

(28) 連続繊維シート・プレート補強材の 屋外暴露試験による長期耐久性評価

富山 禎仁¹・西崎 到²

Pierre LABBOSSIERE³・Kenneth W. NEALE³・Marc DEMERS³

^{1,2}正会員 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, ²nishizaki-i553jp@pwri.go.jp

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

連続繊維シートやCFRPプレートをを用いたコンクリート構造物の補強工法の長期耐久性について把握するために、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、亜熱帯の海浜環境である沖縄県大宜味村で屋外暴露試験を実施した。シート補強材は、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を試験片とした。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、表面塗装による保護効果についても評価した。CFRPプレートは、工場成形品である2種類の製品を試験した。所定の期間暴露後の試験片を回収し、その力学特性を評価した。暴露10年目までの結果から、繊維や樹脂の種類、施工条件の違い、上塗り塗装の有無などによる挙動の差異について知見を得た。

Key Words : continuous fiber sheet, CFRP plate, 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・補強の力学的効果については様々な報告がある一方で、長期耐久性については不明な点が多い。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シートの屋外環境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、強化繊維やマトリックス樹脂、製品形態の異なる新たな材料が開発・普及しつつある。

そこで本研究では、連続繊維シート補強材の繊維として新たにアラミド繊維およびガラス繊維を、マトリックス樹脂としてアクリル（MMA）樹脂を試験対象に取り入れることとした。一方、連続繊維シート補強工法は、シート状の繊維に現場で樹脂を含浸させ構造物に接着、一体化させるのに対し、あらかじめ工場で成形された帯板状のCFRPをエポキシ樹脂等の接着剤で構造物に貼付する工法も普及していることから、CFRP工場成形品についても試験することとした。前述の3箇所においてこれらの材料の暴露試験を実施し、屋外暴露による引張特性、面内せん断特性（シート材）、曲げ特性（プレート材）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10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、連続繊維シート補強材については以下の①②の試験片、CFRP工場成形品については③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。

炭素繊維シートの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。低温施工の際には、材料メーカーが低温時施工用に供給している硬化促進剤を使用した。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

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

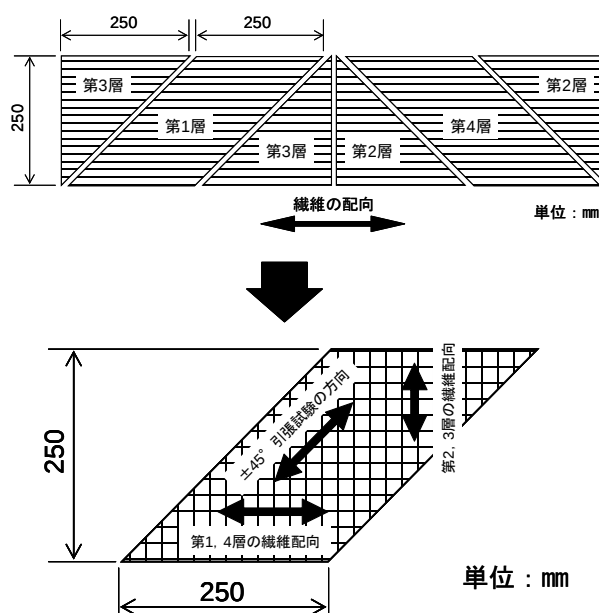


図-1 暴露試験片（±45°斜交積層板）の概略図

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] ₂	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

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。

③ CFRPプレート（工場成形品）

引抜成形法により帯板状に成形されたCFRPを施工現場に搬入し、ペースト状のエポキシ樹脂系接着剤で構造物に貼付する補強工法は、連続繊維シート補強工法に比

べて現場での作業工程が少なく済み、効率的に高弾性の補強ができるため、コンクリート床版・桁等の補修・補強において適用が増えつつある。

本研究においては工場成形品のCFRPプレートのうち、2種類の製品について試験した。製品A（厚さ2 mm）は高弾性タイプであり、カタログ値は引張弾性率450 GPa、引張強さ1200 MPaである。一方、製品B（厚さ1.2 mm）は高強度タイプであり、カタログ値は引張弾性率165 GPa、引張強さ2800 MPaである。それぞれの製品から幅100 mmの×長さ470 mmの試験片を切り出し、これらを試験に供した。

(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。シート補強材試験片については、アルミニウム製の枠を使用して固定した。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。

(3) 評価方法

所定の期間暴露後の試験片を回収し、シート補強材については以下の①②の試験、プレート補強材については③の試験により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。

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

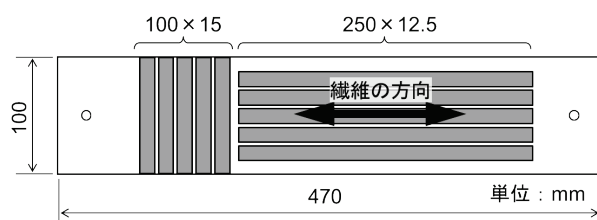


図-5 CFRPプレート暴露試験片

③ CFRPプレート（工場成形品）

回収後の暴露試験片から、図-5に示すように幅12.5 mm×長さ250 mmの試験片を5本、幅15 mm×長さ100 mmの試験片を5本ずつ切り出し、前者は繊維方向の引張試

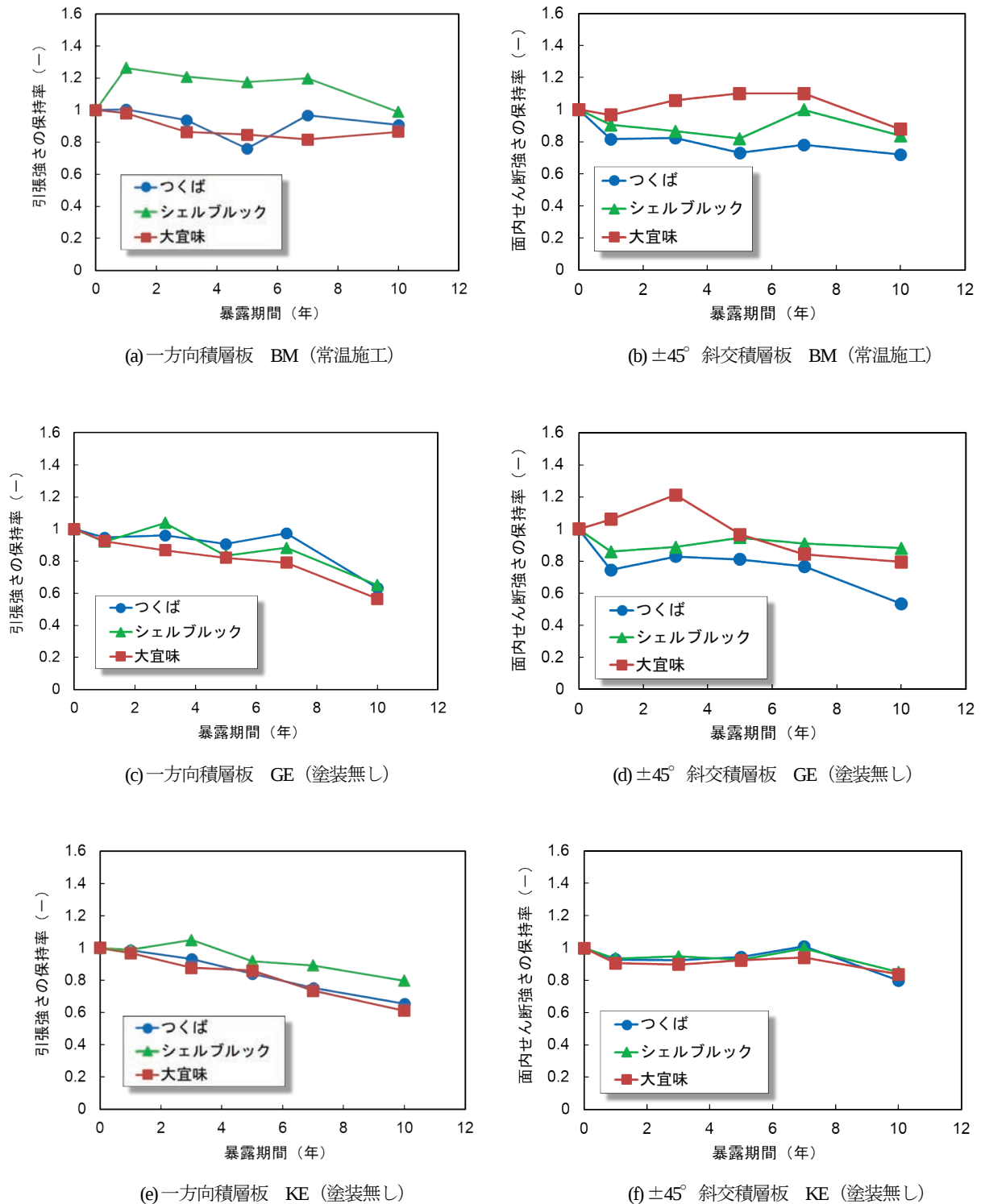


図-6 屋外暴露による連続繊維シート補強材の引張強さ保持率および面内せん断強さ保持率の経時変化

験に、後者は繊維に対し 90° 方向の曲げ試験に供した（繰返し数：各5）。引張試験は①と同様に行い、曲げ試験はISO 178:2010 "Plastics - Determination of flexural properties"に準拠して行った（引張側が暴露面）。

なお、いずれの材種においても未暴露の試験片を同様の方法で評価し、これを初期値とした。

3. 実験結果と考察

(1) 連続繊維シート補強材

a) 暴露環境および材種による挙動の違い

図-6 は屋外暴露による一方向積層板の引張強さおよび $\pm 45^\circ$ 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したものである。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、 $\pm 45^\circ$ 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%程度低下した。その後、変化は緩やかとなるが、ガラス繊維/エポキシ樹脂（GE）、アラミド繊維/エポキシ樹脂（KE）では暴露 7 年目頃より再び低下率が增大しつつある。暴露 10 年目における引張強さの保持率は、炭素繊維/MMA 樹脂（BM）が 90%程度にとどまっているのに対し、GE および KE ではおよそ 60~65%となった。一方、引張弾性率および面内せん断弾性率については、いずれの材種および暴露環境においても、暴露 10 年目の時点ではほぼ初期の水準を維持していた。

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（BM）の引張強さ、大宜味に暴露した炭素繊維/MMA 樹脂（BM）およびガラス

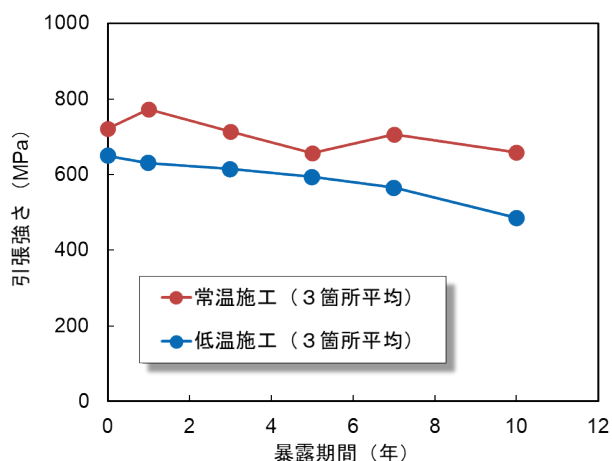
繊維/エポキシ樹脂（GE）の面内せん断強さは、暴露初期に値が増加する特異な挙動を示したが、その他は暴露環境による劣化挙動への影響は顕著に表れていない。

暴露後の積層板については顕微鏡観察や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。

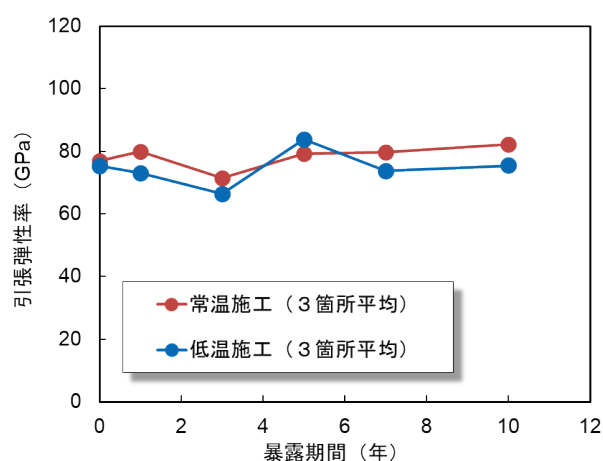
b) 施工条件による挙動の違い

図-7は屋外暴露による炭素繊維/MMA樹脂（BM）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。暴露箇所による差異は小さいと判断し、このグラフでは3箇所の試験データの平均値をプロットしている。

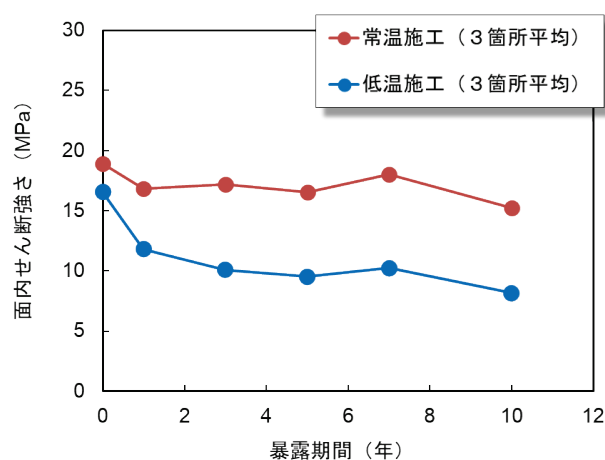
炭素繊維/MMA樹脂（BM）の暴露前の引張強さおよび面内せん断強さの平均値は、常温施工したものでそれぞれ720.8 MPa、18.9 MPa、低温（-10℃）施工したもので



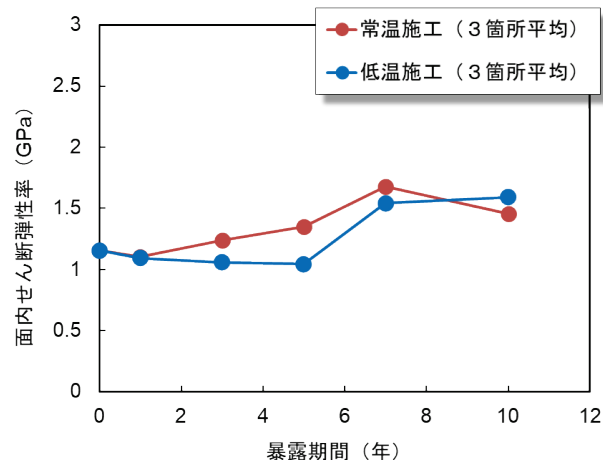
(a) 引張強さの経時変化



(b) 引張断弾性率の経時変化



(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-7 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）

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。一方、面内せん断強さにおいては、施工条件による挙動の差異が大きく現れた。暴露10年の時点で、常温施工したものは初期の10%程度の強度低下であったのに対し、低温施工したものは初期の50%程度まで強度が低下することがわかった。

c) 表面塗装による保護効果

図-8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。

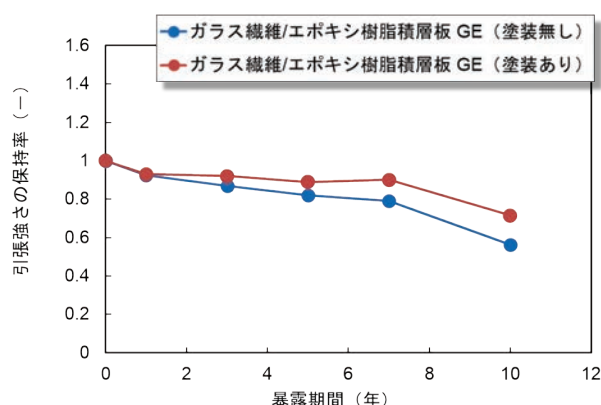
屋外暴露による引張特性および面内せん断特性の変化において、いずれの材種とも、上塗り塗装をした積層板

の方が塗装無しのものよりも高い値で推移した。その傾向は大宜味で暴露したものが最も大きく、つくばおよびシェルブルックでは同程度であった。

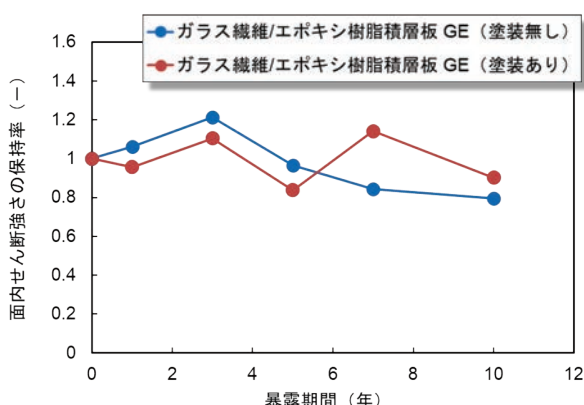
既往の研究では、屋外暴露によるGFRP引抜成形材の力学特性の低下に対し、表面塗装が良好な保護効果を示すことを確認している⁹⁾。本暴露試験においては、ガラス繊維/エポキシ樹脂だけでなく、アラミド繊維/エポキシ樹脂においても表面塗装が有効である可能性が示された。ただし、塗装した場合においても暴露時間の経過とともに強度低下は生じていることから、さらなる耐久性向上のためには、FRPに適した塗料の種類や膜厚、塗装系（塗料の塗り重ね構成）、塗装前の下地処理方法などを明らかにするための詳細な検討が必要である。

(2) CFRPプレート補強材

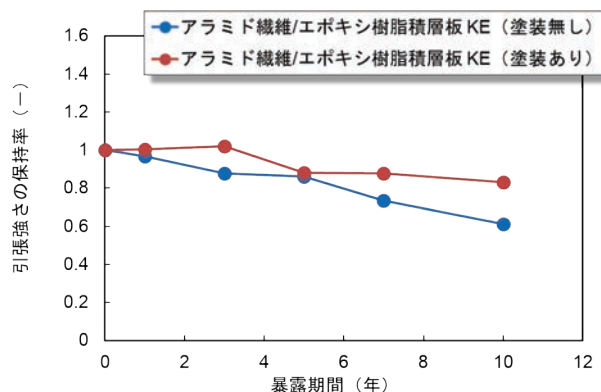
CFRPプレート補強材は屋外暴露によって、表面近傍の繊維の結束が徐々に損なわれ、繊維が毛羽立つような外観変化を示した。この傾向は、大宜味暴露の場合に特に大きかった。マトリックス樹脂が劣化したことによる



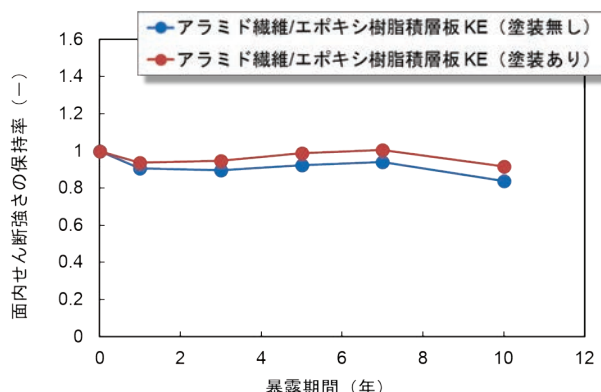
(a) ガラス繊維/エポキシ樹脂積層板の引張強さ保持率



(b) ガラス繊維/エポキシ樹脂積層板の面内せん断強さ保持率

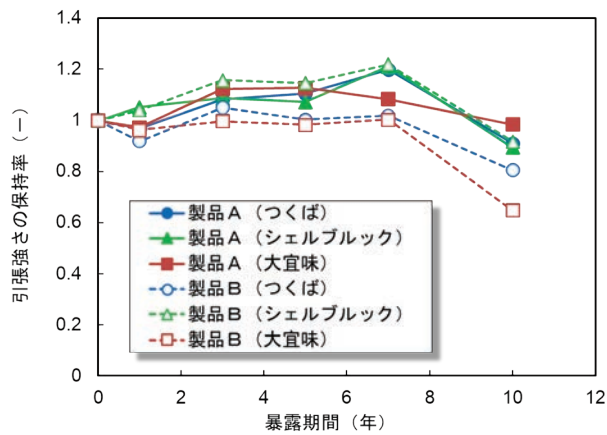


(c) アラミド繊維/エポキシ樹脂積層板の引張強さ保持率

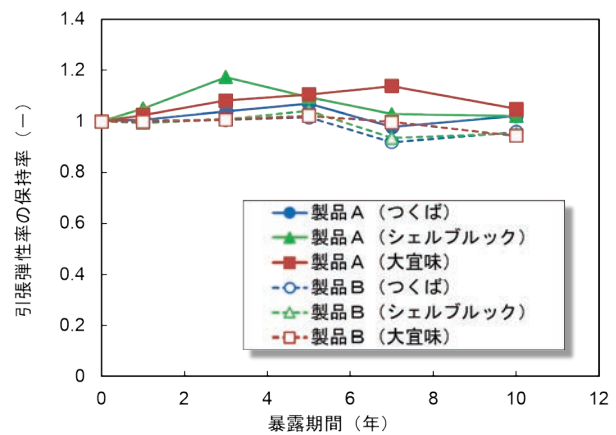


(d) アラミド繊維/エポキシ樹脂積層板の面内せん断強さ保持率

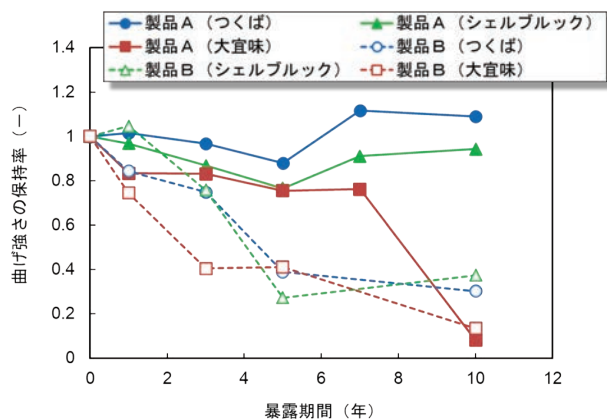
図-8 屋外暴露（大宜味）によるガラス繊維/エポキシ樹脂積層板およびアラミド繊維/エポキシ樹脂積層板の引張強さ保持率および面内せん断強さ保持率の経時変化（上塗り塗装の有無による挙動の相違）



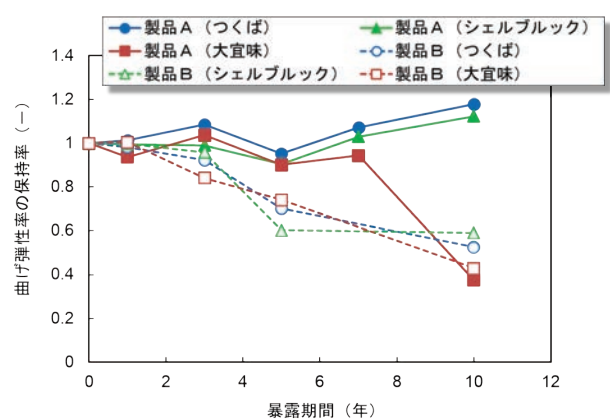
(a) 引張強さ保持率の経時変化



(b) 引張弾性率保持率の経時変化



(c) 曲げ強さ保持率の経時変化



(d) 曲げ弾性率保持率の経時変化

図-9 屋外暴露によるCFRPプレート補強材の引張特性および曲げ特性の経時変化

ものと推察される。

CFRPプレート補強材（製品Aおよび製品B）の引張特性および曲げ特性の経時変化を図-9に示す。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。

引張強さにおいては、どちらの製品も暴露7年目までは初期の水準を維持していたが、暴露10年目になると製品Bで強度低下が認められた。大宜味暴露での低下率が最も大きく、70%程度の保持率となった。引張弾性率についてはどちらの製品も挙動に明確な差異は無く、暴露10年目においても、ほとんど低下していない。既往の暴露試験結果などを踏まえると、10年程度の暴露で炭素繊維が劣化するとは考えにくく、引張強さの低下はマトリックス樹脂の劣化が影響しているものと思われる。

一方、曲げ強度においては製品Aの大宜味暴露、製品Bの全てで暴露初期から低下しはじめ、10年目では初期の10%程度の保持率となった。本研究で行った90°方向の曲げ試験で得られる結果は、特に炭素繊維とマトリックス樹脂との付着力に大きく左右されるものと考えられ

る。すなわち、暴露による曲げ強さの低下は、樹脂の劣化による炭素繊維との付着力の低下や、樹脂の消耗に起因しているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の補修・補強用途に使われる連続繊維シート補強材およびCFRPプレート補強材の屋外環境における長期耐久性について把握するために、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箇所で行った屋外暴露試験を実施している。暴露10年目までの追跡調査の結果から、以下の知見が得られた。

1) 炭素繊維/MMA樹脂積層板は暴露10年目においても初期値の90%程度の高い強度を維持することがわかった。一方で、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は暴露10年で初期の60～

65%まで強度が低下した。

2) 炭素繊維/MMA 樹脂積層板の引張強さおよび面内せん断強さは、低温施工に比べて常温施工の方が高い。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。一方、面内せん断強さは、施工条件による挙動の差異が大きく現れ、低温施工したものは暴露 10 年の時点で初期の 50%程度まで強度が低下した。

3) 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。

4) CFRP プレート補強材は暴露によりマトリックス樹脂の劣化が生じ、製品や暴露環境によっては 10 年程度の暴露でも力学特性が低下することがわかった。

今後、暴露後の試験片について顕微鏡観察や各種化学分析を進め、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。

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

(Received September 10, 2021)

RESULTS ON OUTDOOR EXPOSURE TESTS OF FRP SHEETS AND LAMINATES FOR CONCRETE REHABILITATION UP TO TENTH YEAR

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

Structural reinforcement with FRP sheets or laminates 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 and CFRP laminates 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, in-plane shear strength and flexural strength, were evaluated at regular interval.