

FRP ケーブル材料の 長期曝露後の残存強度特性

佐々木 巖¹・西崎 到²

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新材料チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: isasaki@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 材料資源研究グループ新材料チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: nisizaki@pwri.go.jp

PC 緊張材や外ケーブル補強用として様々な連続繊維補強材料が開発されているが、これらのFRP ケーブル材料は、塩害環境をはじめとした強腐食条件下で長期間供用することを想定する場合が多い。そのためには、実環境での緊張下の長期耐久性が検証されていることが不可欠であるが、各種繊維素材ごとに、劣化因子の影響について調べた知見は十分ではない。本報告では、6種のFRP ケーブルを海洋環境において緊張下で長期間暴露試験し得られた成果から、材料の種類、緊張荷重レベル、直射日光の有無等による、残存強度および弾性率の変化等を比較評価した。

Key Words : FRP cables, durability, exposure test, strength, elastic modulus

1. はじめに

PC 緊張材や外ケーブル補強用として様々な連続繊維補強材料が開発されている。これらのFRP ケーブル材料は、塩害環境をはじめとした強腐食条件下で長期間供用することを想定する場合が多い。そのためには、実環境での長期耐久性、特に破断強度への影響を明らかにしておくことが不可欠であり、これまでにいくつかの調査事例が報告^{1) 2)} されている。しかしながら、高分子複合材料では鋼材では想定していない劣化要因があるなど、各種繊維素材ごとに供用環境条件を細分化して比較評価した耐久性に関する知見は十分ではない。筆者らは、様々な連続繊維補強材について緊張状態を含めた各種環境条件下で長期暴露し耐久性を詳細調査^{3) 4) 5) 6)} して

きている。暴露試験を中心としたこれらの研究では、様々な緊張荷重の保持性能⁶⁾ や、化学分析による素材劣化について報告⁷⁾ した。本報告では、これらの一連の暴露試験による研究の中から、6種のFRP ケーブルの緊張荷重レベルおよび直射日光の有無に注目し、残存強度特性を比較評価した結果を報告する。

2. 試験材料および試験方法

(1) 試験材料

試験材料は、表-1に主な仕様を示す、カーボン、アラミド、ガラス、ビニロンの各繊維を用いたのべ6種のFRP ケーブル材料である。

表-1 FRP ケーブル材料の主要諸元

材料名	CFRP1	CFRP2	AFRP1	AFRP2	GFRP	VFRP
形状	ストランド	ロッド	ロッド	組み紐	ロッド	ロッド
繊維種類	カーボン	カーボン	アラミド	アラミド	E ガラス	ビニロン
マトリクス樹脂	エポキシ	エポキシ	ビニルエステル	エポキシ	ビニルエステル	エポキシ
繊維含有量(%)	64	65	66	65	65	72
直径(mm)	12.5	8.0	6.0	8.0	6.0	6.0
定着方式	付着	くさび	付着	付着	付着	付着



図-1 海洋技術総合研究施設



図-2 暴露試験状況

(2) 暴露試験方法

暴露試験は、静岡県駿河湾沿岸に設置されている海洋技術総合研究施設（図-1）で行った。FRPケーブルの緊張下暴露供試体は、端末定着具の内側を1.0mとして製作し、ステンレス製のフレームに所定の緊張力を導入して図-2のように設置した。

劣化因子として、緊張荷重レベルと直射日光の有無に注目した。供試体の設置場所は、図-1に示すように、海面からの高さが約9mのデッキで、上部に屋根のある箇所と無い箇所を選定し直射日光の影響を調べた。

初期荷重の導入レベルは、実際のPC緊張材としての設計においては材料の規格強度の7割程度と提案⁸⁾されている。本試験では、実測破断荷重 P_u に対して、 $0.8P_u$ と $0.6P_u$ （AFRP1は 0.75 と 0.55 ，AFRP2は 0.75 と 0.6 ，GFRPは 0.4 と 0.25 ）とした。供試体数は、緊張荷重や直射光等の比較条件を増やす観点から1水準あたり2本とした。

本研究では、暴露開始から3.5年経過した段階で、緊張力保持性能や残存強度特性について設置供試体の半数を中間調査し報告^{4) 5)}している。その後、17年経過時（平成21年）に全供試体を回収して解体調査を行った。本報では、17年間経過後の残存強度特性の試験結果を、中間調査の結果とともに報告する。

海上施設における暴露期間は16年間（平成5年5月～21年7月）であるが、供試体製作から暴露開始および回収後の移送保管期間を含めると、緊張荷重導入期間は17年間となる。

(3) 残存強度測定

暴露地点から回収した試験材料は、外観調査を行った後、センターホールジャッキを用いて残存緊張力を測定し⁶⁾、その一部を残存強度評価の破壊試験に供した。

破断強度および引張弾性率は、連続繊維ケーブル材料の引張試験方法であるJSCE-E531⁸⁾に準拠して測定した。

図-3に示すように、材料試験機を用い、試験材の中央部分50cm区間において外部変位計により伸び量を計測しながら引張破壊試験を行った。

比較対象となる初期強度は、同一製造ロットの試験材を用いて、暴露開始時に初期の引張破断荷重および弾性率を試験している。しかしながら、これらはJSCE-E531試験法が制定される前の試験であり、歪みゲージによる伸び測定を行ったこともあり、今回、室内保存材料を用いて同一の方法により強度試験を行った。室内に長期保管してあった長尺ケーブル材から試験材を切り出し、暴露試験材と同一寸法になるよう端末定着具を取り付け、暴露後の試験材とともに強度試験を各材料3本ずつ行い比較基準値とした。

なお、本研究ではケーブル自体の耐久性に注目して試験調査を進めている。しかしながら、暴露後の残存強度特性は、供試体の状況により定着具の劣化等による破壊を含めたケーブルシステムとしての強度特性であること



図-3 引張強度試験状況

を付記しておく。定着具の抜け出し等が生じたごく一部の供試体については新しい定着具を付け直してケーブル自体の強度を測定した。

3. 試験結果

(1) 残存引張破断荷重

a) CFRPケーブル

緊張下で17年間暴露したCFRPケーブルの破断強度を、3.5年緊張暴露後の残存強度、室内保存材の平均破断荷重とともに図-4に示す。CFRP1の直射光ありの場合、特に導入緊張力が大きい場合にやや強度低下の傾向が見られる。それ以外は比較試験体と概ね同程度の破断荷重を示しており、本試験は1条件あたりの繰返し数が2本と少ないものの、各条件の結果を全体として捉えれば4または8本であり、有意な強度低下はないものと判断することができる。試験結果からCFRPケーブルは高緊張荷重下の屋外で線材が露出した状態にあったが、本試験結果

からはこのような状態にあっても、ケーブルの大きな強度低下は生じないことを実証的に確かめられたといえる。

b) AFRPケーブル

AFRPケーブルの破断強度を、図-5に示す。CFRPに比べると試験結果のばらつきがやや大きく、AFRP1の一部に強度低下の傾向がみられる。既往の調査例からすると、0.75Puはアラミド繊維にとって許容緊張力レベルである。0.6Puまでの供試体の試験結果は比較材からの強度減はわずかであり、大きな強度低下を生じたとはいえない。AFRPケーブルについては、これらの知見をもとに許容緊張レベルを精査し安全率をもって使用することで十分な耐久性が確保できると考えられる。

c) GFRPおよびVFRPケーブル

図-6にGFRPおよびVFRPケーブルの破断強度を示す。

GFRPケーブルは、導入緊張レベルの影響がもっとも顕著に現れ、0.4Pu供試体では、3.5年経過の時点で残存強度に大きな低下（直射光ありで約2割、直射光なしで約1割）が見られ、17年後の調査時点では全ての供試体がクリープ破断していた。0.25Puについては、外観はいずれ

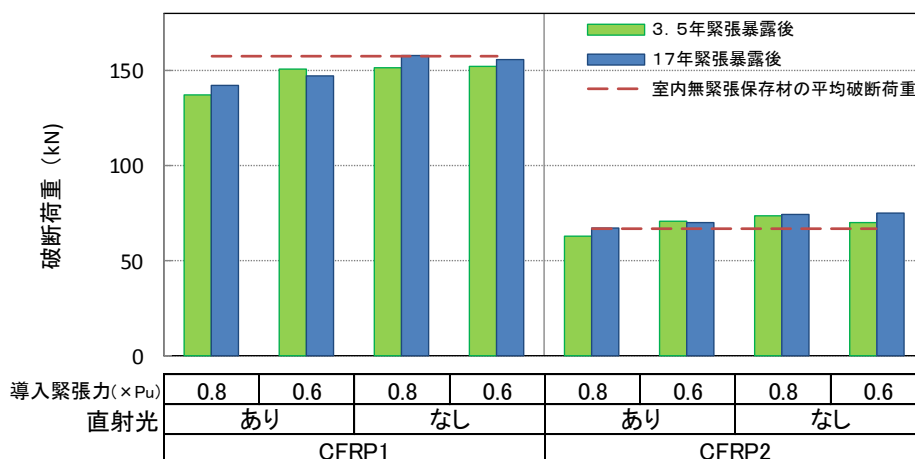


図-4 炭素繊維ケーブルの長期暴露後の残存強度特性

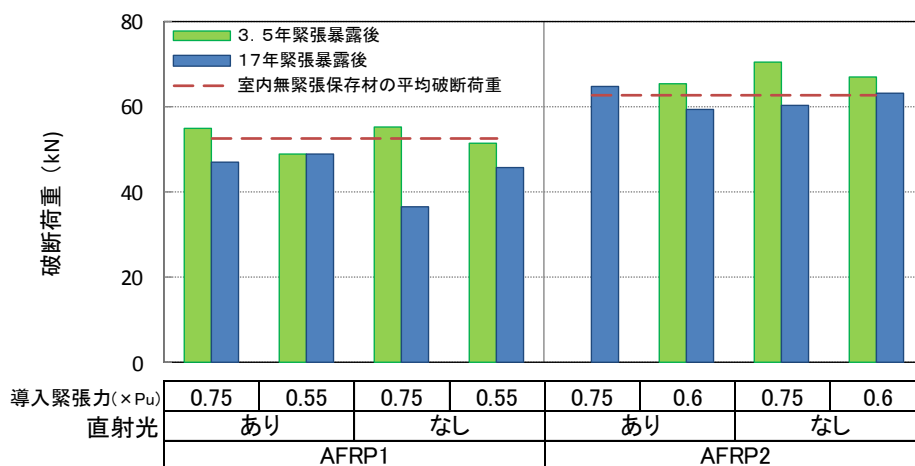


図-5 アラミド繊維ケーブルの長期暴露後の残存強度特性

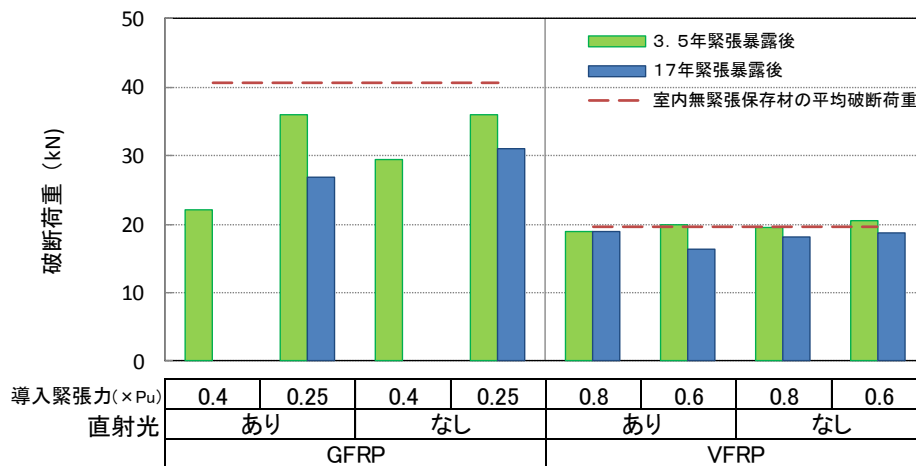


図-6 ガラスおよび炭素繊維ケーブルの長期暴露後の残存強度特性

も健全でリラクセーション率も非常に小さかった⁶⁾が、暴露年数の経過とともに破断強度は低下していることがわかる。ガラス繊維は、荷重保持率は良いものの、大荷重が常時作用する用途には不向きと考えられる。

VFRPケーブルについては、若干の強度低下の兆候が見られるものの有意なものとは言えず、緊張下での屋外暴露においても大きな強度低下の懸念は少ないとみられる。

(2) 弾性率の変化

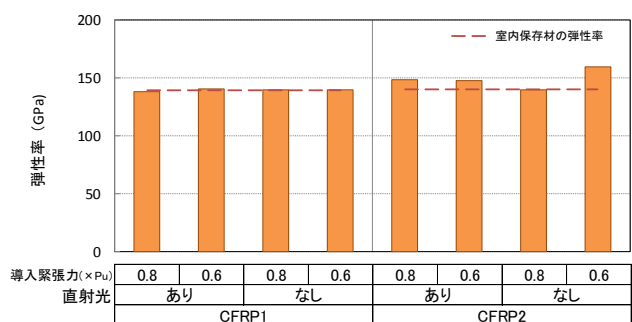
17年間緊張暴露した後の引張強度試験から得られた引張弾性率の値を、室内保管した比較材の試験結果とともに図-7に示す。

GFRPケーブルは、0.4Pu緊張供試体は前述の通り全数破断で試験値が無いが、0.25Pu供試体でも1割程度の弾性率の低下傾向がみられる。ガラス素線のクリーブ破壊が進んでいる可能性も推察され、許容できる荷重レベルの判断資料として検証を進めてゆく必要がある。AFRP1に弾性率増加の兆候が見られるが、これが劣化硬化によるものか等については不明で、化学分析等を併用して試験を進める必要がある。その他のケーブル材については、引張弾性率には大きな変化はみられなかった。

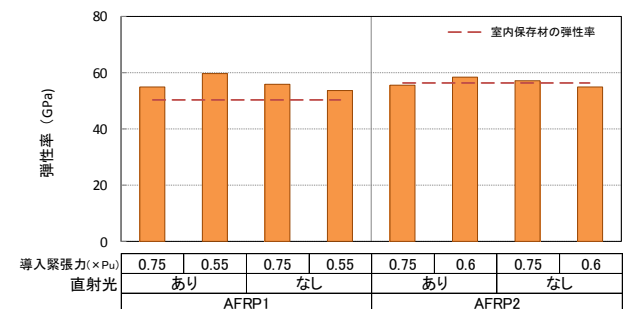
4. まとめ

(1) 緊張暴露後の残存強度

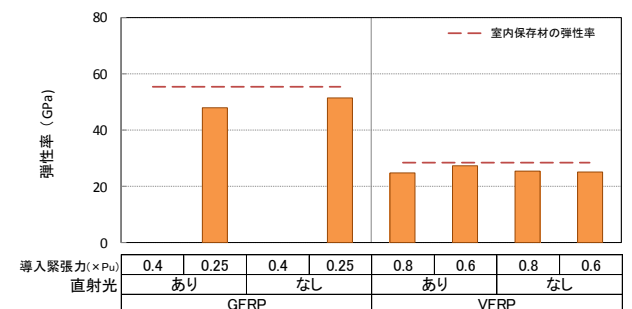
カーボン、アラミド、および炭素繊維によるFRPケーブルは、17年間の緊張暴露下でも大きな強度低下はみられなかった。ただし、CFRP1に直射光の影響がわずかにみられたほか、AFRPの許容緊張荷重レベルについては精査が必要である。



(c) 炭素繊維ケーブル



(b) アラミド繊維ケーブル



(a) ガラスおよび炭素繊維ケーブル

図-7 緊張下で17年間暴露後の引張弾性率

ガラス繊維によるFRPケーブルは、初期荷重が0.4Puの場合に暴露3.5年後に強度低下が認められ、その後、全供試体が暴露中に破断した。0.25Pu供試体にも強度およ

び弾性率の低下が認められるなど、大荷重が常時作用し続けるような使用形態には注意が必要である。

(2) 緊張曝露におけるの弾性率の変化

AFRP1およびGFRPケーブルで、長期曝露後の弾性率に変化がみられ、その原因の解明のため化学分析等の微視的な検討を進める必要がある。その他のケーブル材については、引張弾性率には大きな変化はみられなかった。

謝辞：本研究は、科研費(21360209)の助成を受けたものである。また、曝露試験施設ならびに試験材料等についてご協力を頂いた関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Uomoto, T., Ohga, H. : Performance of Fiber Reinforced Plastics for Concrete Reinforcement, Proceedings of the Second Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-2), 1996, pp. 125-132.
- 2) Takekawa, K., Khin, M. : Deterioration and Stress-Rupture of FRP Rods in Alkaline Solution Simulating as Concrete Environment, Proceedings of the Second Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-2), 1996, pp. 649-656.
- 3) Katawaki, K. et al. : Evaluation of the Durability of Advanced Composites for Applications to Prestressed Concrete Bridges, Proceedings of the First Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-1), 1992, pp. 119-127.
- 4) Sasaki, I., Nishizaki, I., et. al. : Durability Evaluation of FRP Cables by Exposure Tests, Proceedings of the third International Symposium on Non Metallic Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), 1997, pp. 131-137.
- 5) 佐々木 徹, 西崎 到 : FRP ケーブル材料の曝露試験, プレストレストコンクリート Vol.40, No.5, pp.22-30, 1998 年 9 月.
- 6) Sasaki, I., Nishizaki, I. : Tensile Load Relaxation of FRP Cable System During Long-Term Exposure Tests, Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE-6), 2012.
- 7) Nishizaki, I., Sasaki, I. : Long-term durability of FRP cables under maritime conditions, Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE-5), 2010.
- 8) (社)土木学会 : 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー88, 1996 年 9 月.

RESIDUAL STRENGTH PROPERTY OF FRP CABLES AFTER LONG-TERM EXPOSURE TEST

Iwao SASAKI and Itaru NISHIZAKI

Various kinds of FRP reinforcing cables have been developed as PC tendons or external cables. These FRP cables are usually used for a long years under severe corrosion such as salt attack. The long-term durability under continuous tensile load has to be validated in an actual environment. Previous studies focusing on deterioration factors are not sufficient for each fiber composite. This paper states and discusses residual strength and elastic modulus of six types of FRP cables after long-term exposure with tensile loading controlling tensile load level and direct sunlight.