

土木構造材料への適用における高分子系複合材料の 長期耐久性に関する研究

西崎 到*

Study on long term durability of polymer composite materials for structural application in construction

NISHIZAKI Itaru

要旨

高分子系複合材料は耐食性に優れているため、土木構造材料としての適用性が期待できるが、このためには、長期的な耐久性に関する検討を行い、安全かつ効率的に土木構造材料として適用できる材料強度を明らかにすることが必要である。本報文では、土木構造用複合材料の水及び屋外暴露、疲労荷重による強度低下性状、土木用ケーブルとして用いる場合の屋外暴露及び静的荷重による強度低下性状、複合材料を強度低下から保護するための塗装材料等について、促進劣化試験及び暴露試験を通じて得た結果を述べる。

キーワード：複合材料、耐久性、土木構造材料、屋外暴露、疲労、ケーブル、塗装

Synopsis

Polymer composite has a good protective performance against corrosion that will be useful as a construction material. In order to enhance the benefit of the material as a structural material for construction, it is required that to evaluate the availability of the material's strength as a safe and efficient material through the study on long term durability. This report describes the result of deterioration by water, moisture, outdoor exposure and fatigue, deterioration by outdoor exposure and static load in cable application and the coating materials to protect composite, through accelerated and exposure tests.

Keywords: Polymer composite, durability, structural material, outdoor exposure, fatigue, cable, coating

* 材料地盤研究グループ新材料チーム 主任研究員、博士（工学）

土木構造材料への適用における高分子系複合材料の長期耐久性に関する研究

目次

第1章 緒論	1
1. 1 本研究の背景	1
1. 2 本研究の目的	3
1. 3 本論文の構成	4
第2章 FRPの土木構造材料への適用に関する既往の知見	4
2. 1 FRPの環境条件による強度低下の要因	4
2. 2 FRPの水による劣化に関する既往の研究と問題点	5
2. 3 FRPの光を含む複合環境劣化に関する既往の研究と問題点	6
2. 4 FRPの疲労荷重による劣化に関する既往の研究と問題点	6
2. 5 FRPケーブル材料の環境劣化に関する既往の研究と問題点	6
第3章 水および屋外暴露による強度低下と物性保持率	7
3. 1 はじめに	7
3. 2 実験概要	7
3. 3 水中浸せきによるGFRPの変化	11
3. 4 長期屋外暴露試験によるGFRPの変化	16
3. 5 短期屋外暴露試験によるFRPの変化	17
3. 6 光暴露試験によるFRPの変化	17
3. 7 GFRPの水中および屋外暴露における物性	17
3. 8 塗膜による保護効果	20
3. 9 本章のまとめ	20
第4章 疲労荷重による強度低下と物性保持率	20
4. 1 はじめに	20
4. 2 実験	21
4. 3 結果	22
4. 4 考察	26
4. 5 本章のまとめ	27
第5章 FRPケーブル材料の荷重条件下の屋外暴露による強度低下と物性保持率	27
5. 1 はじめに	27
5. 2 FRPケーブルの暴露試験の概要	27
5. 3 暴露試験場	28
5. 4 シリーズⅠ暴露試験	28
5. 5 シリーズⅡ暴露試験	30
5. 6 シリーズⅢ暴露試験	33
5. 7 本章のまとめ	36
第6章 土木構造用FRP保護のための塗装材料	37
6. 1 はじめに	37
6. 2 FRP製土木構造物用塗装に求められる性能	37
6. 3 実験	37
6. 4 結果	40
6. 5 考察	43
6. 6 本章のまとめ	45
第7章 結論	45
7. 1 はじめに	45
7. 2 本論文により得られた結果	46
7. 3 今後の課題と期待	47
参考文献	47

第1章 緒論

1. 1 本研究の背景

1. 1. 1 現在の土木構造材料の課題と要求事項

土木構造物は、主に土、石、鉄鋼、コンクリートで構築される。なかでも鋼材とコンクリートは形状に対する高い自由度、高強度などから、重要な建設材料である。社会基盤の充実とともに、我が国には鉄鋼及びコンクリートで構成された土木構造物が増えてきた。これに伴って、これらの維持管理にかかる費用も増大しつつある。例えば「国土建設の現況」(平成11年、建設省)[1]によれば、全国には現在約66万の橋梁があり、21世紀初頭には道路投資に対する維持管理の比率は、現在の約2割から、約4割に倍増することである。このため、維持管理を軽減するための技術開発が必要となっている。

維持管理費用の増大の要因には、土木構造物を構築する材料が、比較的早期に劣化していることがあげられる。我が国は海に囲まれているため、鉄鋼や鉄筋コンクリート(RC)・プレストレストコンクリート(PC)などでできた土木構造物は、海洋塩分の影響による腐食損傷を受けやすい。海洋塩分による腐食は、現在、土木構造物の短寿命化の主要な原因のひとつである。このため、土木構造物の腐食損傷を軽減するための技術開発が急務となっている。

このような土木構造物の耐食性向上に関する検討はこれまでも盛んに行われてきた。重防食塗料や電気防食は、鋼材の腐食を防ぐ、現在の主要な技術である。しかしこれらの防食技術は、定期的な塗替や維持管理が必要であるので、厳しい腐食環境条件では、鋼材に替えて、耐食性のより優れた材料が有望と考えられている。例えば橋梁では腐食対策として、高分子系複合材料[2][3]やアルミニウム合金材料[3]を主構造材料に利用した事例が知られている。また水門では、普通鋼の代わりにステンレス鋼、アルミニウム合金材料が採用される例がある。これらの防食対策は、構造物を構成する材料そのものの耐食性を向上させるため、高い防食効果が得られると期待できる。このため、耐食性に優れた新しい材料の導入は、現在の土木構造材料の耐食性を向上させ、社会資本を高水準にかつ効率的に維持するために役立つと考えられる。

1. 1. 2 高分子系複合材料の土木構造材料への適用の利点

前項の、耐食性に優れた新材料の中でも、繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Polymers: FRP)は土木構造材料として、以下の点で利点が期待で

きる[4]。

(1) 耐食性の向上

FRPは、塩害に対する耐食性に優れており、沿岸などの現在の土木構造材料にとって厳しい腐食環境で腐食が発生しない。

(2) 軽量化

FRPは密度が1.6~1.9程度であり、コンクリート(2.4~2.5)、鉄鋼(7.8)に比べて軽量である。その割に強度がある(比強度が鉄鋼の約4倍)ため、部材の重量を軽量化することが可能である。このような軽量化による利点として、

- ・下部工反力の軽減による基礎構造の縮小(特に軟弱地盤において有利となる)
- ・上部工の軽量化による耐震性の向上
- ・運搬重量の軽減による輸送コストの削減
- ・架設における施工の省力化、工期短縮
- ・設備の軽減(跳ね上げ橋など)

などを図ることができる。

1. 1. 3 FRPの種類と土木構造用途への適性

FRPは高分子系樹脂(マトリックス樹脂)と繊維により構成される。それぞれの素材や成型法によって様々な種類があり、種類により性質も異なる。

(1) 繊維の種類(表-1. 1)

①ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)

最も一般に普及しているFRPである。鋼材に匹敵する高強度を持つが、弾性係数は鋼材の1/10程度と低く、この点が土木構造用としては改善が望まれる。

②炭素繊維強化プラスチック(CFRP)

機械部品、航空部品などに多く使われる。高強度とともに、鋼材に匹敵する弾性係数を持ち、性能的には土木構造用にも適しているが、GFRPよりもかなり

表-1. 1 FRPの種類(繊維)と性能比較

	引張強度(MPa)	引張弾性率(GPa)
GFRP	100~500	6~25
CFRP	500~3000	20~200
AFRP	1400~1600	40~80
【参考】 普通鋼	400~720	200
PC鋼線	1400~1950	200

注: FRPの物性値の強度が低い場合は、主に一方方向性の強い材料の強度の弱い方向の値

(FRP構造設計便覧および道路橋示方書を元に作成)

高価である。

③アラミド繊維強化プラスチック (AFRP)

高強度の高分子系繊維であるアラミド繊維を用いたFRPである。CFRPに匹敵する強度、弾性率を有する。ケーブル材料等に多く用いられる。

④ハイブリッドFRP

ガラス繊維や炭素繊維などを組み合わせて使用することにより、それぞれのFRPの特徴を併せ持たせたFRPである。土木構造用FRPでは、炭素繊維/ガラス繊維ハイブリッドFRPとすることにより、比較的安価に弾性率の高いFRPを得られる可能性があり、土木構造用途での適用可能性が注目できる。

(2) 樹脂の種類

GFRPでは不飽和ポリエステル樹脂が一般に広く用いられる。また、CFRPでは、機械的性質、接着性に優れているエポキシ樹脂が、通常は多く使用されている。ビニルエステル樹脂は、主鎖中に反応性の二重結合を残しにくいことから、不飽和ポリエステル樹脂に比べ優れた耐食性を示すといわれている。また、耐候性ではエポキシ樹脂より優れていると考えられている。

(3) 成型方法

FRPの成型法には、様々な方法がある。布状の繊維を樹脂により手作業で積層するハンドレイアップ成型法、成型型とプレス機械を用いたSMC(Sheet Molding Compound)やBMC(Bulk Molding Compound)等の成型法、筒状に繊維を巻き付けるフィラメントワインディング成型法などがある。成型法により基本的な繊維構成が概ね決まるため、成型法がFRPの性能に与える影響は大きい。土木構造材料では、①比較的大断面が得やすいこと、②長尺部材を得やすいこと、③比較的安価な成型方法であること、などの点が望まれるが、この様な成型法としては、引抜成型法が有望な方法としてあげられる。引抜成型法の概略図を図-1.1に示す。ポビン等に巻かれた繊維を未硬化樹脂に浸した後に、布状繊維とともに金型に連続的に引き込み、金型内で加熱硬化させることにより、連続的に等断面の長尺部材を得ることができる成型法である。断面形状は、板状、棒状、丸パイプ、角パイプ、I型、L型をはじめ自由度が高く、さらに複雑な形状も可能である。国内では650×250mm程度の断面の成型品の事例があるが、海外ではさらに大きな断面の成型事例もある。

引抜成型材の典型的な積層構成を図-1.2に示す。中間に引抜方向に沿った一方向層があり、これを

不織布や織布などの布状繊維でサンドイッチした構成である。CSM(Continuous Strand Mat)は、比較的長い繊維による不織布であり、繊維の異方性が殆どない。ガラス繊維では最外層に多く使用されるが、比較的加工しにくい炭素繊維では一般に使用されていない。クロスは互いに直交する向きの繊維の束を編んだ布である。炭素繊維の場合には最外層に多く使用される。また、KFC(Knitted Fabric Cloth)と呼ばれる、クロスのように編まずに繊維を「かがり糸」で固定したものが使われることもある。KFCはクロスに比べて布の厚さ方向への繊維の蛇行がないのが特徴である。また、直交方向以外の方向への繊維配置も容易である。

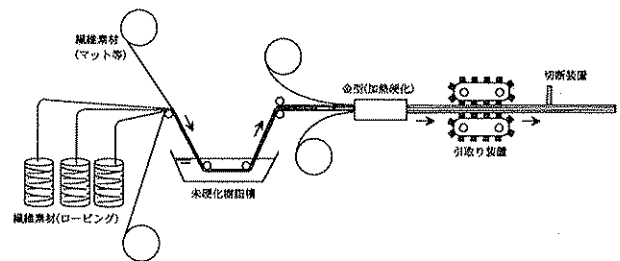
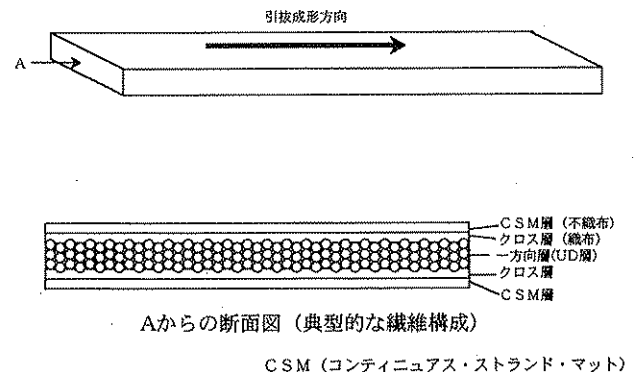


図-1.1 引抜成型法の概略図



Aからの断面図 (典型的な繊維構成)

CSM (コンティニュアス・ストランド・マット)

図-1.2 引抜成型材の典型的な積層構成

(4) 土木構造用FRP

FRPを土木構造材料に適用するには、用途に適した材料の選択が必要である。前述((1)~(3))のように、土木構造用途を考慮した場合、ビニルエステル樹脂をマトリックス樹脂とした引抜成型材は、土木構造用途として最も適したFRPのひとつと考えることができる。このため本研究では、主にビニルエステル樹脂をマトリックス樹脂とした引抜成型材を、検討の対象とすることとした。GFRP、CFRP、CF/GFハイブリッドFRPは、物性と材料コストのバランスから、最適なものを選ぶことができるものと

考えられる。また、土木用ケーブル材料についてはCFRP及びAFRPが主要材料と考えられるので、これらの検討の対象とした。

1. 1. 4 土木構造材料への適用における解決すべき課題

FRPの土木構造材料への適用には、前項のような利点が期待されており、近年、橋梁などの土木構造物への適用が増えつつある。それに伴い、FRPを土木構造材料への適用にあたって、解決すべき課題も以下のように明らかになりつつある。

(1) 設計法の確立

FRPを用いた土木構造部材の設計に関する基準類は、コンクリート補強用のFRPに関するものが存在する[5][6]のみであり、FRPを主たる土木構造材料とする場合の設計法は確立されていない。設計法の確立のためには以下の項目に関する研究が必要と考えられる。

①物性の設定、許容応力度、材料設計強度

FRPは、用途に応じて最適な繊維配置を設定することができるため、材料設計の自由度がある反面、鋼材のように設計に用いる材料強度を一定に設定しにくい。また、比較的高価なFRPを土木構造物に用いるには、十分安全かつ効率的に設計される必要があるが、土木構造材料用FRPの安全率・安全係数については不明の点が多いのが現状である。

②長期特性

FRPの土木構造物への適用の最大の利点は耐食性であるが、一方で、実際の土木構造物が曝される環境下では、主に以下の2つの劣化が懸念される。①主に日光の作用による表面樹脂の劣化(著しく変色することもあるが強度には殆ど影響を与えない)、②主に水の作用による繊維と樹脂界面の接着力低下(強度に影響を及ぼす)。これらの長期的な変化に関するデータは不足しているのが現状である。特に引抜成形材についてはこのようなデータは少ない。土木構造物は他の用途に比べて、概ね寿命が長く、部品の交換が困難な場合が多いため、長期的な物性変化に関する研究が必要である。

(2) コスト

従来のコンクリートや鋼材より、FRPが安価もしくは同等の材料費になる可能性は低い。従って、FRPを一般構造材料として適用していくためには、施工やメンテナンスを削減できるといった付加価値を考慮し、構造物のライフサイクルコストの面から評価する必要がある。

(3) 土木構造物に合った材料改良と低剛性に合った構造設計

FRP部材は鋼材に比べ弾性係数が小さいため、これに対応した構造物設計を行う必要がある。部材の形状や他の材料を併用することにより剛性および終局耐力の向上を図る例もある。六角形の断面は、高い荷重容量があり、かつエネルギー吸収性に優れ、疲労効果にも優れている特長があるため、ハニカム構造を利用した事例が多く見られる。一例として、複合材デッキシステム構造があげられるが、このような剛性向上のための構造形式の革新検討はさらに進むものと考えられる。

一方、土木構造材料用のFRPは、弾性率・剛性が高い方が望ましく、効率的な設計が行いやすい。このため、GFRPのみではなく、CFRPやCF/GFハイブリッドFRPなどの剛性の高いFRP部材が土木用途で検討されている。また、比較的安価に大断面の長尺部材を得るために、引抜成形が有利な成型法と考えられている。このように土木構造物に適したFRPへの改良が必要となっている。

1. 2 本研究の目的

前項の土木構造材料への適用における解決すべき課題から、FRPの土木構造材料への適用を進めるには、FRPの長期的耐久性の評価と、安全かつ効率的な設計のための材料強度の設定、さらにはFRPを土木構造物に用いることのコスト的な評価や、材料改良や構造設計方法の研究が必要であることが分かった。

土木構造物は通常屋外に設置されるため、水や日光、風雨などにさらされる。また、土木構造物には様々な荷重がかかる。このような適用環境条件が、FRPの強度低下に影響を与えることがあることは、これまでに多くの研究によって知られている。しかし引抜成形材やハイブリッドFRPなどの、土木構造物に設計されたFRPに関するデータは少ない。このため、土木構造材料としての適用が最も期待されている材料について、土木構造物の環境条件の因子を考慮し、各因子毎のFRPの強度低下の程度を明らかにする必要がある。

上記に挙げたFRPの強度低下因子による劣化を、できるだけ低く抑えることが、土木構造材料をより安全に使用することにつながる。水や日光などの環境因子は、FRP表面に塗料などの被覆を施すことで、ある程度防ぐことができる可能性がある。土木用FRPへの塗装については、これまで十分なデータがあると

は言い難く、FRPへの塗装に関する基準やマニュアル類も殆ど見あたらないのが現状である。このため、様々な種類の塗料について土木構造材料に必要と考えられる試験を実施し、土木構造材料用のFRPの保護に適した塗料を選定する必要がある。

本研究では、以上の検討を行うことにより、FRPの土木構造材料としての適用する際の主要な問題点である、土木構造部材設計のためのFRPの物性を、長期特性や耐久性向上対策を考慮しながら明らかにすることを目的とする。

なお、FRPの土木構造材料への適用時のコストについては、いくつかの試算例があり、LCCを考慮するとFRPの方が有利になるとのコスト評価例もあるが、FRP構造物の設計法が定まっていないため、FRP構造物の製作コスト算定が困難であること、炭素繊維の価格が近年急激に変動し安価になっていること、大量に使用されることによる材料の低価格化の予測が困難であること、など、現時点ではコスト評価の一般化は困難と考えられるため、本研究では扱わず、今後の課題とした。

また、土木構造物にあった材料改良、および低弾性率材料に適した構造設計の検討については、本研究でもCF/GFハイブリッドFRPの特性を一部で調べることとしたが、構造設計の検討については、本研究の範囲を主に「材料」に置いたため、本研究では扱わなかった。

1. 3 本論文の構成

本論文は、FRPを土木構造材料として適用する際の主要な問題点である、土木構造部材設計のためのFRPの物性を明らかにし、FRP製土木構造物の可能性を評価することを目的として行われた、一連の研究をまとめたものであり、緒論を含めて8つの章から構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章においては現在の土木構造物を構築する構造材料の問題点と、土木構造材料へのFRP適用の利点を整理し、FRPを土木構造材料に適用することの意義を示した。また、FRPを土木構造材料として適用するにあたっての、技術上の課題を整理し、土木構造物FRPの長期的特性・物性設定および経済的可能性に関する研究の重要性を示した。さらに本研究の目的と論文の構成を示す。

第2章においては、FRPを土木構造物に適用する際に起こりうる強度低下を検討するために、土木構造物の環境劣化因子を検討する。主要な環境劣化因子で

ある、「水」、「光を含む複合環境」を中心に、FRPの強度低下に関する既往の知見を整理する。また、FRPを構造材料として適用する際の安全率・許容応力度に関する既往の知見について整理するとともに、本研究の位置づけを明らかにする。

第3章においては、FRP引抜成形材の水及び屋外暴露による強度低下性状を明らかにすることを目的とする。水中、高温高湿な大気中での水蒸気による劣化、長期間にわたる屋外暴露等の条件での強度保持率を評価した。また、水による強度低下の原因、FRPの乾燥による強度回復、塗装による保護効果についても検討する。

第4章においては、FRP引抜成形材の疲労荷重による強度低下性状を明らかにすることを目的とする。他の環境因子による強度低下を起こしたFRPが疲労荷重をうける場合についても検討を行った。

第5章においては、FRP引抜成形材を土木用FRPケーブル材（プレストレストコンクリート、グラウンドアンカー、吊橋や斜張橋等）として用いる場合の、屋外暴露及び静的荷重による強度低下性状を明らかにすることを目的とする。

第6章においては、FRP引抜成形材を強度低下から保護するための塗装材料について、土木構造物における要求性能を実際の土木構造物適用事例をもとにまとめた。このような性能として、FRPへの塗装時に耐候性、付着特性、耐摩耗性に優れた塗装仕様を検討し、必要な性能をもつ塗装材料について検討・提案した。

第7章においては、各章で得られた結果を総括して述べるとともに、今後の課題を指摘して結論とする。

第2章 FRPの土木構造材料への適用に関する既往の知見

本章では、FRPを土木構造物に適用する際に起こりうる強度低下を検討するために、土木構造物の環境劣化因子を検討する。その中の主要な環境劣化因子による強度低下に関する、既往の知見を整理するとともに、土木構造材料用途を考慮する上で不明な点を課題として整理し、本研究の既往の研究に対する位置づけを示した。第3章から第6章にかけて、これらの課題を中心に、FRPの長期的な物性変化に関する検討を行うこととした。

2. 1 FRPの環境条件による強度低下の要因

FRP劣化の主な環境因子には、水/湿度、温度、

日光、荷重等があげられる。しかし、これらは独立した因子でなく、相互に関連した因子である。このため、これらの因子の材料物性への影響を検討するには、土木構造部材の環境毎に検討するのがよい。土木構造部材の環境条件を大別すると、次の6種類に分類できる。なお、これらはさらに複合的に影響しあう場合がある。

- ①水中あるいは水蒸気の影響を受ける環境
- ②光を含む複合環境
- ③荷重を含む複合環境
- ④化学成分及びこれを含む複合環境
- ⑤凍結融解環境
- ⑥微生物による劣化環境

上記のうち、多くの土木構造用途で問題となる代表的な因子は①～③である。④化学成分は土木用途では下水道施設、⑤凍結融解環境は寒冷地でコンクリートを併用する場合と、それぞれ比較的限定的な因子と考えられる。また、⑥微生物劣化は劣化事例が少なく、土木では比較的まれな劣化と考えられる。

このため、以下には代表的な環境因子(①～③)および土木構造物では比較の実績の多いFRPケーブルについて、現状の知見をまとめるとともに、土木構造物材料用途を考慮する上で不明な点を課題として整理した。

2.2 FRPの水による劣化に関する既往の研究と問題点

FRPは水中あるいは湿潤大気中に置かれることで、内部への水の浸透が起きる。水の浸透によるFRPの最も重要な変化は強度低下と考えられる。

(1) 水の浸透特性

FRPへの水の浸透はFickの法則に従うことが分かっている。FRPに含浸される水の飽和量は、水中での浸透では一定であり、 M_m で表される。湿潤大気中では式(2.1)のように表される[7]。

$$M_m = a \phi^b \quad (2.1)$$

M_m : 飽和含水量

ϕ : 相対湿度(%)

a, b : 定数

温度が一定ではなく、高温湿潤と低温湿潤が周期的に繰り返し起きる場合の浸透特性[8]や、浸透を三次元的により正確に解析する方法[9]などの研究が知られている。Menges et al. (1980)[10]はFRPに水が浸透することによる、内部応力について検討

し、これによりクラックが発生する事があることを明らかにした。

GFRPでは温度が比較的高い場合(50℃以上)には、材料の重量減少が認められる場合がある(Harper [11], Morii [12])。これは、マトリックスやガラス繊維のサイジング剤が影響していると考えられている。

土木用途に着目した場合のFRPの耐水性に関する研究は、近年になって報告されるようになった[13]。

(2) 強度の変化

FRPの水による強度変化については、ハンドレイアップ成形やプレス成形に関して多くの報告がある。

① CFRP

既存の文献における、CFRPの水による強度低下の範囲は、0.6～1.0の範囲にある[14]～[17]。その殆どが含水量と強度の関連で検討されており、水の影響による経時的な劣化については、報告が見あたらない。強度に影響を与える水分含有量は1%程度と報告されている[14]。また、繊維方向が90°の場合には特に水の影響は強い[14]。引張強度よりも圧縮強度の方が低下しやすい[15][17]。

② GFRP

GFRPでは水の浸透による強度低下の範囲は0.4～1.0であり[11][13][18]～[22]、CFRPよりも低い場合がある。マトリックスとしてはエポキシ樹脂(EP)、不飽和ポリエステル樹脂(UP)、ビニルエステル樹脂(VE)などが用いられた例があが、ビニルエステル樹脂の耐水性はエポキシ樹脂や不飽和ポリエステル樹脂に比べて良いとの報告がある[11]。

本研究で注目している、ビニルエステル樹脂をマトリックスとした引抜成形材の耐水性に関する研究事例は近年になって報告されている。Sridharan S.ら(1998)[21]は、建設用途を目的としたビニルエステル樹脂をマトリックスとする引抜成形材の浸せき試験を、25℃及び50℃で1700時間行い、浸せき後も曲げ強度は95%を維持していた。80℃水中1700時間後では、曲げ強度保持率は77%であった。また、Vergheeseら(1999)[13]も、ビニルエステル樹脂をマトリックスとしたGFRP引抜成形材の耐水性を報告している。65-25-65℃温度スパイク試験後のFRPの、含水率と引張強度の関係を示した。含水率と強度保持率の関係はリニアで、0.77%の含水率(飽和)において強度保持率は70%であった。

(3) 解決すべき課題

ビニルエステル樹脂をマトリックスとした引抜成形材の耐水性に関する研究は、近年増えつつあるとはいえ、その数はまだ少ない。このためさらなるデータの蓄積が必要とされている。

FRPの水の浸透による劣化性状については、既に研究が進んでいるが、引抜成形材の場合の研究事例は少ないため、これまでと同様の挙動を示すかは確認が必要である。また、比較的高温での浸せき試験中におきる重量減少については、浸透による劣化に比べて不明点が多いが、明確な原因や物性への影響が評価されていないので、これらの観点からの研究が必要である。土木用途の環境を想定する場合、例えば水門などでは、常時没水するだけでなく、水の浸透と乾燥が繰り返される環境も想定される。このような用途では、浸水により劣化したFRPが乾燥した場合の強度回復についても検討が必要であるが、このような検討例は少ない。また、FRPを保護するための塗装の効果と塗膜の耐水性に関する研究もこれまで殆ど行われていないので、本研究で調べることにしたい。

2.3 FRPの光を含む複合環境劣化に関する既往の研究と問題点

(1) GFRP

FRPは屋外暴露により表面に微細なクラックが発生し、樹脂脱落が起きることが知られている〔22〕〔24〕〔25〕。表面にみられるこのような変化は、強度低下と必ずしも関係が認められていない〔25〕。多くの暴露試験は5年程度であるが、この程度では大きな強度的な変化が認められることは少ない〔22〕〔23〕〔25〕～〔28〕。一方、比較的に長期の屋外暴露試験では強度に変化のある事例が報告されている。Polezhaeva, P. G. ら〔29〕は不飽和ポリエステル樹脂をマトリックス樹脂とするGFRPの屋外暴露試験を15年間行い、引張強度は30%、曲げ強度では40%程度の強度低下を報告している。また、横山一広〔31〕は15年の灯台の構造材料用のGFRPについて、15年間にわたる屋外暴露試験を行い、引張、圧縮(0°)、曲げでは大きな変化が無かったが、90°方向の圧縮強度で0.6～0.8の強度低下を報告している。

(2) CFRP

CFRPの暴露試験に関する報告はGFRPに比べて少ない〔33〕～〔36〕。暴露期間が長い文献では10年間の試験の報告がある〔34〕〔35〕が、引張、曲げ、圧縮、せん断、衝撃などの各力学試験では、いずれの報告でも実用上問題となる強度低下は認められてい

ない。

(3) 解決すべき課題

屋外暴露試験を主とする、FRPの光を含む複合環境劣化に関する文献は、プレス及びハンドレイアップ成型品に関する文献が主であり、引抜成形材に関する文献は非常に少ない。ハンドレイアップ成形法ではゲルコートと呼ばれる型枠内にあらかじめ塗布する表面保護層を用いることができるが、引抜成形材ではこれを用いることができない。このため、土木構造物では塗装した状態で供用することが多いと考えられるが、塗装したFRPの屋外暴露試験に関する報告も少ないのが現状である。このため、土木構造物としての用途を考慮した塗装引抜成形材に関する屋外暴露試験及び促進劣化試験により、屋外での耐久性に関する検討が必要であると結論される。また、FRPに対する適切な塗装材料や、塗装による保護効果についても、殆ど検討事例がないため、本研究ではこれらのFRP保護用塗装材料についても検討を行うこととした。

2.4 FRPの疲労荷重による劣化に関する既往の研究と問題点

(1) FRPの疲労特性

FRPのS-N線図では、破壊までの繰り返し回数が多い場合でも、疲労荷重が一定値に落ち着きにくく、明確な疲労限度が現れにくいのが特徴である。通常は 10^7 回を疲労限度とすることが慣例となっている。

(2) 解決すべき課題

FRPの疲労特性については基礎的な研究がCFRP、CF/GFハイブリッドFRPを含めてこれまでも数多くなされてきた。しかし、引抜成形材のCFRP及びCF/GFハイブリッドFRPについては、引抜成形材のGFRPに比べて、未だにデータが少ないのが現状である。引抜成形材は他の成形方法に比べて繊維層構成に特徴があるために、引抜成形材の疲労性状が、他の成型法と同様であるか確認する必要がある。また、ビニルエステル樹脂をマトリックスとした場合の、疲労特性に対する温度などの条件の影響についても検討が必要である。

2.5 FRPケーブル材料の環境劣化に関する既往の研究と問題点

土木用ケーブルの環境劣化(水、空気中の酸素、光などの環境因子による劣化)による許容応力度は、劣化による強度低下だけでなく、リラクセーション、

クリープ破断など、荷重についても考慮する必要がある。FRPケーブルの劣化環境因子は、静的荷重と環境劣化の複合であるが、プレストレストコンクリート緊張材としての用途においては、コンクリート中での耐アルカリ性が、環境劣化の重要な項目となる。その他の用途（例えば吊橋、外ケーブルによる補強工法、グラウンドアンカーなど）では、耐水性や耐候性が必要になる場合もあると考えられる。

(1) CFRPおよびAFRP

CFRP或いはAFRPケーブルの、コンクリート環境中を想定したアルカリ溶液中での耐久性を調べた例は多くある〔37〕～〔40〕。50～60℃程度のアルカリ溶液中での評価例が多い。CFRP及びAFRPでは残存強度に変化の見られない場合が多いが、引張強度が70～80%程度に低下する事例も少し見られる〔34〕。

FRPケーブルの海洋環境での耐候性を調べるための研究も行われている。Uomoto, T.ら(1996)〔41〕は、CFRPロッドの3年間の海岸における屋外暴露試験を行い、9%の引張強度の低下を報告しているが、水酸化ナトリウム溶液への浸漬では変化がなかったと報告した。また、Tomosawa, F.ら〔42〕は石油開発施設への用途を考慮し、沖ノ島におけるFRPケーブルの暴露試験を行っている。Sen, R.ら〔43〕はCFRPケーブルのコンクリートとの付着力の耐久性への海水環境の影響を、60℃塩水への浸せき試験により調べ、付着力は初期の約12ヶ月は増加し、その後少しずつ低下することを調べた。

(2) GFRP

GFRPは現在の指針類ではプレストレストコンクリート緊張材としては使用が認められていない〔5〕が、鉄筋コンクリートの鉄筋代替材料としては適用できるため、コンクリート中環境での耐久性が研究されている。GFRPロッド（E-ガラス、ビニルエステル樹脂）の水酸化ナトリウム溶液への浸漬試験から、内部へナトリウムが浸透したことによる、ガラス繊維の侵食が確認されている〔44〕。実環境におけるGFRPロッドのコンクリート中での引張強度の低下は、15年で60%程度と予測されている〔44〕。また、酸性の腐食環境でのGFRPの腐食現象についての試験結果では、引張強度は初期に急激に減少したあと、ほぼ一定かやや増加する傾向がある〔45〕。また、酸性条件での疲労強度は、水中、特に硫酸中では疲労特性は悪くなると報告されている〔45〕。

(3) 解決すべき課題

PC緊張材への適用において必要な、緊張条件での耐アルカリ性については既に十分な検討が行われているが、FRPケーブルの用途はPC緊張材としての用途だけでなく、吊橋用ケーブルや外ケーブル式PCを始め様々な用途が期待できる。また、PC緊張材としての適用事例は未だに試験的な採用に留まっている様にみられるが、これはコスト効果の評価が十分になされていないことと併せて、耐久性が十分に評価されていないことが原因の一つと考えられる。このため耐アルカリ性だけでなく、コンクリート構造物の塩害対策としての効果を評価するために、屋外暴露試験を中心とした耐久性評価が必要である。

第3章 水および屋外暴露による強度低下と物性保持率

3.1 はじめに

本章ではビニルエステル樹脂をマトリックス樹脂としたGFRP引抜成形材の、水及び屋外暴露による強度低下性状を中心とした劣化現象を明らかにすることを目的に検討した。水・湿度の影響は屋外で使用される場合でも、最も主要な劣化要因と考えられるため、屋外暴露試験および光による劣化についても検討を行った。FRPの水中浸せき試験、高湿度暴露試験、屋外暴露試験などの劣化試験を行い、試験後のFRP供試体の強度や、劣化性状を化学的な手法を中心に調べることにした。また、安全な応力の範囲を許容応力度設計法の物性保持率（劣化後の強度や弾性率等の物性値/初期の物性値）の試算により検討することとした。

3.2 実験概要

3.2.1 実験要因

本章で行った劣化試験の種類を、表-3.1に示す。

(1) 水中浸せき試験

一定温度の蒸留水への浸せき試験である。表-3.1の1-1から1-3は、それぞれ60, 50, 40℃の蒸留水への浸せき試験である。最高温度を60℃に設定したのは、本節の(3)で示す、長期屋外暴露試験における材料温度計測の結果、材料温度が最も高くなる温度が約60℃であったことによる。1-1から1-3にはそれぞれ25個の供試体を使用した。25個のうち5個は重量変化を調べるために用い、5個は劣化試験後の乾燥条件での測定に用いた。残りの15個は曲げ試験に用いた。1-4には5個のマトリックス

樹脂の供試体を用い、暴露試験条件1-5および1-6にはそれぞれ1個を用いた。

(2) 高湿度暴露試験

湿度の高い大気中条件での、供試体内部への水の浸透について調べるために実施した室内暴露試験である。GFRP供試体については恒温恒湿槽を用い、気温及び相対湿度が40℃85%、60℃85%、60℃65%、50℃95%、25℃95%の5条件で実施した。2-1から2-3にはそれぞれ25個の供試体を使用した。25個のうち5個は重量変化を調べるために用い、5個は劣化試験後の乾燥条件での測定に用いた。残りの15個は曲げ試験に用いた。2-4および2-5には無塗装と塗装の2種類を使用し、5個を1組とした。測定は重量変化(方法は短期屋外暴露試験と同様)と3点曲げ試験(90°)を行った。2-6は5個のマトリックス樹脂の供試体を用いた。

(3) 長期屋外暴露試験

長期屋外暴露試験は、陸別(北海道陸別町)、つくば(茨城県つくば市)、大宜味(沖縄県大宜味村)の3箇所で実施した。塗装供試体は3カ所の暴露試験場で試験し、無塗装供試体はつくばでのみ行った。暴露試験には南向き傾斜5度の架台を用いた。供試体は2年間暴露した後に回収した。

(4) 短期屋外暴露試験

短期屋外暴露試験は、暴露試験中の供試体への水分の吸収・排出状態を調べるために実施した。ラックに

納めた供試体を屋外暴露し、数時間おきに供試体を回収し、表面の水分をふき取った後に、直ちに重量を電子はかり(最小秤量:0.1mg)により測定した。重量を量った供試体は直ちに暴露に戻した。供試体は無塗装と塗装の2種類を使用し、それぞれ5個を1組とした。試験は3日間実施した。

表-3.2 供試体の種類

供試体	概要及び積層構成	形状	主な試験の種類	主な測定項目
Type 1	Vf: 70% 無機系フィラー (炭酸カルシウム) 構成: CSM層:8% 一方向層:84% CSM層:8%	角パイプ(正方形) 50× 50mm(JIS 7015 SP50)から 切り出した板 幅: 15mm 長さ: 84mm (0°) 厚さ: 4mm	水中浸せき試験	重量変化
Type 2	Vf: 70%, フィラー無し ガラス転移温度: 110.8℃ 構成: CSM層:8% 一方向層:84% CSM層:8%	角パイプ(長方形) 40× 25mm(JIS 7015 KP40)から 切り出した板 幅: 15mm 長さ: 68mm (0°) 厚さ: 3mm	水中浸せき試験 高湿度暴露試験	重量変化 IRスペクトル 熱分析 繊維含有率 表面積 曲げ試験(0°)
Type 3	Vf: 39% フィラー無し 構成: CSM層:16% クロス層:21.5% 一方向層:26% クロス層:21.5% CSM層:16%	板状 幅: 420mm 長さ: 620mm (0°) 厚さ: 3mm	長期屋外暴露試験	力学性能試験 曲げ試験(0°) 曲げ試験(90°) 引張試験(0°) 引張試験(90°) 面内せん断試験
Type 4		板状(Type3と同じ引抜成 形材から加工) 幅: 15mm 長さ: 84mm (90°) 厚さ: 3mm	短期屋外暴露試験 高湿度暴露試験 光暴露試験	重量変化 曲げ試験(90°)

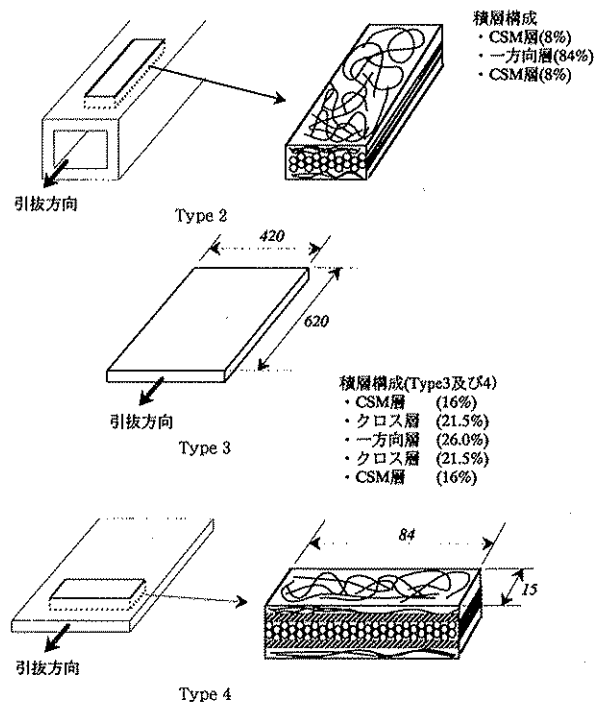
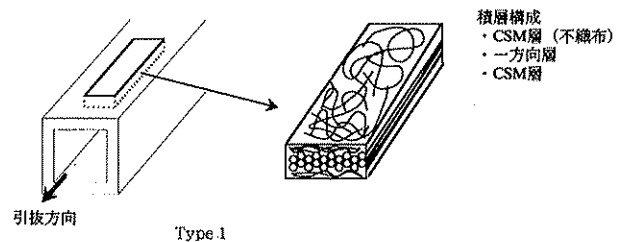


図-3.1 供試体図

表-3.1 劣化試験の種類

No.	試験の種類	試験の条件	供試体の種類と数量 (明示無いものは無塗装) (表-3.2を参照)	試験項目
1	水中浸せき試験	1-1: 60℃, 最大434日	Type 2: 25個	うち5個は重量変化測定, 5個は劣化後の乾燥条件での測定, 15個は曲げ試験
		1-2: 50℃, 最大188日	Type 2: 25個	
		1-3: 40℃, 最大557日	Type 1/2: 25個	
		1-4: 60/50/40℃	マトリックス樹脂板 (Type2と同樹脂): 各5個	重量変化測定
		1-5: 60℃	Type 2: 1個	浸せき水の化学分析
		1-6: 60℃	Type 2 1-1, 2-2, 2-3で劣化・回収した供試体: 各1個	重量変化測定
2	高湿度暴露試験 (恒温恒湿槽による試験)	2-1: 気温40℃, 相対湿度85%	Type 2: 25個	うち5個は重量変化測定, 5個は劣化後の乾燥条件での測定, 15個は曲げ試験
		2-2: 気温60℃, 相対湿度85%	Type 2: 25個	
		2-3: 気温60℃, 相対湿度65%	Type 2: 25個	
		2-4: 気温50℃, 相対湿度95%	Type 4: 無塗装・塗装各5個	重量変化測定
		2-5: 気温25℃, 相対湿度95%	Type 4: 無塗装・塗装各5個	重量変化測定
		2-6: 気温50/60℃, 相対湿度85%	マトリックス樹脂板: 各5個	重量変化測定
3	長期屋外暴露試験	暴露場: 陸別, つくば, 大宜味 5° 傾斜南向き暴露架台	Type 3: 各暴露場毎に 塗装供試体1個, つくばのみ 無塗装供試体1個	力学性能試験 (表-3.2を参照)
4	短期屋外暴露試験	暴露場: つくば 90° 垂直暴露架台	Type 4: 無塗装・塗装各5個	重量変化測定
5	光暴露試験 (キセノンランプによる光照射)	放射照度: 36.5W/m ² (290-400nm) 温度および湿度はなりゆき	Type 4: 無塗装・塗装各5個	重量変化測定

(5) 光暴露試験

キセノンランプによる光照射を伴う室内暴露試験であり、光の照射による供試体の強度変化への影響を調べるために実施した。キセノンランプ照射装置(島津製作所製XF-180)を用いた。平均照射照度は $36.5\text{W}/\text{m}^2$ (290-400nm, 紫外線センサー: CUV3 (Kipp & Zonen)) であった。同型のセンサーによるつくばでの紫外線量測定結果では、1年間の最大紫外線量は約 $40\text{W}/\text{m}^2$ であったので、本試験における紫外線照射量は、自然屋外暴露試験において、最も紫外線が強い時の紫外線量にほぼ等しいと考えることができる。試験実施中の平均材料表面温度は 67°C 、表面の平均相対湿度は7%であった。回収した供試体は気温 23°C 相対湿度50%の恒温恒湿槽に静置した後、3点曲げ試験(90°)を行った。

3. 2. 2 供試体

本研究で使用した4種類のGFRPの概要を表-3. 2に示す。GFRPはいずれも引抜成形材であり、旭硝子マテックス(株)製のプラアロイを使用した。供試体の製作図を図-3. 1に示す。Type1およびType2の元の形状は角パイプであり、結果の比較のために2種類の異なる断面を選んだ。幅15mm、長さ64または84mmに切り出した。Type2は主に水中浸せき試験で使用し、Type1は限られた条件でのみ使用した。Type3は長さ620mm、幅420mm、厚さ3mmの板状供試体であり、主に長期屋外暴露試験に使用した。暴露試験後に、これから試験片を切り出して各種の力学性能試験を行った。Type4は長さ84mm、幅15mm、厚さ3mmの供試体であり、暴露試験による重量変化を調べると共に、このまま3点曲げ試験を行うことができる。Type3及びType4は、同じ種類のGFRP引抜成形材(幅420mm、厚さ3mm)から機械加工により製作した。

Type1およびType2は3層構成となっており、中間層はガラス繊維の一方向のローピング層(以下、ROV層と記す)(84%)で、これをコンティニュアス・ストランド・マット層(以下、CSM層と記す)(各8%)ではさんだ構成になっている。Type3及びType4は5層構成であり、CSM層(16%)/ローピングクロス層(21.5%)/ROV層(26%)/ローピングクロス層(21.5%)/CSM層(16%)であった。

塗装による暴露試験中のFRP保護効果を検討するために、Type3、4に塗装供試体を設定した。塗装供試体は、アセトンにより脱脂した引抜成形材に、アクリルウレタン系上塗り塗料(ショーボンド化学(株)

製AU-1)を、目標膜厚 $30\mu\text{m}$ でローラー又はハケにより塗装して製作した。

マトリックス樹脂は日本ユピカ(株)製のビニルエステル樹脂NEOPOL 8250H(ビスフェノールA型)である。GFRPとの比較のため試験に供したマトリックス樹脂板は、Type2と同じ種類の樹脂によって日本ユピカ(株)により製造されたものとした。供試体はJIS K 7051に定められた標準条件(気温 23°C 、相対湿度50%)に48時間以上静置した後に、試験前の重量を測定した。

3. 2. 3 供試体の測定

(1) 重量測定

供試体は所定の日時に回収し、供試体表面の水を拭き取った後、電子はかり(最小秤量 0.1mg)を用いて速やかに重量を計った。重量測定後は次のいずれかによった(a)速やかに回収前と同じ試験槽に戻し試験を続行する、(b)乾燥条件に置いたときの重量変化および曲げ強度変化を測定するために、気温 23°C 、相対湿度50%に設定した恒温槽に静置する。(c)速やかに曲げ試験を実施する。上記の(b)の場合では、重量測定と曲げ試験は、実施までの乾燥時間を変えて行った。

(2) 外観観察

劣化状態の評価のために、FRP表面を肉眼および走査型電子顕微鏡(以下、SEMと記す)により観察した。SEMの観察用試料は供試体から $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ の小片を切り出して金蒸着を行って作成した。SEMはフィリップス製XL-20型を使用し、加速電圧は2~5kVとした。

(3) 赤外線分光スペクトル(IRスペクトル)

樹脂の化学的変化を調査するためにフーリエ変換赤外線分光光度計(パーキンエルマー製1640型)により赤外線分光スペクトルを測定した。試料は供試体表面から削りだし、乳鉢を用いて粉碎して作成した。KBr(臭化カリウム)錠剤成型法によりIRスペクトルを得た。

(4) 熱分析(DSC, Differential scanning calorimetry: 示差走査熱量測定)

樹脂の化学的変化を調べるために熱分析(DSC)を測定した。アルミニウム密閉容器を使用し、窒素ガス条件で測定した。昇温速度は $20^\circ\text{C}/\text{min}$ とした。

(5) 繊維含有率

劣化試験によってGFRPの重量減少の状況を調べるために、繊維含有率をいくつかの供試体について測定した。測定はJIS K 7052「ガラス長繊維強化プラ

スチックプリプレグ、成形材料及び成型品—ガラス長繊維及び無機充てん材含有率の求め方—焼成法」に準拠した。

(6) 核磁気共鳴分光スペクトル(NMRスペクトル)

樹脂の化学的变化を調査するために核磁気共鳴装置(日本電子製 EX-400 型 (7.4T, ^{13}C 観測周波数 100.4MHz)) により ^{13}C -NMR スペクトルを測定した。試料は供試体表面から削りだし、乳鉢を用いて粉碎して作成した。測定は CP/MAS 法及び CP/MAS_toss 法(スピニングサイドバンド消去法)によった。

(7) 比表面積分析

劣化試験による GFRP の樹脂—繊維間の接着の剥離を調べるために、ガス吸着法による比表面積の測定をいくつかの供試体について行った。ガス吸着法による比表面積分析は、試料を定容量の容器に入れ表面を清浄に処理し減圧した後、ガスを少しずつ入れて吸着させ、吸脱着等温線を得て、これを BET 法等の方法により解析する事により、比表面積(m^2/g)を得るものである。測定には高速比表面積/細孔分布測定装置

アサップ2010型マイクロポアシステム(島津—マイクロメリティクス製)を使用し、吸着ガスにはクリプトンガスを用いた。吸着温度は -196°C である。試料前処理は減圧下で 70°C に加熱し、前処理時間は15時間であった。

(8) 劣化試験で使用した水の化学分析

Type2の供試体をフラスコ中の蒸留水に浸せきし、 60°C に60日間浸せきした(表-3.1の暴露試験条件1-5)。この水をジクロロメタンで抽出し、ジクロロメタン層を乾燥、除媒することにより、無色の油状物質を得た。GFRPの構成要素であるガラス繊維ロービングクロスについても同様の操作によりジクロロメタンによる抽出、乾燥、除媒操作を行い、表面処理剤を無色の油状物質として得た。両方の油状物質は ^1H -核磁気共鳴装置(200MHz, バリアン製 Jemini200)により、 ^1H -NMR スペクトルを測定した。

(9) 力学性能試験

屋外暴露試験後の供試体については、表-3.2の Type3の項目に示した5項目の力学性能試験を行い、暴露試験前との性能変化を調べた。長期屋外暴露試験に使用した Type3の供試体から試験片を、図-3.2のように機械加工により切り出した。試験片はそれぞれ5個製作した。切り出し加工後洗浄し、気温 23°C 、相対湿度 50% の恒温恒湿槽に2日以上静置した後に、

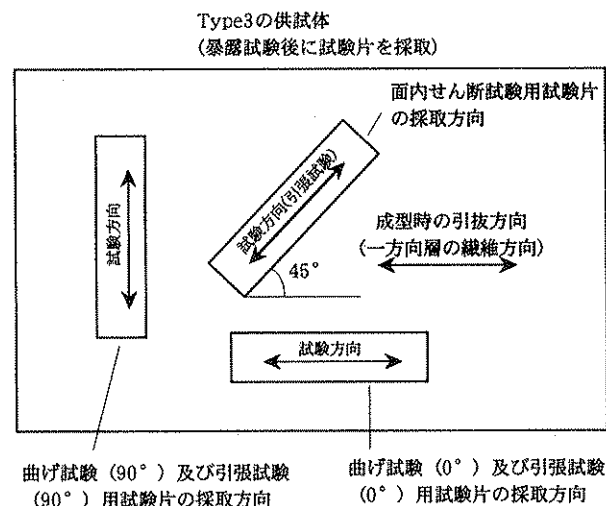


図-3.2 長期屋外暴露試験後の供試体の加工 (Type3)

力学性能試験を実施した。なお、Type2については 0° 方向の曲げ試験、Type4については 90° 方向の曲げ試験のみを実施した。

①曲げ試験

支点間距離を試験片厚さの16倍、载荷速度は $2\text{mm}/\text{min}$ とした。JIS K 7055の規定では、最大たわみが支点間距離の10%を越えるものにはたわみの影響を補正する式を用いることになっている。最大たわみが支点間距離の10%に近い供試体が多く、いくつかは支点間距離の10%を越えたため、全ての供試体についてたわみ補正を行うこととし、式(3.1)を用いて曲げ強さを算出した。また、塗装供試体については、試験片の高さ(h)には、実測値から塗膜分の $60\mu\text{m}$ を差し引いた値を使用した。

$$\sigma_b = 3P_b L / 2bh^2 \times (1 + 4(\delta/L)^2) \quad (3.1)$$

P_b : 最大荷重(N)

δ : 最大荷重時の支点間中央たわみ(mm)

σ_b : 曲げ強さ(MPa)

L : 支点間距離(mm)

b : 試験片の幅(mm)

h : 試験片の高さ(mm)

②引張試験

载荷速度は $1\text{mm}/\text{min}$ とした。引張強さは式(3.2)により計算した。塗装供試体については、試験片の高さ(h)には、実測値から塗膜分の $60\mu\text{m}$ を差し引いた値を使用した。

$$\sigma_b = P_b / bh \quad (3.2)$$

P_b : 破壊時荷重(N)

σ_b : 引張強さ(MPa)

b : 試験片の幅(mm)

h : 試験片の厚さ(mm)

③面内せん断試験

載荷速度は1mm/minとした。面内せん断強さは式(3.3)により計算した。塗装供試体については、試験片の高さ(h)には、実測値から塗膜分の60 μ mを差し引いた値を使用した。

$$\tau_b = P_b / 2bh \quad (3.3)$$

P_b : 破壊時荷重(N)

τ_b : 面内せん断強さ(MPa)

b : 試験片の幅(mm)

h : 試験片の厚さ(mm)

④検定

屋外暴露試験では、暴露後の力学性能試験結果と、未暴露供試体の試験結果との有意差の有無を、t検定(両側検定, 有意水準1%)により調べた。また、塗装供試体と無塗装供試体の有意差の有無を調べるためにも、同様に検定を実施した。

3.3 水中浸せきによるGFRPの変化

3.3.1 外観観察

供試体の劣化試験前の外観の一例(Type2)を図-3.3に示す。図-3.4はType2の60℃浸せき試験後の供試体の外観である。図-3.4の供試体はCSM層のガラス繊維に沿って白色の線が浮き出ているのが分かる。(これはガラス繊維とマトリックス樹脂の付着が剥離していることによると推定できる。)図-3.5は温度60℃、相対湿度85%の大気中で210日間劣化試験を行った後の供試体の外観状況であり、顕著な茶色い点が見られる。この茶色い点はGFRP内面のガラス繊維に沿って発生しているが、CSM層のみに見られ、ロービング層には発生していない。同様の茶色の点は温度60℃、相対湿度65%の大気中で148日間劣化試験を行った供試体にも見られたが、この場合には図-3.5よりも数が少なく、色も淡かった。小さな薄茶色の点は、60℃浸せき試験後の供試体(図-3.4)にも見られるが、図-3.5に比べ、色は非常に淡く大きさも非常に小さかった。

図-3.6は60℃の水中に120日間浸せきした供

試体表面のSEM写真である。表面には主にCSM層の繊維に沿って多くのひび割れが発生していた。このようなひび割れは、未劣化供試体には認められない。ひび割れは繊維や気泡などのために表面のマトリックス樹脂が薄くなっている部分に発生しやすいと考えられる。60℃85%大気中で劣化した供試体についても、SEM写真では水中への浸せき試験を行った供試体と同様のひび割れが発生していた。SEMのひび割れの位置は茶色の点が発生位置と対応していた(図-3.7)。茶色の変色部分はSEMによって20倍から5000倍の倍率まで観察したが、細菌の影響によるものとの証拠は認められなかった。このことから、茶色の変色が化学反応によるものであることを示唆している。

3.3.2 重量変化

図-3.8に水中浸せき試験を実施した際の重量変化の結果を示す。供試体の重量は実験開始から急速に増加した。初期の重量増加速度は最高温度の60℃の場合にもっとも早かった。初期の増加の後に、40℃での浸せき試験では、重量はほぼ一定となった。しかし、50および60℃の場合には、重量はゆっくりと減少し始めた。40℃浸せきに使用した2種類の供試体(Type1及びType2)は同様の重量変化パターンを示した。気温40℃相対湿度85%大気中に置かれた供試体も、初期の重量増加の後に一定の値を維持した。

図-3.9は60℃大気中に置かれた供試体の重量変化を示す。60℃大気中に置かれた供試体は、水中浸せきの供試体と同様に、初期の重量増加のあとに緩やかに減少するという重量変化パターンを示した。初期の重量増加は湿度が高い場合の方(相対湿度85%)が早い。浸せき試験の場合ほどには大きくはない。60℃での重量減少については、Harperら(1984)[11]がエポキシ系GFRPの70℃における水浸せき試験で同様の減少を報告し、GFRPのマトリックス樹脂の損失によると説明している。DSCの結果は少量の溶媒のスチレンの残留を示している(3.3.4)ため、特に大気中における重量減少はスチレンの損失により説明できる。供試体は乾燥条件(気温23℃、相対湿度50%)に置かれたので、重量減少が湿気の損失によって説明できる可能性は低い。

図-3.10はいくつかの条件における樹脂の重量変化を示す。GFRPは図-3.8に見られるように20日後には顕著な減少を示しているのに対し、樹脂は同じ条件で70日経過した時点でも重量増加後の減少を示していない。

図-3.11は、塗装の有無による重量変化の差

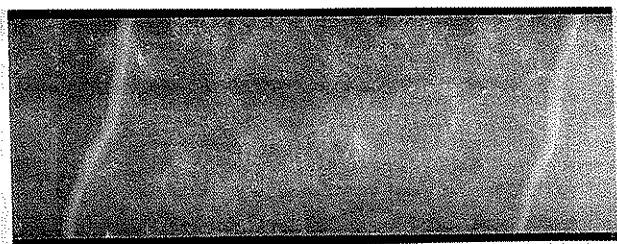


図-3.3 未劣化供試体の外観
(Type2, 供試体の中央部表面(図-3.4,3.5 も))

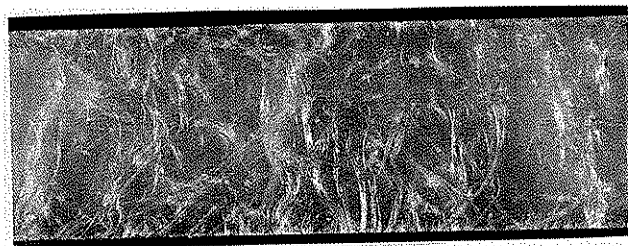


図-3.4 水中浸せき試験後の外観
(Type2, 60°C 210 日間)

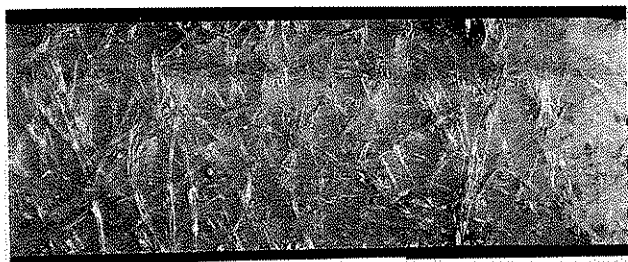
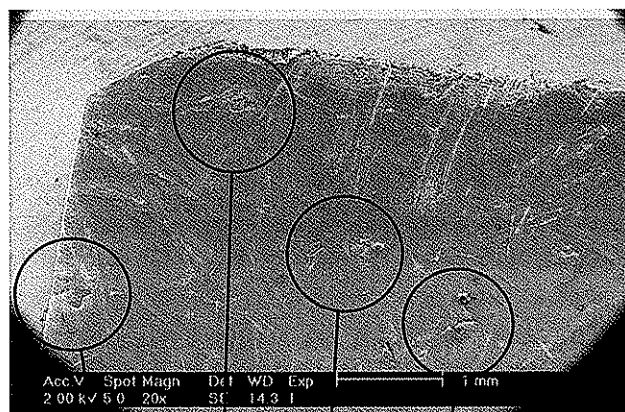


図-3.5 高湿度劣化試験後の外観
(Type2, 60°C 85% 210 日間)

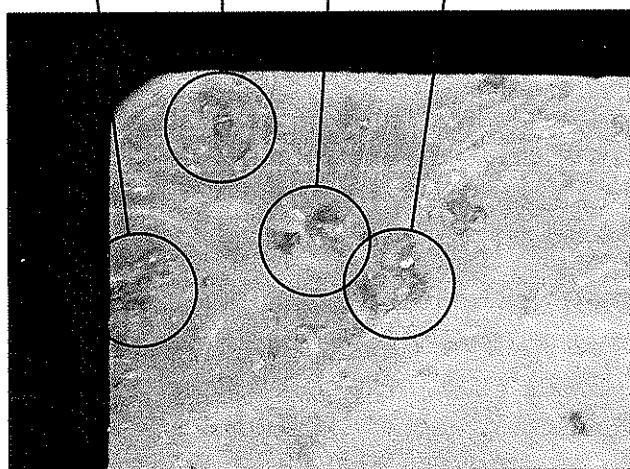


図-3.6 高湿度劣化試験後の外観(SEM)
(Type2, 60°C 85% 210 日間)

を、気温25℃、相対湿度95%及び気温50℃、相対湿度95%で調べた結果である。塗装有りの供試体では端面にも塗装を施してある。気温50℃、相対湿度95%の場合には塗装が有る場合の方が、塗装がない場合に比べて重量増加量が多く、塗膜が有ることによる水の浸入に一定の抑制効果を示している。無塗装供試体の重



(a)



(b)

図-3.7 高湿度暴露試験(気温60℃相対湿度85%)後の供試体の表面 (a) SEM観察, (b)肉眼

量増加率が、塗装供試体と同程度になるまでの時間は、塗膜供試体の場合の0.7程度であった。

気温25℃、相対湿度95%の場合には、気温50℃、相対湿度95%の場合と異なり、塗膜の有無による重量増加の差はわずかであった。重量増加は気温50℃、相対湿度95%の場合に比べて緩やかであった。

3.3.3 IRスペクトル

すべてのIRスペクトル用の試料はCSM層から採取した。茶色の点状の変色は、樹脂の化学変化により可視光域の波長の短い領域(400nm程度)に、吸収が発生したことによると考えられる。このような吸収は、元の構造よりも長い共役二重結合(単結合で連結された二重結合の組)が形成されたことによりおきる可能性があるが、IRスペクトルからはこれを裏付ける変化は認められなかった。Sridharan [46] も水中で劣化したビニルエステル樹脂の劣化をIRで調べたが、変化を見いだせなかったと報告している。

3. 3. 4 DSC

ガラス転移温度(T_g)の結果は劣化試験の前後でわずかな変化を示した。試験前の T_g は110.8℃であったが、60℃浸せきを434日間行った供試体では104.8℃、気温60℃、相対湿度85%で423日間劣化試験を行った供試体では108.9℃であった。なお、未劣化の供試体についてオープン型容器で測定を行ったところ、溶媒の揮発と考えられる吸熱ピークが認められたため、溶媒のスチレンが多少残留していたものと考えられる。

3. 3. 5 NMRスペクトル

未劣化のFRPと気温60℃、相対湿度85%で423日

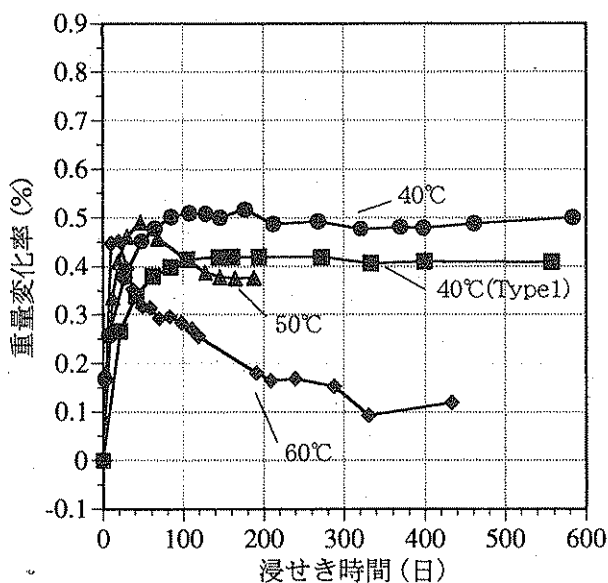


図-3. 8 水中浸せき試験におけるFRPの重量変化率

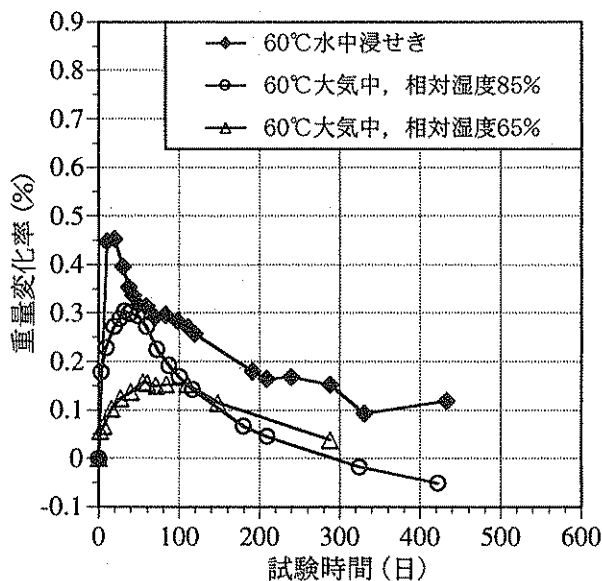


図-3. 9 60℃大気中及び水中浸せき試験におけるFRPの重量変化率

間劣化試験を行った供試体の、 ^{13}C -NMRスペクトル(CP/MAS_toss法)には明確な差異は認められなかった。

3. 3. 6 比表面積

未劣化では $0.0043\text{m}^2/\text{g}$ とわずかであった比表面積は、劣化によって60℃水中で約3倍、気温60℃、相対湿度85%では約6倍と、大幅に増加しており、クラックの発生により空隙が増加していることを示した。

3. 3. 7 浸せき水中の化学組成

重量の減少は、GFRPから何らかの構成要素が水中へ溶出していることを示している。溶出物を分析す

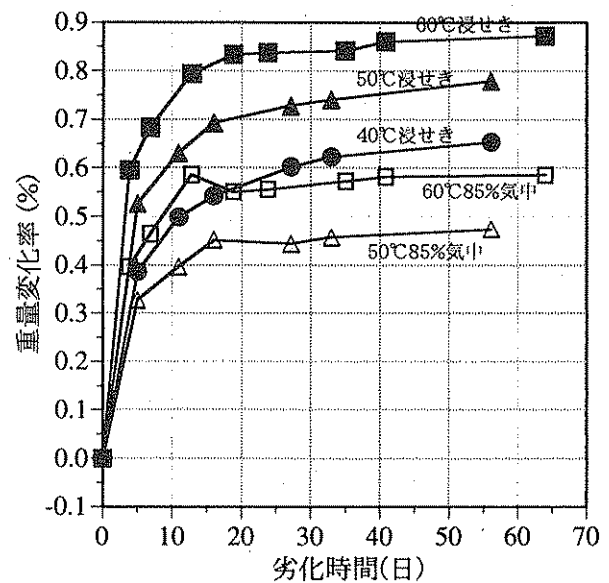


図-3. 10 様々な環境条件におけるマトリックス樹脂板の重量変化率

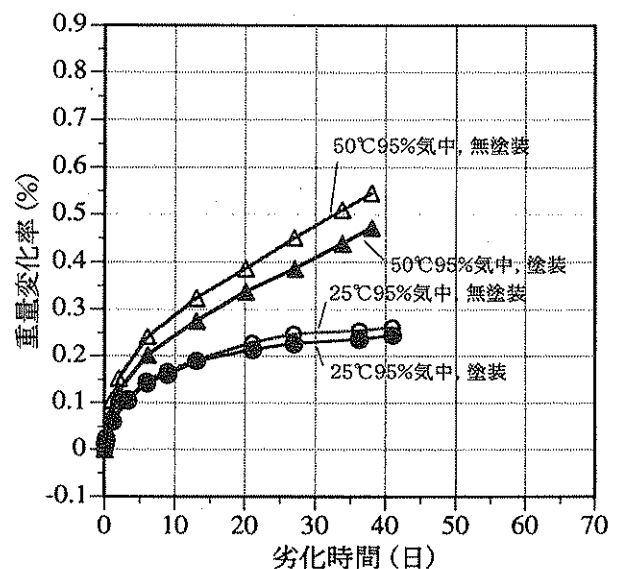


図-3. 11 塗膜の有無による重量変化の差(高湿度暴露試験)

るためにガラス製フラスコ中で水浸せき試験を実施した。試験後にGFRPを取り除き乾燥したフラスコは、フラスコ内の残留物により重量が増加し、その量はほぼGFRP供試体の重量減少量にほぼ一致した。乾燥したフラスコは水で洗浄し、その洗浄液からジクロロメタンで有機成分を抽出し、除媒、乾燥した結果、無色の油状物質を得た。その油状物質の¹H-NMRスペクトルは、ガラス繊維クロスから抽出した表面処理剤のNMRスペクトルと良く一致しており、GFRPの重量減少が、ガラス繊維の表面を覆っているサイジング剤が水中に溶出したことによるものであることが明らかとなった。このガラス繊維(旭硝子(株)製GLASRON)にはシラン系のサイジング剤が使用されている。表-3.3にいくつかのGFRP供試体の繊維と樹脂の重量含有率の結果を示す。GFRP供試体の繊維と樹脂の重量含有率の結果を示す。未劣化のGFRP(Type2)の樹脂含有率は35.0%であったが、60℃水中浸せき試験後には30.9%に低下していた。サイジング剤は樹脂の一部として測定されるので、この変化は重量減少の結果に適合している。大気中で気温60℃、相対湿度85%の場合にも31.7%となり、未劣化に比べ低下を示した。

3.3.8 高湿度暴露試験後の供試体の乾燥

図-3.12はいろいろな条件で暴露した後に、気温23℃、相対湿度50%の恒温恒湿槽で乾燥したときの供試体の重量変化を示している。図-3.12の記号は、1個の供試体から得られたデータであり、記号無しの線は5つの供試体の平均値を示している。60℃の水中に浸せきした供試体は顕著な重量減少を示した。50日間暴露したものの重量変化率は-0.3%、440日間暴露したものでは-1.0%となっている。気温60℃、相対湿度85%の大気中及び40℃水中浸せきした後に乾燥した供試体では、重量変化率は-0.3~-0.2%となった。これらの値は60℃水中への浸せきに比べ小さいが、これらの条件でも長期間の重量減少に寄与していると考えられる。60℃水浸せきにおける重量減少速度は気温60℃、相対湿度85%大気中よりも早かった。

図-3.13は劣化した供試体の、60℃水浸せきした際の重量変化を示す。この試験に使用した供試体

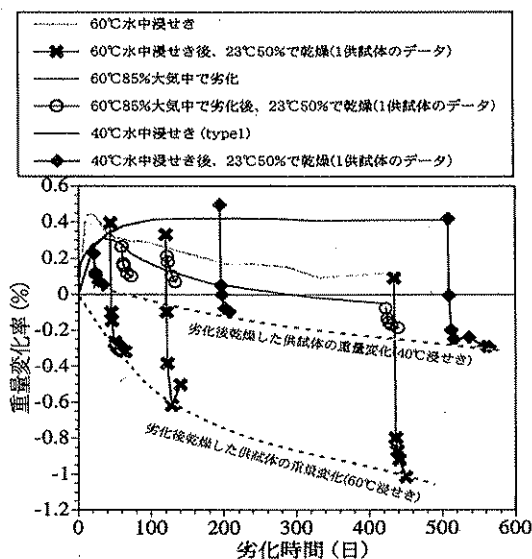


図-3.12 暴露試験後に乾燥したGFRPの重量変化

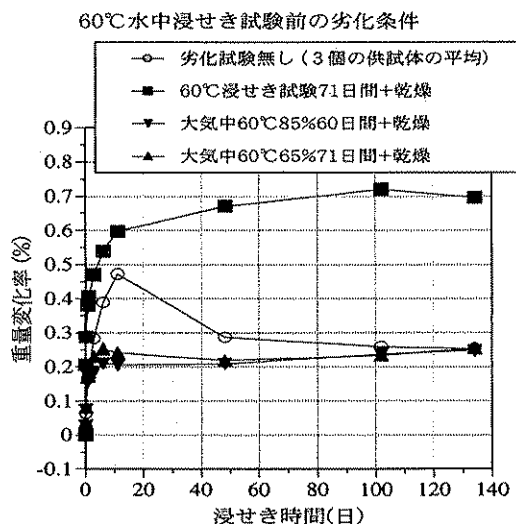


図-3.13 劣化試験後の供試体の60℃水中浸せき試験

表-3.3 繊維・樹脂含有率の変化(Type2)

供試体	未劣化GFRP	水中浸せき(60℃) 210日後のGFRP	大気中(気温60℃, 相対湿度85%) 210日後のGFRP
樹脂含有率(%重量)	35.0	30.9	31.7
繊維含有率(%重量)	65.0	69.1	68.3

は、表-3.1の暴露試験条件1-1, 2-2, 2-3の条件で劣化させたあと、気温23℃、相対湿度50%の条件で30日以上乾燥させ、再度初期重量を測定したものである。60℃に71日間浸せきした供試体は劣化していないものに比べより早い重量増加を示した。重量増加速度だけでなく、吸収量もより大きな値を示した。繊維と樹脂間の隙間が生じることで、水の浸入が早く、浸入量も大きくなったものと考えられる。気温60℃、相対湿度85%及び気温60℃、相対湿度65%の大気中で劣化させたものでは、初期の重量増加速度は、未劣化のものと変わらなかった。しかし、これらの供試体は、未劣化供試体を60℃水中に浸せきした際に見られる、初期の重量増加とその後の緩やかな重

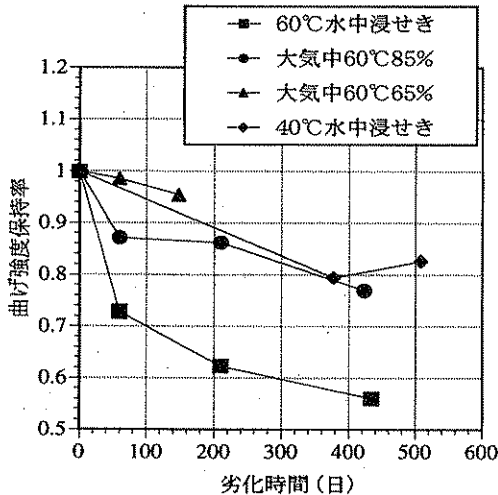


図-3. 14 様々な条件による暴露試験後の曲げ強度変化
(曲げ強度保持率
=劣化後の曲げ強度 / 未劣化の曲げ強度)

量減少のパターンは見られず、平衡に達した後はほぼ一定を保つようになった。これらの差はサイジング剤と残存溶媒がはじめの劣化試験で既に溶出しているためと説明できる。

3. 3. 9 曲げ試験

図-3. 14は曲げ試験の結果を示す。全ての供試体はロービング層と下側CSM層間のせん断破壊を示した。下側CSM層の中央部は引張破壊を示した。劣化試験前後では、破壊モードに差は認められなかった。気温60℃、相対湿度65%の大気中で148日間劣化した供試体は、曲げ強度が初期値の95%となるわずかな低下を示した。気温60℃、相対湿度85%の大気中に423日間暴露した供試体の曲げ強度は、初期値の80%に低下した。40℃水中に380日間浸せきした供試体も初期値の80%程度の曲げ強度を示した。508日間でも82%であった。60℃の水中浸せき試験での曲げ強度の低下は浸せき時間によって低下し、62%にまで達した。曲げ強度の減少の理由は繊維と樹脂のはく離によると考えられる。これはFRP表面に見られる白色の線状模様の出現と、水の浸透速度の顕著な増加もはく離の発生により説明できる。Schutteら(1994) [47] はFRPを水中に置いた場合のガラス繊維と樹脂のはく離を、単繊維を用いた試験により報告している。

一方、40℃水中浸せきや気温60℃、相対湿度85%大気中暴露ではガラス繊維と樹脂のはく離は観察されなかった。このため、これらの供試体で認められた曲げ強度の低下は、主に樹脂の強度低下によるものと考えられる。水の吸収あるいは樹脂の劣化が繊維と樹脂の接着強度を低下させている可能性も高い。環境条件の

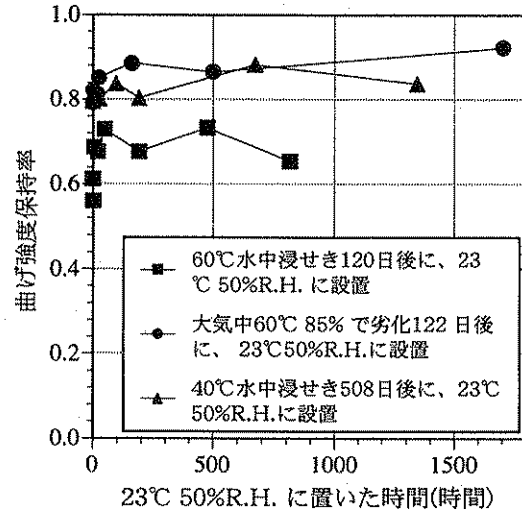


図-3. 15 暴露試験後に気温23℃相対湿度50%で乾燥させた供試体の曲げ強度の回復

表-3. 4 高湿度暴露試験の結果(90° 曲げ試験)

	未暴露	無塗装 38日間暴露	塗装 38日間暴露
曲げ強さ, σ (MPa)	287.6	218.2	226.9
未暴露供試体の強さとの比	1.00	0.76	0.79
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	S (0.001)	S (0.002)
曲げ弾性率, E (GPa)	11.2	9.7	10.5
未暴露供試体の弾性率との比	1.00	0.87	0.94
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	S (0.0002)	S (0.009)

GFRPの力学的性能への影響を調べるために、上記の曲げ試験では暴露条件から回収後直ちに実施した。

これらの強度変化の様子は、図-3. 12中に点線で示した、劣化後の供試体の乾燥重量の減少の様子と、60℃浸せきの低下に比べて、40℃浸せきと気温60℃、相対湿度85%大気中の値が近く、減少も緩やかである点などで、比較的良く一致していた。

水への暴露による曲げ強度低下が一時的なもののか、永久的なものかを調べるために、劣化試験後に気温23℃、相対湿度50%で乾燥させた供試体についても曲げ試験を実施した。この試験の結果を図-3. 15に示す。図-3. 15から、曲げ強度は少し回復するものの、初期値までには回復しないことが分かった。乾燥によつては繊維と樹脂間のはく離が回復するとは考えられないことから、乾燥によつて回復しなかった強度低下は、繊維と樹脂のはく離による強度低下と考えられる。また、乾燥による若干の曲げ強度の回復は、FRPから水が追い出されることによる、樹脂強度の回復によるものと考えられる。

表-3. 4は塗装の有無による強度低下への保護効果を、気温50℃、相対湿度95%で38日間暴露した供

試体で調べた結果である。無塗装供試体の曲げ強度は未暴露供試体の値の0.76、塗装供試体では0.79であった。無塗装供試体と塗装供試体の間に有意差は認められなかった。また、曲げ弾性率でも、無塗装供試体(0.87)、塗装供試体(0.94)ともに、未暴露供試体より低い値を示した。

3.3.10 水中浸せきによるGFRPの劣化のまとめ

GFRP引抜成形材への水の浸透による物性劣化挙動を調べるため、いくつかの温度における浸せき試験と・恒温恒湿試験を行った。GFRPは劣化に伴い表面に亀裂が入ると共に、FRPから、サイジング剤と思われる表面処理剤が溶出し、重量減少が起きていることが分かった。GFRPの曲げ強度は低下することが分かった。重量減少と曲げ強度低下の速度は、60℃浸せきの方が、60℃温潤大気や40℃浸せきよりも早かった。60℃温潤大気中ではFRP表面に顕著な黄変が認められたが、赤外線スペクトルや核磁気共鳴スペクトルでは化学的な変化を観察できなかった。

3.4 長期屋外暴露試験によるGFRPの変化

3.4.1 曲げ試験

0°方向の曲げ試験の結果を表-3.5に示す。いずれも試験片下面に亀裂が発生して破断した。無塗装の供試体を含めて、いずれの供試体も、曲げ強さ、曲げ弾性係数共に、未暴露の供試体と有意の差が認められなかった。90°方向の曲げ試験の結果を表-3.6に示す。塗装供試体では、曲げ強さ、曲げ弾性係数共に、未暴露の供試体と有意の差が認められなかったが、つくばで2年間暴露した無塗装供試体では、曲げ強さが未暴露供試体の0.8に低下し、有意差が認められた。

3.4.2 引張試験

0°方向の引張試験の結果を表-3.7に示す。塗装供試体ではいずれの供試体も、引張強さ、引張弾性係数共に、未暴露の供試体と有意の差が認められなかった。無塗装供試体では、引張強度は、未暴露供試体の0.90となったが、検定の結果では有意差は認められなかった。90°方向の引張試験の結果を表-3.8に示す。0°方向の引張試験と同様に、塗装供試体では未暴露供試体と有意差が認められないが、無塗装供試体の引張強さで有意差が認められた。未暴露供試体からの低下率は0.87であった。

3.4.3 面内せん断試験

面内せん断試験の結果を表-3.9に示す。無塗装

表-3.5 長期屋外暴露試験結果(0°曲げ試験)

	未暴露	無塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (陸別)	塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (大宜味)
曲げ強さ, σ (MPa)	306.6	303.0	328.6	330.9	323.8
未暴露供試体の強さとの比	1.00	0.99	1.07	1.08	1.06
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	N (0.840)	N (0.070)	N (0.096)	N (0.196)
曲げ弾性率, E(GPa)	10.4	10.1	10.5	10.1	10.2
未暴露供試体の弾性率との比	1.00	0.97	1.01	0.97	0.98
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	N (0.262)	N (0.583)	N (0.204)	N (0.377)

表-3.6 長期屋外暴露試験結果(90°曲げ試験)

	未暴露	無塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (陸別)	塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (大宜味)
曲げ強さ, σ (MPa)	287.6	229.8	293.4	274.3	279.3
未暴露供試体の強さとの比	1.00	0.80	1.02	0.95	0.97
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	S (0.0027)	N (0.728)	N (0.338)	N (0.540)
曲げ弾性率, E(GPa)	11.2	10.6	11.8	10.9	11.1
未暴露供試体の弾性率との比	1.00	0.95	1.06	0.98	0.99
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	N (0.021)	N (0.118)	N (0.253)	N (0.706)

表-3.7 長期屋外暴露試験結果(0°引張試験)

	未暴露	無塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (陸別)	塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (大宜味)
引張強さ, σ (MPa)	369.0	333.9	352.6	363.1	356.4
未暴露供試体の強さとの比	1.00	0.90	0.96	0.98	0.97
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	N (0.0106)	N (0.112)	N (0.390)	N (0.165)
引張弾性率, E(GPa)	19.24	18.89	18.97	18.95	18.75
未暴露供試体の弾性率との比	1.00	0.98	0.99	0.99	0.97
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	N (0.522)	N (0.510)	N (0.489)	N (0.297)

表-3.8 長期屋外暴露試験結果(90°引張試験)

	未暴露	無塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (陸別)	塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (大宜味)
引張強さ, σ (MPa)	165.8	145.0	158.9	161.8	156.9
未暴露供試体の強さとの比	1.00	0.87	0.96	0.98	0.95
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	S (0.0009)	N (0.088)	N (0.297)	N (0.053)
引張弾性率, E(GPa)	12.9	12.5	13.0	12.8	13.4
未暴露供試体の弾性率との比	1.00	0.97	1.01	1.00	1.04
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	N (0.363)	N (0.612)	N (0.859)	N (0.139)

表-3.9 長期屋外暴露試験結果
(面内せん断試験)

	未暴露	無塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (陸別)	塗装 暴露 (つくば)	塗装 暴露 (大宜味)
面内せん断強さ, τ (MPa)	56.9	53.5	58.5	56.2	60.0
未暴露供試体の強さとの比	1.00	0.94	1.03	0.99	1.05
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	S (0.006)	N (0.074)	N (0.493)	S (0.001)
面内せん断弾性率, G(GPa)	3.79	3.90	3.82	3.81	3.80
未暴露供試体の弾性率との比	1.00	1.03	1.01	1.01	1.00
未暴露供試体とのt検定の結果 (有意水準1%)	-	N (0.127)	N (0.621)	N (0.529)	N (0.922)

供試体では面内せん断強さが未暴露供試体に比べて0.94に低下し、有意差が認められた。塗装供試体では大宜味に暴露した供試体で、面内せん断強さが、未暴露供試体の1.05と高い値を示したが、その他には、有意差は認められなかった。

3. 4. 4 外観の変化

無塗装供試体では樹脂が黄変化し、CSM層のガラス繊維が露出した。塗装供試体では、塗膜に多少の白亜化(劣化した塗膜が粉末となって表面に残っている状態)が認められるものの、大きな変化は認められなかった。

3. 4. 5 長期屋外暴露試験によるGFRPの変化のまとめ

土木構造用FRPとしての適用が期待される、GFRP引抜成形材について2年間の暴露試験を行った。曲げ、引張、面内せん断の各項目について物性保持率を調べ、無塗装供試体では、引抜方向に対して90°方向の物性(曲げ強さ、引張強さ、面内せん断強さ)で、低下が認められた。これは一方向層の90°方向の性能が、屋外暴露試験によって低下したものと考えられる。これらの供試体でも弾性係数には変化が認められず、また、塗装供試体でも変化は認められなかった。物性保持率は0.80～0.94であった。

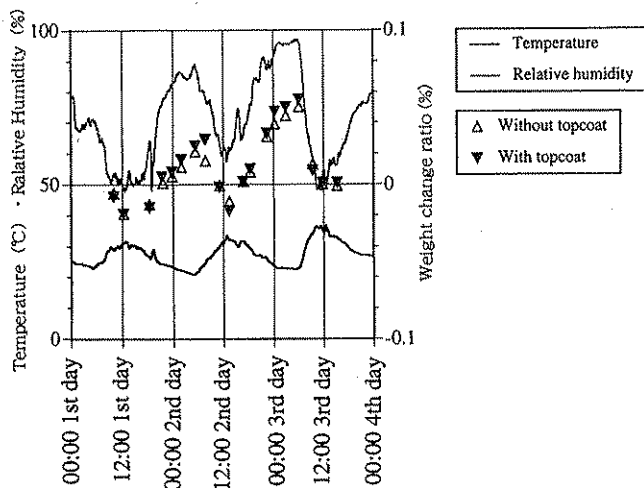


図-3. 16 短期屋外暴露試験結果

表-3. 10 光暴露試験の結果

	未暴露	無塗装 483時間暴露	塗装 483時間暴露	無塗装 1063時間暴露	塗装 1063時間暴露
曲げ強さ, σ (MPa)	287.6	278.8	279.3	264.7	275.9
未暴露供試体の強さとの比	1.00	0.97	0.97	0.92	0.96
未暴露供試体との1検定の結果 (有意水準1%)	-	N (0.083)	N (0.151)	N (0.076)	N (0.104)
曲げ弾性率, E (GPa)	11.2	11.1	11.3	11.8	11.2
未暴露供試体の弾性率との比	1.00	1.00	1.01	1.05	1.00
未暴露供試体との1検定の結果 (有意水準1%)	-	N (0.831)	N (0.404)	N (0.064)	N (0.844)

3. 5 短期屋外暴露試験によるFRPの変化

図-3. 16に試験の結果を示す。試験を実施した3日間は、昼間は晴れて、相対湿度が60%以下まで低下したが、夜間は気温の低下と共に湿度が上昇し、90%以上となった。夜間には一部降雨もあり、供試体表面は濡れている状態であった。夜間の気温はおよそ25℃、昼間は30℃程度であった。図-3. 16から、供試体の重量は夜間に吸湿と共に増加し、昼間の乾燥と共に減少している様子が分かる。吸水による重量増加は多い場合でも0.06%であり、翌日の昼間の乾燥で当初の値に戻ることが分かった。また、塗膜がある方が、ない場合に比べ重量増加が多い傾向があったが、その差はわずかであった。

3. 6 光暴露試験によるFRPの変化

暴露試験後の無塗装供試体は、表面の黄変化が著しかったが、塗装供試体では顕著な変化は認められなかった。暴露試験後の曲げ試験の結果を表-3. 10に示す。1063時間まで暴露試験を実施したが、無塗装供試体、塗装供試体共に曲げ強度に差は認められなかった。1063時間暴露中に供試体が受けた紫外線量は、139.9MJ/m²である。同型の紫外線センサーでつくばにおいて測定した1年当たりの紫外線積算量は46.9MJ/m²であったことから、紫外線量からは屋外暴露試験(つくば)の約3年に相当すると考えることができる。

3. 7 GFRPの水中および屋外暴露における物性保持率

本節では、水中および屋外暴露により強度低下するFRPの安全な応力範囲について、許容応力度設計法の強度保持率により検討する。

3. 7. 1 本研究の結果から設定される引抜成形材の物性保持率

GFRP引抜成形材の各種の暴露試験による強度変化は以下のようにまとめられる。

(1) 水中浸せき試験及び高湿度暴露試験

水中浸せき試験及び高湿度暴露試験による曲げ強度低下は、図-3. 14に示すように、強度低下の速度が次第に遅くなっていく傾向がある。この強度保持率の値は、表-3. 11のNo.1～3のようにまとめられる。また、表-3. 4に示した気温50℃、相対湿度95%における高湿度暴露試験の結果からは、経時的な変化は不明であるが、これらについても表-3. 1

1に示した。60℃水中浸せきの場合の強度保持率は0.56であるが、土木構造物としての用途を考慮する場合、温泉地などの特殊な条件を除けば、部材が60℃の水中に浸される条件は考えにくい。海水は温度が高い場合でも30℃程度である。また、下水処理場における下水の温度は高い場合でも35℃程度と考えられている。このようなことから、水中浸せき時の強度保持率としては、40℃水中浸せきの値が保持率の目安として適していると考えられる。また、60℃85%大気中での強度保持率もほぼ同程度である。これらを総合的に判断すると、水中浸せき時の強度保持率の目安としては、0.75～0.80が適当であると考えられる。

(2) 屋外暴露試験

屋外暴露試験では、無塗装供試体の曲げ強さ(90°)、引張強さ(90°)、面内せん断強さは、未暴露供試体に比べて低下し、表-3. 12の様になった。

強度低下率は曲げ強さ(90°):0.80、引張強さ(90°):0.87、面内せん断強さ:0.94であった。0°方向の曲げ強さ及び引張強さには、未暴露供試体との有意差が認められなかったことから、無塗装供試体では一方向層の繊維間の付着力が弱くなっているものと考えられる。

一方塗装供試体では、2年間の暴露で、曲げ特性(0°、90°)、引張特性(0°、90°)、面内せん断特性の低下は認められなかった。このことから、塗装は無塗装供試体が示した90°方向及び面内せん断方向の強さ低下の抑制効果があることが分かった。

経時的な変化については本試験からは不明であるが、水中浸せき試験や高湿度暴露試験と同様に一定値にほぼ落ち着き、2年間で既に平衡に達しているものと仮定すれば、強度保持率を以下のように設定できる。

塗装してある場合:1.0

無塗装の場合(引抜方向に0°方向の物性):1.0

無塗装の場合(0°以外の方向の物性):0.8

3. 7. 2 文献における物性保持率

F R Pの繊維・樹脂や積層構成などは用途に応じて設計されるものであり、材料の性能にはある程度幅がある。本研究では、F R P引抜成形材の土木構造物用途を想定した場合の耐久性に関する検討を行ったが、使用した供試体の積層構成には限りがあり、また、引抜成型材に関する類似データの報告も少ない。一方F R Pの耐久性データは、ハンドレイアップ成型材やプレス成型材の航空部品用途を想定した条件で、多くの報告がある。そこでこれらの報告を本研究と比較す

表-3. 11 水劣化による強度保持率のまとめ

No.	繊維方向	劣化条件	曲げ強度保持率
1	0°	60℃水中、370～510日間の最低値	0.56
2	0°	40℃水中、370～510日間の最低値	0.8
3	0°	気温60℃、相対湿度85%大気中、370～510日間の最低値	0.77
4	90°	気温50℃、相対湿度95%大気中、38日	0.76～0.79

表-3. 12 屋外暴露による強度保持率のまとめ

No.	繊維方向	性能と条件	強度保持率
1	0°	引張強度、塗装無し	1.0
2	0°	曲げ強度、塗装無し	1.0
3	90°	引張強度、塗装無し	0.87
4	90°	曲げ強度、塗装無し	0.80
5		面内せん断、塗装無し	0.94
6	90°	引張強度、塗装有り	1.0
7	90°	曲げ強度、塗装有り	1.0

表-3. 13 水・湿度による強度保持率に関する文献(GFRP)

文献番号	研究者名	材料種類	繊維構成	力学性能の種類	劣化試験条件	強度保持率
[18]	R. F. Lark & C. C. Chamis (1983)	GFRP/EP (Transverse Filament Tape)	(0/90°): 9層 (0/90/±45°): 11層	引張強度	49℃98%500時間	1.0
		GFRP/EP		圧縮強度	49℃98%500時間	1.0
		GFRP/UP		引張強度	49℃98%4000時間	0.6
[11]	J. F. Harper & M. Naem	GFRP/UP,EP,VEプレス	UD45%	引張強度	浸せき50℃40日	0.4-0.6
		GFRP/EPプレス			浸せき25℃40日	0.59
		GFRP/VEプレス			浸せき25℃40日	0.90
		GFRP/UP,EP,VEプレス			70℃95%40日	0.4-0.6
		GFRP/VEプレス			50℃95%40日	0.63-0.69
		GFRP/EPプレス			50℃95%40日	0.57
[19]	T. Horino et al. (1987)	GFRP/UP MMD(マッドダイ)	CSM:3層	引張強度	浸せき50℃3000時間(125日)	0.45
[20]	K. S. Singh et al. (1991)	GFRP/EP	WRとChoppedSMの組み合わせ	層間せん断強度	浸せき25℃120日	0.50-0.66
				衝撃強度	浸せき50℃120日	0.60
[46]	S. Sridharan et al. (1998)	GFRP/VE引抜成形		曲げ強度	浸せき50℃1700時間(70日)	0.95
					浸せき80℃1700時間(70日)	0.77
[13]	K. N. E. Verghese et al. (1999)	GFRP/VE引抜成形	CSM/ROV/CSM市場流通品	引張強度	65-25-65温度サイクル試験	0.70

注 ア: プリ成形, UP: 不飽和ポリエステル樹脂, EP: エポキシ樹脂, VE: ビニルエステル樹脂, ROV: ロービング

表-3. 14 水・湿度による強度保持率に関する文献(CFRP)

文献番号	研究者名	材料種類	繊維構成	力学性能の種類	劣化試験条件	強度保持率
[14]	C. H. Shen & G. S. Springer (1977)	CFRP/EP (HL8層)	0°	引張強度	27-149℃	0.8
			45°	引張強度	27-149℃	0.8
			90°	引張強度	27-149℃	0.8
[15]	P. R. Christoff, et al. (1987)	CFRP/EP繊維、6層及び8層		引張強度	77℃、30-70日	0.95
				圧縮強度	77℃、30-70日	0.60
[16]	S. Kellas, J. Morton and P. T. Curtis (1990)	CFRP/EP-16層	(±45°/0°/±45°/0°)₂及び(0°/±45°/0°/±45°)₂	引張強度	60℃84%および室温100% (一部)	0.95～1.05
[17]	T. K. Tsotsis and V. Weissman (1990)	CFRP/EPプレス	(±30°)₂₃	引張強度	40℃で相対湿度95% (2週間) との湿度サイクル試験 (5-6サイクル)	0.95
			(90°)₈	引張強度		0.65
			(±30°)₂₃	圧縮強度		0.83
			(0°/+45°/90°/-45°)₄	圧縮強度		0.90

注 EP: エポキシ樹脂

ば、強度保持率の信頼性を向上させることができると考えられる。

このような観点から、水・湿度による強度保持率を報告した文献を調べた。結果を表-3. 13及び3. 14に示す。表-3. 13はGFRPに関する文献である。強度保持率は1.0から低い場合で0.4までの場合があることがわかる。Harperらは樹脂の種類を変えた試験を行い、ビニルエステル樹脂がエポキシ樹脂や不飽和ポリエステル樹脂に比べ、比較的強度保持率が高い結果を示した。温度の影響は大きく、25℃水中浸せき40日では、引張強度保持率は0.90であるが、気温50℃相対湿度95%の気中40日では0.63-0.69と低下している。50℃の場合の強度保持率は概ね0.4~0.95程度、25℃では0.5~0.9と、材料や条件による幅が広い。本研究に近い材料(ビニルエステル樹脂をマトリックスとするGFRPの引抜成形材)を用いているのは、Sridharan, S.ら(1991)[46]と、Verghese, K.N.E.ら(1999)[13]である。本研究では図-3. 14に示すように、水中浸せき60℃60日で曲げ強度保持率0.73であり、Sridharan, S.らの結果と大きな差は無いことがわかる。また、Vergheseらの温度スパイク試験から得た強度保持率は0.70と、本研究から得られた結果(0.75~0.80)と大きな差が無いと考えられる。

表-3. 14はCFRPに関する文献である。繊維方向(0°)の強度保持率は最低でも0.8で、劣化が殆ど認められ無い場合もある。一方、繊維と直交方向には、強度保持率が低くなった。本章ではCFRPの水・湿度による劣化試験は実施していないが、表-3. 14に示す文献では、0.6~1.05の強度保持率が報告されている。Tsotsisらの報告する0.65は90°方向のみのCFRPの引張試験であるので、特に低く出るが、CFRP引抜成形材では90°方向のみの材料は考えにくいことを考慮すると、Ciriscioliらの圧縮試験の0.60の値を例外として、全て0.8~1.0の範囲にある。このため、この範囲をCFRPの強度保持率として設定することが妥当であると考えられる。

表-3. 15は、GFRPの屋外暴露試験に関する文献から、材料の種類、物性低下率、暴露期間等を整理した結果である。ハンドレイアップ成形かプレス成形によるものが多かった。植村ら[48]、鶴江ら[25]、長谷川[27]、福田[28]は、無塗装供試体の2~5年の屋外暴露試験で、強度低下率は0.95~1.0と殆ど低下していない結果を報告している。特に鶴江ら[25]は、本研究で差が認められた90°方向の曲げ・引

表-3. 15 屋外暴露試験による強度保持率に関する文献

文献番号	研究者名	材料の種類	成形・積層構成	積層	暴露期間	力学性能の種類	強度保持率
[48]	植村ら	GFRP/UP	HL	なし	5年	曲げ強度	0.95
						引張強度	1.0
			CSM:3層 HL	なし	3年	引張強度(0°)	1.0
						引張強度(90°)	1.0
						曲げ強度(0°)	1.0
						曲げ強度(90°)	1.0
			WRクロス:14層 プレス	なし	3年	引張強度(0°)	0.95
						引張強度(90°)	0.95
						曲げ強度(0°)	0.95
						曲げ強度(90°)	0.95
[26]	鶴江ら	GFRP/UP	CSM:2層+WRクロス:2層 HL	なし	3年	引張強度(0°)	1.0
						引張強度(90°)	1.0
						曲げ強度(0°)	1.0
						曲げ強度(90°)	1.0
			CSM:3層, HL	なし	2年	疲労限度	1.0
			プレス, WR14	なし	2年	疲労限度	1.0
			HL, CSM2+WR2	なし	2年	疲労限度	0.85
[27]	長谷川	GFRP/UP	プレス, チョップ	なし	2年	曲げ強度	1.0
						衝撃強度	1.0
[28]	福田	GFRP/EP	WRクロス7層 プレス	EPプライマー/PU上塗り	5年	曲げ強度	1.0
						面内せん断強度	1.0
						圧縮強度(0°)	1.0
						圧縮強度(90°)	0.8
						曲げ強度	0.87
						引張強度	1.0
[31]	横山	GFRP	HL	なし	15年	圧縮強度(0°)	1.0
						圧縮強度(90°)	0.6
						曲げ強度	0.94
						引張強度	1.0

注: HL:ハンドレイアップ成形, プレス:プレス成形, UP:不飽和ポリエステル樹脂, EP:エポキシ樹脂, PU:ポリウレタン樹脂, WR:ロービングクロス

張試験でも変化が認められていない結果を示している。本研究とこれらの文献との相違は、本研究で使ったGFRPの積層構成がCSM/ロービング/CSMと、中間層に一方方向層を含むのに対し、鶴江らのGFRPの積層構成がロービングクロスとCSMからできていたことであり、繊維間の付着強度低下の影響を受けにくかったためと考えられる。横山[31]は15年のGFRPの屋外暴露試験を発表しており、引張、圧縮(0°)では変化が無く、曲げでは0.87-0.94と報告されている。90°方向の圧縮強度の0.6~0.8の強度低下は、積層間の剥離破壊が起きやすくなるためと報告されている。

本研究の屋外暴露試験の結果、無塗装供試体の場合には、90°方向で0.80の物性保持率が最低値であった。文献の多くは、無塗装の場合でも、5年程度では強度低下がないと報告しているが、それらのFRPでは一方方向層が少なかったため考えられる。引抜成形材には通常一方方向層が多いため、無塗装で土木構造物に用いる場合には、一方方向層の繊維方向以外には0.8程度の物性保持率が必要であると考えられる。

一方、塗装を行った場合には、この強度低下は2年間の暴露期間では3カ所の暴露場のいずれにおいても認められず、抑制効果があることが明らかであった。この場合には物性保持率は1.0として問題ないものと考えられる。

3. 7. 3 GFRPの水中および屋外暴露における

物性保持率に関するまとめ

浸せき試験の結果からは、曲げ試験による強度保持率から、GFRPの水・湿度に対する強度保持率は0.75～0.80程度が目安として適当との結論を得た。また、文献から、CFRPの水・湿度に対する強度保持率は0.8～1.0程度が目安として適当と考えられた。これらの値は常時水中に没する土木構造物の水を因子とする劣化による強度保持率として適用できる。2年間の屋外暴露試験から、GFRP引抜成形材を土木構造物用FRPとしての適用する際の限界値を定めるための強度保持率は、0°以外の方向で無塗装の場合には0.8程度、塗装する場合や、0°方向には1.0程度が適当との結果を得た。なお、いずれの場合も本研究の試験期間は2年程度であり、強度低下は、速度が遅くなってきてはいるものの、完全に一定にはなっていない。このため、長期にわたる劣化によりさらに強度が低下する可能性もある。

3. 8 塗膜による保護効果

前項で確認された塗膜による保護効果が、塗膜のどのような性能によって得られるか検討を行った。

3. 8. 1 光の遮断による保護効果

屋外暴露試験では無塗装供試体は2年間の暴露(つくば)で、曲げ強度(90°)の低下を示したのに対し、光暴露試験では屋外暴露試験約3年に相当する紫外線を照射した無塗装供試体でも、曲げ強度(90°)に初期と差が認められなかった。このことから、この強度低下が光とは直接関係ないと考えることができる。光暴露試験により塗膜はFRP表面の紫外線による樹脂劣化から保護できることが明らかであるが、光を防ぐ効果でFRPの強度低下を保護しているわけではないことが分かった。

3. 8. 2 水の遮断による保護効果

高湿度暴露試験(図-3.11)では、塗膜は、気温50℃、相対湿度95%の大気中で水のFRPへの浸透を抑制しているが、その程度はあまり大きくなく、曲げ試験ではどちらも強度低下が顕著であった。また、気温25℃、相対湿度95%の場合には塗膜は水の浸透抑制に殆ど寄与していなかった。塗膜による水の浸入抑制効果は、浸透速度が比較的遅い低温高湿な条件では十分に現れないものと考えられる。短期暴露試験の結果(図-3.16)から、屋外暴露試験中のFRPの水浸透の条件は、気温25℃、相対湿度95%の場合に近いと考えられるため、長期屋外暴露試験においても、塗膜には水浸透抑制効果は期待できないと考えられる。

3. 9 本章のまとめ

本章では、GFRP引抜成形材への水の浸透による物性劣化挙動を調べるため、いくつかの温度における浸せき試験と・恒温恒湿試験を行った。GFRPの表面に亀裂が入ると共に、FRPから、サイジング剤と思われる表面処理剤が溶出し、重量減少が起きていることが分かり、GFRPの曲げ強度も低下することが分かった。重量減少と曲げ強度低下の速度は、60℃浸せきの方が、60℃湿潤大気や40℃浸せきよりも早かった。60℃湿潤大気中ではFRP表面に顕著な黄変化が認められたが、赤外線分光光度法や核磁気共鳴スペクトルでは化学的な変化を観察できなかった。

土木構造物用FRPとしての適用が期待される、GFRP引抜成形材について2年間の暴露試験を行った。曲げ、引張、面内せん断の各項目について物性保持率を調べ、無塗装供試体では、引抜方向に対して90°方向の物性で、低下が認められた項目があった。これは一方向層の90°方向の性能が、屋外暴露試験によって低下したものと考えられる。これらの物性低下は塗装供試体では認められなかった。

浸せき試験の結果からは、曲げ試験による強度保持率から、水・湿度による強度保持率は0.75～0.80程度が目安として適当との結論を得た。文献からは、CFRPの強度保持率は0.8～1.0程度が目安として適当と考えられた。また、2年間の屋外暴露試験から、GFRP引抜成形材を土木構造物用FRPとしての適用する際の限界値を定めるための物性保持率は、0°以外の方向で無塗装の場合には0.8程度、塗装する場合や、0°方向には1.0程度が目安として適当との結果を得た。なお、これらの値は2年程度の試験結果から得られており、強度低下は、速度が遅くなってきてはいるものの、完全に一定にはなっていない。このため、長期にわたる劣化によりさらに強度が低下する可能性もある。

屋外暴露で塗膜が引抜成形材を保護する効果は、光あるいは水の浸入を防ぐためではないことが分かった。これらの複合や、気体の浸入抑制などが関連している可能性が考えられる。

第4章 疲労荷重による強度低下と物性保持率

4. 1 はじめに

本章では土木構造物用FRPの疲労に関する物性保持率について検討を行う。GFRPの強度は鋼材と同程

度であるが弾性率が低い。このためFRP橋梁(上部工)を試設計すると、強度には余裕があり、たわみが基準値を越えないような検討を行うこととなる[49][50]。そこで材料の強度を有効に使うには、FRPの弾性係数の向上を図る必要がある。このようなFRPとして、GFRPのガラス繊維の一部を炭素繊維に置き換えた、CF/GFハイブリッド引抜成形FRPがあげられ、比較的安価に、弾性係数の高い大断面長大部材を得ることができると期待される。

このようにFRPの弾性係数を向上させると、FRPの許容応力度近くまで荷重をかけることが出来るようになるため、強度に余裕があるGFRPに比べ、荷重の影響を考慮する必要が高まってくる。特に荷重の大きな道路橋への適用を考慮する場合には、疲労荷重に関する検討が必要と考えられる。

FRPは航空機などの用途が多いため、疲労特性についてはCFRP、CF/GFハイブリッドFRPを含めてこれまでも数多くの研究がなされてきた。しかし、引抜成形材のCFRP及びCF/GFハイブリッドFRPについては、引抜成形材のGFRPに比べて、未だにデータが少ないのが現状である。本章では引抜成形材のCFRP及びCF/GFハイブリッドFRPについて、3点曲げによる疲労試験を実施し、土木用構造材料として使用する際の、疲労荷重による強度低下を、 10^7 回疲労限度から調べる。また、湿潤大気中で材料劣化した供試体についての疲労試験も行い、他の劣化要因と複合的な条件における疲労強度についても調べる。さらに試験結果と文献を参考に、許容応力度設計法における、疲労荷重に関する物性保持率について検討する。

なお、本研究での検討対象用途は橋梁上部工を想定しており、橋脚などの下部工は想定していない。このため地震等による低サイクル疲労については検討対象としなかった。

4. 2 実験

4. 2. 1 供試体

表-4. 1に示す3種類の引抜成形材(GFRP, CFRP, CF/GFハイブリッドFRP)を使用した。FRP引抜成形材はいずれも旭硝子マテックス(株)製である。積層構成の違いは材料物性に大きな影響を与える。引抜材の積層構成は、主に一方向性が強い場合と弱い場合に分けられる。どちらの場合にも適した土木部材が考えられるので、GFRP、CFRPで異なるタイプの積層構成を選択した。GFRPは

表-4. 1 試験に使用したFRP

	GFRP	CFRP	CF/GF hybrid FRP
Vf(%)	52	45	52
Matrix resin	Vinylester	Vinylester	Vinylester
Original shape	Hollow square 50×50 mm 4 mm thickness	Plate 420 mm width 4 mm thickness	Plate 420 mm width 4 mm thickness
Specimen shape		15 mm width 4 mm thickness 84 mm length	
Layer system	CSM 8% Roving 84% CSM 8%	Cloth 30.7% UD 4.0% Cloth 30.7% UD 4.0% Cloth 30.7%	CSM (GF) 8% KFC (GF) 20% UD (CF) 44% KFC (GF) 20% CSM (GF) 8%

注:積層構成は板の表面から順に表示。CSM:エンフィュアーストランド・マット(不織布), KFC(ニット・ファブリック・クロス(編まずにかがり糸で作った布)), Cloth:織布, Roving 及び UD:一方向層

表-4. 2 3点曲げ疲労試験の条件

Items	Condition
Support span	16 times of thickness
Temperature	5, 23, 50°C
Frequency	1 Hz, 5 Hz
Min. stress/Max. stress	0.05 to 0.22 (pulsating)

表-4. 3 静的試験の結果

	Flexural strength	Elastic modulus
GFRP	847 MPa	25.1 GPa
CFRP	470 MPa	42.6 GPa
CF/GF hybrid FRP	458 MPa	22.6 GPa

市販されているものから選別した。一方向層が84%と多いものである。このような形状の角パイプ部材はトラス部材、床版などに使用される。CFRP及びCF/GFハイブリッドFRPは、本試験のために製造された。CFRPはクロス層の割合が高く、一方向層は8%しかない。もとの形状は幅420mmの板状である。このようなCFRPの主な用途は補剛桁などの、 0° と 90° の両方向に強さを必要とする部材と考えられる。CF/GFハイブリッドFRPは適切なコストで高弾性係数を得るために設計した。炭素繊維ヤーン(織る前の糸)が炭素繊維クロス(織布)に比べかなり安価であることに注目し、ガラス繊維の一方向層のみを炭素繊維に置き換えたFRPとした。CF/GF比率は44%である。元のFRPの形状から、幅15mm、長さ84mmの形状に切断したものを供試体とした。(寸法効果を見るために、一部で、幅55mm、長さ125mmの供試体を製作した。)

4. 2. 2 試験方法

(1) 静的試験

静的な3点曲げ試験はJIS K 7055に準拠して実施した。供試体は1種類につき5個使用した。载荷速度は2mm/minとした。支点間距離は供試体厚さの16倍とした。

(2) 疲労試験

表-4.2に3点曲げ疲労試験の条件を示す。主な試験は23℃、5Hz、片振りで実施した。いくつかの供試体では、疲労強度への試験条件の影響を調べるために、5℃、50℃、あるいは1Hzで行った。たわみと荷重の最大及び最小値を測定した。最大たわみと荷重から、式(4.1)により剛性を計算し、剛性の変化を追跡・監視した。

$$EI = P \times l^3 / 48 \delta \quad (4.1)$$

EI : 剛性 (Nm²)

l : 支点間距離 (m)

P : 荷重 (N)

δ : たわみ (m)

各試験においては2種類の疲労破壊を設定した。ひとつはJIS K 7082に準拠して、剛性が初期値の0.8に低下する点である。もうひとつはたわみが10mmに達する点である。疲労試験装置の試験終了点をたわみが10mmに達した時に設定して、剛性が初期の0.8となる点は観測データから読みとった。

4. 3 結果

4. 3. 1 静的試験

表-4.3に静的曲げ試験の結果を示す。全ての供試体は下面中央部での引張破壊を示した。GFRPは一方向層の割合が大きいため高い曲げ強度を示した。CFRPは高い曲げ弾性率を示した。CF/GFハイブリッドFRPはGFRPよりも低い曲げ弾性係数を示したが、これはGFRPが一方向層が全体の84%あるのに対して、CF/GFハイブリッドFRPでは一方向層は44%しかなく、また、炭素繊維は中間層に位置しているためと考えられる。

4. 3. 2 疲労試験の破壊モード、剛性及びたわみ

図-4.1から4.3までにGFRP, CFRP, CF/GFハイブリッドFRPの剛性残存率を示す。GFRPの剛性残存率(図-4.1)ははじめに少しずつ低下し、その後急激な低下を起こした。全てのGFRP供試体は疲労試験において、供試体下面中央

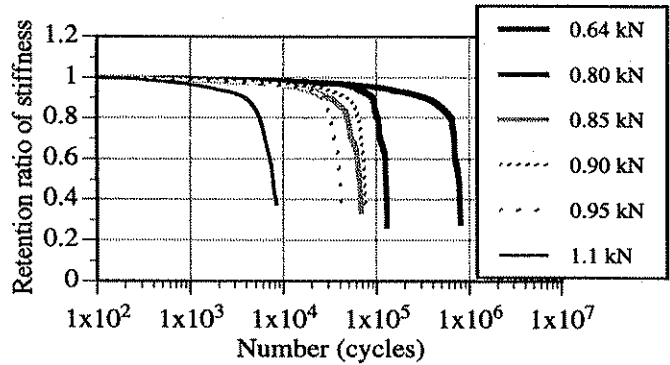


図-4.1 剛性の変化(GFRP)

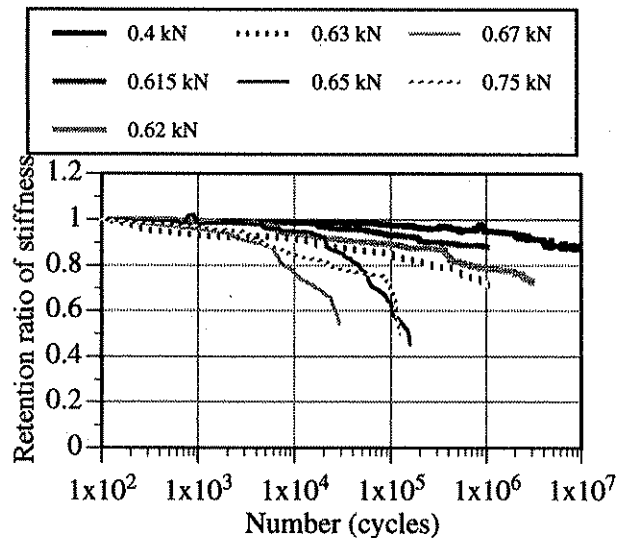


図-4.2 剛性の変化(CFRP)

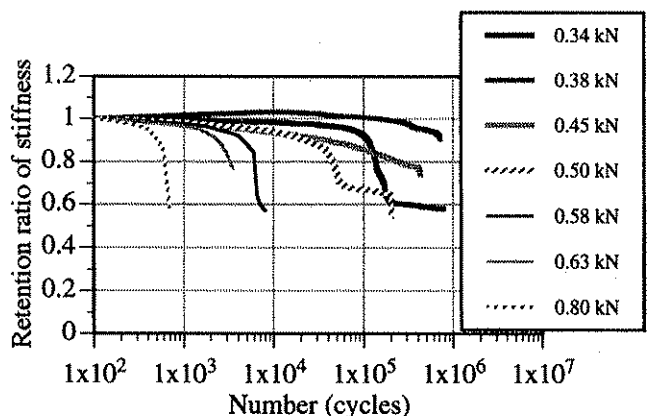


図-4.3 剛性の変化(CF/GFハイブリッドFRP)

で引張破壊を起こした。多くの供試体は下側のCSM層とロービング層の間で剥離が認められた。

CFRPの剛性(図-4.2)はGFRPの様な急激な低下を示さなかった。ほぼ全てのCFRP供試体は供試体下面中央で引張破壊を起こしたが、いくつか

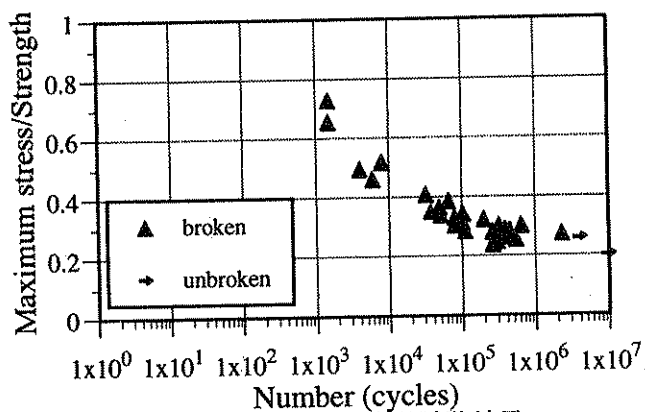


図-4. 4 GFRPの疲労試験結果
(疲労破壊: 剛性保持率 < 0.8,
23 °C, 5 Hz, 最小荷重 = 0.1kN)

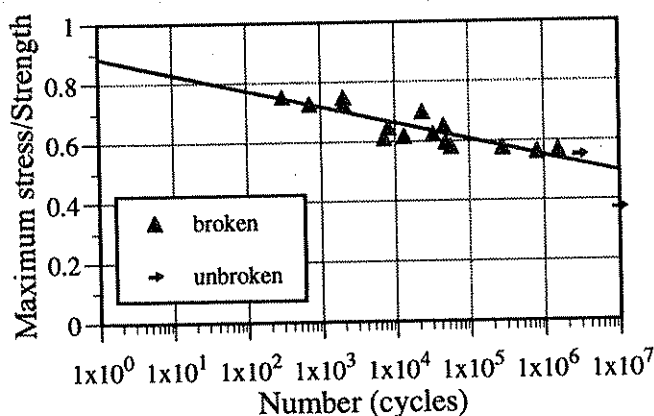


図-4. 5 CFRPの疲労試験結果
(疲労破壊: 剛性保持率 < 0.8,
23 °C, 5 Hz, 最小荷重 / 最大荷重 = 0.1)

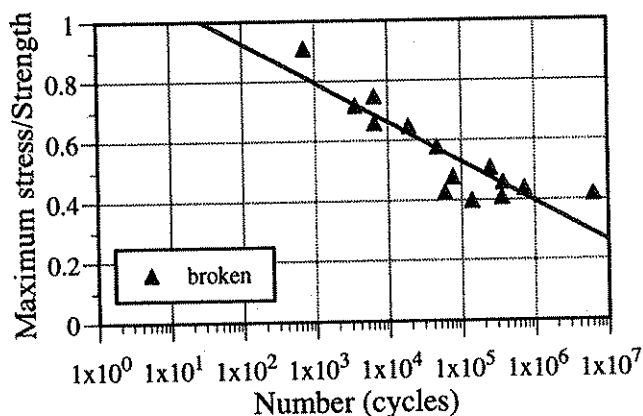


図-4. 6 CF/GFハイブリッドFRPの疲労試験結果
(疲労破壊: 剛性保持率 < 0.8,
23 °C, 5 Hz, 最小荷重 / 最大荷重 = 0.1)

の供試体では上面中央部で圧縮破壊を同時に起こした。

CF/GFハイブリッドFRPの剛性 (図-4. 3) はGFRPと同様に、はじめに緩やかに低下し、後に急激な低下を示した。ほぼ全てのCF/GFハイ

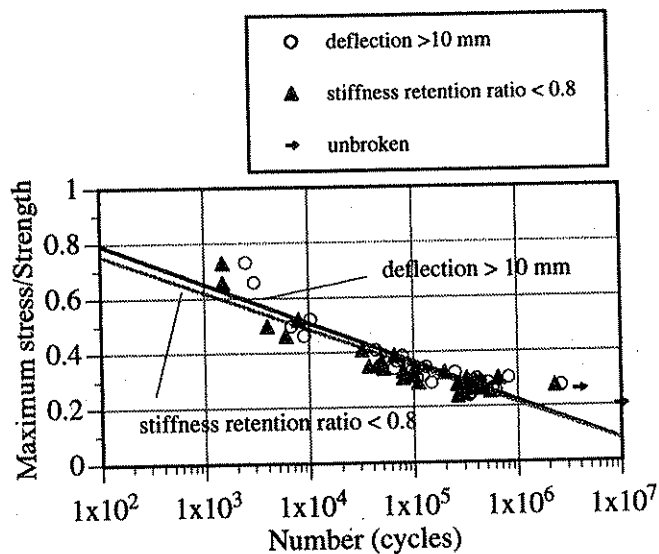


図-4. 7 疲労破壊の違い(GFRP)
(23 °C, 5 Hz, 最小荷重 = 0.1kN)

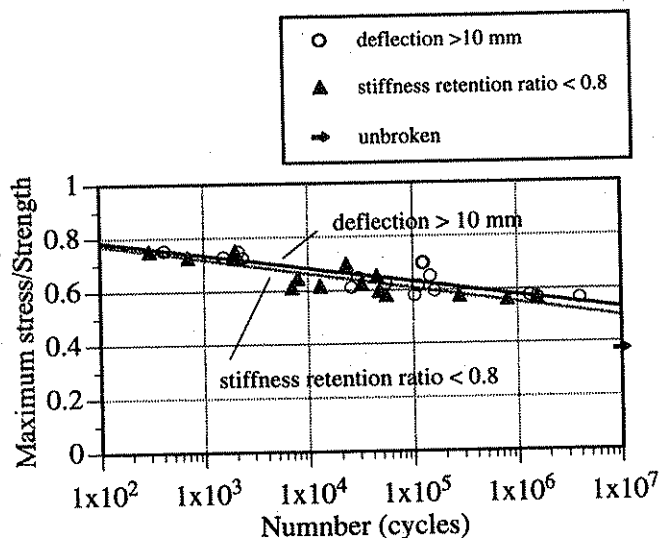


図-4. 8 疲労破壊の違い(CFRP)
(23 °C, 5 Hz, 最小荷重 / 最大荷重 = 0.1)

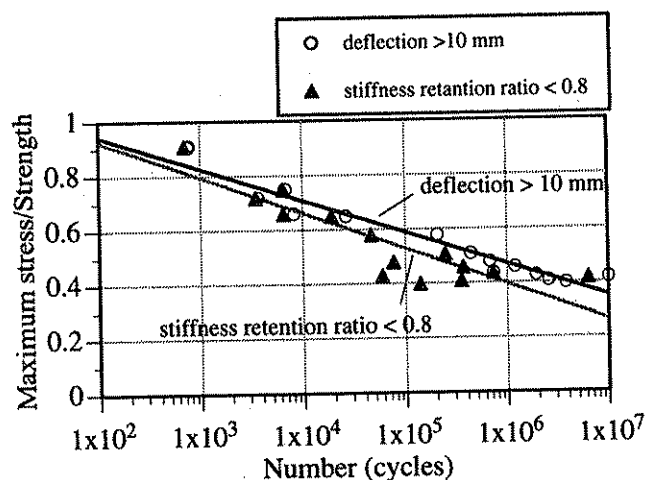


図-4. 9 疲労破壊の違い(CF/GFハイブリッドFRP)
(23 °C, 5 Hz, 最小荷重 / 最大荷重 = 0.1)

ブリッドFRP供試体は、供試体下面中央での引張破壊と、上面での圧縮破壊を同時に起こした。図-4.3のいくつかの供試体は、はじめの急激な剛性の低下の後に、再度緩やかな剛性低下の領域を示している。これらの供試体の下側のGFRP層（ニットファブリックとCSM層の両方）ははじめの剛性低下の時点で破断していた。2度目の緩やかな剛性低下領域ではCFRP層が破壊せずに残っている状態となっていた。

4. 3. 3 10^7 回における疲労限度

(1) 剛性に基づく疲労破壊

図-4.4から4.6までにGFRP, CFRP, CF/GFハイブリッドFRPの疲労試験結果を示す。横軸は疲労にいたるまでの載荷回数、縦軸は最大疲労応力（静的及び動的応力を加えた応力の最大値）の静的強さに対する比である。図-4.4では疲労荷重の最小値は0.1kN、図-4.5及び4.6では疲労荷重の最小値は、最大値の0.1倍とした。いずれも23℃, 5Hzで試験し、剛性が0.8となった点を疲労破壊としている。図-4.4, 4.5, 4.6の応力軸を絶対値ではなく静的強度に対する比で表したのは、本研究では安全率を検討するために疲労限度に着目したためである。

図-4.4は疲労回数と応力の関係がややカーブしているため、図中に回帰直線を示していない。GFRPの 10^7 回における最大疲労応力/静的強度比は、約0.2であった。

図-4.5のCFRPはGFRPに比べてより良い疲労特性を示している。CFRPの 10^7 回における最大疲労応力/静的強度比は、約0.5であった。

図-4.6はCF/GFハイブリッドFRPの結果であるが、GFRPとCFRPのほぼ中間的な疲労特性を示している。 10^7 回における最大疲労応力/静的強度比は、約0.27であった。

(2) たわみに基づく疲労破壊

図-4.7から4.9までに、たわみが10mmに達した点を疲労破壊とした際の、GFRP, CFRP, CF/GFハイブリッドFRPの疲労回数と最大応力の関係を示す。GFRPは図-4.1に示したように疲労破壊領域の剛性の変化が急激であるので、図-4.7では2種類の疲労破壊による差が殆ど無いことが分かる。GFRPの 10^7 回における最大疲労応力/静的強度比は、この疲労破壊の設定でも約0.2であった。

CFRPは図-4.2で破壊領域での剛性の変化が

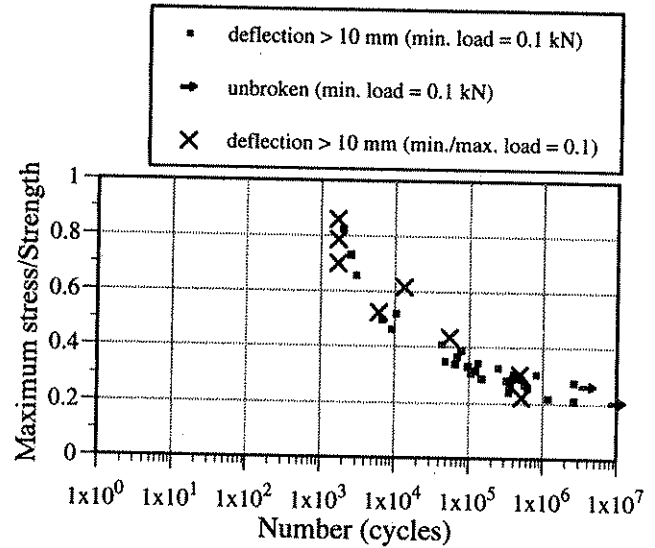


図-4.10 GFRPの2つのシリーズの相違
(疲労破壊：たわみ>10mm、23℃, 5Hz)

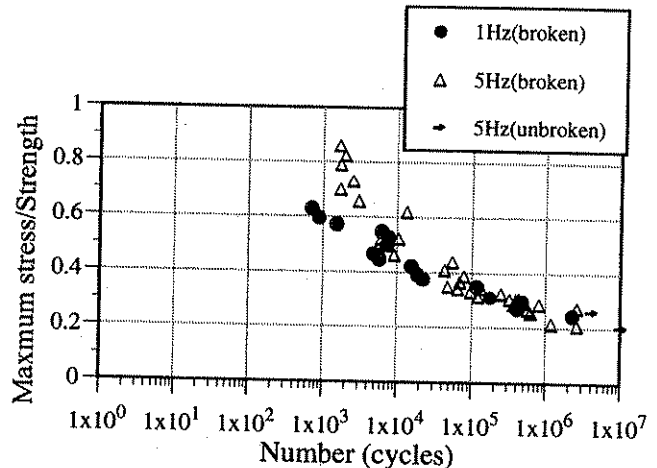


図-4.11 GFRPの疲労特性への周波数の影響
(疲労破壊：たわみ>10mm、23℃)

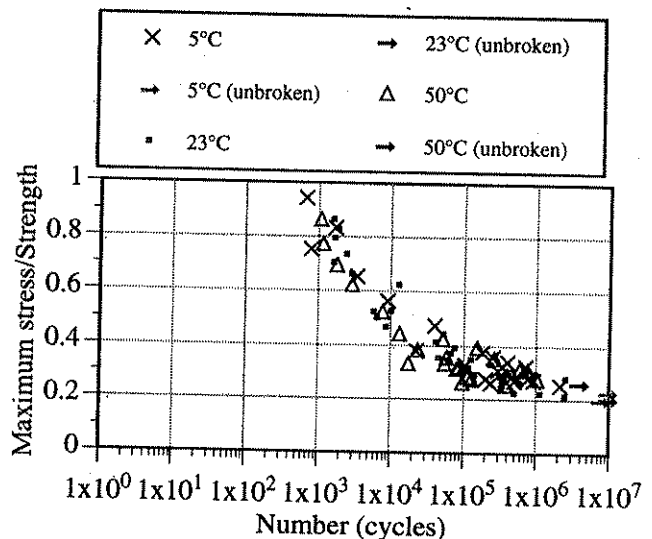


図-4.12 GFRPの疲労特性への温度の影響
(疲労破壊：たわみ>10mm、5Hz)

より緩やかであったことから、たわみに基づく疲労破壊では 10^7 回疲労限度は、GFRPの場合よりもやや差がある(図-4.8)が、剛性に基づく疲労破壊の場合で0.50であったのが、0.53となる程度であった。

図-4.9から、CF/GFハイブリッドFRPの 10^7 回疲労限度は、CFRPと比較して2種類の疲労破壊による差の影響が大きいものの、その値の差は0.1に満たず、さほど顕著ではなかった。CF/GFハイブリッドFRPの 10^7 回における最大疲労応力/静的強度比は、この疲労破壊の設定では約0.35であった。

GFRPの試験は2つのシリーズで行われた。一つは $R=0.1$ とし、もう一つは最大荷重を0.1kNに固定した。図-4.10ではこの2つのシリーズに明確な差が認められなかったことを示す。

4.3.4 各種因子の影響

周波数と温度が 10^7 回疲労限度に与える影響を、いくつかの供試体について調べた。

(1) 周波数

図-4.11は1Hzと5Hzの時のGFRP供試体の結果である。最大曲げ応力/静的強度比が0.3よりも大きい領域では5Hzの方が1Hzの場合よりも疲労特性が良いが、0.3以下の場合には1Hzと5Hzの間に差は認められなくなった。この結果から、周波数は1~5Hzの間では疲労限度には影響を与えないものと考えられる。

(2) 温度

図-4.12はGFRPの5℃、23℃、および50℃の場合の試験結果を示す。応力-疲労回数線図にはこれらの温度による明確な差は認められなかった。この結果から、5~50℃の範囲ではGFRPの疲労特性には差がないものと判断できる。

図-4.13はCF/GFハイブリッドFRPの23℃と50℃の場合の試験結果である。50℃の場合には23℃よりも疲労寿命は短い傾向が認められるが、 10^7 回疲労限度には23℃と50℃間の差は認められなかった。

4.3.5 水分による劣化との複合

図-4.14は気温50℃、相対湿度90%の恒温恒湿槽に238日静置したCF/GFハイブリッドFRPの疲労試験結果を示す。劣化したFRPの静的曲げ強度は397MPaであり、未劣化のFRP(462MPa)に比べて0.86に低下していた。図-4.14から、疲労特性を静的強度の比で表すと、 10^7 回疲労限度には劣化後と未劣化との相違は認められなかった。この結

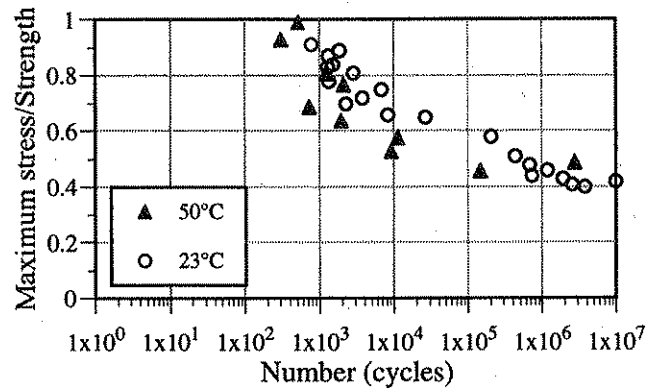


図-4.13 CF/GFハイブリッドFRPの疲労特性への温度の影響(疲労破壊: たわみ>10mm, 5Hz)

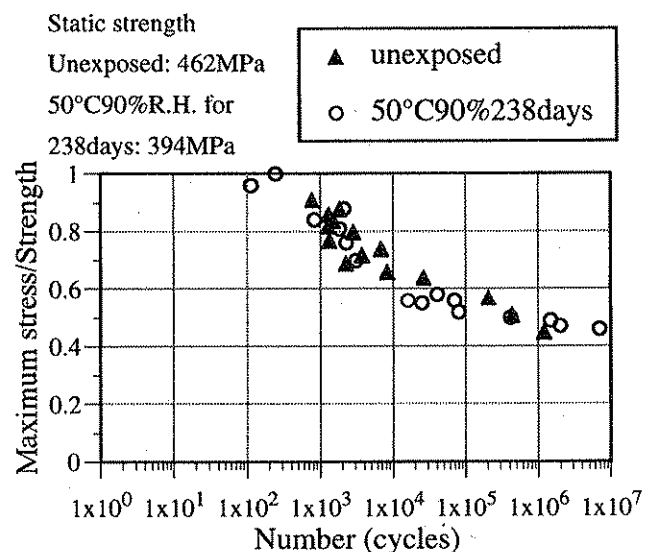


図-4.14 気温50℃相対湿度90%で238日間劣化したCF/GFハイブリッドFRPの疲労特性(疲労破壊: たわみ>10mm, 5Hz)

表-4.4 文献におけるFRPの 10^7 回疲労限度/静的強度比

材料	静的強度に対する 10^7 回疲労限度の比		参考文献
	flexural	tensile	
GFRP	0.29-0.41	0.22-0.36	植村 (1994)[51]
	0.29 (HL)	0.53 (HL)	鶴江 (1981)[25]
	0.18-0.30 (press)	0.23-0.45 (press)	
CFRP	0.4-0.8		植村 (1994)[51]
		0.73-0.83 (UD)	池田 (1999)[52]
GF/CF hybrid FRP	0.19-0.24 (0.23-0.28 GFRP)	0.48 (0.22 GFRP)	植村 (1984)[53]

果から、疲労に関する強度低下と、水による環境劣化に関する強度低下は別に考える必要があることが分かった。疲労と、水による劣化の両方が影響する利用の場合には、疲労に関する強度保持率と、水劣化に関する強度保持率をかけ合わせる必要がある。

4. 4 考察

4. 4. 1 本実験から得られる疲労限度及び疲労に関する物性保持率

本実験から得られた 10^7 回疲労限度は以下のようにまとめられる。これらの結果は許容応力度設計法による場合の、疲労荷重に対する強度保持率と考えることができる。

0.2 : GFRP

0.5 ~ 0.53 : CFRP

0.27 ~ 0.35 : CF/GFハイブリッドFRP

FRPの静的強さは積層構成によって変化し、一方向層の割合が多い程、その方向の静的強さが高くなる。一方、FRPの疲労限度は積層構成が変化しても静的強さほどの大きな変化を示さないことが一般に知られている。このことから静的強さが大きいFRPの方が、疲労限度/静的強さ比が小さくなると考えられる。本研究で使用したGFRPは、一方向層が84%と静的強さが比較的高いものであり、より静的強さの低いFRPでは疲労限度/静的強さ比はより高くなる可能性がある。また逆に、本研究で使用したCFRPは一方向層が8%と、静的強さが比較的低いタイプであり、積層構成が異なるより高強度の材料の場合には疲労限度/静的強さ比はより高くなる可能性がある。

4. 4. 2 文献における 10^7 回疲労限度

第3章と同様の理由により、疲労限度についても文献調査を行い、信頼性向上を図ることとした。表-4. 4に、文献で報告されている様々な種類のFRPの 10^7 回疲労限度を示す。表-4. 4から引張疲労に比べて曲げ疲労の方が疲労限度が小さいことが分かる。このことから、引張試験によるよりも、本研究のように曲げ試験により疲労特性を検討する方が、より安全側の検討となるものと考えられる。曲げ試験における 10^7 回疲労限度は、GFRPで0.15 ~ 0.32、CFRPで0.4 ~ 0.8であった。成型方法、マトリックス樹脂が異なるにも係わらず、本研究における試験結果はこれらの文献値の範囲内に納まっている。

一方、CF/GFハイブリッドFRPについては植村ら[67]の結果と相違している。植村らはハンドレイアップ成形のCF/GFハイブリッドFRPの曲げ疲

表-4. 5 文献と本研究のハイブリッドFRPの試験条件の相違

	本研究	植村ら [53]
成型法	引抜成形	ハンドレイアップ
マトリックス樹脂	VE	UP
Vf (%)	52	20.7-26.0
積層構成	CSM (GF) KFC (GF) UD (CF) KFC (GF) CSM (GF)	UD又はCloth (CF) CSM (GF) Cloth又はCSM (GF) CSM (GF) UD又はCloth (CF)
載荷方法	3点 片振り	4点 両振り
周波数	5 Hz	30 Hz

KFC: ニット・ファブリック・クロス

労試験を行い、対応するGFRPよりも劣る疲労限度を得ている。本研究における試験では引抜成形のCF/GFハイブリッドFRPを用い、GFRPよりも良い疲労限度となっている。この相違の原因の一つとしては、本試験で使用した3種類のFRPの層構成が、同じシリーズとして比較するには差がありすぎることがあげられる。またこの他にも、本研究と文献との間には、表-4. 5に示すように、成型方法、マトリックス樹脂、繊維含有率、載荷系、周波数などの点で差がある。

表-4. 5は文献と本研究のハイブリッドFRPの試験条件の相違を示している。本研究で用いたCF/GFハイブリッドFRPは建設用途を目的としたものである。剛性を効率的に向上させるためには炭素繊維をFRPの外側に配置すべきであるが、本研究では炭素繊維層を中間層に配置している。これはこのFRPは単に板材として使用されるためのものではなく、より大きな部材の一部として用いることを想定しているためである。建設材料として要求される、比較的低コストで済む層構成を採用している。片振りの載荷条件もこのような建設用途を想定した上で選択した。

4. 4. 3 文献における疲労に関する安全率

いくつかのハンドブックや指針類ではFRPの疲労に関する安全率(疲労荷重を考慮した場合に使用できる設計上の最大応力に対する静的強さの比)を制定している。「繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル」[54]は疲労荷重を受ける部材に対して、他の全ての因子も含めて、6~12の安全率を設定している。同マニュアルでは静的短期間荷重に対しては2~4、静的長期荷重に対しては3~6を設定している。疲労に関する因子単独についての安全率は2~3程度を

設定しているものと推定できる。"EUROCOMP Design Code" [55] は疲労に関する安全率として、1.5～3.0を設定している。これは前出の「繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル」とほぼ同じ程度の安全率となっている。

これらのマニュアルや基準に設定されている安全率は実験によって求められる値よりも小さいが、マニュアルや基準類の安全率は他の因子の係数とかけ合わせて最終的な安全率を設定する様になっているためと考えられる。文献における疲労に関する安全率はGFRPに対するものであるが、本研究で明らかのように、GFRPとCFRP、CF/GFハイブリッドFRPの疲労特性は異なるので、CFRPについてはより低い安全率を、CF/GFハイブリッドFRPについてはCFRPとGFRPの中間的な安全率を設定することが適切である。

4. 5 本章のまとめ

3点曲げ疲労試験を片振り5Hzで、土木構造用途を考慮して製作した引抜成形材（GFRP、CFRP、CF/GFハイブリッドFRP（中央層が炭素繊維）の3種類、マトリックスは全てビニルエステル樹脂）に対して行った。2種類の疲労破壊（剛性が初期値の0.8に低下した点及びたわみが10mmに達した点）を設定した。10⁷回疲労限度はGFRPで0.2、CFRPで0.5～0.53、CF/GFハイブリッドFRPでは0.27～0.35であった。疲労破壊点の差による10⁷回疲労限度への影響はさほど大きくなく、大きい場合でも0.1以下であった。周波数と温度の疲労限度に与える影響は本試験では顕著ではなかった。本試験から得られた、GFRPとCFRPの疲労限度は、文献で報告されている範囲内であった。一方、CF/GFハイブリッドFRPについては、相当するGFRPとの疲労限度との関係等の点で、文献と異なる結果が得られた部分があった。文献との相違は積層構成、成型方法、マトリックス樹脂、繊維含有率、載荷条件、周波数等の相違によると考えられる。許容応力度設計法による場合の、実験から求められる疲労に関する物性保持率は、10⁷回疲労限度の通りであり、GFRPで0.2、CFRPで0.5～0.53、CF/GFハイブリッドFRPでは0.27～0.35であった。

第5章 FRPケーブル材料の荷重条件下の屋外暴露による強度低下と物性保持率

5. 1 はじめに

炭素繊維やアラミド繊維などを用いた繊維強化プラスチック（FRP）ケーブルのプレストレストコンクリート（PC）緊張材への適用は、早い段階から検討されてきたが、グラウンドアンカーや鉄筋代替材料としても利用技術開発が進みつつある。PC緊張材としての用途では、既に基準類も整備され、強度保持率についても知見がまとめられている[5]。しかし、FRPケーブルの用途はPC緊張材としての用途だけでなく、吊橋用ケーブルや外ケーブル式PCを始め様々な用途が期待できる。また、PC緊張材としての適用に関する基準は整備されたものの、適用事例はグラウンドアンカーを含めても100数十であり、未だに試験的な採用に留まっている様にみられる。これはコスト効果の評価が十分になされていないことと併せて、耐久性が十分に評価されていないことが原因の一つと考えられる。

PC緊張材では、緊張条件でコンクリートの強いアルカリにさらされるため、耐アルカリ性が必要であり、FRPケーブルの耐アルカリ性には多くの研究がある（[37] [39] [40] [62]）。しかし、吊橋用ケーブルや外ケーブル式PCなどの、コンクリート構造物の塩害対策としての効果を評価するためには、海洋環境における屋外暴露試験を中心とした耐久性評価が必要である。このような研究例はいくつか報告されている（[60] [61]）が、まだ少ないのが現状である。

本章ではこのような観点から、FRPケーブルの置かれた環境とその時の変化に関するデータの収集を主目的として屋外暴露試験を実施し、強度保持率、リラクセーションなどの耐久性に関する検討を行った。

5. 2 FRPケーブルの暴露試験の概要

5. 2. 1 暴露試験の概要

FRPケーブルの暴露試験は1988年から行った。当初は、FRPケーブルや定着体も開発途上にあった。これら開発状況の進展、ならびに実験目的や評価項目の変遷により、暴露試験は3つのシリーズに分けられる。

表-5.1 使用材料と暴露試験シリーズによる試料名一覧

	繊維	カーボン	カーボン	アラミド	アラミド	アラミド	E-ガラス	ビニロン
	樹脂	エポキシ	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
暴露試験シリーズ	I	I-CFRP1	I-CFRP2	I-AFRP0	I-AFRP1			
	II	II-CFRP1	II-CFRP2		II-AFRP1	II-AFRP2	II-GFRP	II-VFRP
	III	III-CFRP1	III-CFRP2		III-AFRP1	III-AFRP2	III-GFRP	III-VFRP

(1) シリーズⅠ [56]

FRPケーブルの長期耐久性を調べるための暴露試験である。2種の炭素繊維強化プラスチック(CFRP)ケーブルと2種のアラミド繊維強化プラスチック(AFRP)ケーブルを用い、緊張応力をかけた状態で、海上と内陸の2カ所で大気中暴露試験を行った。1988年に開始し、1年7ヶ月で一部試験片を回収試験した。残りの試験片は10年を経過した現在も暴露試験継続中である。

(2) シリーズⅡ [57]

環境因子がFRPケーブルの耐久性に与える差を調べるために行った調査である。FRPケーブルを、海洋の大気中から海中部にかけて連続的に暴露することにより、劣化環境の差が劣化の度合いに与える影響を調査した。すべてのケーブルは無緊張で、2年間暴露した。FRP材料の劣化度調査手法として、外観調査、引張試験、赤外線分光分析等による分析を行っ

た。

(3) シリーズⅢ [58]

シリーズⅡで得られたFRPケーブルの劣化傾向を確認するために行った暴露試験である。FRPケーブルを、緊張荷重、直射光の有無、水浸状態などの劣化環境条件を変化させ、これらの条件がFRPケーブルの強度変化に与える影響を調べた。暴露試験は海洋環境において、試験条件により32ヶ月あるいは42ヶ月行った。

5. 2. 2 試験材料

一連の試験に用いたFRPケーブルは、7銘柄、延べ16種である。同一銘柄のケーブルであっても、その製造時期によって物性などが多少異なることも考えられる。そのため、本稿では表-5.1の試料名を用いた。各材料の諸元や物性はシリーズごとの各項で示す。

5. 3 暴露試験場

暴露試験は、静岡県駿河湾内海上の海洋技術総合研究施設—マリンステーションするがーと、茨城県つくば市の建設省土木研究所構内の2カ所で実施した。

5. 3. 1 海洋技術総合研究施設

海洋技術総合研究施設は静岡県駿河湾内海上に設置されたプラットフォーム型の施設である。海岸からはおよそ250mの海上に位置する。15m×15mの施設である。1983年に総合的な海洋技術研究のために設置され、様々な材料の海洋環境での耐久性と防食技術の研究が実施されている施設である。気候は温暖であるが、海上に設置されているため、海塩の影響を非常に強く受ける。3つのデッキがあり、一番上の第一デッキは、海面から13.9m、中間の第二デッキは8.9m、一番下の第三デッキは1.9mの高さにある。第三デッキは台風来襲などの場合には、高波の影響を受ける。

5. 3. 2 土木研究所

茨城県つくば市にある、土木研究所構内において材料暴露試験を行った。

5. 4 シリーズⅠ暴露試験

5. 4. 1 試験材料

2種類のCFRPケーブルと、2種類のAFRPケーブルを用いた。試験材料の主な諸元を表-5.2に示す。

5. 4. 2 試験体

FRPケーブルは同種類の3本を一組とし、図-

表-5.2 シリーズⅠに用いたFRPケーブルの主要諸元

	FRPの種類				鋼 (比較)	
	I-CFRP1	I-CFRP2	I-AFRP0	I-AFRP1	PC鋼線	PCより線
形状	ストランド	ロッド	ロッド	ロッド		
繊維種類	炭素繊維	炭素繊維	アラミド繊維	アラミド繊維		
マトリックス樹脂	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ		
繊維含有量(%)	65	65	65	65		
直径(mm)	12.4	8	8	8	7	12.4
単位重量(g/m)	144	76.9	64.5	65.1	302.2	729
密度(g/cm ³)	1.53	1.57	1.35	1.28	7.85	7.85
引張強度(kgf/mm ²)	126	186	159	147	165	175
[MPa]	[1240]	[1820]	[1560]	[1440]	[1620]	[1720]
破断荷重(kgf)	11800	9100	7600	7400	6350	16300
[kN]	[115.6]	[89.2]	[74.5]	[72.5]	[62.2]	[159.7]
弾性係数(kgf/mm ²)	10700	15150	8250	5570	20400	19800
[GPa]	[104.9]	[148.5]	[80.9]	[54.6]	[199.9]	[194.0]
破断歪み(%)	1.1	1.2	1.9	2.6	>4.5	6.5

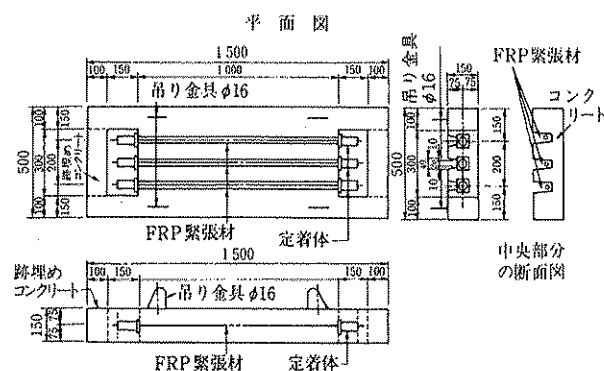


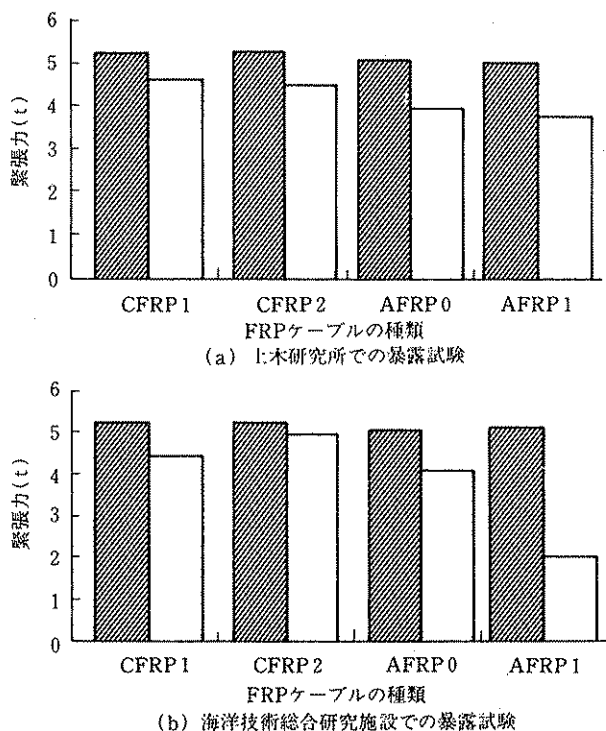
図-5.1 FRPケーブルの暴露方法 (シリーズⅠ)

5. 1に示す形状のコンクリート製試験体に3本づつ取り付けたものを暴露試験に用いた。FRPケーブルの暴露部分の長さは1.0mとした。定着体はCFRP 1には専用に設計されたFRP製のものを使用し、そのほかにはくさび形の同種のステンレスを用いた。初期緊張応力は1本のケーブルにつき5.0tf(49kN)を目標に油圧ジャッキとステンレス板を用いて導入した。FRPケーブル設置後、ケーブル破断時の安全性のため、ケーブルの先端部はコンクリートによって埋めた。1種類のFRPケーブルについて4つの試験体を製作し、2体ずつ、2カ所の暴露場所に設置した。

5. 4. 3 試験体の暴露

暴露試験は前述の2箇所で行われた。いずれの暴露環境も大気中と考えられるが、FRPケーブルはコンクリート製の試験体枠の比較的深い溝の中にあるため、直射日光はほとんど当たらない。雨や高波の場合には雨水または海水(海洋技術総合研究施設のみ)に濡れる。なお、海洋技術総合研究施設では第2デッキに暴露した。

暴露試験は1987年2月に開始し、半数の試験体は



初期緊張力/引張破断荷重		凡 例	
I-CFRP1	0.42		初期緊張力
I-CFRP2	0.55		残存緊張力
I-AFRP0	0.66		
I-AFRP1	0.68		

図-5. 2 試験結果(シリーズI)

1年7ヶ月後の1989年9月に回収し試験した。残りの半数の試験体は現在も暴露中である。

5. 4. 4 測定項目と方法

(1) 残存緊張応力

試験体を製作したときには1本のケーブルにつきおよそ5.0tf(49kN)の緊張力を導入したが、この緊張力の暴露後のリラクゼーションによる低下を測定することとした。回収した試験体の端部のコンクリートを切り取り、定着体に油圧ジャッキを取り付け緊張力を導入し、定着体が離れる時の荷重を測定して残存緊張応力とした。

(2) 引張試験

残存緊張応力を測定した後、回収したFRPケーブルについて、引張破断強度と引張弾性係数を測定した。弾性係数測定にはFRPケーブル表面に張り付けた歪みゲージを用いた。

5. 4. 5 結果

(1) 残存緊張応力

残存緊張応力の測定結果を図-5. 2に示す。暴露前の緊張応力はおおよそ5.0tf(49kN)であったが、多くのケーブルは1年7ヶ月後に初期値の75%を保持していた。残存緊張応力保持率は、CFRPケーブルでは80%~98%の範囲にあったが、AFRPケーブルでは75%~80%程度であり、CFRPの方がAFRPに比べて大きい傾向が認められた。海洋技術研究施設に暴露したI-AFRP1では、3本のうち2本のケーブルが部分的に破断し、残存緊張応力は初期値の30%に低下した。この破断はケーブルの根元で起きていることから、この破断はクリープ破断ではなく、定着体の問題である可能性がある。繊維やマトリックス樹脂の劣化が起きた可能性も考えられるが、次項で触れるように弾性係数に明確な変化が認められなかった。

本試験では、各ケーブルの耐荷重に係わらず、一律

表-5. 3 シリーズIIに用いたFRPケーブルの主要諸元

	II-CFRP1	II-CFRP2	II-AFRP1	II-AFRP2	II-GFRP	II-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	炭素繊維	炭素繊維	アラミド繊維	アラミド繊維	E-ガラス	ビニロン
マトリックス樹脂	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	65	65	65	65
直径(mm)	12.5	8.0	8.0	8.0	6.0	6.0
破断荷重(kgf)	16400	6580	5420	5730	4130	2060
[kN]	[160.7]	[64.5]	[53.1]	[56.2]	[40.5]	[20.2]
弾性係数(kgf/mm ²)	13334	15015	6440	4464	5392	3333
[GPa]	[130.7]	[147.1]	[63.1]	[43.7]	[52.8]	[32.7]

表-5. 4 熱分析の結果

	ガラス転移温度 (°C) (DSC: 示差走査熱量測定)		分解開始温度 (°C) (TG: 熱重量測定)	
	暴露試験前	暴露試験後	暴露試験前	暴露試験後
II-CFRP1 (Eポキシ樹脂)	132	133 (平均値)	-	-
II-CFRP2 (Eポキシ樹脂)	-	-	-	-
II-AFRP1 (ビニルエステル樹脂)	-	-	382.0	275~390 362.8 (平均値)
II-AFRP2 (Eポキシ樹脂)	73.3 (表面) 76.2 (内部)	91.0 (表面) 90.6 (内部)	-	-
II-GFRP (ビニルエステル樹脂)	132.2	126~163 142.8 (平均値)	-	-
II-VFRP (Eポキシ樹脂)	-	-	347.8	307.5

ス樹脂で結合した複合材料であり、その樹脂により各繊維に適切な応力伝達を行って所定の引張性能を発現している。このため、強化繊維の耐久性のみならず、マトリックス樹脂の劣化に注目することが重要である。本研究では、紫外線や水分等による樹脂の酸化や分解による化学構造変化を調べるために赤外分光分析 (FT-IR) を行い、また熱分析を行って樹脂の硬化等の物性変化を調査した。赤外吸収度は、試験材料の表面部と、1mmあるいは2mm削ってケーブル内

部の試料を採取して測定することにより、深さ方向の評価も行った。また、熱分析 (DSC) ではガラス転移温度や分解開始温度等の測定を行った。

5. 5. 3 試験結果

図-5. 3に示すように、II-CFRP2の全数、II-VFRPの2本中1本が破損流失してしまったほか、II-CFRP1の2本すべて、II-AFRP2の2本すべて、II-AFRP2の3本のうち1本が、試験期間中に破損し干満部より下部が流失してしまったため、これらの部分については評価不能であった。以下の試験結果は、回収できた試験片について行ったものである。

(1) 外観調査

回収した試験体の目視観察の結果、表面のマトリックス樹脂が分解散逸し、繊維分の多い粗な表面状態となっている試験体が多く見られた。

(2) 材料表面の性状変化

FRPケーブルのマトリックスに用いられるエポキシやビニルエステル樹脂などは、劣化により酸化や分解などの変化を生ずることがある。これらを調べるた

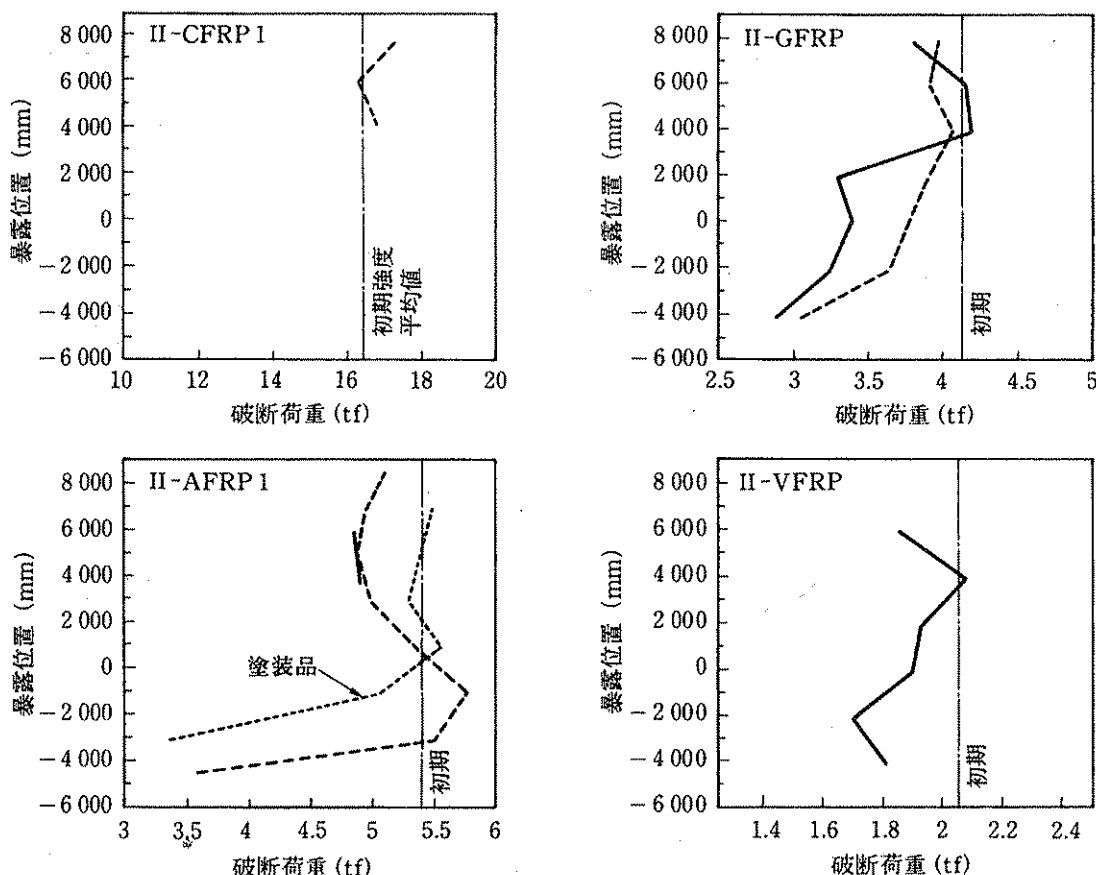


図-5. 7 暴露位置と引張強度の関係

注：暴露位置 0mm が水位(TP0)である。

めに赤外線吸収（IR）スペクトルを測定した。その結果、II-AFRP1では、干満部暴露材料で加水分解によるカルボニル基（C=O二重結合）の生成と推定される変化が見られた。この変化は水中などでは認められず、また繊維のみの劣化も認められなかったため、FRPを構成する樹脂が日光などにより劣化反応をおこしたものと考えられる。また、II-AFRP2でも材料表面部の試料で、C=Oの吸収が認められ（図-5.5および5.6）AFRPを構成する樹脂が日光により劣化しやすいことが判った。II-CFRP1、II-GFRPおよびII-VFRPの暴露前後のIRスペクトルには、特に変化が見られなかった。

熱分析の結果を表-5.4に示す。II-AFRP2のガラス転移温度が暴露前の試料に対して、ケーブルの表層で18℃、内部で14℃ほど高くなっており、樹脂の硬化が進んでいることが確かめられた。II-GFRPは気中部暴露の試料表面部分において、ガラス転移温度が暴露後にやや高くなる傾向が見られたが、それ以外の部分では変化がなかった。II-AFRP1とII-VFRPでは分解開始温度が、それぞれ20℃と40℃と低くなり、樹脂の分解が進んでいることが窺える。II-CFRP1については、今回の測定では変化が見られなかった。

(3) 引張強度試験

引張強度と鉛直方向の暴露位置の関係を図-5.7に示す。なお、長尺試験材両端の暴露された定着体を含む試験区分の一部（上下両端部の約1m分）は試験結果に含めていない。

引張試験における結果は一般にばらつきが大きく、今回の試験においては繰返し数が少ない（ $n=1$ ）ため定量的な判断は困難であるが、傾向として次のことが分かる。

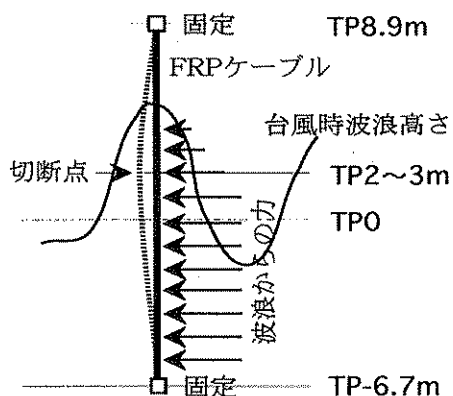


図-5.8 シリーズII供試体の中途切断の模式図

海中部において一様に引張強度の低下傾向が見られる。この原因としては2つの要因が考えられる。1つは、暴露試験材が長尺物（約15m）の一括設置であったため、特に水中部で集中的に波浪荷重がかかり、下端部に緩やかな曲げ疲労が生じたことである。また、繊維とマトリックス樹脂の界面への水分侵入による付着破壊による材料劣化なども考えられる。

II-AFRP1の表面被覆を施していない材料では、日光の当たる干満部以上で一定の強度低下が確認できた。これは紫外線劣化による可能性が高いと言える。

5.5.4 考察

シリーズIIの実海域暴露試験では、水中部で強度低下の傾向が見られたほか、塗装の有無による残存強度の差異も認められた。

材料の赤外分光分析による評価では、干満部より上の気中部での一部暴露材料において、材料の化学的な変化が見られた。熱分析の結果からは、多くの試料で気中部の表面部分を中心とした材料変化が見られた。このため、高分子系複合材料であるFRPケーブルについては、被覆状態や材料種類により紫外線劣化が問題となりうるということが分かった。

海中部の強度低下傾向については、波浪の力学的影響と水の浸透による劣化などが要因として考えられる

表-5.5 シリーズIIIに用いたFRPケーブルの主要諸元

	III-CFRP1	III-CFRP2	III-AFRP1	III-AFRP2	III-GFRP	III-VFRP
形状	ストランド	ロッド	ロッド	組み組	ロッド	ロッド
繊維種類	炭素繊維	炭素繊維	アラミド繊維	アラミド繊維	E-ガラス	ビニロン
マトリックス樹脂	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ	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
破断荷重(kN)	141	70.6	52.4	65.7	36.3	19.6
弾性係数(GPa)	145	168	55.6	62.1	52.9	28.6
定着方式	付着	くさび	付着	付着	付着	付着

表-5.6 シリーズIIIの暴露試験ケース（環境条件による区分）

環 境	直射光	緊張あり	緊張なし
海上大気部	あり	CASE-IVa	CASE-VIa
	なし	CASE-IVb	CASE-VIb
飛 沫 部	あり		
	なし	CASE-V	
海 中 部	なし		CASE-VII

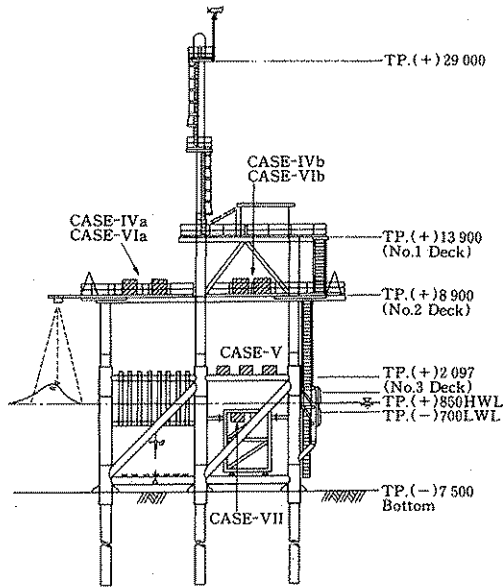


図-5.9 シリーズⅢの環境区分に応じた暴露設置場所

が、原因の特定はできなかった。

Ⅱ-CFRP1の2本、Ⅱ-AFRP1の1本、Ⅱ-AFRP2の2本の計5本のケーブルについては、いずれも海面から2～3mのところでは破断し、その上部のみが残っていた。これはこの位置でケーブルが折れて強度が低下し、破断して下部が水流により流されたものと推測できる。上部が残っているケーブルは、全てほぼ同じ位置より切れていることから、この位置で切断する力学的な理由があるものと考えられる。ケーブルの切断は、台風時の波浪による力学的な作用による。ケーブルは上端と下端を固定され、水中にある部分が波浪による力を、ケーブル軸と直角方向から受けていることとなる。図-5.8に模式図を示すこのときの波の高さは、第二デッキにも達することがあるが、高い位置にまで達する海水の量はさほど多くないため、最も大きな力がかかるのは、より低い位置であると考えられる。台風時に水中部における波浪から受ける力の分布は複雑で予測は困難であるが、多くのケーブルが2～3mの高さで折れているのは、この位置で、波によるケーブルの変形量が最も大きくなったことを示すものと考えられる。

5.6 シリーズⅢ暴露試験

5.6.1 試験材料

試験材料は、CFRP2種、AFRP2種、GFRP1種、VFRP1種の、計6種のケーブル材料を用

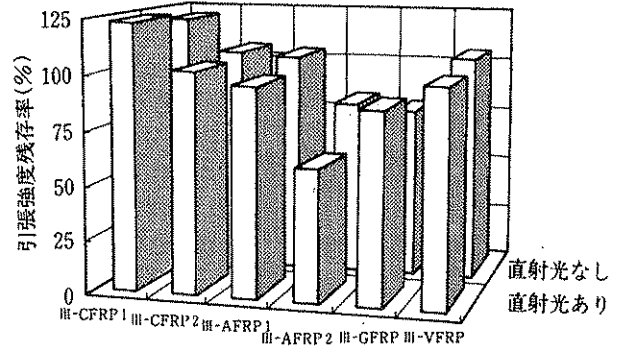


図-5.10 CASEⅥa・Ⅵbの無緊張暴露供試体の残存引張強度

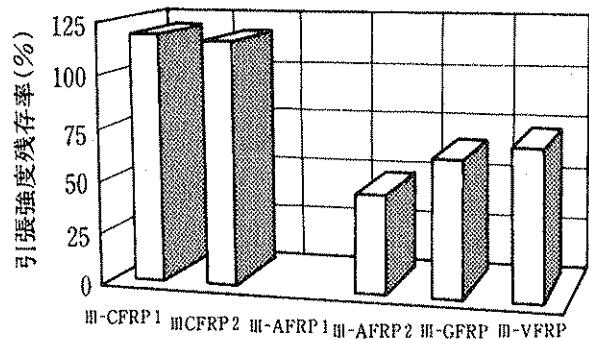


図-5.11 CASEⅦの水中における無緊張暴露試験後の残存引張強度

いた。種類と主な特性を表-5.5に示す。表中の引張強度および弾性係数は暴露試験開始時に実測したものであり、定着体を含めたケーブルシステムの強度である。定着体は、FRPケーブルの製造者が最適と考えるものを取り付けて評価試験を行った。

5.6.2 試験体の暴露

暴露試験は、海洋技術総合研究施設で行った。シリーズⅢはこれまでの試験で得られたFRPケーブルの劣化傾向を定量的に評価するための暴露試験である。直射光の有無や水中などの環境の差を生じさせるために、当試験施設の複数の場所を使用して暴露試験を行った。このためシリーズⅢは、その暴露環境により表-5.6および図-5.9に示すCASEⅣからCASEⅦに分けられる。なお、以下に述べるのはCASEⅤ以外の試験材料の半数を回収して評価を行った結果である。各試験条件あたりの試験体数は多い方が望ましく、土木学会の提案している試験法においては5本と規定されているが、暴露試験実施上の制約から2ないし3本で行った。暴露期間は、緊張供試体で42ヶ月、無緊張供試体では32ヶ月である。

緊張供試体は、ステンレス製のフレームに所定の緊

表-5. 7 本研究の結果と文献の比較 (いずれも無緊張供試体)

暴露環境	文 献	引張強度低下率		
		A FRP	C FRP	G FRP
内陸	魚本ら[41][60]	1種類 20% (6ヶ月) 30% (3年)	1種類 16% (3年)	1種類 19% (3年)
海上 (伊豆)	魚本ら[41][60]	1種類 32% (3年)	1種類 9% (3年)	1種類 1% (3年)
海上 (沖ノ島)	友沢ら[42][61]	3種類 1-9% (1年) 0-7% (3年)	7種類 0-5% (1年) 0-23% (3年)	2種類 0% (1年) 0-4% (3年)
海上 (直射光あり) (大井川沖)	本研究	2種類 4-50% (32ヶ月)	2種類 0% (32ヶ月)	1種類 12% (32ヶ月)
海上 (直射光無し) (大井川沖)	本研究	2種類 0-20% (32ヶ月)	2種類 0% (32ヶ月)	1種類 21% (32ヶ月)
海中 (大井川沖)	本研究	1種類 51% (42ヶ月)	2種類 0% (42ヶ月)	35% (42ヶ月)

張力を導入して試験材料を固定した。無緊張暴露供試体は2000mmの試験材料6種類1本ずつを1つのフレームに取り付けた。製作した試験材料は表-5. 6の暴露環境に所定の数量を設置した。

5. 6. 3 試験体の回収と評価試験方法

暴露試験によるFRPの性状変化は、外観調査、残存緊張力、引張強度および引張弾性率の各項目について行った。

回収した試験材料は、試験材料の色や表面の状態、ひび割れや傷の有無等について外観調査を行い、緊張下暴露供試体については、センターホールジャッキにより緊張解放を行って残存緊張応力の測定を行った。そして回収試験材の全数について引張破断試験を行って、引張強度と引張弾性係数を測定した。なお、緊張試験体は暴露試験に使用された定着体を利用し、無緊張試験体は暴露回収後に定着体を取り付けて試験した。引張試験は土木学会の「連続繊維補強材の試験方法(案)」[59]を参考に行った。試験材の定着間有効試験長は、各材料とも1000mmである。

5. 6. 4 試験結果

(1) 無緊張暴露試験体

FRPケーブルの耐久性における直射光の影響を評価するための暴露試験ケースである、CASE-VIa及びCASE-VIbの試験結果を図-5. 10に示す。Ⅲ-AFRP2とⅢ-GFRP以外の試験材料では初期強度に対する有意差は認められず、直射光の有無に関わらずいずれも初期強度を保持していた。Ⅲ-AFRP2は、回収試験体の引張り試験時に4本中3本が定着体抜けしたため、新たな定着体を再度取り付けて測定した。Ⅲ-GFRPの強度低下については、日光の影響があまり見られないことを考慮すると、素材の特性、特に海面からの蒸気や降雨によるものであると推測される。

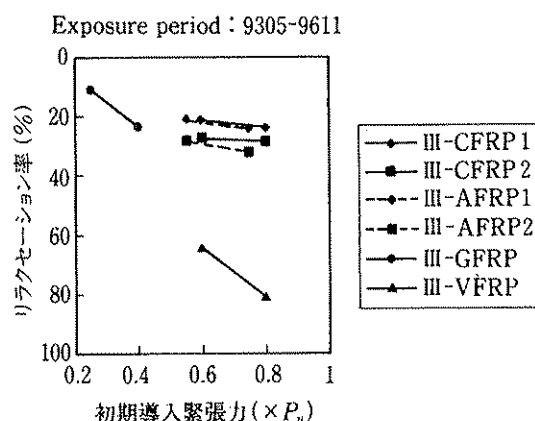


図-5. 12 暴露試験後のリラクゼーション率と緊張レベルの関係 (直射光あり)

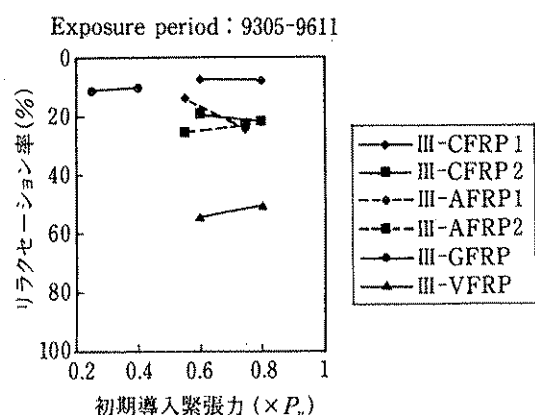


図-5. 13 暴露試験後のリラクゼーション率と緊張レベルの関係 (直射光なし)

海中に設置した試験材料CASE-VIIの残存引張り強度を図-5. 11に示す。CFRPケーブルについてはいずれも初期強度を保持していたが、Ⅲ-AFRP1は全数が暴露中に破損したため評価不能、Ⅲ-AFRP2、Ⅲ-GFRP、Ⅲ-VFRPについてはそれぞれ初期強度の49%、65%、71%に低下した。この理由としては、海水の浸透、生物付着の影響、波浪による曲げ疲労などにより、FRPの劣化(繊維と樹脂の微細な剥離の発生等)が考えられる。

FRPケーブルの屋外暴露試験は、魚本らによる試験[41][60]、友沢らによる試験結果[42][61]が報告されている。表-5. 7に、これらの試験結果と本研究の結果の比較を示す。表-5. 7ではばらつきや暴露中の硬化等により、強度が初期よりも高い場合には、低下率を0%と表している。魚本らは1種類のCFRPケーブルの試験で9~16%の引張強度低下を報告している。また友沢らの試験結果では、7種類のCFRPケーブルうち、4種類には強度低下が見ら

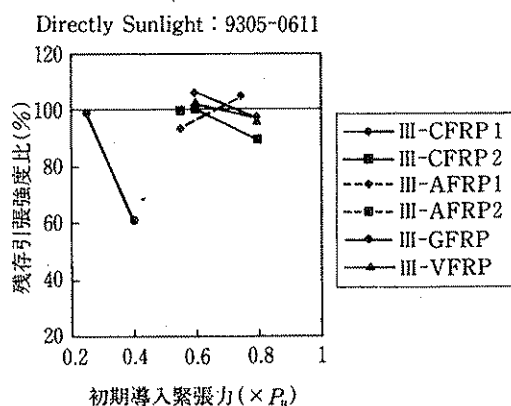


図-5. 14 暴露試験後の残存引張強度比と緊張レベルの関係 (直射光あり)

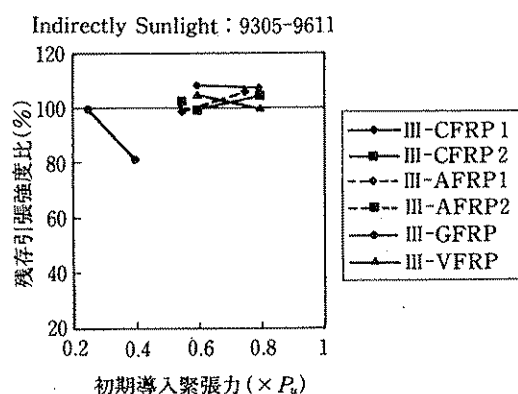


図-5. 15 暴露試験後の残存引張強度比と緊張レベルの関係 (直射光なし)

れないが、3種類は3年間で5, 15, 23%の強度低下を示している。本研究ではCFRPケーブルに強度低下は認められなかったが、条件・材料によっては低下する可能性があるものと考えられる。

一方、AFRPケーブルについては、魚本らは1種類について試験し3年で30~32%の引張強度低下を報告している。本研究では低下率の大きい場合のAFRPの値(直射光ありで50%、無しで20%)に近かった。友沢らは3種類のAFRPケーブルの強度低下は3年目においても7%とわずかであったと報告している。

AFRPケーブルについては、材料の種類によって耐久性に差があると考えられる。宮川[39]、Nanni[37]らは、AFRPの場合には、アルカリや水中での浸せき試験で、引張強度の変化が見られなかったと報告している。一方、Takewaka[40]が50℃のアルカリ溶液中で6000時間で初期の0.7になったデータを示し、また、建設省土木研究所橋梁研究室ほか[62]はアルカリ溶液中にて2年間で初期の0.8になっ

たデータを示している。これらの文献では、材料によっては強度低下のないAFRPもあることを報告している。このように、FRPは繊維および樹脂の組合せによって耐久性が異なり、AFRPということと同様の特性を有する材料として評価するのが困難な場合がある。

(2) 緊張試験体

緊張状態で暴露試験供試体について、初期導入荷重と42ヶ月後の残存緊張荷重の比で求めた実暴露後のリラクセーション率を、直射光の有無に応じてそれぞれ図-5. 12、5. 13に示す。

CFRP及びAFRPの4種は、III-CFRP1の直射光なしを除いて、リラクセーション率がおおむね20%程度であり、30%以内には全ての供試体が納まっていた。III-CFRP1は、直射光の有無により、リラクセーション率に10%程度の差が生じた。この要因としては、日射による試験体の温度履歴と、紫外線による材料劣化の、2つが考えられる。III-VFRPについては、残存緊張力が初期の半分以下であった。

暴露試験後の引張破断強度を図-5. 14、5. 15に示す。残存引張強度は、III-GFRPの0.4 P_u の場合を除いて、暴露前の引張強度を満足に保持していた。GFRPは、常時緊張応力が作用する状態の利用は、強度が低下する可能性があるため、初期導入緊張力は破断強度のおよそ20~30%程度が限界であると推測できる。

III-AFRP2は、無緊張暴露において強度低下が確認されているにもかかわらず、緊張下暴露においては強度の変化が見られなかった。III-AFRP2は組み紐状のFRPケーブルであるが、宮川ら[39]は、同様の組み紐状のAFRPケーブルの浸せき試験で、プレテンション荷重の高い場合の方が劣化が少ない傾向になることを報告している。これらの理由としては、組み紐構造であるために棒材が絞られ、繊維間の距離が縮まったためと説明されており、本実験結果においても同様に説明できるものと考えられる。

5. 6. 5 シリーズIIIのまとめ

(1) 無緊張試験体

海中でのAFRPの暴露試験に供した1種類の材料については残存強度が初期の約半分になり、他のものは全数破損のため評価不能であった。同様に、GFRPケーブルおよびVFRPケーブルについても大きな強度低下が確認された。一方CFRPには強度低下は認められなかった。

(2) 緊張試験体

CFRP及びAFRPのケーブルは、今回試験に用いた材料では、42ヶ月暴露におけるリラクセーション率は、0.8Puと初期緊張応力が高い場合でも30%以内であり、引張強度も初期状態を保持していた。CFRPの一つでは、直射光の有無により、リラクセーション率に10%程度の差が生じることが認められた。残存引張強度への直射光有無の影響は、導入緊張力にかかわらず観察されなかった。

GFRPケーブルは緊張レベルが高い場合の強度低下が大きく、緊張用材料としての問題点が確認できた。強度低下を起こさない応力限度は、強さの0.25程度であった。VFRPケーブルは大きなリラクセーションが見られ、引張弾性係数が鋼材に比べて非常に小さいことと併せて、特殊な使用法に限られるであろうと推察される。

5. 7 本章のまとめ

5. 7. 1 CFRP

(1) リラクセーション

①CFRPケーブルのリラクセーション率(定着部も含む見かけのリラクセーション率)は以下の通り。

- ・シリーズⅠ：2%～20% (1年7ヶ月)
- ・シリーズⅢで8%～30% (3年6ヶ月)

②リラクセーション率は材料による差異が大きく認められ、同種のCFRPでもシリーズⅠとⅢでは、製造時期による差が認められた。

③環境条件の影響については、シリーズⅢで直射光を受ける環境の方が直射光を受けない場合よりもリラクセーション率が大きくなる傾向が認められた。本試験におけるリラクセーション率の最大値は、実用上比較的大きな値と考えられるため、材料と定着方法の良好な設計が望まれる。

④緊張荷重レベルに関しては、シリーズⅢでGFRPを除き初期緊張力を0.6Puと0.8Puの2段階に設定したが、リラクセーション率への影響はほとんど見られなかった。

(2) 残存引張強度

①CFRPケーブルの残存引張強度は、シリーズⅠ、Ⅱ、Ⅲを通して、回収および試験したものについては、緊張力の有無にかかわらず強度低下は認められなかった。

②赤外吸光等の化学分析の結果(シリーズⅡ)では、マトリックス樹脂等の材料変化は見られなかった。

③最も厳しい条件は、0.8Puの緊張条件において直射

光下で3年6ヶ月暴露したものであり、CFRPケーブルの耐久性の高さが認識できる。本研究の結果からCFRPケーブルの強度保持率は1.0、強度低下を起こさない応力限度は0.8Puとすることができる。

5. 7. 2 AFRP

(1) リラクセーション

①AFRPケーブルのリラクセーション率は以下の通り。

- ・シリーズⅠで20%～25% (1年7ヶ月)
- ・シリーズⅢで10%～30% (3年6ヶ月)

②AFRPケーブルのリラクセーション特性は、CFRPケーブルとほぼ同様であり、材料による差や、直射光を受ける環境の方が直射光を受けない場合よりもリラクセーション率が大きくなる傾向も認められた。

③初期緊張力(最大0.8Pu)の差がリラクセーション率へ与える影響はほとんど見られなかった。

(2) 残存引張強度

①以下の劣化事例が認められた。

・緊張力のないもので残存引張強度が低下している事例(シリーズⅢ)

・暴露中の破断(0.66Pu)事例(シリーズⅠ(暴露中破断は定着体の不適の可能性が高い))

・海中部での強度低下事例(シリーズⅡ)

・赤外分光分析による樹脂表面の劣化事例(シリーズⅡ)

②上記のシリーズⅢの無緊張暴露試験の結果は、AFRPケーブルは苛酷な環境では残存引張強度が低下する可能性があることを示している。

③AFRPの強度低下率は0.6～1.0であり、強度低下を生じない緊張応力の限度は0.66Pu程度と考えられる。

④シリーズⅢの暴露環境は、プレストレストコンクリートの緊張材料として用いるうえではかけ離れた特殊な環境であるが、AFRPケーブルの適用にあたっては適切な材料および定着体の選定と安全率の設定が望ましいと考えられる。

5. 7. 3 GFRP及びVFRPケーブル

①海中部における無緊張暴露試験では、大きな強度低下(0.6～0.8)が見られた。(シリーズⅢ)

②緊張状態における暴露試験では、GFRPケーブルは緊張レベルが高い場合の強度低下が大きく、安全に使える範囲は0.25Pu以下であった。(シリーズⅢ)

③VFRPケーブルでは大きなリラクセーションが見られ、引張弾性係数が鋼材に比べて非常に小さいこと

と併せて、特殊な使用法に限られるであろうと推察される。

第6章 土木構造用FRP保護のための塗装材料

6.1 はじめに

道路や橋梁をはじめとする土木構造物は、長期間にわたり社会基盤としての機能を発揮する必要がある。土木構造物を構築する主要材料である鋼材やコンクリートは、塩分の作用により腐食する。腐食は土木構造物の短寿命化の原因となる。日本は海に囲まれており、また山地が多いため、沿岸構造物が多い。したがって土木構造物の腐食対策は重要であり、様々な方法が検討されている。

FRPは塩分に対する耐食性に優れており、鋼材の様な腐食がないことから、新しい腐食対策として、土木構造物に導入するための研究が注目されている[64]。例えば、FRP橋梁の建設事例は、世界で既に40橋を越えている[65]。

2000年3月に日本初の本格的なFRP歩道橋が、沖縄で建設された[66]。沖縄は北陸から北海道の日本海沿岸地域と並び、日本でも有数の腐食環境の厳しい地域とされている[67]。このFRP歩道橋の建設では、沖縄の厳しい環境条件からの、主要構造材料であるFRPの保護方法が重要な課題の一つであった。前述のようにFRPは腐食しないが、第3章で述べたように水・日光等により劣化する場合があるためである。特に沖縄は紫外線が強いことから、FRPには十分な耐候性が必要であった。また、海浜に近いことから、海砂による摩耗の防止対策も同時に求められた[68]、[69]が、FRPの砂による耐摩耗性のデータは少ない。

FRPの劣化対策として塗装が有効であることは、第3章で明らかとなっている。また、土木構造物の美観向上の観点からも、FRPへの塗装が必要である。しかし、塗装自体の早期劣化が認められる事例もある[28]、[70]。

鋼材やコンクリートでできた土木構造物に用いられる塗料の基準類[71]が整備されているのに比べ、FRP製土木構造物用塗装の性能評価は不十分であり、基準類もない。そこで本章では、土木構造用FRP保護のための塗装材料に求められる性能を検討するとともに、FRP用塗装仕様の検討、試験による性能評価、塗装仕様の提案を行った。

表-6.1 FRP製歩道橋の環境要因と必要な性能(評価項目)

環境要因	必要な性能
飛来塩分による腐食	耐候性
強い紫外線(日光)	
高温多湿(海洋環境)	
強風、飛砂による摩耗	耐摩耗性

表-6.2 試験に使用したFRP板

記号	FRP板の種類	ゲルコート材料の種類
S-F	ゲルコート付きハンドレイアップ成形FRP板	塗装下地用ゲルコート(三井化学製エスター-SFG-3001)
S-SG	ゲルコート付きハンドレイアップ成形FRP板	高耐候性ゲルコート(昭和高分子製リゴラックG-20T)
S-IG	ゲルコート付きハンドレイアップ成形FRP板(繊維補強ゲルコート)	高耐候性ゲルコート(昭和高分子製リゴラックRG-20T) ゲルコート補強繊維(シンコー工業製 糸0.777#71)

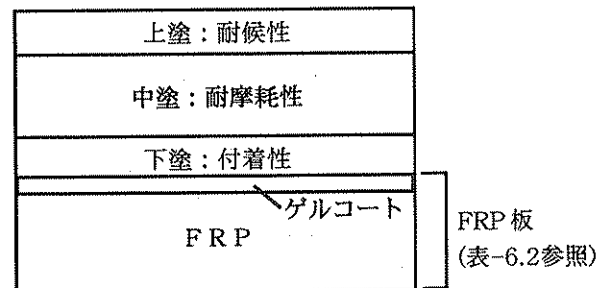


図-6.1 FRP用塗装系の考え方

6.2 FRP製土木構造物用塗装に求められる性能

FRP製土木構造物用塗装に求められる性能を、実際の構造物を事例として検討した。FRPの最大のメリットの一つは耐塩害性であり、このメリットを活かした適用事例として、沖縄県内の海洋環境に建設されたFRP製歩道橋(2径間連続FRP桁橋、橋長37.7m)[68][69]を選択した。この橋梁は主桁がハンドレイアップ成型FRP、対傾構および床版は引抜成形FRPで構成されている。このFRPの環境要因および必要な性能を検討した結果を表-6.1にまとめた。亜熱帯であり直射日光が厳しく、気温も高いことから、耐候性に優れている必要がある。また、海岸(砂浜)に面していることと、台風の襲来による強風のため、飛砂による耐摩耗性が懸念された。耐摩耗性は必ずしも必要ではない場合もあるが、本事例のように砂浜で季節風の強い環境では必要となる場合がある。この他に塗膜の基本性能として、FRPとの付着性についても検討を行うこととした。

6.3 実験

表-6. 3 塗装仕様の詳細

記号	塗料名	塗装仕様	膜厚 (μm)	特 徴
A1	無溶剤ウレタン樹脂塗料 (4工程)	下塗: 付着促進剤 中塗: 無溶剤ウレタン樹脂 上塗: 無溶剤ウレタン 上塗: 無溶剤ウレタン	- 4,000 60 60	中塗りは柔軟性、弾性があり、耐摩耗性に優れる。上塗りは耐候性、柔軟性に優れる。
A2	無溶剤ウレタン樹脂塗料 (3工程)	下塗: 付着促進剤 中塗: 無溶剤ウレタン樹脂 上塗: 無溶剤ウレタン	- 3,000 120	中塗りは柔軟性、弾性があり、耐摩耗性に優れる。上塗りは耐候性、柔軟性に優れる。
A3	ウレタンエラストマー～ 柔軟形ふっ素樹脂塗料	下塗: プライマー 中塗: ウレタンエラストマー 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料	50 2,000 30	中塗りは柔軟性、弾性があり、耐摩耗性に優れる。上塗りは耐候性、柔軟性に優れる。
A4	ウレタン化エポキシ樹脂～ 柔軟型ふっ素樹脂(2回塗り)	下塗: なし 中塗: 柔軟形ウレタン化エポキシ樹脂塗料 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料	160 25 25	中塗りは柔軟性、弾性があり、耐摩耗性に優れる。上塗りは耐候性、柔軟性に優れる。
B1	ガラスフレーク入りビニルエス テル樹脂塗料	下塗: ビニルエステル樹脂 上塗: ビニルエステル樹脂がラスフレーク	150 350	下塗り、上塗り共に硬度が高く、耐摩耗性に優れる。また、上塗りの膜厚が厚い。
B2	ガラスフレーク入りビニルエス テル樹脂塗料～ ふっ素樹脂塗料	下塗: ビニルエステル樹脂 中塗: ビニルエステル樹脂がラスフレーク 中塗: ふっ素樹脂塗料用 上塗: ふっ素樹脂塗料上塗り	150 350 30 25	硬度の高い中塗りに、耐候性に優れた上塗りを組み合わせた仕様。
B3	ガラスフレーク入りビニルエス テル樹脂塗料～ 柔軟形ふっ素樹脂塗料	下塗: プライマー 中塗: ビニルエステル樹脂がラスフレーク塗料 中塗: ビニルエステル樹脂がラスフレーク塗料 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料	50 500 500 30 30	硬度の高い中塗りに、耐候性・優れた柔軟型上塗りを組み合わせた仕様。
C1	柔軟形エポキシ樹脂塗料～ 柔軟形ふっ素樹脂塗料	下塗: プライマー 中塗: 柔軟形エポキシ樹脂塗料 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料	- 120 25	中塗り・上塗り共に柔軟型の塗装仕様。上塗りは耐候性に優れる。
C2	柔軟形エポキシ樹脂塗料～ 柔軟形ふっ素樹脂塗料(2回塗り)	下塗: プライマー 中塗: 柔軟形エポキシ樹脂塗料 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料	- 120 25 25	C1の上塗りを2層とし、より、耐摩耗性を向上させた仕様。
C3	柔軟形ふっ素樹脂塗装上塗り (3回塗り)	上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料 上塗: 柔軟形ふっ素樹脂塗料	25 25 25	柔軟型のふっ素樹脂上塗りのみを3層にわたり塗り重ねた仕様。
D1	ウレタン樹脂塗料 ～ふっ素樹脂塗料(2回塗り)	下塗: ウレタン樹脂プライマー 上塗: ふっ素樹脂塗料 上塗: ふっ素樹脂塗料	35 25 25	プライマーにウレタン樹脂を使用。FRPボートで実績のある仕様。
D2	エポキシ樹脂塗料 ～ふっ素樹脂塗料(2回塗り)	下塗: エポキシ樹脂プライマー 上塗: ふっ素樹脂塗料 上塗: ふっ素樹脂塗料	60 25 25	プライマーに接着性の高いエポキシを使用。上塗りは耐候性に優れる。中近東砂漠で実績あり。
D3	エポキシ樹脂塗料 ～厚膜型ウレタン樹脂塗料(2回塗り)	下塗: エポキシ樹脂プライマー 上塗: 厚膜型ウレタン樹脂塗料 上塗: 厚膜型ウレタン樹脂塗料	60 50 50	D2の上塗りをウレタン樹脂系としたもの。鋼構造物で実績多い。
S-P	ポリウレタン樹脂塗料 (3回塗り)	上塗: ポリウレタン樹脂塗料 上塗: ポリウレタン樹脂塗料 上塗: ポリウレタン樹脂塗料	25 25 25	標準的なポリウレタン系上塗り

前節の結果よりFRP用塗膜の供試体を作成し、耐候性、耐摩耗性の他、塗膜として必要な一般性能として、付着性、光学性能、硬度を調べることにした。またこれらの性能の変化と塗膜の化学的劣化の関連を調べるために、示差走査熱量と赤外線スペクトルの測定を行った。

6. 3. 1 供試体

検討対象とした事例の主桁がハンドレイアップ成型法によっていたため、ハンドレイアップ成型法により供試体を製作した。積層用樹脂はビニルエステル樹脂（昭和高分子製「リゴラック158BQT」）である。このFRP板から機械加工により、70×150mmのFRP小片を切りだした。表-6.2に示す様に3種類のゲルコート（ハンドレイアップ成形の際に型の内面（完成時に最外層となる）にあらかじめ塗布する保護用の樹脂層）を使用した。表-6.2のS-Fは塗装下地用のゲルコートである。S-FのFRP小片に塗装を施したものを供試体とした。また、表-6.2のS-SGとS-IGは高耐候性のゲルコートである。ゲルコートの性能を塗料と比較するために、表-6.2の3種類の無塗装FRP小片を、無塗装のまま供試体に加えた。FRP小片の塗装は、溶剤で脱脂し、サンドペーパーで表面を目粗しした後にいった。

塗装仕様の詳細を表-6.3に示す。塗装仕様は耐候性と耐摩耗性を両立させるため、耐摩耗性に優れた中塗り、耐候性に優れた上塗りの組み合わせを基本とした（図-6.1）。下塗りは素地のFRP（ゲルコート）と中塗りを付着させる役割をもつ。表-6.3のA1からA4には、中塗りにゴム弾性を持つ厚い塗膜を用いた。弾性の高い塗膜で砂による衝撃エネルギーを吸収して、耐摩耗性を得ようとするものである。上塗りにも柔軟性がある。B1からB3はガラスフレーク入りの硬い中塗りで、Aシリーズとは逆に塗膜の硬度を高めて耐摩耗性を得ようとしている。B1は上塗りも硬い塗膜で、上塗りにも耐摩耗性を付加させる可能性を検討する。B2は通常型の高耐候性上塗り、B3は柔軟型の高耐候性上塗りと組み合わせている。C1からC3は柔軟な中塗りであるが、Aシリーズのようなゴム弾性は保有していない。D1からD3は中東の砂漠地帯の鋼構造物で使用事例のある塗装仕様で、柔軟性のある上塗り塗料である。FRPにはガラス繊維が含まれていることから、ある程度の耐摩耗性を持つと予想し、中塗りを省略している。S-Pは標準的なポリウレタン樹脂上塗り塗料であり、比較対象供試体とした。供試体は1種類につき9枚製作し

た。また、摩耗した層の判別を容易にするため、各層毎に異なる色を使用した。

6. 3. 2 試験方法

(1) 落砂耐摩耗性試験

供試体を気温23℃、相対湿度50%の恒温恒湿槽に10日間静置し恒量にした後に、供試体の重量を計測した。次に、ASTM D-968に準拠して落砂耐摩耗試験を行った。940mmの高さから試験砂を供試体に落として、供試体の耐摩耗性を評価する試験方法である。試験砂には沖縄県の海浜から採取した海砂200kgを使用した。1種類の塗装仕様につき3枚の供試体を用い、各供試体に一回づつ、200kg分の試験砂を使用した。落砂試験終了後、供試体に付着した試験砂を洗い落とし、気温23℃、相対湿度50%の恒温恒湿槽に10日間静置し恒量にした後、供試体の重量を計測した。落砂耐摩耗性試験前の重量との差から、重量減少量を算出し、3枚の供試体の平均値を摩耗量とした。また、摩耗部分の状況を目視観察した。なお、塗装仕様による膜厚の差が大きく、塗膜重量も大きく異なる。重量変化率で評価すると同じ材料でも膜厚が異なると値が変わってしまうなど、材料の評価が難しいため、重量変化量（摩耗量）で評価する事とした。

(2) 付着性試験

付着性に関する試験は、JIS K 5600-5-7に準拠したプルオフ法付着性試験と、JIS K 5600-5-6に準拠したクロスカット法付着性試験を行った。プルオフ法付着性試験では、直径20mmの円筒状の治具を塗膜表面に接着し、垂直方向に引張力を加えて破壊させ、破壊強さと破壊性状を調べた。クロスカット法付着性試験は、工具で塗膜表面に基盤目状の切り込みを入れ、切り込み面に付着テープを貼り付け、このテープを引き剥がした時の塗膜表面の状況により付着性を評価する方法である。付着性試験には供試体を1枚使用した。

(3) 光学性能試験

光学性能試験は、供試体表面の60度鏡面光沢度と色彩を計測した。60度鏡面光沢度は、JIS K 5600-4-7に準拠して測定した。色彩は、JIS K 5600-4-5に準拠し、色彩計（ミノルタ製CR-200型）を用いて（L*, a*, b*）を測定した。5枚の供試体について測定し、平均値を求めた。

(4) 耐候性試験

前項で光学性能試験を行った5枚の供試体について、JIS K 5400 9.8.2に準拠して、キセノンアーク灯

式耐候性試験機を用いた促進耐候性試験を行った。試験時間は1000時間とした。照射した光エネルギーの総量は $72\text{MJ}/\text{m}^2$ (300～400nm)である。

耐候性試験後に、前項と同様の方法により光学性能試験を行い、耐候性試験前後の60度鏡面光沢度と色彩の変化(色差 ΔE^*_{ab})を調べた。さらに、耐候性試験を行った供試体のうち、3枚について落砂耐摩耗性試験を、1枚について付着性試験を行い、耐候性試験前後の変化を調べた。

(5) 引っかかり硬度

耐候性試験前後の上塗りの劣化と耐摩耗性の変化の関連を調べるために、引っかかり硬度試験(鉛筆法)をJIS K 5600-5-4に準拠して行った。

(6) 示差走査熱量測定(DSC)

耐候性試験前後の上塗りの劣化と耐摩耗性の変化の関連を調べるために、いくつかの供試体について示差走査熱量測定(DSC)を実施した。供試体表面の上塗り層から鋭利なナイフで表面層を削り取り、粉碎した試料をアルミニウム製オープンパンに約5mg入れ、 -50°C から 260°C まで昇温速度 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ で測定し、JIS K 7121に準拠してガラス転移温度を求めた。参照試料にはアルミナを用い、窒素ガス下で測定した。測定装置はセイコーインスツルメンツ(株)製DSC6200型を使用した。

(7) 赤外線スペクトル(IRスペクトル)

耐候性試験前後の上塗りの劣化と耐摩耗性の変化の関連を調べるために、いくつかの供試体について、赤外線スペクトル(IRスペクトル)を測定した。供試体表面の上塗り層から鋭利なナイフで表面層を削り取り、乳鉢で粉碎し試料とした。測定はKBr(臭化カリウム)錠剤成型法により、フーリエ変換赤外線分光光度計(パーキンエルマー製Spectrum One)を用いて行った。測定装置にはを用い、測定波数は $4000\sim 450\text{cm}^{-1}$ 、積算回数は16回とした。

(8) 検定

落砂耐摩耗性試験では、耐候性試験前後の摩耗量の結果の有意差の有無を、t検定(両側検定、有意水準5%)により調べた。

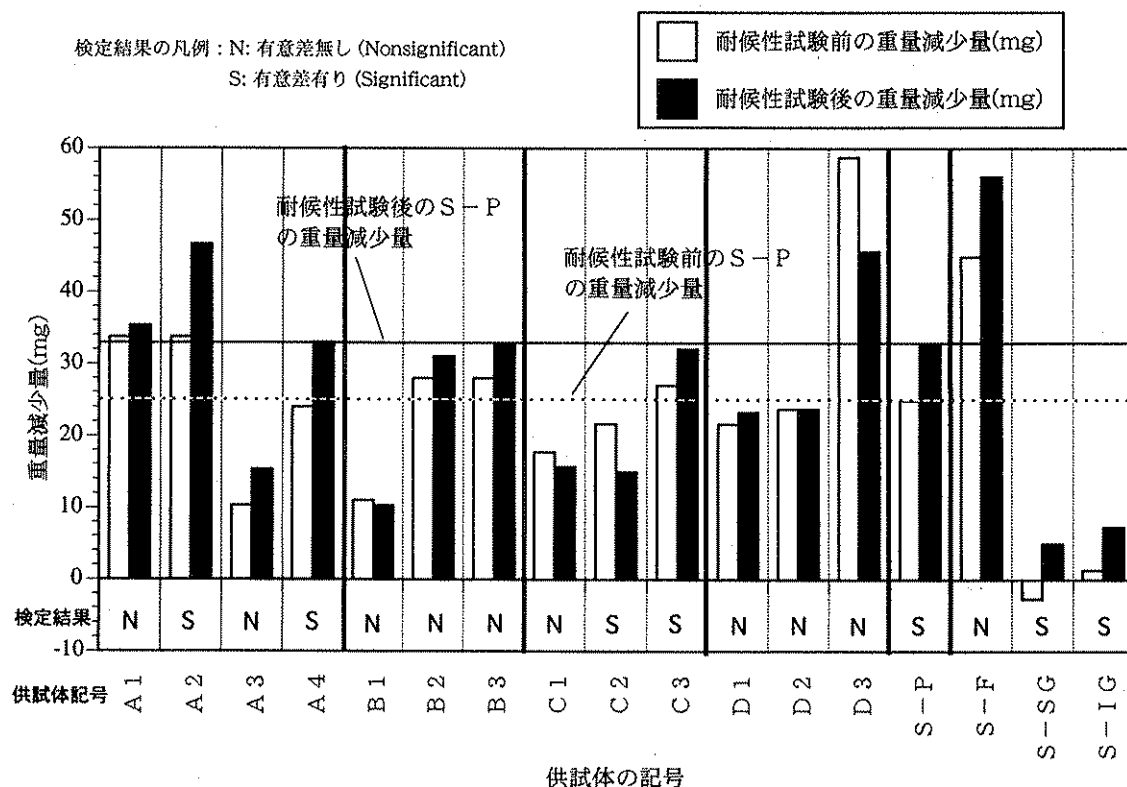
6. 4 結果

6. 4. 1 落砂耐摩耗性試験

(1) 耐候性試験前の結果

試験結果を図-6. 2に示す。耐候性試験を行わなかった供試体については、以下のことが明らかになった。

a) D3(FRPエポキシ樹脂塗料下塗+厚膜ポリウレタン樹脂塗料上塗)は、S-P(標準仕様、ポリウレタ



ン樹脂塗料上塗り3回塗) に比べ
 摩耗量が多かった。

b) ほぼ全ての供試体で、耐候性に優れたふっ素樹脂系・ポリウレタン樹脂系上塗り塗膜は摩耗し、中塗りが露出していた。これらの供試体の上塗りには耐摩耗性はあまり期待できず、S-P(標準仕様) とほぼ同程度であると考えられる。B1(上塗りが硬いガラスフレーク入り塗料) は、S-P(標準仕様) に比べ摩耗量が少なかった。上塗りが薄いもの(A3(上塗り30 μ m)、C1(上塗り25 μ m)) では、摩耗量が10~18mgと、比較的摩耗量が少なかった。上塗りが薄い塗装系で摩耗量が少なかったことから、これらで使用した中塗りの耐摩耗性が発揮されていることが確認できた。

c) S-F(塗膜下地用ゲルコート) を施した供試体はS-Pよりも摩耗量が大きかったが、S-SGおよびS-IG(高耐候性ゲルコート) を施した供試体は、重量変化量が非常に少なく、高耐候性ゲルコートの耐摩耗性が塗料に比べ優れていることが分かった。

(2) 耐候性試験後の結果

a) 耐候性試験後の耐摩耗性試験結果が、耐候性試験前に比べて検定で有意差が認められたものは7種類であった。このうちS-Pを含む6種類は摩耗量が増加しており、1種類(C2)は磨耗量が減少した。
 b) D3(耐候性試験前の落砂耐摩耗性試験で摩耗量が多かった仕様)の耐候性試験後の耐摩耗性試験結果は、S-Pに比べ摩耗量が多かった。また、A2もD3と同程度の摩耗量を示した。
 c) 耐候性試験前の落砂耐摩耗性試験で摩耗量が比較的少なかった仕様(A3, B1, C1)は、耐候性試験後も比較的摩耗量が少なかった。また、C2もこれらと同程度の摩耗量となった。

表-6. 4 引っかかり硬度及びDSCの結果

供試体の記号	引っかかり硬度 (鉛筆法)		ガラス転移温度 (°C)	
	耐候性試験前	耐候性試験後	耐候性試験前	耐候性試験後
A1	6B	6B		
A2	B	B		
A3	3B	3B		
A4	6B	6B		
B1	4H	5H		
B2	H	H	38.2	39.7
B3	HB	HB		
C1	3B	3B		
C2	B	B		
C3	F	F		
D1	2H	2H		
D2	2H	2H		
D3	2H	2H	46.4	46.7
S-P	2H	2H	50.5	47.3

表-6. 5 付着性試験の結果

供試体の記号	プルオフ法				クロスカット法	
	耐候性試験前		耐候性試験後		耐候性試験前	耐候性試験後
	σ /MPa	塗料とゲルコート間の剥離	σ /MPa	塗料とゲルコート間の剥離		
A1	7<	○	7<	○	○	○
A2	6.9	×	3.8	×	○	○
A3	3.2	○	3.0	○	○	○
A4	3.8	○	4.0	○	○	○
B1	3.8	○	2.0	○	○	○
B2	3.5	○	3.2	○	×	×
B3	1.9	○	1.5	○	×	×
C1	6.0	○	3.3	○	○	○
C2	5.4	○	3.2	○	○	○
C3	2.2	○	1.8	○	○	×
D1	2.1	×	2.0	○	×	×
D2	2.1	×	3.0	○	○	×
D3	3.3	○	3.3	○	○	×
S-P	3.8	○	2.8	○	×	×
S-F	4.2	○	2.2	○	○	○
S-SG	3.2	○	3.0	○	○	○
S-IG	1.3	○	1.6	○	○	×

クロスカット法の凡例

×: グレード2~5 (剥離程度が高い)

○: グレード0~1 (剥離程度が低い)

d) その他の塗装供試体は、いずれもS-P(標準仕様) と同程度の摩耗量であった。

e) S-F(塗膜下地用ゲルコート) を施した供試体は、摩耗量が大きかったが、S-SGおよびS-IG(高耐候性ゲルコート) を施した供試体は、耐候性試験後も優れた耐摩耗性を示した。

6. 4. 2 引っかかり硬度・DSC・IRスペクトル

引っかかり硬度（鉛筆法）の試験結果をDSCの結果と併せ、表-6. 4に示す。引っかかり硬度（鉛筆法）の結果は、塗膜表面の硬さにほぼ等しい鉛筆の硬さで示しており、9Hが最も硬く、6Bが最も柔らかい。耐候性試験前の引っかかり硬度は、S-Pは2Hであるのに対し、Aシリーズのゴム弾性を持つ塗膜ではB~6B、柔軟形塗膜のCシリーズではF~3Bと、塗膜がかなり柔らかいことが分かる。B1は4Hと硬い上塗りをもつことを示している。その他のBシリーズではHB~Hと、S-Pよりもわずかに柔らかかった。DシリーズはS-Pと同じ、2Hの硬度であった。

耐候性試験後において引っかかり硬度に変化が認められたのは、B1のみであり、その他の塗装系では引っかかり硬度の変化は認められなかった。

DSCとIRスペクトルは試験可能な数量に限りがあったため、重量減少量が特徴的ないくつかの供試体についてのみ測定した。

ガラス転移温度はS-P、B2、D3について、耐候性試験前後に測定を行った。S-Pで約3℃の低下が認められたが、劣化による著しい変化は認められなかった。

IRスペクトルはS-PとD3の2種類について、耐候性試験前後の測定を行ったが、明確な変化は認められなかった。

6. 4. 3 付着性試験

(1) 耐候性試験前

試験結果を表-6. 5に示す。試験結果より、以下のことが明らかになった。

a) プルオフ法付着性試験の結果は、一般に塗膜は2MPa以上であれば付着力が十分であると判断されている[72]。本研究で使用した塗装仕様で、付着力が2MPaに満たなかったのは、B3であった。B3は、ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂中塗りと柔軟型ふっ素樹脂塗料上塗りの間で破断しており、硬質の中塗りと柔軟型の上塗り間の付着力が十分でなかったことが分かった。また、S-IG（繊維補強高耐候性ゲルコート）も、1.3MPaと2MPaに満たなかった。試験後の供試体は、ゲルコート補

表-6. 6
色差の結果

供試体の 記号	色差 ΔE^*_{ab}
A1	1.02
A2	0.66
A3	1.09
A4	0.32
B1	3.36
B2	0.20
B3	1.59
C1	0.23
C2	0.20
C3	0.72
D1	0.09
D2	0.27
D3	0.22
S-P	0.36
S-F	1.89
S-SG	0.36
S-IG	0.42

強繊維と、上面のゲルコートの中で破断し、補強繊維とゲルコート樹脂の接着性が不十分であると考えられる。

b) A2（無溶剤ウレタン樹脂塗料3工程吹き付け）、D1（FRPウレタン樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料）、D2（FRPエポキシ樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料）は、プルオフ法付着性試験で素地（FRPゲルコート面）との層間剥離が確認された。

c) B2（ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料）、B3（ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂塗料+柔軟型ふっ素樹脂塗料上塗り）、D1（FRPウレタン樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料）、S-P（ポリウレタン樹脂塗料上塗り3回塗り）は、クロスカット法付着性試験で塗膜の剥離が確認された。

(2) 耐候性試験後

a) 耐候性試験を行っていない供試体が2MPaに達しなかったB3は、耐候性試験後も2MPaに達しなかった。また、C3も1.8MPaと、2MPaを下回った。

b) A2（無溶剤ウレタン樹脂塗料3工程吹き付け）は、プルオフ法付着性試験結果で素地（FRPゲルコート面）との層間剥離が確認された。

c) B2（ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料）、B3（無溶剤ウレタン樹脂塗料3工程吹き付け）、C3（柔軟型ふっ素樹脂塗料3

表-6. 7 60° 光沢保持率の結果

供試体の 記号	初期光沢度	耐候性試験後 の光沢度	光沢保持率 (%)
A1	19.8	10.9	54.6
A2	78.4	69.1	88.4
A3	58.5	57.1	97.6
A4	69.1	65.9	95.5
B1	38.2	4.8	12.6
B2	67.5	65.7	97.7
B3	52.5	47.4	90.6
C1	71.5	64.8	90.2
C2	69.7	68.9	98.8
C3	66.3	58.6	88.4
D1	64.0	60.9	95.2
D2	61.5	56.8	92.3
D3	72.5	67.0	92.5
S-P	82.7	81.0	98.0
S-F	69.1	26.9	39.1
S-SG	61.7	62.0	100.5
S-IG	58.7	59.4	101.1

回塗), D1 (FRPウレタン樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料), D2 (FRPエポキシ樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料), D3 (FRPエポキシ樹脂塗料下塗+厚膜ポリウレタン樹脂塗料上塗), S-P (ポリウレタン樹脂塗料上塗3回塗)は、クロスカット法付着性試験で剥離が塗膜間の剥離が確認された。

d) S-I Gではクロスカット法付着性試験で補強繊維の上面樹脂の剥離が確認された。

6.4.4 光学性能試験 (1) 色差

L^* , a^* , b^* の測定結果および耐候性試験前後の色差(ΔE^*_{ab})を表-6.6に示す。試験の結果、以下のことが明らかとなった。

a) B1 (ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂塗料)は最も色差が大きかった。これはビニルエステル樹脂の耐候性が劣っているためと考えられる。

b) その他の試験片は、耐候性に優れたふっ素樹脂かポリウレタン樹脂を上塗りとして付着しているため、1000時間程度では耐候性試験前後の色差はほとんどなく良好な結果が得られた。

(2) 60度鏡面光沢度

耐候性試験前後の60度鏡面光沢度および光沢保持率を表-6.7に示す。試験の結果、以下のことが明らかとなった。

a) A1 (無溶剤ウレタン樹脂塗料4工程吹き付け)は、試験前の表面にも凹凸が激しく光沢度は小さかった。光沢保持率も50%程度とS-Pよりも小さかった。

b) B1 (ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂塗料)は、耐候性試験後の供試体表面はチョーキング(塗膜が劣化し粉状になってしまう現象)しており、

表-6.8 各試験結果による評価

記号	耐摩耗性 (耐候性試験前)	耐摩耗性 (耐候性試験後)	付着性 (耐候性試験前)	付着性 (耐候性試験後)	光学計測	総合評価
A1	○	○	○	○	×	×
A2	○	×	△	△	○	×
A3	○	○	○	○	○	○
A4	○	○	○	○	○	○
B1	◎	◎	○	○	×	×
B2	○	○	△	△	○	△
B3	○	○	△	△	○	△
C1	○	○	○	○	○	○
C2	○	○	○	○	○	○
C3	○	○	○	△	○	△
D1	○	○	×	△	○	×
D2	○	○	△	△	○	△
D3	×	×	○	△	○	×
S-F	×	×	○	○	×	×
S-SG	○	○	○	○	○	○
S-IG	○	○	×	×	○	×
S-P	○	○	△	△	○	△

注: 評価基準

① 耐摩耗性

- ◎: S-Pに比べ重量減少量が少ない。
- : S-Pと同程度の重量減少量。
- ×

② 付着性

- : 付着力があり、素地(ゲルコート面)との層間剥離がない。
- △: 付着力はあるが、素地(ゲルコート面)との層間剥離がある。または、クロスカット法付着性試験で剥離がある。
- ×

③ 光学計測

- : 耐候性試験後も初期の状態を維持している。
- ×

④ 総合評価

- : 全て○(または◎)のもの。
- △: ×が無いが、ひとつでも△があるもの。
- ×

光沢保持率は10%程度と低かった。

c) その他の塗装供試体は、耐候性試験後も光沢度が高く良好な結果が得られた。

d) S-SG及びS-IG(高耐候性ゲルコートを施した供試体)は、耐候性試験後も光沢度が高く良好な結果が得られた。

6.5 考察

6.5.1 FRP製土木構造材料用塗装系

塗装供試体について、各試験項目を評価すると表-6.8のようになる。

(1) AシリーズおよびCシリーズ(柔軟型中塗り/高耐候性上塗りの組み合わせ)

耐摩耗性と耐候性を両立させるために、柔軟型の耐摩耗性中塗り塗膜と耐候性に優れた上塗りを組み合わせた塗装仕様を試験したが、耐候性に優れた上塗りの

耐摩耗性は十分とは言えなかった。A3、C1、C2などはS-P(標準型塗装系)と比較して耐摩耗性が良い評価となったが、これらは上塗りがほぼ全て摩耗していることから、上塗りが比較的薄いために、摩耗量が少なかったことによると考えられる。これらの塗装系は、その他の塗装系とともに、標準的な塗装系(S-P)とほぼ同程度の耐摩耗性を有すると考えることができる。S-Pと比較して耐摩耗性が明らかに劣っていたのは、耐候性試験後のA2のみであった。

A2は付着性試験でも、塗膜とゲルコート間のはく離を示し、付着性が不十分と判定された。また、C3は耐候性試験後の付着力低下が見られたほか、クロスカット法でも付着性の低下が認められた。

A1は耐候性試験前から60度光沢度が19.8%と低く、この塗装系が光沢を有さないタイプであることが分かるが、耐候性試験後の光沢保持率も54.6%と低いので、低い評価となった。

これらの結果、全ての試験項目で良好であったのは、A3(ウレタンエラストマー樹脂塗料+柔軟型ふっ素樹脂塗料上塗)、A4(厚膜柔軟型ウレタン化エポキシ樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料上塗)、C1(柔軟型エポキシ樹脂塗料下塗+柔軟型ふっ素樹脂塗料上塗)、C2(柔軟型エポキシ樹脂塗料下塗+柔軟型ふっ素樹脂塗料2回)の4種類であった。

(2) Bシリーズ(硬質型中塗り)

上塗りが硬いガラスフレーク入りビニルエステル樹脂のもの(B1)は耐摩耗性が優れていたが、耐候性試験後の色差、光沢保持率ともに低かった。B1はガラスフレーク入りビニルエステル樹脂系塗料を上塗りとしたが、ふっ素樹脂系等の耐候性に優れた上塗りに比べて明らかに劣る結果となった。

硬い中塗りを持つB2およびB3は、柔軟な中塗りと同程度の耐摩耗性を持つと考えられるが、いずれも付着性が不十分であり、これらの点で改良を要する結果となった。

(3) Dシリーズ(高耐候性上塗り)

D3はS-Pに比べ摩耗量が著しく多く、耐摩耗性が不良と考えられる。また、D1、D2、D3とも、光学性能は問題ないものの、付着性に何らかの問題がある結果となった。

(4) ゲルコートのみ仕様

高耐候性ゲルコートの結果は、塗装と比較すると、十分な性能を有していると考えられる。耐摩耗性は、塗装でもっとも良かったB1に比較して優れていた。光学性能も問題なかった。補強繊維のある供試体(S

-IG)は、耐候性試験後のクロスカット法付着性試験で、補強繊維より上の樹脂の剥離が認められた。耐摩耗性、光学性能では、S-SGとS-IGに差は認められなかったことから、補強繊維の無い高耐候性ゲルコートの方が優れていると考えられる。一方、塗装下地用のゲルコートでは耐摩耗性、光学特性ともに、塗膜よりも劣っていた。

(5) まとめ

B1が土木構造FRP用塗装系として不十分と判定されたことと、Dシリーズで総合評価が良好な結果となった塗装系がなかったことから、耐摩耗性および耐候性が必要な環境では、耐摩耗性に優れた中塗り/耐候性に優れた上塗りの塗装系が基本的に望ましいと結論する事ができる。ガラスフレーク入りの硬質な塗膜でも、十分な耐摩耗性を有する中塗りとなるが、これを中塗りとする塗装系(Bシリーズ)に総合評価の良好なものがなかったことから、現時点では柔軟型の中塗りが適していると結論づけることができる。

海砂によって上塗りが摩耗した場合には、上塗りの塗替を行う必要が生じるが、環境条件に応じて上塗りの膜厚を増加させることにより、塗替周期を鋼橋に比べて著しく長くすることができるものと考えられる。

また、本試験の結果から、高耐候性ゲルコートは、塗料よりも性能が優れていると考えられる。このため、屋外で使用する土木構造物用FRPでは、可能であれば高耐候性ゲルコートを施し、成型法等によりこれができない場合には、塗装による保護を行うことが望ましい。

6.5.2 耐候性試験による劣化と物性変化の関連

(1) 落砂耐摩耗性試験と引っかかり硬度

引っかかり硬度は、落砂耐摩耗性の変化と関連が高いと予測したが、耐候性試験前後で引っかかり硬度の変化が認められたのは、1種類(B1)のみであり、落砂耐摩耗性試験で耐候性試験前後に有意差が認められる塗装系については、引っかかり硬度の変化は認められなかった。

(2) 落砂耐摩耗性試験とDSC・IRスペクトル

S-Pは、耐候性試験前後で落砂耐摩耗性試験の結果に有意差が認められたが、IRスペクトルには差が認められなかった。S-Pのガラス転移温度は3.2℃低下しており、有意差が認められなかったB2(1.5℃上昇)、D3(0.3℃上昇)に比べて、大きな変化を示した。データは少ないものの、落砂耐摩耗性の変化とガラス転移温度の変化に関連がある可能性がある。

6.5.3 FRPへの塗装と鋼構造物への塗装の相

違

6. 5. 1の検討結果から、FRPへの塗装についても、摩耗が著しい場合には塗り替える場合があることとなるが、ここで問題となるFRPへの塗装の塗替と、鋼構造物の維持管理上の塗替の相違を明確にする必要がある。

例えば鋼道路橋の場合は、通常は7～9年、短い場合には3年程度で塗り替える必要がある[73]が、塗替を実施する時点では、通常部分的な腐食が発生している状態となっている。これらの部分的腐食は孔食となりやすい[74]ため、大部分の塗膜が比較的健全な場合でも、塗替を必要とする。一方FRPの場合には腐食が発生しないため、鋼構造物のような腐食の進行による塗替の必要はなく、付着力が十分な限りは塗膜は保護効果を発揮すると考えられる。FRPへの塗装の塗替が必要となるのは、飛砂による摩耗がある場合のみであり、摩耗が無い場合には、FRPへの塗装の塗替の必要性は少ない。

また、FRPへの塗装の耐摩耗性が問題となる環境では、塗装する以上、鋼構造物においても同じ問題が生じ、鋼構造物の場合には塗膜の摩耗が防錆効果の低下に直結するために、維持管理上の問題は大きいと考えられる。

さらに、FRPへの塗装の塗替が必要となった場合の塗替塗装は、上塗りのみの再塗装であるので、鋼構造物の通常の維持管理における塗替塗装(腐食部分の除去や困難な素地調整を伴う)や、コンクリート補修(塩分浸透部分の除去を伴う)に比べて、容易であると考えられる。

なお、6. 5. 1でも述べたが、飛砂による摩耗の程度などの環境条件があらかじめわかっている場合には、それに応じて上塗りの膜厚を増加させることにより、塗替周期を著しく長くすることができるものと考えられる。

6. 6 本章のまとめ

土木構造物用FRPへの塗装を目的に、耐候性、耐摩耗性に優れると期待される様々な塗装系について、FRPとの付着性、耐候性、耐摩耗性を実験によって調べ、FRPに適していると考えられる塗装仕様を検討した。

耐摩耗性と耐候性を両立させるために、耐摩耗性に優れた中塗りと耐候性に優れた上塗りを組み合わせた塗装仕様を試験したが、耐候性に優れた上塗りの耐摩耗性は十分とは言えなかった。ガラスフレーク入りビ

ニルエステル樹脂塗料を用いた上塗りは、耐摩耗性に優れていたが、耐候性が悪かった。これらのことから、耐摩耗性および耐候性が必要な環境では、耐摩耗性に優れた中塗りと耐候性に優れた上塗りの塗装系を基本とすることを提案した。海砂によって上塗りが摩耗した場合には、上塗りの塗替を行うことになるが、その塗替間隔は環境に応じて上塗りの膜厚を増加させることにより、鋼橋に比べ著しく長くすることができるものと考えられる。

いくつかの塗装系では塗膜間や塗膜-FRP間の付着性に問題がある塗装系があった。耐摩耗性を得るために、柔軟型と硬質型の中塗りを試験し、どちらも耐摩耗性を発揮したが、硬質型の中塗りをもち塗装系は付着性等に問題が認められたため、柔軟型の中塗りをもち塗装系が望ましいとの結論を得た。各試験で欠陥がみられなかったのは、ウレタンエラストマー樹脂塗料+柔軟型ふっ素樹脂塗料上塗、柔軟型エポキシ樹脂塗料下塗+柔軟型ふっ素樹脂塗料上塗、柔軟型エポキシ樹脂塗料下塗+柔軟型ふっ素樹脂塗料(2回塗り)、厚膜柔軟型ウレタン化エポキシ樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料上塗の4種類であり、これらを土木構造物FRP用塗装仕様として提案した。

また、高耐候性ゲルコートは、塗装と比較して、十分な耐摩耗性、耐候性を有していた。補強繊維のある高耐候性ゲルコートは、付着性が不十分であったので、補強繊維の無い高耐候性ゲルコートが優れていた。このため、屋外で使用する土木構造物用FRPでは、可能であれば高耐候性ゲルコートを施し、成型法等によりこれができない場合には、塗装による保護を行うことが望ましい。

第7章 結論

7. 1 はじめに

高分子系複合材料(FRP)は耐食性に優れており、鋼材に匹敵する強度を持つ。このため、土木構造物の耐久性・耐食性向上策のひとつとして、土木構造材料への適用が期待される材料である。本研究では土木構造用途に適したFRPとして、比較的安価に長尺大断面部材が得られる引抜成形材を検討の対象とした。本研究では、FRPの本格的な適用にあたり、土木構造用途における長期耐久性を水・湿度、屋外暴露、疲労荷重などの環境因子毎に評価し、特に強度をはじめとする物性保持率としてとりまとめることを目的とした。また、FRPの耐久性向上策としての塗装

の効果を評価し、新たなFRP用塗装仕様について検討を併せて行った。

以下に、本研究から得られた結果を要約するとともに、今後の課題を述べて本論文の結論とする。

7. 2 本論文により得られた結果

第3章から第5章では、FRPが様々な条件に置かれた場合の、劣化と強度保持率について調べた。第3章においてはG（ガラス繊維）FRPの水・湿度・屋外暴露環境における耐久性を、第4章においてはGFRP、C（炭素繊維）FRP、CF/GFハイブリッドFRPの疲労荷重による劣化を、第5章においてはFRPケーブル材の海上屋外暴露環境での耐久性を調べた。また、第6章では、FRPを劣化から保護するための方法としての塗装の効果と、適切な塗装系について検討している。詳細を以下に記す。

第3章においては、GFRP引抜成形材の水・湿度による劣化と、屋外暴露による劣化について検討した。水・湿度による劣化については、いくつかの温度による浸せき試験、高湿度大気による劣化試験を行い、電子顕微鏡・化学分析・力学物性試験により評価した。GFRPは水中や高湿度条件で、表面に亀裂が入ると共に、サイジング剤と思われる表面処理剤が溶出し、重量減少が起きることがあることが分かった。またこのように劣化したGFRPの曲げ強度は低下することが分かった。強度低下の主な原因はガラス繊維と樹脂の界面の剥離である。樹脂の劣化は化学分析では変化を観察できなかった。

また、土木構造用FRPとしての適用が期待される、GFRP引抜成形材について2年間の暴露試験を行った。曲げ、引張、面内せん断の各項目について物性保持率を調べたところ、無塗装供試体では、引抜方向に対して90°方向の物性で、低下が認められた項目があった。これは一方向層の90°方向の性能が、屋外暴露試験によって低下したためと考えられた。これらの物性低下は塗装供試体では認められなかった。

第4章においては、疲労荷重がFRPの強度保持率に与える影響を調べるため、3点曲げ疲労試験を引抜成形GFRP、CFRP、CF/GFハイブリッドFRPに対して行い、疲労限度を検討した。長期間安全に使用することのできる応力範囲の指標として、10⁷回疲労限度/静的強度比を調べ、GFRPで0.2、CFRPで0.5~0.53、CF/GFハイブリッドFRPでは0.27~0.35との結果を得た。周波数と温度の疲労限度に与える影響は本試験では顕著ではなかった。

本試験から得られた、GFRPとCFRPの疲労限度は、文献で報告されている範囲内であった。

第5章においては、FRPケーブル材の海上屋外暴露試験を行い、強度保持率に関する検討を行った。FRPケーブル材にはCFRP、AFRP、V（ビニロ繊維）FRP、GFRPを使用した。

CFRPケーブルのリラクセーション率（定着部も含む見かけのリラクセーション率）は、2%~30%であり、材料による差や、同種のCFRPでも製造時期による差が認められた。直射光を受ける環境の方が直射光を受けない場合よりもリラクセーション率が大きくなる傾向が認められた。初期緊張力を0.6Pu（最大強度の0.6倍）と0.8Puの2段階に設定したが、リラクセーション率への影響はほとんど見られなかった。CFRPケーブルの残存引張強度は、緊張力の有無にかかわらず強度低下は認められなかった。赤外吸光等の化学分析においても、マトリックス樹脂等の材質変化は見られなかった。最も厳しい条件は、0.8Puの緊張条件において直射光下で3年6ヶ月暴露したものであり、CFRPケーブルの耐久性の高さが認識できた。

AFRPケーブルのリラクセーション率は10%~30%であった。AFRPケーブルのリラクセーション特性は、CFRPケーブルとほぼ同様であり、材料による差違や、直射光を受ける環境の方が直射光を受けない場合よりもリラクセーション率が大きくなる傾向も認められた。また、最大値も同程度であり、初期緊張力（最大0.8Pu）の差がリラクセーション率へ与える影響もほとんど見られなかった。一方、AFRPケーブルは、緊張力のないもので残存引張強度が低下している事例があるほか、暴露中の破断（0.66Pu）事例、水中での強度低下事例や赤外線スペクトルによる樹脂表面の劣化事例などが観測された。暴露中破断は定着体の不適の可能性が高いが、AFRPケーブルは苛酷な環境では残存引張強度が低下する可能性があることを示している。

GFRPケーブルおよびVFRPケーブルについては、海中中部における無緊張暴露試験では、大きな強度低下（0.6~0.8）が見られた。また緊張状態における暴露試験では、GFRPケーブルは緊張レベルが高い場合の強度低下が大きく、安全に使える範囲は0.25Pu以下であった。

第6章においては、土木構造物用FRPへの塗装を目的に、耐候性、耐摩耗性に優れると期待される様々な塗装系について、FRPとの付着性、耐候性、耐摩

耗性を実験によって調べ、FRPに適していると考えられる塗装仕様を検討した。

耐摩耗性と耐候性を両立させるために、耐摩耗性に優れた中塗りと耐候性に優れた上塗りを組み合わせた塗装仕様を試験したが、耐候性に優れた上塗りの耐摩耗性は十分とは言えなかった。ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂塗料を用いた上塗りは、耐摩耗性に優れていたが、耐候性が悪かった。これらのことから、耐摩耗性および耐候性が必要な環境では、耐摩耗性に優れた中塗りと耐候性に優れた上塗りの塗装系を基本とすることを提案した。海砂によって上塗りが摩耗した場合には、上塗りの塗替を行うことになるが、その塗替間隔は環境に応じて上塗りの膜厚を増加させることにより、鋼橋に比べ著しく長くすることができるものと考えられる。

7. 3 今後の課題と期待

FRPが土木構造材料として適用性が高いことは明らかであるが、現時点では限定的にしか採用されていない。基準類が整備されたPC緊張材用途でも試験的な採用が中心であることから、新しい材料であるため耐久性評価やコスト評価が十分になされていないことが、主要な理由と考えられる。本研究においても耐久性評価を屋外暴露試験を中心に行ったが、最長でも3年6ヶ月の結果であり、文献でより長期のデータを参照しているとはいえ、土木構造材料の寿命から考えると、短いと言わざるを得ない。このため今後はより長期の信頼性の高いデータを蓄積することにより、信頼性を向上させていくことが必要である。

また、コスト評価については、本研究では扱わなかったが、FRPの本格的な採用にあたってはライフサイクルコストを含めた検討が、今後は必要である。さらに、比較的弾性率の低いFRPに適した土木構造物設計方法についても本研究では取り扱わなかったが、革新的な構造形式の実現可能性も考えられるので、今後さらなる研究が必要である。

第3章においてはFRPの屋外暴露時の耐久性向上策として塗装が有効であることを確認したが、塗膜のどのような性能がFRPを保護しているのかを明らかにするには至らなかった。これを明らかにすることにより、FRP用塗料の性能向上が期待できるので、今後さらなる検討が必要である。

第4章の疲労に関する物性保持率に関する検討は、全て均一の材料で実施したが、実際の構造部材を構築にあたっては、切り欠き、穴、接合部などの影響が疲

労強度に影響する可能性がある。接合方法は構造物によって異なるが、接合方法に応じて個々に別途検討の必要がある。

本研究では土木構造物の環境因子毎に、FRPの長期耐久性と物性変化について検討を行ったが、腐食環境におけるFRPの耐食性の高さには、目を見張るべきものがある。特にCFRPは力学性能・疲労特性も優れており、材料費を考慮に入れなければ、土木構造材料として適していると言えることができる。腐食に窮する土木構造物への適用性をひとつずつ検討することにより、優れた耐食性や軽量性をもつFRPの土木構造物への適用技術の信頼性が向上し、FRPの土木構造材料への普及により、土木構造物（社会資本）の耐久性、施工性、経済性を向上させることができることになるものと確信する。

謝辞

本研究を遂行する上で、土木研究所材料地盤研究グループの明嵐政司上席研究員をはじめ、新材料チームの皆様に貴重な御意見・御協力を賜りました。また研究のまとめにあたっては、東京理科大学理工学部の福田博教授より終始懇切なる励ましと御助言を頂きました。東京理科大学理工学部の菊池正紀教授、辻正哲教授、向後保雄助教授、長崎幸夫助教授から貴重な御教示を頂きました。謹んで感謝の意を表す次第です。

参考文献

- [1] 「国土建設の現況」(平成11年、建設省)。
- [2] 山城和男他「沖縄ロードパークFRP歩道橋の開発」日本複合材料学会誌、Vol.28, No.2, pp.76-79 (2002)。
- [3] 建設省「建設技術の先導研究 超高耐久材料の開発 最終報告書(土木分野編)」(平成12年3月)。
- [4] 建設省土木研究所他「繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書(1)」共同研究報告書第210号(1998.10)。
- [5] コンクリートライブラリー 第88号「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)」土木学会(平成8年)。
- [6] コンクリートライブラリー 第101号「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」土木学会(平成12年)。
- [7] Shen, C. H. and Springer, G.: "Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials", Journal of Composite Materials, Vol.10, pp.2-20 (1976)。
- [8] Aditya, P. K. and Sinha, P. K.: "Diffusion coefficients of polymeric composites subjected to periodic hygrothermal exposure", Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 2(9),

pp.1035-1047 (1992).

- [9] Blikstad, M., Sjöblom, P. O. W. and Johannesson, T. R.: "Long-Term Moisture Absorption in Graphite/Epoxy Angle-Ply Laminates", *Journal of Composite Materials*, 18, pp.32-46 (1984).
- [10] Menges, G., Gitschner, H. W.: "Sorption behaviour of glass-fiber reinforced composites and the influence of diffusing media on deformation and failure behaviour", *Proceeding of 3rd International Conference on Composite Materials*, pp.25-48, Paris (1980).
- [11] Harper, J. F., Naeem, M.: "The Effect of Temperature and Humidity on Glass Fibre Reinforced Vinyl Ester Resin", 14th Reinforced Plastics Congress 1984, pp.173-176 (1984).
- [12] Morii, T. et al. "Weight changes of the fibre/matrix interface in GRP panels immersed in hot water", *Compos. Sci. Technology*, 50, pp.373-379 (1994).
- [13] Verghese, K. N. E., Hayes, M. D., Garcia, K., Carrier, C., Wood, J., Riffle, J. R., and Lesko, J. J. "Influence of Matrix Chemistry on the Short Term Hydrothermal Aging of Vinyl Ester Matrix and Composites under Both Isothermal and Thermal Spiking Conditions", *Journal of Composite Materials*, Vol.33, No.20, pp.1918-1938 (1999).
- [14] Shen, C. H. and Springer, G.: "Effect of Moisture and Temperature on the Tensile Strength of Composite Materials", *Journal of Composite Materials*, Vol.11, pp.2-16 (1977).
- [15] Ciriscioli, P. R. et al., "Accelerated environmental testing of composites", *Journal of Composite Materials*, 21, pp.225-242 (1987).
- [16] Kellas, S., Morton, J. and Curtis, P. T. "The effect of hygrothermal environments upon the tensile and compressive strengths of notched CFRP laminates, Part 1: Static loading", *Composites*, Vol. 21, No. 1, pp.41-51 (1990).
- [17] Tsotsis, T. K. and Weitsman, Y. "The Effects of Cyclic Humidity Exposure on the Mechanical Properties of AS4/3502 Graphite/Epoxy Composite", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 9, pp.420-445 (1990).
- [18] Lark, R. F., Chamis, C. C. : "Hygrothermomechanical Evaluation of Transverse Filament Tape Epoxy/Polyester Fiberglass Composite", 38th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, 38, 12c.1-12c.15 (1983).
- [19] Horino, T., Mackawa, Z., Hamada, H.: "Accelerated Aging of FRP in Hot-Water by Ultrasonic Vibration Technique", *ICM & ECCM*, 4, 4.212-4.221 (1987).
- [20] Singh, K. S., Singh, P. N. and Rao, R. M. V. G. K.: "Hygrothermal Effects on Chopped Fiber/Woven Fabric Reinforced Epoxy Composites, Part B: Degradation Study", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.10, pp.457-462 (1991).
- [21] Sridharan, S., Zureick, A-H. and Muzzy, J. D., "Effect of Hot-Wet Environments on E-glass/vinylester Composites", 56th Society of Plastics Engineering Annual Technical Conference, Vol.56, No.2, pp.2255-2259 (1998).
- [22] Cope, R., Revirand, G.: "Short Term Weathering of Polymeric Materials", *Durability of Building Materials*, Vol.1, No.3, pp.225-240 (1983).
- [23] Martin, K. G., Sasnaitis, I.: "Assessment of Deterioration of Translucent Plastics Building Sheets After Weathering", *Durability of Building Materials*, Vol.3, No.3, pp.233-253 (1986).
- [24] Bulmanis, V. N., Urzhumtsev, V. S.: "Effect of Cold Climate Factors on Strength and Durability of Structural Fiberglass Composites", *ICM & ECCM*, 4, 4.457-4.466 (1987).
- [25] 鶴江孝, 鈴木智: 北海道工業開発試験所報告, Vol.24, pp.198-204 (1981).
- [26] 長谷川準三「FRPの耐候性に関する研究 表面状態と物性について (1)」強化プラスチック, Vol.21, No.7 pp.289-301 (1975).
- [27] 長谷川準三「FRPの耐候性に関する研究 表面状態と物性について (2)」強化プラスチック, Vol.21, No.8 pp.337-344 (1975).
- [28] 福田博「複合材料の屋外暴露試験」, 複合材料シンポジウム講演要旨集, Vol.14, pp.117-120 (1989).
- [29] Polezhaeva, P. G., Pashkevich, M. Yu. and Bogorodskaya, E. P., *Plasticheskie Massy*, No.5, pp.57-58 (1986).
- [30] Eskim, E. A., Kolesnik, K. I., Petrov, A. S., Startsev, O. V. and Meletov, V. P., *Problemy Prochnosti*, No.10, pp.91-96 (1982).
- [31] 横山一広「繊維強化プラスチック (FRP) の屋外暴露試験 (その3)」, 航路標識技術要報, No.34, pp.81-95, 97, 99 (1995).
- [32] 工藤亮, 邊吾一, 北條英光, 大久保浩「促進および屋外暴露を受けるGFRP材の耐候性曲げ強度間の相関性」日本機械学会第76期全国大会講演論文集 (I), Vol.76, pp.595-596 (1998).
- [33] 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).
- [34] 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).
- [35] 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).
- [36] 工藤亮, 邊吾一, 北條英光, 大久保浩「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).
- [37] Nanni, A., Matsubara, S., Hasuo, K., "Durability of braided epoxy-impregnated aramid FRP rods", 1st Conference on Advanced Composite Materials in Bridge and Structures pp.101-110 (1992).
- [38] Gerritse, A., "Durability criteria for non-metallic tendons in an alkaline environment", 1st Conference on Advanced Composite Materials in Bridge and Structures pp.129-138 (1992).
- [39] 宮川豊章, 吉田真樹, 服部篤志, 岩本勲「連続繊維補強材のアルカリ耐久性」土木学会論文集 No.520/V-28, pp.171-181 (1995).

- [40] Takewaka, K. and Khin, M.: "Deterioration and Stress-Rupture of FRP Rods in Alkaline Solution Simulating as Concrete Environment", Proceeding of 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridge and Structures, p.649 (1996).
- [41] Uomoto, T. and Ohga, H.: "Performance of Fiber Reinforced Plastics for Concrete Reinforcement", Proceeding of 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridge and Structures, pp.125-132 (1996).
- [42] Tomosawa, F. et al. "Evaluation of the ACM Reinforcement Durability by Exposure Test", Proceeding of 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridge and Structures, pp.699-706 (1996).
- [43] Sen, R. et al, "Effect of Tidal Exposure on Bond of CFRP Rods", Proceeding of 2nd International Conference on Composites in Infrastructure, pp.512-523 (1998).
- [44] 勝木太、魚本健人「アルカリ環境下におけるガラス繊維強化プラスチックロッドの耐久性評価」土木学会論文集 No.544/V-32, pp.101-107 (1996).
- [45] Bledzki, A. et al.: "Corrosion Phenomena in Glass Fibers and Glass Fiber Reinforced Thermosetting Resins", Composites Science and Technology, 23, pp.263-285 (1985).
- [46] Sridharan, S., Zureick, A-H. and Muzzy, J. D. "Effect of Hot-Wet Environments on E-glass/vinylester Composites", 56th Society of Plastics Engineering Annual Technical Conference, Vol.56, No.2, pp.2255-2259 (1998).
- [47] Schutte, C. et al.. "Use of single-fibre fragmentation test to study environmental durability of interfaces/interphases between DGEBA/mPDA epoxy and glass fibre: the effect of moisture", Composites, Vol.25, No.7, pp.617-624 (1994).
- [48] 植村益次編:「FRP構造設計便覧」p.55 (1994).
- [49] I. Sasaki, I. Nishizaki, and H. Sakamoto, "A Bridge Constructed Entirely of Composites; and the Results of Load Testing", Proceeding of the Second International Conference on Composites in Infrastructure, pp.657-666 (1998).
- [50] 鈴木統、林耕四郎、大橋潤一、西崎到「朝霧暴露試験場におけるGFRPモデル車道橋の設計」,第1回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.113-116 (2001).
- [51] 植村編:「FRP構造設計便覧」p.39, p.70 (1994).
- [52] 池田哲史:「ピッチ系炭素繊維を用いた複合材料の疲労特性」強化プラスチック Vol. 45, No.5, pp.175-179 (1999).
- [53] 植村編:「ハイブリッド(GF/CF)FRP積層板の力学的特性に関する研究報告書」強化プラスチック協会ハイブリッドFRP調査研究専門委員会 (1984).
- [54] 宮入編:「繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル」強化プラスチック協会 (1996).
- [55] Clarke, J. J.: "Structural Design of Polymer Composites - EUROCOMP Design Code and Handbook" E & FN SPON (1996).
- [56] K. Katawaki, I. Nishizaki and I. Sasaki "Evaluation of the Durability of Advanced Composites for Applications to Prestressed Concrete Bridges, " Proceedings of the First Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, pp.119-127 (1992).
- [57] 片脇、佐々木: 暴露試験によるFRPの環境劣化、第20回日本道路会議論文集、pp.1.104-1.105 (1993.10).
- [58] I. Sasaki, I. Nishizaki, H. Sakamoto, K. Katawaki, Y. Kawamoto "Durability Evaluation of FRP Cables by Exposure Tests", Proceedings of the third International Symposium on Non Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, pp. 131-137 (1997.10).
- [59] 土木学会: 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用、コンクリートライブラリー第72号 (1992.4).
- [60] 魚本健人、西村次男「プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(10) - 内陸および海洋環境下に暴露した各種FRPロッドの引張特性 -」生産研究, Vol.48, No.3 pp.201-204 (1996.3).
- [61] 日本海洋開発産業協会「海洋石油開発技術調査 極限海域における海洋構造物の基礎調査研究 熱帯域における海洋構造物への新素材適用可能性研究成果報告書 平成9年度」、通商産業省 (1998.3).
- [62] 建設省土木研究所橋梁研究室他、「PC橋の緊張材への新素材の利用に関する共同研究報告書(総括編)、共同研究報告書第107号、p.20 (1996.9).
- [63] 高島、西崎、佐々木、川本: 各種連続繊維補強材海洋環境下における暴露試験、プレストレストコンクリート技術協会第7回シンポジウム論文集、pp.549-554 (1997).
- [64] John P. Busel, "FRP Composites in Construction Application, A PROFILE IN PROGRESS", SPI (1995).
- [65] 西崎到、佐々木巖、明嵐政司、「繊維強化複合材料の一次土木材料としての適用事例の調査」、強化プラスチック、Vol. 45, No.8 pp.312-323 (1999).
- [66] 日経コンストラクション「伊計平良川線FRP歩道橋工事(沖縄県)」p.28、4月28日号(2000).
- [67] 日本道路協会編「コンクリート道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」(1984).
- [68] 山城和男他「主要地方道 伊計平良川線ロードパークと国内初FRP横断歩道橋の整備」橋梁&都市PROJECT, pp.23-31 (2001.8).
- [69] 山城和男他「沖縄ロードパークFRP歩道橋の開発」日本複合材料学会誌, Vol.28, No.2, pp.76-79 (2002).
- [70] 鈴木正一他「FRP接合部の耐候性」、接着研究発表会講演要旨集, Vol.19, pp.77-78 (1981).
- [71] 例えば鋼橋では「鋼橋塗装マニュアル」(日本道路協会)、水門・ダム施設では「ダム・堰施設技術基準(案)」(ダム・堰施設技術協会) などがある。
- [72] (社) 日本鋼構造協会編「鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV 03-1993」p.43 (1993).
- [73] (社) 日本鋼構造協会編「重防食塗装の実際」p.212 (1988).
- [74] (社) 日本鋼構造協会編「重防食塗装の実際」p.215 (1988).