

(36)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

富山 禎仁¹・西崎 到²

Pierre LABBOSSIERE³・Kenneth W. NEALE³・Marc DEMERS³

^{1,2}正会員 独立行政法人土木研究所 新材料チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: ¹tomiyama@pwri.go.jp, ²nisizaki@pwri.go.jp

³Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada

コンクリート構造物に適用される、連続炭素繊維シートを用いた補修・補強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、屋外暴露試験を実施した。暴露試験片は、シート状の炭素繊維に樹脂を含浸させつつ、積層して硬化させたCFRPの形態とした。所定の期間暴露後の試験片を回収し、その引張強度や面内せん断強度を評価した。この結果、試験に供したCFRPは屋外暴露によりわずかな強度低下を示すものの、10年間の暴露期間を通じ、実用上問題のない力学的性能を保持し続けることが明らかとなった。

Key Words : CFRP, 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、屋外暴露によるCFRP積層板の引張特性および面内せん断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) 試験片

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、①②の暴露試験片に関する結果について報告する。

① 一方向積層板

繊維自体の耐久性を評価するため、一方向積層板を暴露し、暴露前後の試験片について繊維方向の引張試験を行った。表-1に一方向積層板試験片の概要を示す。

異なるメーカーより入手した、2種類のCFRPシート（製品A、B）を試験に供した。いずれの製品とも、PAN系の炭素繊維を用いている。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。試験片は、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、硬化させて作製した。繊維の配向は4層とも試験片の長手方向（主軸方向）である。

表-1 暴露試験片（一方向積層板）の概要

暴露試験片名	使用材料	積層構成
一方向積層板A	PAN系炭素繊維シート/ エポキシ樹脂（製品A）	[0]
一方向積層板B	PAN系炭素繊維シート/ エポキシ樹脂（製品B）	
一方向積層板AC	PAN系炭素繊維シート/ エポキシ樹脂（製品A） +アクリルウレタン樹脂塗料 （上塗り）	

表面塗装の保護効果を評価するため、アクリルウレタン樹脂塗料を上塗りとして積層板表面に塗装した試験片についても試験した。

② ±45° 斜交積層板

屋外暴露による繊維/樹脂界面の劣化について調べるために、試験片の主軸に対し繊維を±45° 方向に配向して積層した斜交積層板を暴露した。暴露前後の試験片について±45° 引張試験を行い、面内せん断特性を評価した。図-1に±45° 斜交積層板試験片の繊維の配向、および±45° 引張試験の試験方向を示す。

±45° 斜交積層板は一方向積層板と同様、2種類のCFRPシート（製品A、B）を用いて作製した。表-2に試験片の概要を示す。幅250mm×長さ1000mmの一方向配列の炭素繊維シートから、短辺が250mmの直角二等辺三角形を4枚、底辺が250mmの平行四辺形を2枚切り出し、それぞれにエポキシ樹脂を含浸させつつ4層積層し、硬化させたものを試験片とした。積層構成は試験片の主軸に対し、+45° /-45° /-45° /+45° である。表面塗装の保護効果を評価するため、アクリルウレタン樹脂塗料を上塗りとして積層板表面に塗装した試験片についても試験した。

- ③ 炭素繊維シート：マトリックス樹脂無しの連続炭素繊維シート単体による試験片
- ④ マトリックス樹脂板：マトリックス樹脂（エポキシ樹脂）単体による試験片
- ⑤ コンクリート円柱：製品 A、B をコンクリート円柱に巻立て補強した試験体

表-2 試験片（±45° 斜交積層板）の概要

暴露試験片名	使用材料	積層構成
±45° 斜交積層板 A	PAN系炭素繊維シート/ エポキシ樹脂（製品A）	[+45°/-45°]
±45° 斜交積層板 B	PAN系炭素繊維シート/ エポキシ樹脂（製品B）	
±45° 斜交積層板 AC	PAN系炭素繊維シート/ エポキシ樹脂（製品A） +アクリルウレタン樹脂塗料 （上塗り）	

(2) 暴露試験

暴露試験はシェルブルック（カナダ）、茨城県つくば市、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-3にまとめた。試験片はアルミニウム製の枠を使用し、鋼製暴露架台に垂直に、試験片表面が真南の方角を向くように設置した。3箇所の暴露地それぞれに、各試験片あたり5枚ずつの試験片を設置し暴露した。試験片は暴露1年後、3年後、5年後、7年後、10年後に回収することとした。各暴露地における暴露試験の様子を図-2～図-4に示した。

表-3 各暴露地の主な気象条件

暴露地	緯度	年間平均気温 (°C)	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	温暖湿润
沖縄県大宜味村	北緯 26度 38分	22.4	2036	亜熱帯性 海浜環境

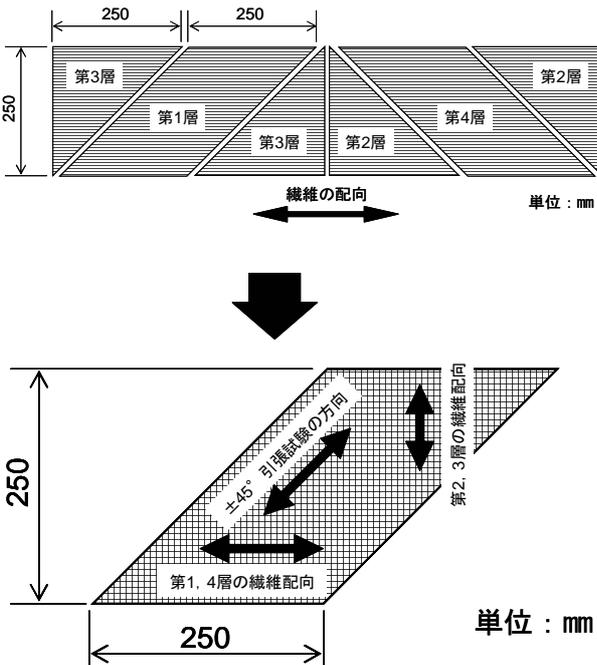


図-1 暴露試験片（±45° 斜交積層板）の概略図

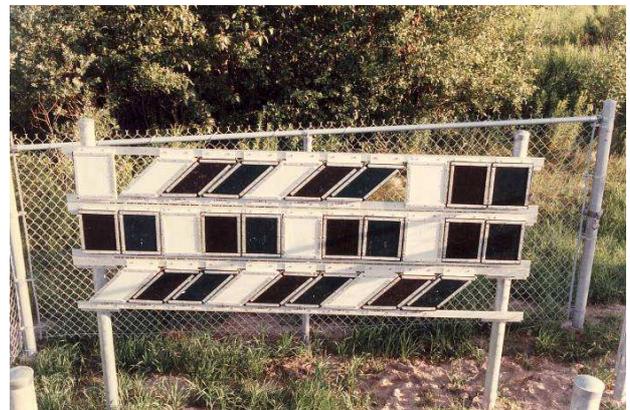


図-2 シェルブルック（カナダ）における暴露試験



図-3 茨城県つくば市における暴露試験



図-4 沖縄県大宜味村における暴露試験

(3) 評価方法

所定の期間暴露後の試験片を回収し、以下の①②の試験により試験片の力学的特性を評価した。

① 一方向積層板

ASTM D3039-76 "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Rein Composites" に準拠し、引張試験を行った。回収後の各暴露試験片から、幅15mm×長さ250mmの試験片を5本ずつ切り出し（繰り返し数：5）、試験に供した。

② ±45° 斜交積層板

ASTM D3518M-91 "In-Plane Shear Stress-Strain Response of Unidirectional Polymer Matrix Composites" に準拠した±45°引張試験を行った。回収後の各暴露試験片から、幅25mm×長さ250mmの試験片を5本ずつ切り出し（繰り返し数：5）、試験に供した。

なお、いずれの材種も、未暴露の試験片についても同様に評価し、これを初期値とした。

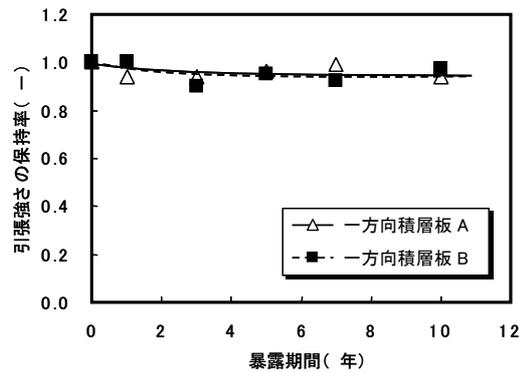
3. 実験結果と考察

(1) 材種による劣化挙動の相違

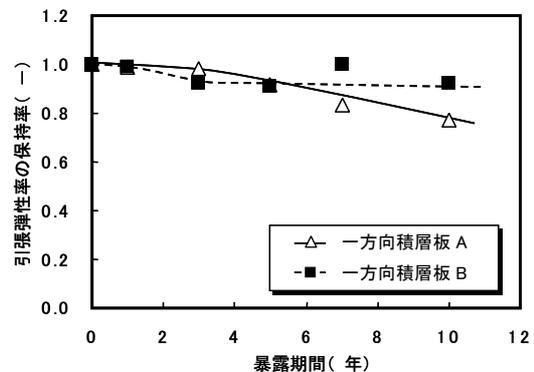
図-5 に一方向積層板の引張特性の経時変化を、図-6

に±45°斜交積層板の面内せん断特性の経時変化をそれぞれ示す。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、各水準における引張強さ（弾性率）あるいは面内せん断強さ（弾性率）の初期値に対する割合（保持率）として表した。

一方向積層板の引張強さは、10年間の暴露期間を通じて著しい変化を見せなかった。この結果は、炭素繊維自体が10年間暴露後においても全く劣化していないか、あるいはほとんど劣化していないことを示唆している。その一方で、±45°斜交積層板の面内せん断強さは20%程度減少したことから、マトリックス樹脂と炭素繊維との界面はわずかに劣化しているものと推察される。しかしこの強度低下は、暴露開始からおよそ3年の間に生じ、その後はほぼ一定レベルの強度を保ち続けた。引張弾性率および面内せん断弾性率の低下は、それぞれの強度低下よりも大きかった。製品A、Bの結果にはほとんど差異が無かったが、製品Aの方がBよりも、劣化による強度低下がやや大きく生じる傾向となった。全体的に見ると、試験に供したCFRP積層板は屋外暴露によりわずかな強度低下を示すものの、10年間の暴露期間を通じ、実用上問題のない力学的性能を保持し続けるものと考えられる。

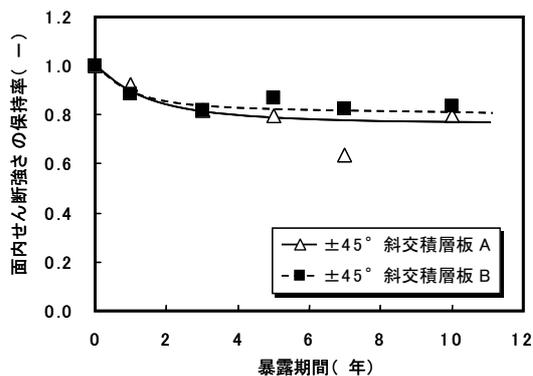


(a) 引張強さの経時変化

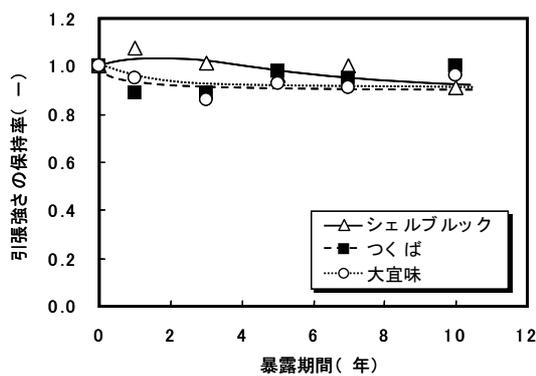


(b) 引張弾性率の経時変化

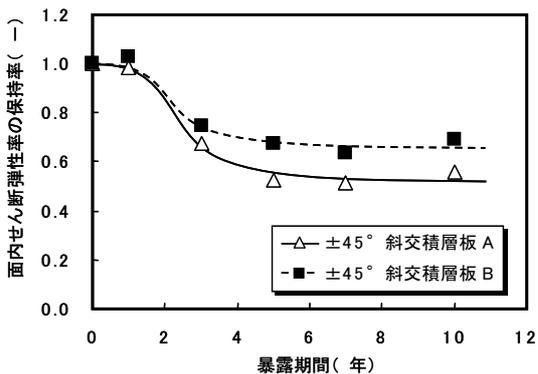
図-5 屋外暴露による一方向積層板の引張特性の経時変化（材種による劣化挙動の相違）



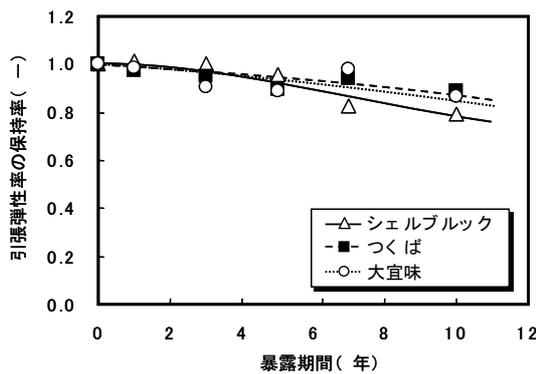
(a) 面内せん断強さの経時変化



(a) 引張強さの経時変化



(b) 面内せん断弾性率の経時変化



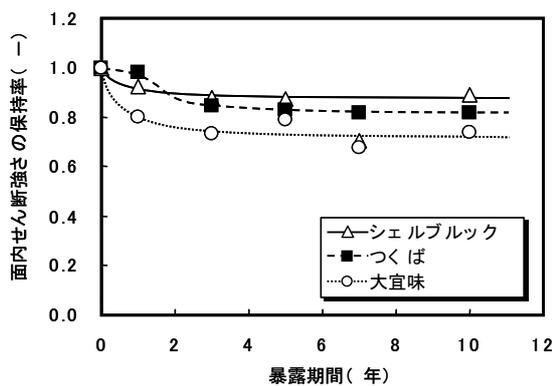
(b) 引張弾性率の経時変化

図-6 屋外暴露による±45° 斜交積層板の面内せん断特性の経時変化 (材種による劣化挙動の相違)

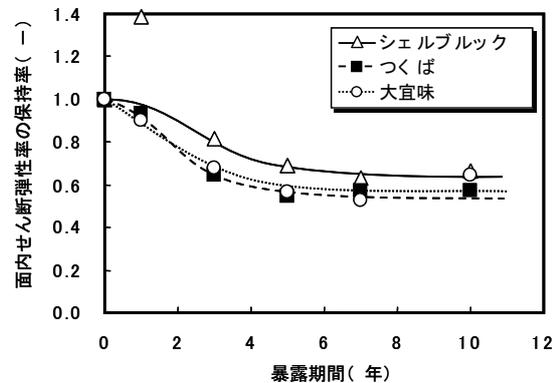
(2) 暴露環境による劣化挙動の差異

図-7は屋外暴露による一方向積層板の引張特性および±45° 斜交積層板の面内せん断特性の経時変化を、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。データは製品A (無塗装) およびBの平均値とした。また、グラフの縦軸は、各水準における引張強さ (弾性率) あるいは面内せん断強さ (弾性率) の初期値に対する割合 (保持率) として表した。

これらの結果から、沖縄県大宜味村に暴露した試験片の強度低下は、他の暴露地よりもやや大きい場合がある。しかし、気象条件の相違 (表-3) が比較的大きいと考えられるのに対し、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。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り、あらゆる環境条件を網羅しているわけではない。暴露環境による劣化挙動への影響については、今後、より多くの条件下で評価する必要がある。



(c) 面内せん断強さの経時変化



(d) 面内せん断弾性率の経時変化

図-7 屋外暴露による一方向積層板の引張特性および±45° 斜交積層板の面内せん断特性の経時変化 (暴露地による劣化挙動の相違)

(3) 表面塗装の保護効果

図-8は屋外暴露による一方向積層板の引張特性および $\pm 45^\circ$ 斜交積層板の面内せん断特性の経時変化を、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。一方向積層板A(塗装なし)およびAC(塗装あり)、 $\pm 45^\circ$ 斜交積層板A(塗装なし)およびAC(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、各水準における引張強さ(弾性率)あるいは面内せん断強さ(弾性率)の初期値に対する割合(保持率)として表した。

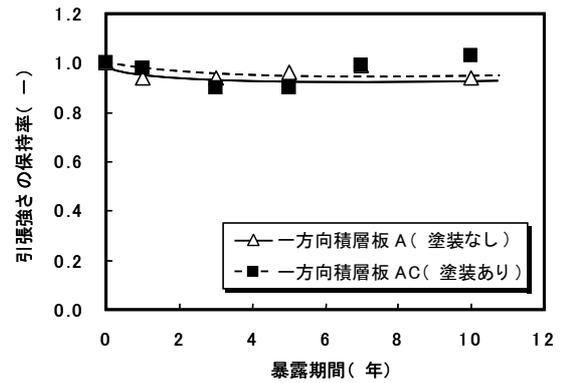
GFRP引抜成形材に関する既往の研究では、屋外暴露によるFRPの力学的特性の低下に対し、表面塗装が良好な保護効果を示すことを確認している⁹⁾。しかし図-8では、表面塗装の有無にかかわらず積層板の強度低下はほぼ同等となり、CFRP積層板の強度低下に対する表面塗装の効果は認められなかった。一方、弾性率の低下に対しては、わずかながら表面塗装の効果を確認された。

4. まとめ

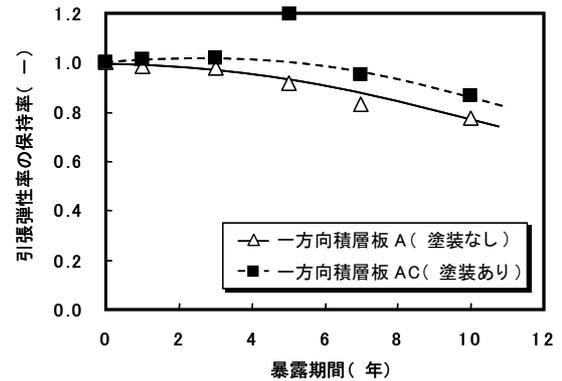
本研究では、CFRP積層板の屋外暴露試験をシェルブルック(カナダ)、茨城県つくば市、沖縄県大宜味村の3箇所で10年間にわたり実施し、屋外暴露による積層板の引張特性および面内せん断特性の変化を評価した。結果をまとめると、以下の通りである。

- ① 一方向積層板の引張強度は10年間暴露後においても著しい変化を見せず、炭素繊維自体が全く劣化していないか、あるいはほとんど劣化していないことが示唆された。
- ② $\pm 45^\circ$ 斜交積層板の面内せん断強度は20%程度減少し、マトリックス樹脂/炭素繊維界面のわずかな劣化が示された。
- ③ 製品の違いによるCFRP積層板の劣化挙動の差異は明確ではなかった。
- ④ 暴露地により気象条件は大きく異なっていたが、これによる劣化挙動への影響は顕著ではなかった。
- ⑤ CFRP積層板の力学的特性の低下に対する表面塗装の効果は認められなかった。
- ⑥ 試験に供したCFRP積層板は屋外暴露によりわずかな強度低下を示すものの、10年間の暴露期間を通じ、実用上問題のない力学的性能を保持し続けることが明らかとなった。

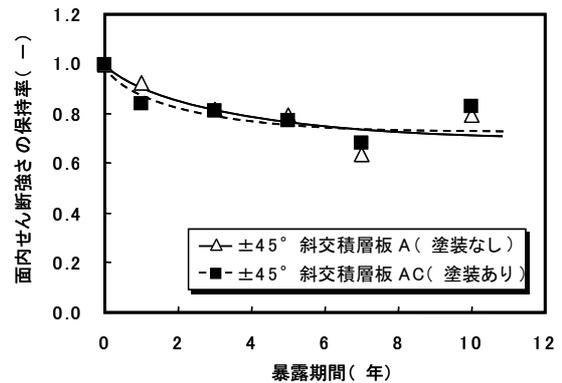
謝辞：本研究は科研費(21360209)の助成を受けたものである。



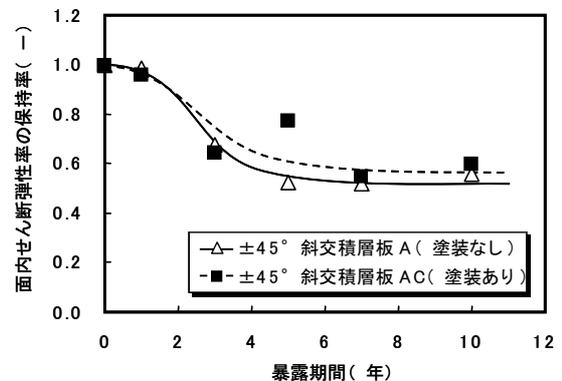
(a) 引張強さの経時変化



(b) 引張弾性率の経時変化



(c) 面内せん断強さの経時変化



(d) 面内せん断弾性率の経時変化

図-8 屋外暴露による一方向積層板の引張特性および $\pm 45^\circ$ 斜交積層板の面内せん断特性の経時変化(表面塗装の有無による相違)

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) I. Nishizaki, T. Kishima and I. Sasaki: Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests, *Proceedings of CDCC2007*, pp. 159-166, 2007

EVALUATION OF THE DURABILITY OF CFRP SHEETS AFTER CLIMATIC EXPOSURE

Tomonori TOMIYAMA, Itaru NISHIZAKI, Pierre LABBOSSIERE
Kenneth W. NEALE and Marc DEMERS

Structural reinforcement with CFRP sheets is a widely used method for strengthening concrete structures such as girders, decks and piers. While the efficiency of this method is well documented, there are still questions about its long term durability. Most of the original studies on the long-term behaviour of CFRP have been done for aircraft or marine structures. However, many conditions such as materials for these applications, environmental factors and expected life time are different than those in structural civil engineering. The authors carried out a series of exposure tests under natural climates conditions for CFRP sheets in three characteristic locations in the world, Sherbrooke (Canada), Tsukuba (mainland Japan) and Oogimi (Okinawa). The natural exposure tests were continued for ten years and the mechanical properties of the specimens from the three locations, such as tensile strength and in-plane shear, were evaluated at regular interval. Although the results showed a slight decrease in mechanical properties over the exposure period, the tested materials exhibit properties that still allow their use after ten years.