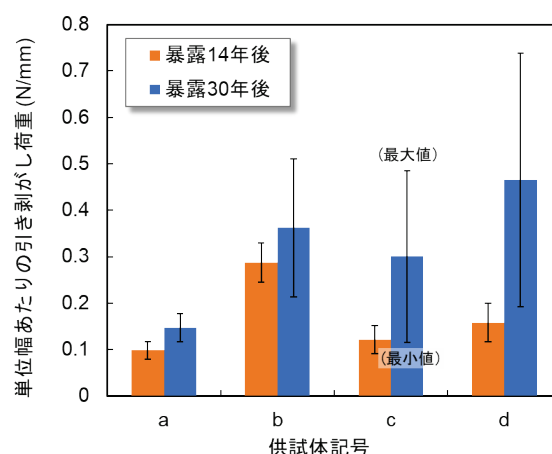


図-10 引き剥がし試験結果（解析方法（1）による）

そこで、まず始めに試験初期と終了直前に示される荷重のピークを排除し、図-9 に示した方法で解析することにした。すなわち、解析の対象区間を、試験開始から 50 秒後から試験終了の 10 秒前までとし、この区間の全ての極大値の最大値と、全ての極小値の最小値の平均値を求め、これを当該供試体の引き剥がし荷重とした。この解析方法は JIS K 6274:2018「ゴム及びプラスチック-引裂強さ及び接着強さの求め方における波状曲線の解析」に示される D 法に相当するものである。試験部位ごとに幅が若干異なるため、引き剥がし荷重を試験部位の幅で除し、単位幅あたりの引き剥がし荷重を求め評価した。

図-10 は暴露 14 年後および 30 年後の供試体の、単位幅あたりの引き剥がし荷重を整理したものである。それぞれ、5 回のデータの平均値、最大値、最小値を示している。前述の通り、暴露試験開始当初の計画では引き剥がし試験を行う予定は無かったため暴露前の供試体のデータは取得しておらず、暴露 14 年後と 30 年後のみの比較を行う。暴露 14 年後では、供試体 a、c、d の引き剥がし荷重が 0.10 から 0.16 N/mm であったのに対し、供試体 b のみ大きな値 (0.29 N/mm) を示した。一方、暴露 30 年後ではいずれの供試体とも暴露 14 年後を上回る引き剥がし荷重を示した。全体的に暴露 30 年後の方がばらつきが大きくなっており、特に大きい供試体 d では最小値が 0.19 MPa、最大値が 0.74 MPa となった。

引き剥がし試験後の典型的な剥離面の状態を表-2 に示す。この表には、各画像に見られる破壊モードも併せて示している。暴露 14 年後の供試体 a と c では、剥離した CF シート補強材にコンクリート片の付着は認められず、CF シート補強材/コンクリート母材の界面で破壊が生じたと見ることができる。これは暴露 30 年後も同様であり、暴露による破壊モードの変化は生じていないことがわかった。一方、暴露 14 年後の供試体 d では、表層近傍のコンクリート片が剥離した CF シート補強材に部分的に付着しており、部分的に母材コンクリートの凝集破

表-2 引き剥がし試験後の典型的な剥離面の状態

供試体記号	a		b		c		d	
暴露期間	14年	30年	14年	30年	14年	30年	14年	30年
引き剥がし試験後の剥離面の状態								
破壊モード※	①	①	70% : ② 30% : ①	③	①	①	②	②

※ 破壊モードの凡例：①CFシート/コンクリートの界面破壊，②コンクリートの凝集破壊，③CFシートの層間破壊

壊が生じていると見ることができる。暴露 30 年後には、剥離面のほぼ全面で母材コンクリートの凝集破壊が生じた。暴露 14 年後において引き剥がし荷重が最も大きかった供試体 b では、供試体 d よりも母材コンクリートの凝集破壊が生じた面積が増加し、剥離面全体の 50～70% となった。剥離面の残りの部分は、CF シート補強材/母材コンクリートの界面破壊であった。供試体 b については暴露 14 年後と暴露 30 年後とで破壊モードが大きく異なり、暴露 30 年後の供試体では CF シート補強材の第 1 層と第 2 層との層間で剥離が生じた。供試体 b の引き剥がし荷重を見ると、暴露 14 年後よりも暴露 30 年後の方がやや大きい値とはなっているものの、引き剥がし試験における破壊モードの変化から、CF シート補強材自体の劣化が生じている可能性が考えられる。このことについては、さらに長期の暴露試験や供試体の化学的な分析等により、今後解明していく予定である。

以上のような、CF シート補強材の付着性の評価における供試体間の破壊モードの相違は、プルオフ法では得られなかった知見である。プルオフ法では、シート補強材の付着性が健全であれば、コンクリート母材で凝集破壊が起きるのが通常である。このような評価方法は、一定の基準値をもとにした合否判定が簡便に行えるという利点はあるものの、CF シート補強材とコンクリートとの付着特性の経時的な変化を追跡していく目的には適さず、引き剥がし試験などの評価方法を用いることが望ましいと考えられる。

ところで、図-9 に示した「解析方法（1）」では、既に標準化されている波状曲線の解析方法の一つを利用した。この方法では、試験開始時の初期上昇曲線及び異

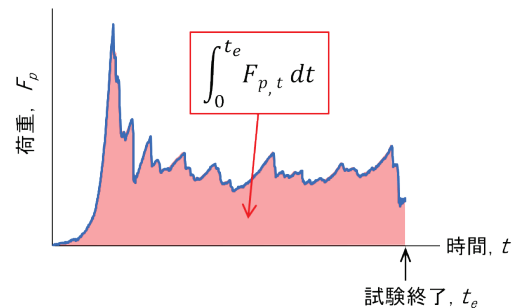


図-11 荷重－時間線図の解析方法（2）

常なピークを無視し解析を行うのものである。図-8 に示した通り、荷重－時間線図のパターンは供試体の種類により異なる一方で、同一の供試体では類似の形状が示されたことから、荷重－時間線図のパターン自体も CF シート補強材の付着特性を表す重要な特徴であると考えられる。また、供試体 d のように、試験開始直後に表れる荷重のピークがさほど小さくなく、その後、試験終了までの間に同程度の大きさのピークが複数回生じるようなパターンを示すものもある。これらのことから、試験開始時の初期上昇曲線を異常なピークとして無視するのではなく、これも含めて、試験時間全体を通じて解析する方が、シート補強材の付着特性をより忠実に評価できるのではないかと考えた。この解析は、図-11 に示す方法で行った。すなわち、CF シート補強材を母材コンクリートから完全に引き剥がすのに必要なエネルギーに相当する物理量として、(1)式に示す I_p を定義し、単位剥離面積あたりの I_p によって付着性の大小を評価することとした。

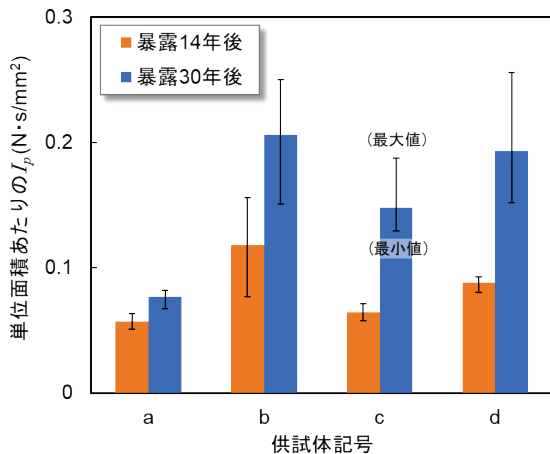


図-12 引き剥がし試験結果（解析方法（2）による）

$$I_p = \int_0^{t_e} F_{p,t} dt \quad (1)$$

ここに、 $F_{p,t}$ は時間 t における引き剥がし荷重、 t_e はシート補強材が完全に剥離した（試験終了の）時間を示す。

図-12 は「解析方法（2）」によって求めた単位面積あたりの I_p を示している。図-11 と図-12 とでは、暴露 30 年後の結果において大小関係の序列が一部で入れ替わったが、その他は「解析方法（1）」と「解析方法（2）」とで概ね同様の結果が示された。供試体 b については、暴露 14 年後と 30 年後とで破壊モードが大きく異なる一方で、「解析方法（1）」による結果は両者で大差はなかったが、「解析方法（2）」では 2 倍程度の差となった。

3. 炭素繊維シート補強材による補強効果の屋外暴露耐久性

(1) 概要

CF シート補強材による補強効果の屋外暴露耐久性を評価するため、補強材を巻立て施工したコンクリート供試体を作製し、積雪寒冷地のシェルブルック（カナダ）、亜熱帯気候の沖縄県大宜味村、温暖な茨城県つくば市の 3 箇所で、1997 年から 10 年間の屋外暴露試験を実施した⁹⁾¹⁰⁾。所定の期間暴露した後に供試体の圧縮強さを評価した結果から、無塗装の補強材ではマトリックス樹脂の黄変や減耗といった外観変状が顕著に生じたが、その補強効果に対する影響は極めて小さく、いずれの供試体とも暴露 10 年後の時点においてもほぼ初期の強度を維持していることが明らかとなった。その後、茨城県つくば市のみ暴露を継続し、今般、暴露 25 年後の調査を実施した。

(2) 実験方法

a) 実験材料

実験には、二つのメーカーより入手した 2 種類の CF シート補強材を用いた（表-3）。いずれの補強材も強化繊維は PAN 系の炭素繊維であり、マトリックス樹脂は各メーカーが推奨するエポキシ樹脂の中から選定した。

b) 供試体

供試体は、標準的な直径 150 mm×高さ 300 mm の無筋コンクリート（材齢 28 日における圧縮強度は 32 MPa）の中実円柱を母材として用いた。無補強のもの、2 種類の補強材でそれぞれ巻立て補強したもの（供試体 B および E）、表面塗装の保護効果を評価するため、供試体 B の表面にアクリルウレタン樹脂塗料を塗装したもの（供試体 D）を試験に供した。

CF シート補強材による補強は、幅 30 cm の連続繊維シートを母材の外周を 2 周するより 10 cm 長くなるように切断し、2 周分を樹脂を含浸させながら連続的に巻き立てて施工した（図-13）。すなわち、母材は 2 層の CF シートで補強されていることとなる。連続繊維の配向は、供試体の円周方向と同じである。

c) 暴露試験

暴露試験は積雪寒冷地のシェルブルック（カナダ）、温暖な茨城県つくば市、亜熱帯気候の沖縄県大宜味村の 3 箇所で 1997 年に開始した。各暴露地の主な気象条件を表-4 に示す。

表-3 本研究に用いた CFRP シート補強材の概要

供試体記号	強化繊維	マトリックス樹脂	上塗り塗料
B	炭素繊維シートB (中弾性グレード)	エポキシ樹脂B	—
D (補強材B+上塗り)	炭素繊維シートB (中弾性グレード)	エポキシ樹脂B	アクリルウレタン樹脂塗料
E	炭素繊維シートC (高弾性グレード)	エポキシ樹脂A	—

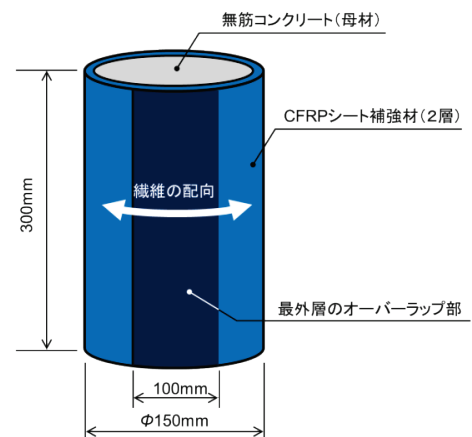


図-13 供試体の概略図

表-4 各暴露地の主な気象条件

暴露地	緯度	年間平均 気温(℃)	年間平均 降水量(mm)	気候
シェルブルック (カナダ、ケベック州)	北緯45度2分	4.1	1084	積雪寒冷
茨城県 つくば市	北緯36度6分	13.6	1505	温暖湿潤
沖縄県 大宜味村	北緯26度3分	22.4	2036	亜熱帯性 海浜環境

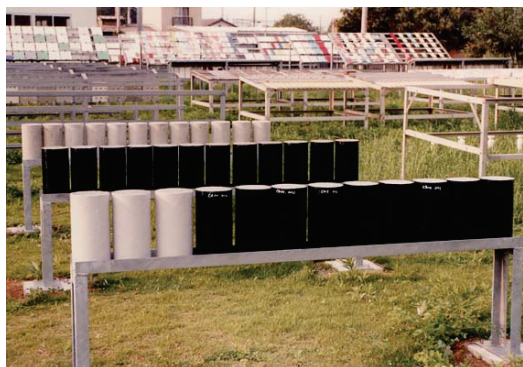


図-14 暴露試験状況（茨城県つくば市）

表-5 暴露期間と供試体の数量

暴露期間 供試体	未暴露	3年	5年	10年	25年 (つくばのみ)
無補強	3	3	3	3	3
B	3	3	3	3	3
D	0	2	2	2	3
E	2	0	2	2	3



図-15 圧縮試験の実施状況（無補強供試体）

供試体は、シェルブルックおよびつくばでは高さ 70～120 cm 程度の鋼製暴露架台上に、大宜味では地面に直接、垂直に立てて設置した。つくば市における暴露試験の実施状況を図-14に示す。3箇所の暴露地それぞれに、各補強材につき 4～9 個の供試体を設置し暴露した。供試体は表-5にもとづき暴露 3 年後、5 年後、10 年後に回

収し、調査を行った。その後、つくば市のみ、開始から 25 年後まで暴露を継続した。

d) 評価方法

所定の期間暴露後の供試体を回収し、供試体の圧縮特性を評価した。供試体の上下両端面は、キャッピングにより平滑にした上で試験に供した。圧縮試験は ASTM C398)に準拠し、2000 kN 圧縮試験機により中心軸圧縮試験を行い、圧縮荷重、クロスヘッドの変位、縦（軸方向）ひずみ、横ひずみを記録した。ひずみの測定は、供試体の側面中央部に軸方向、円周方向にそれぞれ 2 枚ずつひずみゲージを貼付し、ひずみ測定器により出力を取得した。いずれの材種とも、未暴露の供試体（コンクリート材齢 56 日）についても同様に試験し、これを初期値とした。圧縮試験の実施状況を図-15に示した。

(2) 実験結果と考察

a) 暴露環境による劣化挙動の差異

図-16は、屋外暴露による CF シート補強コンクリート（供試体 B）の圧縮強さの保持率（初期値に対する割合）の経時変化を、暴露地ごとに整理した結果である。10 年間の屋外暴露において、暴露環境による劣化挙動の明確な差異は認められなかった。暴露地による気象条件の相違は比較的大きく（表-4）、凍結融解や海水飛沫による影響等も予想されたが、今回の試験の範囲内では暴露環境による劣化挙動への影響は顕著ではなかった。そのため、つくば市のみ引き続き暴露試験を継続することとした。

b) 材種による劣化挙動の相違

暴露後の補強供試体では、無塗装の補強材の外観が初期とは大きく異なっており、供試体 B では樹脂が消耗して表面の繊維が露出し、供試体 E では樹脂が黄変するとともに、表面に無数の空隙が生じていた。一方、塗装した供試体 D は上塗り塗膜の光沢がやや低下しているものの、その他の外観上の変化は認められなかった。これら

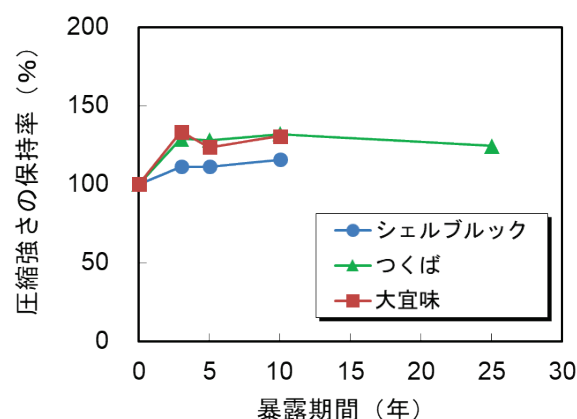


図-16 屋外暴露による CF シート補強コンクリートの圧縮強さ保持率の経時変化（供試体 B）

は、暴露 10 年目までの外観変化の傾向と大きな違いは無かった。

圧縮試験後の供試体破壊状況の一例を図-17 に示す。圧縮試験では軸ひずみが増加するにつれて母材のコンクリートに無数のクラックが生じ、これに伴ってコンクリートが膨張するとともに補強材の繊維方向に荷重が加わり、補強材が供試体の軸方向に破断することにより圧縮応力が大きく低下した。補強材の種類や暴露による明確な傾向は認められなかった。



図-17 圧縮試験による供試体の破壊状況（供試体 B）

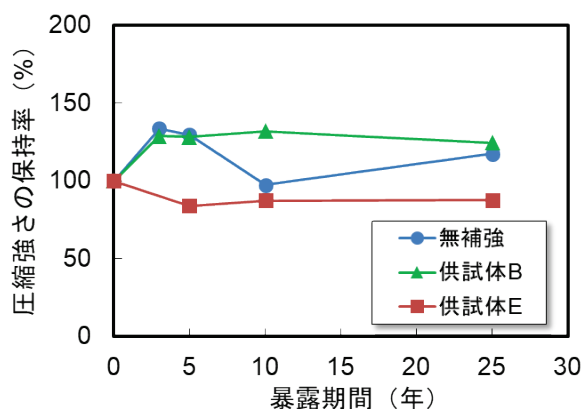
暴露供試体の圧縮特性の経時変化を図-18 に示す。グラフの縦軸は、各水準における圧縮強さあるいは弾性係数の初期値に対する割合（保持率）として表した。

無補強、CF シート補強のいずれにおいても、圧縮強さおよび弾性係数ともに暴露 10 年後以降の変化は小さく、暴露 25 年後の時点においても初期とほぼ同程度の水準を維持していることがわかった。既往の研究において同種の補強材自体の暴露耐久性を評価した結果、長期の屋外暴露により、マトリックス樹脂と炭素繊維との界面の劣化と見られる面内せん断強さの低下が生じることが明らかとなったが⁹⁾、この劣化は巻立て補強コンクリートの補強効果には大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

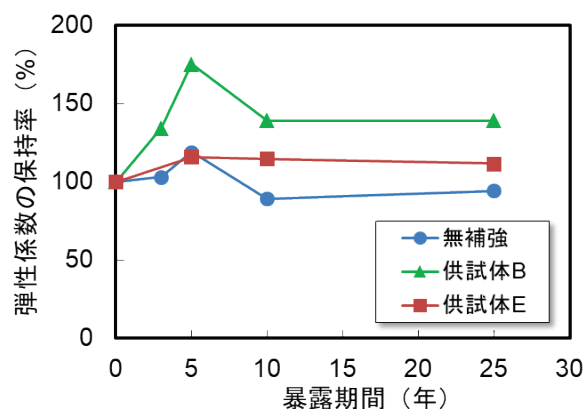
c) 表面塗装の保護効果

図-19 は屋外暴露による CF シート補強コンクリートの圧縮特性の経時変化を、表面塗装の有無によって整理した結果である。グラフの縦軸は、各水準における圧縮強さあるいは弾性係数の初期値に対する割合（保持率）として表した。

既往の研究において GFRP 引拔成形材に関する屋外暴

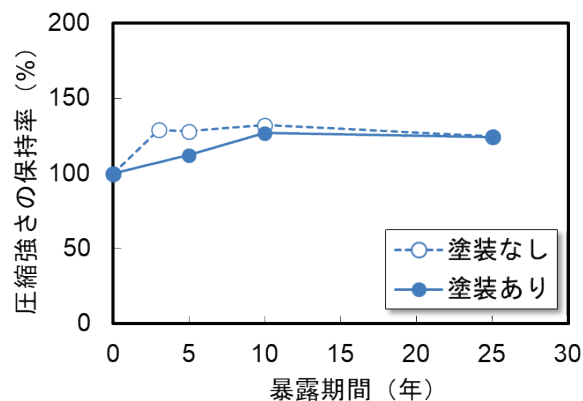


(a) 圧縮強さ保持率の経時変化

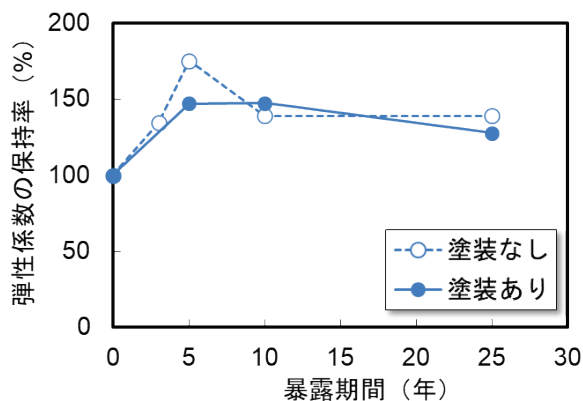


(b) 弾性係数の経時変化

図-18 屋外暴露による CF シート補強コンクリートの圧縮特性の経時変化（材種による劣化挙動の違い）



(a) 圧縮強さ保持率の経時変化



(b) 弾性係数の保持率の経時変化

図-19 屋外暴露による CF シート補強コンクリートの圧縮特性の経時変化（表面塗装の有無による劣化挙動の違い）

露耐候性について検討した結果、暴露による GFRP の力学的特性の低下に対し、表面塗装が良好な保護効果を示すことを確認している¹²⁾。その一方で CF シート補強材に関する研究⁹⁾では、表面塗装の有無にかかわらず暴露による積層板の強度低下はほぼ同等となり、表面塗装の効果は認められなかった。今回の実験結果では CF シートの補強効果自体に劣化が認められず、表面塗装の有効性を確認するまでには至らなかった。

4. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の補修・補強に用いられる炭素繊維 (CF) シート補強材の付着性や補強効果の長期耐久性を把握するため、補強材を歩道用コンクリート平板の全面に施工した供試体や、コンクリート円柱側面に巻き立て施工した供試体を作製し、長期の屋外暴露試験を行っている。本報では、暴露 30 年後の平板供試体を用いてプルオフ試験および引き剥がし試験を行い、CF シート補強材のコンクリートへの付着性を評価した結果と、暴露 25 年後の円柱供試体の圧縮強度試験を行った結果について取りまとめた。得られた知見は以下の通りである。

(1) プルオフ法で得られた付着強さは、暴露の前後で大きな差異が無かった。いずれも、コンクリート母材で凝集破壊を生じたことから、CF シート補強材とコンクリート母材との付着強さは、試験で得られた測定値よりも大きいことが推察される。付着強さは小さいものでも 20 MPa 以上であり、暴露 30 年後においても実用上は十分な付着特性を維持していると考えられる。

(2) 引き剥がし試験の結果から、供試体によって荷重-時間線図のパターンや破壊モードが異なること、暴露によってこれらが変化する可能性があることがわかった。シート補強材の付着性が健全であれば、コンクリート母材の凝集破壊で結果が決まってしまうプルオフ法による評価と比べて、引き剥がし試験は、シート補強材の付着特性の経時変化をより精緻に評価できる可能性があることが明らかとなった。

(3) 円柱供試体の暴露では、無塗装の CF シート補強材においてマトリックス樹脂の黄変や減耗といった外観変状が顕著に生じたが、その補強効果に対する影響は認められず、いずれの供試体とも 25 年間暴露後においてもほぼ初期の強度を維持していることが明らかとなった。表面塗装の効果については明確ではなかった。

参考文献

- 1) Labossière, P., Neale, K. W. and Nishizaki, I.: Effect of

- Different Long-term Climatic Conditions on FRP Durability, *Proc. of the 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6)*, Vol. 2, pp. 779-784, 2003.
- 2) Nishizaki, I., Labossière, P. and Sarsaniuc, B.: Durability of CFRP sheet reinforcement through exposure tests, *Proc. of the 7th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-7)*, Vol. 2, pp. 1419-1427, 2005.
- 3) 西崎 到, ピエール・ラボシエール, ケネス・ニール, "炭素繊維シート補強材の暴露試験による耐久性の検討", コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告書, Vol. 5, pp. 99-104, 2005
- 4) Demers, M., Labossière, P., Nishizaki, I., Sarsaniuc, B. and Neale, K. W.: Durability of CFRP sheets under natural climatic conditions, *Proc. of the Third International Conference on Durability and Field Applications of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction (CDCC2007)*, pp. 151-158, 2007.
- 5) Nishizaki, I., Labossière, P., Neale, K. W., Demers, M. and Tomiyama, T.: Evaluation of the durability of CFRP sheets after climatic exposure, *Proc. of the 4th International Conference on Durability and Sustainability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction and Rehabilitation (CDCC 2011)*, pp. 91-99, 2011.
- 6) 富山 禎仁, 西崎 到, Labossiere, P., Neale, K. W., Demers M. "コンクリート補強用連続繊維シート (CFRP) の長期耐久性評価", 第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp. 290-295, 2012.
- 7) Nishizaki, I. and Kato, Y.: Durability of the adhesive bond between continuous fibre sheet reinforcements and concrete in an outdoor environment, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 515-522, 2011.
- 8) 西崎 到, カリム・ベンザルティ, マーク・キアトン, 加藤祐哉, "連続繊維シートの付着耐久性", 土木技術資料, Vol. 54, No. 9, 2012.
- 9) 富山 禎仁, ピエール・ラボシエール, ケネス・W・ニール, マーク・ドメス, 西崎 到, "炭素繊維シート巻立て補強コンクリートの屋外耐久性に関する検討", 第 4 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集, pp. 27-32, 2012.
- 10) Tomiyama, T., Nishizaki, I., Labossière, P., Neale, K. W. and Demers, M.: Outdoor Durability of Concrete Confined with CFRP, *Proc. of the 11th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-11)*, Paper No. 04-702, 2013.
- 11) Au, C. and Büyüköztürk, O.: Peel and shear fracture characterization of debonding in FRP plated concrete affected by moisture, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 10, No. 1, pp. 35-47, 2006.
- 12) Nishizaki, I., Kishima T. and Sasaki, I.: Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests, *Proc. of the 3rd International Conference on Durability and Sustainability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction and Rehabilitation (CDCC 2007)*, pp.159-166, 2007.

(Received August 26, 2022)

OUTDOOR DURABILITY OF CONCRETE RETROFITTED WITH CARBON FIBER SHEET

Tomonori TOMIYAMA, Yoko KAWASHIMA, Pierre LABOSSIERE, Marc DEMERS
and Itaru NISHIZAKI

In order to clear long-term durability of adhesive properties and strengthening effects of carbon fiber (CF) sheet reinforcements on concrete, outdoor exposure tests were conducted. Specimens were as follows: one is a concrete plate (300 x 300 x 60 mm) covered entirely with reinforcements and the other is a concrete cylinder (ϕ 150 x 300 mm) wrapped with reinforcements.

For the former specimens, an exposure test was conducted for up to 30 years in Tsukuba (moderate climate in Japan). After the exposure, the adhesion properties of CF sheet reinforcements were evaluated by pull-off tests and peeling tests. There was little change in pull-off adhesive strength before and after exposure. Since the fracture mode was cohesive fracture of concrete in all specimens, it was considered that there was no deterioration in the adhesive properties reinforcements. In the peeling tests, no deterioration in adhesive properties due to exposure was confirmed, but several characteristic fracture modes that were not seen in the pull-off tests such as delamination of reinforcements or debonding at the interface between reinforcements and concrete were observed. Hence, it appears that the peeling test may be more suitable as a method for examining adhesive properties in detail.

On the other hand, for the latter specimens, two types of CF sheet reinforcements with or without protected by a polyurethane coating were examined. The specimens were exposed to natural ageing at Tsukuba for up to 25 years. Compression tests were carried out after the exposure. Although yellowing or wearing of the matrix resin was observed on the cylinders without top coating, such visual degradations did not indicate a negative effect on the strength. The specimens still kept their initial strength after 25 years of exposure. It appears that there are no significant differences in degradation between specimens from the three exposure sites.