

(69) コンクリート補強用連続繊維シートの 屋外暴露7年目の結果

富山 禎仁¹・西崎 到²

Pierre LABBOSSIERE³・Kenneth W. NEALE³・Marc DEMERS³

^{1,2}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: 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、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、シート状の繊維に樹脂を含浸させつつ、積層して硬化させたFRPの形態とした。繊維には炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維を、マトリックス樹脂にはエポキシ樹脂、MMA樹脂を用いた。表面塗装による保護効果についても評価した。所定の期間暴露後の試験片を回収し、その引張特性や面内せん断特性を評価することで、屋外暴露によるこれらの特性の変化の挙動について調べた。暴露7年目までの結果から、積層板の施工条件の違いや、上塗り塗装の有無による挙動の差異について把握した。

Key Words : FRP, continuous 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。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CFRP積層板の屋外暴露試験を実施し、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^{5)・7)}。その結果、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。この研究で試験対象とした素材は2種類に限定されていたが、その後、新たな材料が開発・

普及しつつある。

そこで本研究では、新たな素材としてアラミド繊維、ガラス繊維、アクリル（MMA）樹脂を試験対象に取り入れ、前述の3箇所においてこれらの積層板の暴露試験を実施し、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ている。

本報では、新たに開始した暴露試験7年目までの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①②の試験片の暴露試験を実施している。

① 一方向積層板

繊維自体の耐久性を主に評価するため、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。

連続繊維シートの素材には、PAN系の炭素繊維に加えて、アラミド繊維およびガラス繊維を用いた。アラミド繊維は合成繊維の一種であり、ナイロンと同様、ポリア

表-1 暴露試験片（一方向積層板）の概要

材種	使用材料	積層構成	備考
BM	PAN系炭素繊維シート/ MMA樹脂	[0 ₄]	常温施工
BMC	PAN系炭素繊維シート/ MMA樹脂		低温施工
GE	ガラス繊維シート/ エポキシ樹脂		塗装無し
GEX	ガラス繊維シート/ エポキシ樹脂		塗装あり
KE	アラミド繊維シート/ エポキシ樹脂		塗装無し
KEX	アラミド繊維シート/ エポキシ樹脂		塗装あり

ミドに分類される。軽量、高強度、耐熱性、耐摩擦性等の優れた性質を有するほか、炭素繊維と比べて合成繊維としてのしなやかさを有し取り扱いやすいことから、土木・建築分野でも普及しつつある。一方、ガラス繊維はFRP成形品として水門や橋梁部材としての適用事例は豊富にあるものの、コンクリート補強の用途では実績が少ない。しかし、海外ではガラス繊維連続シートによるコンクリート補強事例も多いため、検討対象に取り入れた。

炭素繊維シートマトリックス樹脂には、アクリル（MMA）樹脂を用いた。アクリル樹脂は低温での施工が可能であることから、土木分野においても接着用途やコンクリートのひび割れ補修用途などで普及しつつある。一方、アラミド繊維シートおよびガラス繊維シートのマトリックス樹脂には、それぞれ、メーカーが推奨するエポキシ樹脂を用いた。

試験片は、一方向配列の繊維シートを幅250 mm×長さ300 mmの寸法に切断し、これにマトリックス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。炭素繊維シート/MMA樹脂の積層板の作製は、室温および低温（-10℃）の2水準で行った。また、表面塗装の保護効果を評価するため、ガラス繊維/エポキシ樹脂およびアラミド繊維/エポキシ樹脂の積層板には、アクリルウレタン樹脂塗料を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、6材種を作製した。表-2に試験片の概要を示す。幅250 mm×長さ1000 mmの一方向配列の繊維シートから、短辺が250 mmの直

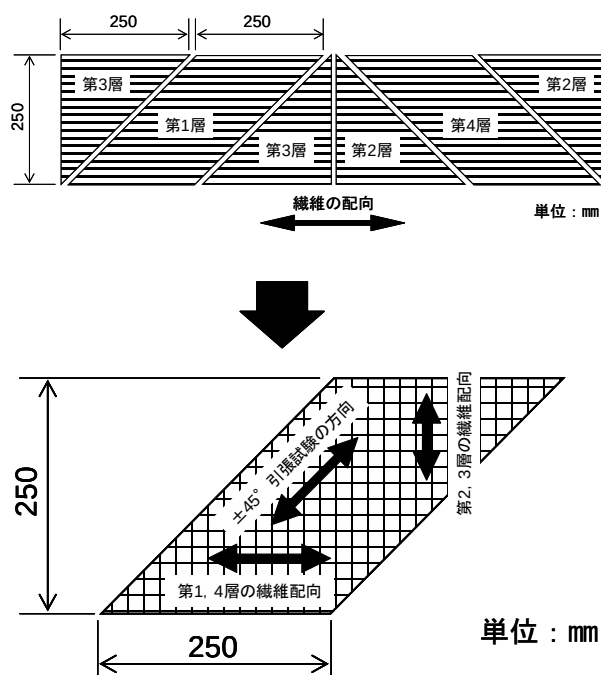


図-1 暴露試験片（±45°斜交積層板）の概略図

表-2 試験片（±45°斜交積層板）の概要

材種	使用材料	積層構成	備考
BM	PAN系炭素繊維シート/ MMA樹脂	[+45/-45] ₄	常温施工
BMC	PAN系炭素繊維シート/ MMA樹脂		低温施工
GE	ガラス繊維シート/ エポキシ樹脂		塗装無し
GEX	ガラス繊維シート/ エポキシ樹脂		塗装あり
KE	アラミド繊維シート/ エポキシ樹脂		塗装無し
KEX	アラミド繊維シート/ エポキシ樹脂		塗装あり

角二等辺三角形を4枚、底辺が250 mmの平行四辺形を2枚切り出し、それぞれにマトリックス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。

(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2008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7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、12年後、15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-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-Reinforced 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15 mm×長さ250 mm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25 mm×長さ250 mm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) 暴露環境および材種による劣化挙動の相違

図-5 は屋外暴露による一方向積層板の引張強さおよび±45°斜交積層板の面内せん断強さの経時変化を、材種ごとに整理しプロットたものである。グラフの縦軸は、各水準における引張強さあるいは面内せん断強さ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、および±45°斜交積層板の面内せん断強さは、一部を除き暴露初期に10～20%程度低下し、その後の変化は緩やかとなった。引張強さの低下率が最も大きいのはアラミド繊維/エポキシ樹脂の一方向積層板 KE であり、暴露7年目の時点で引張強さの保持率は75%程度となった。

一方で、引張弾性率および面内せん断弾性率については、炭素繊維/MMA樹脂積層板を除き、いずれの材種および暴露環境においても、暴露7年目の時点ではほぼ初期の水準を維持していた。炭素繊維/MMA樹脂積層板については、引張弾性率は暴露期間を通じてほぼ一定の値で推移したが、面内せん断弾性率は暴露期間が長くなるにつれて増大し、暴露7年目において最大で暴露前のおよそ1.6倍程度となった。

暴露箇所による差異に着目すると、シェルブルックに暴露した炭素繊維/MMA樹脂積層板およびアラミド繊維/エポキシ樹脂積層板の引張強さ、大宜味に暴露した炭素繊維/MMA樹脂積層板およびガラス繊維/エポキシ樹脂積層板の面内せん断強さは、暴露初期に値が増加する特異な挙動を示したが、その他は暴露環境による劣化挙動への影響は顕著に表れていない。

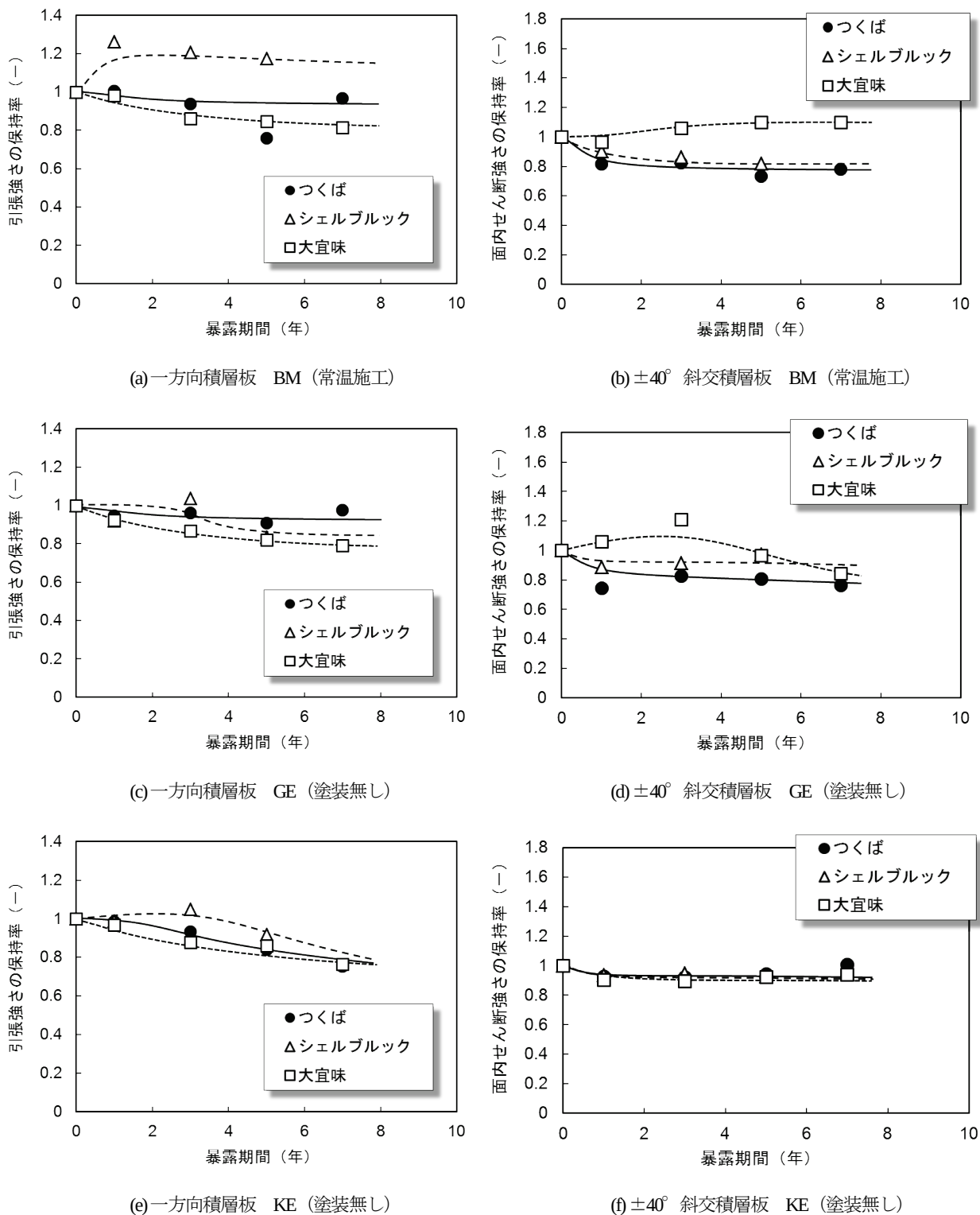


図-5 屋外暴露による積層板の引張強さおよび面内せん断強さの経時変化

暴露後の積層板については各種化学分析により、屋外暴露による素材の変化を調査しているところである。今後、環境因子と、これにより影響を受ける特性との関係について解析し、劣化の機構について詳細に検討する予定である。

(2) 施工条件による劣化挙動の差異

図-6は屋外暴露による炭素繊維/MMA樹脂積層板の引張特性および面内せん断特性の経時変化を、施工条件の違いにより整理した結果である。グラフの縦軸は、初期値に対する割合（保持率）として表した。

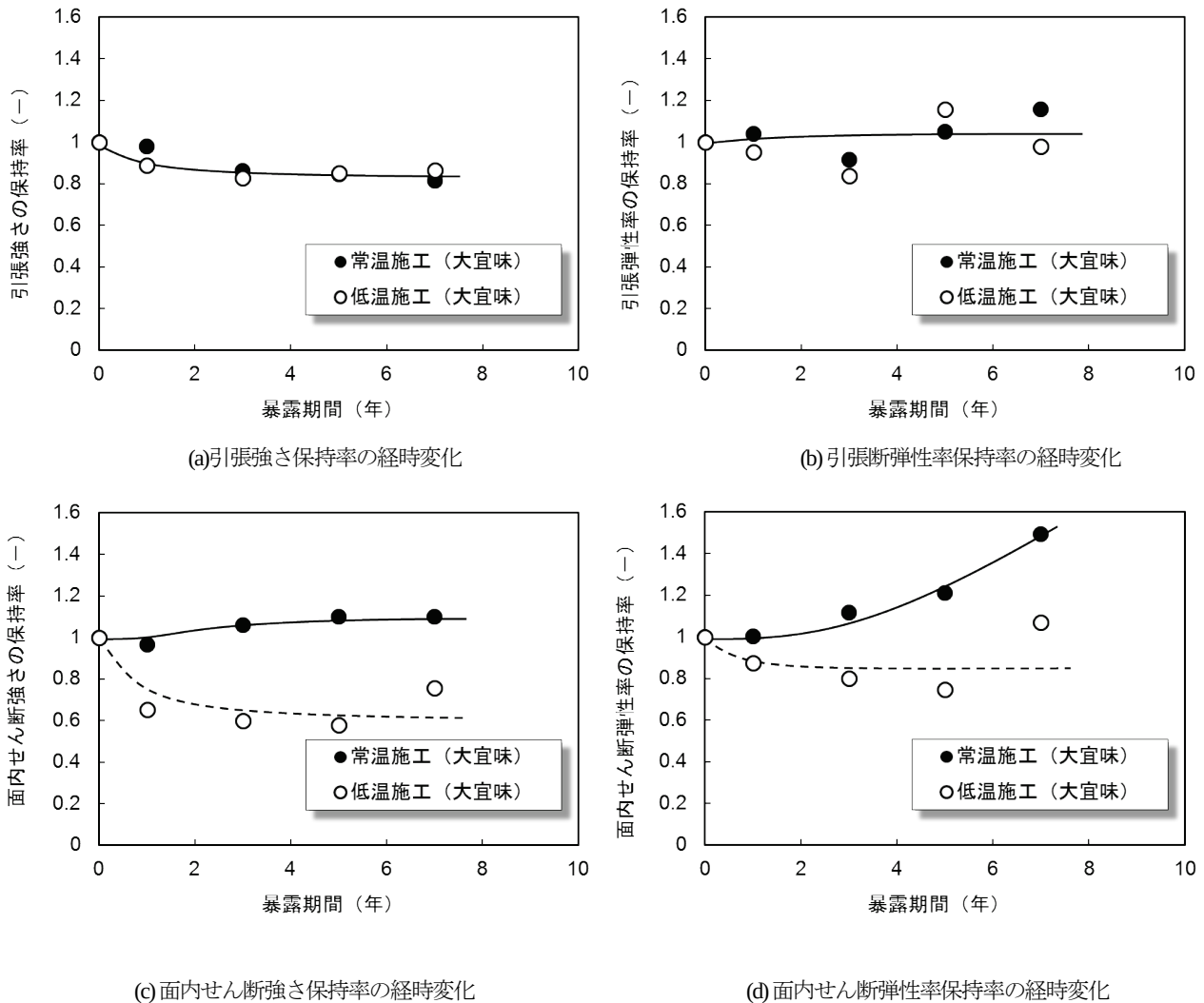


図-6 屋外暴露による炭素繊維/MMA樹脂積層板の引張特性および面内せん断特性の経時変化 (施工条件による挙動の相違)

炭素繊維/MMA樹脂積層板の暴露前の引張強さおよび面内せん断強さは、常温施工したものでそれぞれ720.8 MPa, 18.9 MPa, 低温 (-10℃) 施工したもので649.6 MPa, 16.6 MPaとなり、いずれも低温施工の方が常温施工よりも約10%低い結果となった。引張弾性率および面内せん断弾性率については、ほぼ同じ値であった。屋外暴露による積層板の引張特性の変化の傾向は、いずれの施工条件においても大きな差異は無く、低温施工した積層板については常温施工よりも低い特性を維持したまま推移した。施工条件による変化挙動の差異は、引張特性よりも面内せん断特性により大きく現れた。施工条件による面内せん断特性の変化挙動の差異は、大宜味に暴露したケースが最も大きく、次いでつくば、シェルブルックの順となった。

(3) 表面塗装の保護効果

図-7は屋外暴露によるガラス繊維/エポキシ樹脂積層

板およびアラミド繊維/エポキシ樹脂積層板の引張強さおよび面内せん断強さの経時変化を、上塗り塗装の有無により整理した結果である。グラフの縦軸は、初期値に対する割合 (保持率) として表した。

屋外暴露による引張特性および面内せん断特性の変化において、いずれの材種とも、上塗り塗装をした積層板の方が塗装無しのものよりも高い値で推移した。その傾向はガラス繊維/エポキシ樹脂積層板の方が、アラミド繊維/エポキシ樹脂積層板よりも大きい結果となった。暴露箇所による変化挙動の違いは明確ではなかった。

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⁾。本暴露試験においても、これを裏付ける結果が得られつつある一方で、強化繊維の違いにより、塗装による保護効果に差異が生じる可能性が示された。

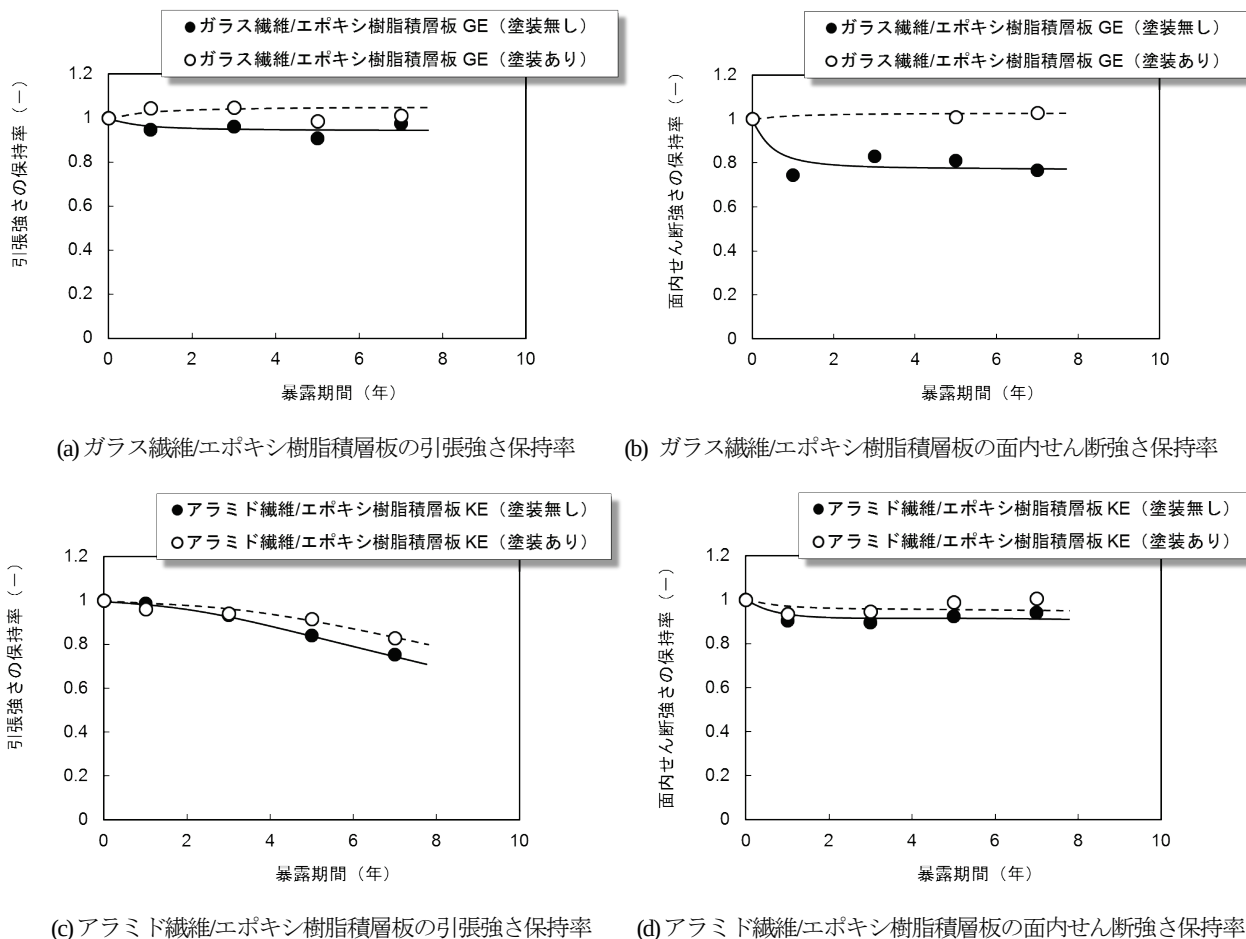


図-7 屋外暴露（つくば）によるガラス繊維/エポキシ樹脂積層板およびアラミド繊維/エポキシ樹脂積層板の引張強さおよび面内せん断強さの経時変化（上塗り塗装の有無による挙動の相違）

4. まとめ

本研究では、土木構造物に適用される FRP 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、各種積層板の屋外暴露試験を実施し、これまでに7年間目までの結果が得られている。その結果、炭素繊維/MMA 樹脂積層板、ガラス繊維/エポキシ樹脂積層板、アラミド繊維/エポキシ樹脂積層板の引張強さおよび面内せん断強さは、一部を除き暴露初期に10～20%の低下を示すものの、その後の変化は緩やかとなり、暴露7年目においても高い水準を維持していることがわかった。

常温あるいは-5℃の低温で作製した炭素繊維/MMA 樹脂積層板の特性を比較したところ、引張強さおよび面内せん断強さは常温施工の方が高いことがわかった。屋外暴露による引張特性の変化の傾向は、いずれの施工条件

においても大きな差異は無く、低温施工した積層板については常温施工よりも低い特性を維持したまま推移した。

ガラス繊維/エポキシ樹脂積層板、アラミド繊維/エポキシ樹脂積層板においては、上塗り塗装の適用による保護効果が認められた。一方で、強化繊維の違いにより、塗装による保護効果に差異が生じる可能性が把握された。

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 材の耐侯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, 2

RESULTS ON OUTDOOR EXPOSURE TESTS OF CONTINUOUS FIBER SHEET (FRP) FOR CONCRETE REHABILITATION UP TO SEVENTH YEAR

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

Structural reinforcement with FRP 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. The authors carried out a series of exposure tests under natural climates conditions for various FRP sheets in three characteristic locations in the world, Sherbrooke (Canada), Tsukuba (mainland Japan) and Oogimi (Okinawa). The natural exposure tests were continued for seven 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.