

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

富山 禎仁¹・Pierre LABOSSIERE²・Kenneth W. NEALE³
Marc DEMERS⁴・西崎 到⁵

¹正会員 独立行政法人土木研究所 材料資源研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: tomiyama@pwri.go.jp

²Professor, Département de génie civil, Université de Sherbrooke
(2500, boul. Université, Sherbrooke, QC, J1K 2R1 Canada)
E-mail: Pierre.Labossiere@usherbrooke.ca

³Professor emeritus, Université de Sherbrooke

⁴Assistant professor, Département de génie civil, Université de Sherbrooke
(2500, boul. Université, Sherbrooke, QC, J1K 2R1 Canada)
E-mail: Marc.Demers@usherbrooke.ca

⁵正会員 独立行政法人土木研究所 材料資源研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: nisizaki@pwri.go.jp

炭素繊維シート巻立て工法の長期耐久性に関する知見を得るために、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、最長10年間の屋外暴露試験を実施した。供試体は無筋コンクリートの中実円柱（直径150mm×高さ300mm）を母材とし、無補強のもの、異なるメーカーより入手した2種類の炭素繊維シートでそれぞれ巻立て補強したもの、補強材の表面にさらにアクリルウレタン樹脂塗料上塗を塗装したものとした。所定の期間暴露後、その圧縮強度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10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。

Key Words : continuous carbon fiber sheet, structural reinforcement, durability, exposure test

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、連続炭素繊維シート（CFRPシート）を用いる工法が普及しつつある。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。CFRPの長期耐久性に関する既往の研究の多くは、航空機や船舶を対象としたものであり^{1)~4)}、環境要因や期待寿命が土木構造物とは大きく異なる。

そこで著者らは、土木構造物に適用されるCFRPシートの自然気象条件下における長期耐久性について知見を得るために、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^{5)~7)}。本報ではこのう

ち、CFRPシートで巻立て補強したコンクリート供試体の、屋外暴露による圧縮特性の変化を評価した結果について報告する。

2. 実験方法

(1) 研究の概要

本研究では、以下の①～⑤の試験片（試験体）の暴露試験を実施している。本報ではこの中で、⑤の暴露試験体に関する結果について報告する。

① 一方向積層板

一方向配列の炭素繊維シートを幅250 mm×長さ300mmの寸法に切断し、これにエポキシ樹脂を含浸させつつ4層積層して硬化させた試験板。暴露前後の試験板から切り出したクーボン試験片について、繊維方向の引

張試験を行い、主に繊維自体の耐久性を評価している。

② ±45° 斜交積層板

一方向配列の炭素繊維シートを、試験板の主軸に対して ±45° 方向に配向して積層した斜交積層板。暴露前後の試験板から切り出したクーポン試験片について、±45° 引張試験を行い、主に屋外暴露による繊維/樹脂界面の劣化を評価している。

③ 炭素繊維シート

炭素繊維シート自体の耐久性を評価するために、マトリックス樹脂無し状態で屋外暴露し、暴露前後の力学的特性を調べている。

④ マトリックス樹脂板

マトリックス樹脂（エポキシ樹脂）の耐久性を評価するために、樹脂単体を板状に成形し、屋外暴露前後の物性を調べている。

⑤ コンクリート円柱

コンクリート円柱に巻立て補強した試験体。暴露前後の供試体について圧縮試験を行い、コンクリートの補強効果の観点から、補強材の耐久性を評価している。

(2) 実験材料

本研究では、二つの異なるメーカーより入手した3種類のCFRPシート補強材について様々な形態で屋外暴露試験を実施し、自然気象条件下におけるシート補強材の長期耐久性を検討している。研究対象としている補強材の概要を表-1に示す。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。なお、本報で報告する「コンクリート円柱」に関する検討では、補強材B、D、Eのみを使用した。

表-1 本研究に用いたCFRPシート補強材の概要

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

(3) 供試体

供試体は、標準的な直径150mm×高さ300mmの無筋コンクリート（材齢28日における圧縮強度は32MPa）の中実円柱を母材として用いた。無補強のもの、異なるメーカーより入手した2種類の補強材（補強材BおよびE）で

それぞれ巻立て補強したもの、表面塗装の保護効果を評価するため、補強材Bの表面にアクリルウレタン樹脂塗料を塗装したもの（補強材D）を試験に供した。

CFRPシート補強材による補強は、幅30cmの連続繊維シートを母材の外周を2周するより10cm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。すなわち、母材は2層のCFRP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。図-1に供試体の概略図を示した。

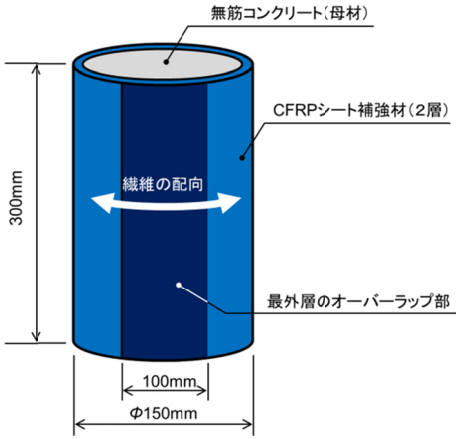


図-1 供試体の概略図

(4) 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-2にまとめた。

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-3にもとづき暴露3年後、5年後、10年後に回収することとした。

表-2 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22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38分	22.4	2036	亜熱帯性 海浜環境

表-3 暴露期間と供試体の数量

暴露期間 補強材	未暴露	3年	5年	10年
無補強	3	3	3	3
B	3	3	3	3
D	0	2	2	2
E	2	0	2	2



(a) シェルブルック



(b) つくば



(c) 大宜味

図-2 各地における暴露試験状況

供試体は、シェルブルックおよびつくばでは高さ70～120cm程度の鋼製暴露架台上に、大宜味では地面に直接、それぞれ地面に対して垂直に立てて設置した。暴露試験の実施状況を図-2に示す。

(5) 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、硫黄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 C39⁹⁾に準拠し、2000kN 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-3に示した。



図-3 圧縮試験の実施状況（無補強供試体）

3. 実験結果と考察

(1) 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ことになっており、補強材Bでは樹脂が消耗して表面の繊維が露出し、補強材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、塗装した補強材Dは上塗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。

圧縮試験後の供試体破壊状況の一例を図-4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。破壊形態には図-4に示す二つのタイプが見受けられたが、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。

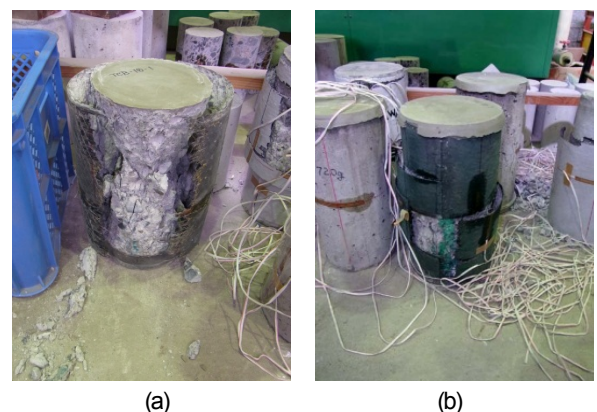
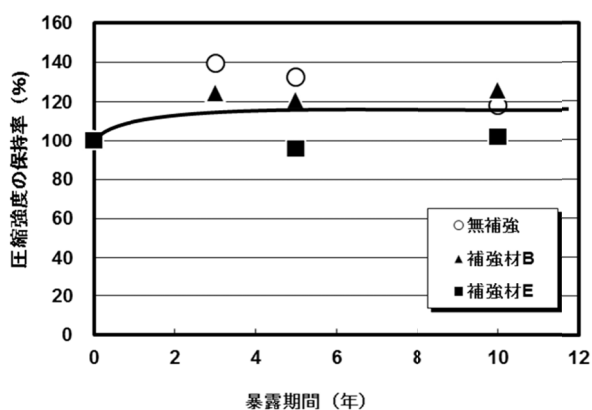
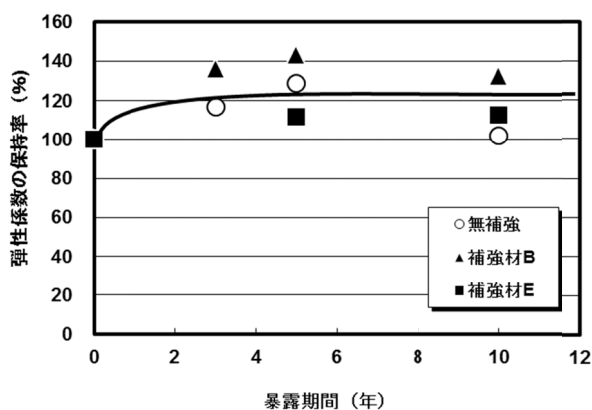


図-4 圧縮試験による供試体の破壊状況



(a) 圧縮強度保持率の経時変化



(b) 弾性係数の経時変化

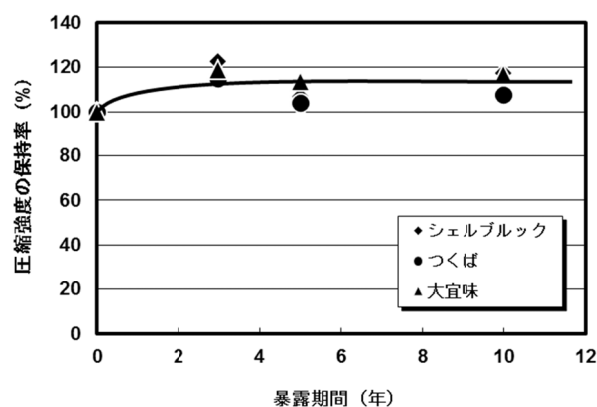
図-5 屋外暴露によるCFRPシート補強コンクリート圧縮特性の経時変化（材種による劣化挙動の相違）

暴露供試体の圧縮特性の経時変化を図-5に示す。データは3箇所の暴露地の平均値とした。また、グラフの縦軸は、各水準における圧縮強さおよび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，CFRPシート補強共に，圧縮強さおよび弾性係数ともに暴露初期に20%程度増加した後，10年間の暴露期間を通じてほぼ同じ水準を維持した。既往の研究において同種の補強材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影響しないものと考えられる。補強材Bは補強材Eに比べて，暴露初期の強度の増加は大きかった。

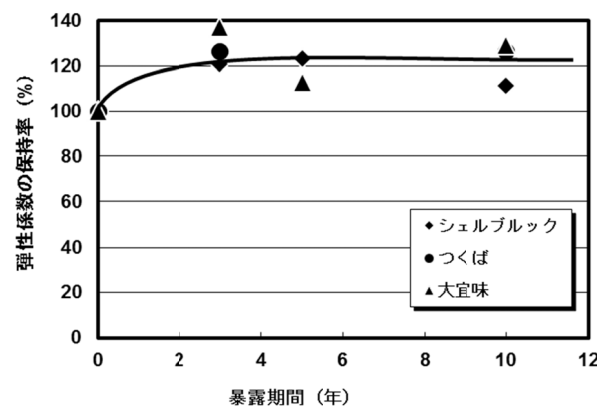
(2) 暴露環境による劣化挙動の差異

図-6は屋外暴露によるCFRPシート補強コンクリートの圧縮特性の経時変化を，暴露地（すなわち暴露環境）ごとに整理しプロットしたものである。データは補強材Bおよび補強材Eの平均値とした。また，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。

する割合（保持率）として表した。暴露環境によるCFRPシート補強コンクリートの特性の変化に，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-2），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と考えられる。ただし，今回の暴露試験はわずか3箇所のみで実施したものである。また各試験水準では，供試体は2～3体と多くは無いことから，統計的手法により議論するためには十分なデータが得られているとは言えない。暴露環境による劣化挙動への影響については，今後，より広範囲な条件下でのデータを積み重ねる必要がある。



(a) 圧縮強度の経時変化



(b) 弾性係数の経時変化

図-6 屋外暴露によるCFRPシート補強コンクリートの経時変化（暴露地による劣化挙動の相違）

(3) 表面塗装の保護効果

図-7は屋外暴露によるCFRP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プロットしたものである。補強材B（塗装なし）および補強材D（塗装あり）のそれぞれについて，3箇所の暴露地の平均値をデータとした。また，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¹⁰⁾。その一方でCFRP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CFRP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。

図-8に補強材B（塗装なし）と補強材D（塗装あり）の応力ひずみ線図の一例（つくばにおける暴露10年後の結果）を示す。両者は暴露10年後においてもほぼ同じ圧縮挙動を示すことがわかった。これは、他の暴露地の供試体においても同様の結果であった。

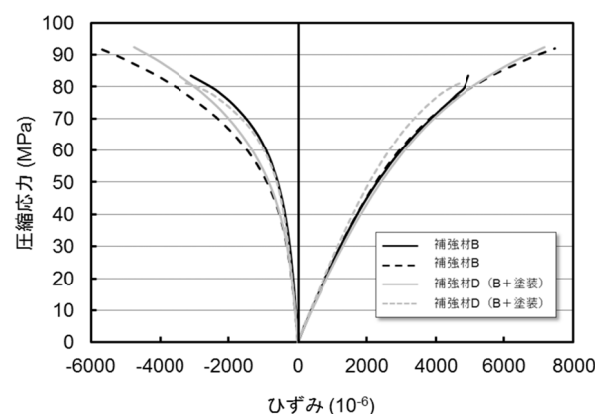


図-8 CFRPシート補強コンクリートの応力ひずみ線図の例（つくば暴露10年後の補強材BとD）

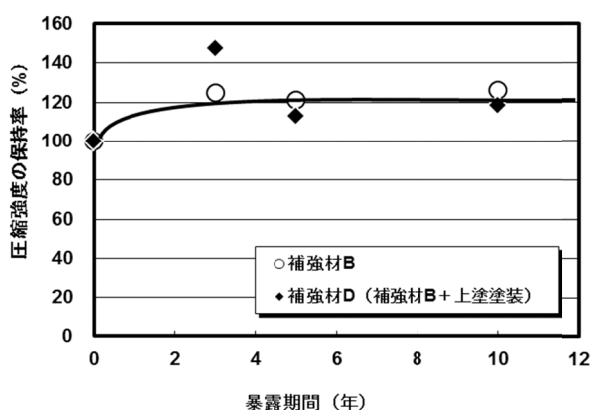
4. まとめ

炭素繊維シート巻立て工法の長期耐久性に関する知見を得るために、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、最長10年間の屋外暴露試験を実施した。補強材の種類や暴露環境、表面塗装の有無による補強コンクリートの圧縮特性の変化の挙動を検討した。この結果、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10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。また、暴露環境による劣化挙動の違いや、表面塗装の効果については明確ではなかった。

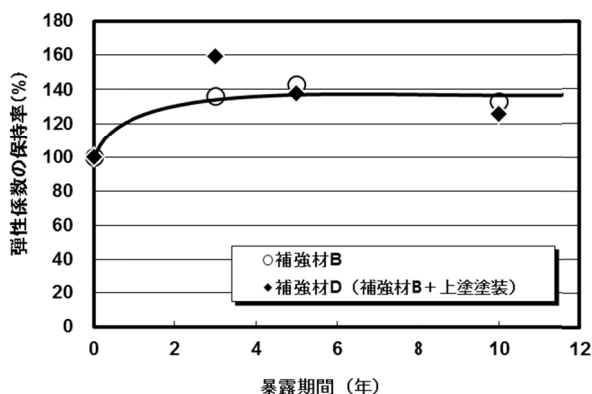
謝辞：本研究は科研費（21360209）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Backer, D. J.: Flight service evaluation of composite components on Bell 206L and Sikorsky S-76 helicopters, *Journal of American Helicopter Society*, Vol. 29, No. 2, pp. 3-11, 1984
- 2) Dexter, H. B. and Backer, D. J.: Worldwide flight and ground-based exposure of composite materials, *NASA Conference Publication*, NASA-CP-2321, pp. 17-49, 1984
- 3) 山口富三雄, 百島祐忠, 代田 忠: 炭素繊維複合材料の長期屋外耐候性試験結果, *強化プラスチック*, Vol. 44, No. 2, pp. 56-62, 1998
- 4) 工藤 亮, 大久保浩, 辺 吾一, 北条英光: 促進暴露を受けるCFRP材の耐候性曲げ強度とその非破壊的予測, *日本複合材料学会誌*, Vol. 25, No. 1, pp. 23-29, 1999
- 5) Labossiere, P., Neale, K. W. and Nishizaki, I.: Effect of different long-term climatic conditions on FRP durability, *Proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structure (FRPRCS-6)*, No. 2, pp. 779-784, 2003
- 6) 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*



(a) 圧縮強度保持率の経時変化



(a) 圧縮強度保持率の経時変化

図-7 屋外暴露によるCFRPシート補強コンクリートの経時変化（表面塗装の有無による劣化挙動の相違）

ト構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol. 5, pp. 99-104, 2005

- 7) M. Demers, P. Labossiere, I. Nishizaki, B. Sarsaniuc and K. W. Neale: Durability of CFRP sheets under natural climatic conditions, *Proceedings of the Third International Conference on Durability and Field Applications of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction (CDCC2007)*, pp. 151-158, 2007.
- 8) ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of

Cylindrical Concrete Specimens

- 9) 富山禎仁, 西崎 到, Pierre LABBOSSIERE, Kenneth W. NEALE, Marc DEMERS: 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 (2011.11.11)
- 10) I. Nishizaki, T. Kishima and I. Sasaki: Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests, *Proceedings of CDCC2007*, pp. 159-166, 2007

OUTDOOR DURABILITY OF CONCRETE CONFINED WITH CFRP

Tomonori TOMIYAMA, Pierre LABOSSIÈRE, Keneath W. NEALE,
Marc DEMERS and Itaru NISHIZAKI

This paper presents the results of a series of outdoor exposure tests for concrete wrapped with CFRP. Three characteristic locations were investigated: Sherbrooke (Canada), Tsukuba and Oogimi (Okinawa). Specimens were exposed to natural ageing for up to 10 years. Four types of specimens were investigated: concrete cylinders($\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$) without CFRP wrapping; cylinders wrapped in two types of CFRP sheets supplied by different manufacturers; and CFRP-wrapped concrete cylinders protected by an acrylic urethane coating. The compressive behavior of specimens was evaluated at specified time intervals throughout the exposure.