

第1章 FRP材の耐久性に関する研究概要

1.1 まえがき

(1)研究目的

平成3年11月にACC倶楽部が設立されて以来、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維などのFRP材を用いたコンクリート構造物の実績は着実に増加し、1999年には約150件に達している。この間、FRP材の物理的性質および耐久性、また実構造物への応用技術に関して、さまざまな研究開発が行われ、成果を上げており、FRP材が建設材料として社会的に高く認められてきている。

今後、このようなFRP材がさらに発展していくためのキーワードとして、「耐久性」が考えられる。FRP材は耐久性に優れているというのが主な特長のひとつである。おりしも時代は、「建設」から「維持補修」へと移行しつつあり、ライフサイクルコストや環境への影響が重視され始めており、FRP材が大きく発展する可能性を秘めている。しかし、FRP材がこのような点で有利な材料であることを認知してもらうには、耐久性に対する確かなデータを提示する必要がある。FRP材の耐久性については、各製造メーカーが責任をもって研究しており、これまでの実績に問題は生じていない。しかし、統一された耐久性の試験方法はまだ確立されておらず、これまでは各メーカーが独自の方法で試験し、独自の判断基準で責任を負っており、ACC倶楽部として取りまとめたデータや統一した見解がないのが現状である。

そこで、各種環境条件下におけるFRP材を使用したコンクリート部材において、FRP材の多方面にわたる使用優位性を明確にして需要の拡大を図ることを目的として、平成10年9月にACC倶楽部技術委員会の傘下に本研究会が設立された。

本研究会における調査・検討の内容は、現在までの耐久性に関する国内外の文献収集を行い、耐久性に関する問題点と課題を抽出したエキスパート情報としてまとめることである。

(2)調査範囲

本研究会で調査を行った文献は、以下の通りである。

- ・ 日本建築学会関連（1987～1998年）
 - 日本建築学会大会学術講演概要集
 - 日本建築学会論文集
- ・ 土木学会関連（1989～1998年）
 - 土木学会年次学術講演会講演概要集
 - 土木学会論文集
- ・ 日本コンクリート工学協会関連（1987～1998年）
 - コンクリート工学年次論文報告集
 - Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Proceedings of the 1st,2nd,3rd International Symposium
- ・ 日本材料学会関連（1994～1998年）
 - 工業材料
 - 材料
 - 機能材料
- ・ 日本複合材料学会関連（1994～1999年）
 - 日本複合材料学会誌
- ・ A C I（The American Concrete Institute）関連（1993～1998年）
 - ACI Journal (Structural, Materials)
 - ACI International Symposium

1.2 分類

収集した研究文献を大きく化学的耐久性，力学的耐久性，熱力学的耐久性の3つに分類し，さらにそれぞれを細分化して，下記に示すテーマごとに整理して，動向の調査を行った．

[化学的耐久性]

- A - 1 耐セメント・耐アルカリ性
- A - 2 耐水・耐塩水性
- A - 3 耐薬品性
- A - 4 その他

[力学的耐久性]

- B - 1 動的疲労
- B - 2 リラクゼーション・クリープ
- B - 3 長期試験
- B - 4 その他

[熱力学的耐久性]

- C - 1 耐熱性
- C - 2 耐候性
- C - 3 耐凍結性
- C - 4 耐火性
- C - 5 その他

1.3 研究動向・概説

[化学的耐久性]

A-1 耐セメント・耐アルカリ性

(1) 研究の動向

耐セメント・耐アルカリ性に関する文献は、20 件であった。部材の種類としては単体が最も多く、16 件であり、その中には、RC と併記されているもの[A1-5] [A1-16]が 2 件あった。単独で単体以外の部材の種類としては、PC[A1-19]と RC[A1-18]が各 1 件のみであった。

形状としては表 1 に示すように、異型ロッドタイプが 20 件と群を抜いて最も多く、次いで組紐タイプが 6 件、ロッド、ストランド、格子タイプが各 3~4 件である。矩形タイプに関するものは、1 件も無かった。

表 1 形状別分類

	ロッド (R)	異型ロッド (D)	ストランド (S)	組紐 (B)	格子 (L)	矩形 (P)
炭素	1	6	3	2		
アラミド	1	3		4		
ガラス	1	9			3	
アラミド・ガラスハイブリッド	1	1				
玄武岩ファイバー		1				
計	4	20	3	6	3	0

炭素に関しては、異型が 6 件と最も多く、次いで、ストランド、組紐の各タイプの順であり、比較的形状の偏りは無かった。アラミドは、組紐と異型ロッドの各タイプがそれぞれ 4 件、3 件であった。また、ガラスは異型タイプが 9 件であり、これらの素材に関しては、使用された形状が偏る傾向が見られた。また、ビニロンに関する文献[A1-11]も 1 件あったが、これは短繊維を対象としたものであり、表 1 中にはカウントしていない。

採り上げられている素材としては、表 2 に示すように、炭素が 9 件、アラミドが 7 件、ガラスが 12 件およびビニロンが 1 件であった。また、特殊な材料として、ガラス繊維を主体としたアラミド繊維とのハイブリッド FRP (AGFRP) に関するものが 2 件[A1-10] [A1-15]、玄武岩ファイバーFRP[A1-6]が 1 件あった。なお、表 2 では、1 件の文献で同じ素材が異なる形状で取り上げられている場合でも 1 件の素材として数えている。

ガラスに関する文献が 12 件と最も多いのは、耐セメント・耐アルカリ性に関する問題を重視する傾向があるためであると考えられる。さらに、ガラスのみに関する文献が 6 件と多いことや、アラミド・ガラスハイブリッドに関する文献が 2 件あることも、それを裏付けている。また、短繊維のビニロンのみを取り上げた文献[A1-11]が 1 件あったが、これは、ビニロンを使用した製品の PR 的要素の強いものであった。

炭素，アラミドに関しては，単独で取り上げている文献はアラミドの 2 件[A1-1] [A1-19]のみであり，それ以外は他の素材との比較という位置付けである場合が多い．したがって，これらの 2 種類の素材は，ガラスやビニロンに比べて耐セメント・耐アルカリ性に関する注目度は低いようである．

表 2 素材別分類

A1-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	計
炭素																					9
アラミド																					8
ガラス																					13
ビニロン																					2
アラミド・ガラスハイブリッド																					2
玄武岩ファイバー																					1

(2) 研究内容の概説

アルカリ環境を実現する方法としては，主に，実際のコンクリート中に長期間埋め込む方法と，濃度や温度を上げたアルカリ溶液中に浸漬して促進させる方法の 2 種類に分類できる．評価の方法としては，コンクリート中あるいはアルカリ溶液中から取り出した FRP の引張強度の調査が主である．

コンクリート中から取り出した試験体では，ガラスに関してもほとんど劣化は認められないが，アルカリ溶液中での促進試験では，ガラスの劣化が最も大きい．炭素が最も安定しており，アラミドは炭素に比べてやや劣る傾向がみられた．アラミド・ガラスハイブリッドは，アラミドによるアルカリ環境に対する防護効果が確認されている．

(文責:白濱)

A - 2 耐水・耐塩水性

(1) 研究の動向

耐水・耐塩水性について収集した文献は3件で，GFRP 引き抜き成型材の水浸劣化試験 [\[A2-1\]](#)，AFRP および CFRP プリテンション梁が潮流に晒された場合の長期信頼性 [\[A2-3\]](#)，ガラス繊維とビニルエステル樹脂を用いたシートの水浸暴露試験 [\[A2-2\]](#) が報告されている．これらの研究では，水浸の影響とともに，温度，熱による影響についても併せて行われている．

(2) 研究内容の概説

各種複合材料について，水中暴露試験および潮流試験等が行われており，材料によってその内容は異なるものの，試験後各種強度が低下していることが報告されている．また，水温が高いほどその傾向が大きく，一方，浸水により低下した強度も乾燥によって初期値に戻るというケースも報告されている．

(文責:村上)

A - 3 耐薬品性

(1) 研究の動向

対象文献数は 8 件であった。

耐薬品性の評価方法として、評価材を各種薬品に浸漬し、

- ・重量変化
- ・引張強度の変化
- ・曲げ強度の変化
- ・曲げ弾性率の変化等

の経時変化の測定が一般的に行われている。

(2) 研究内容の概説

1)複合材の機械物性

FRP の重量、引張強度、曲げ強度、曲げ弾性率の薬品による経時変化の結果がつぎのように示されている。

対象文献中の最大浸漬時間(浸漬時間 1 年)

松林らは、FRP 浄化槽の土中耐久性評価を目的に試験を実施。

pH13,10(NaOH 水溶液で pH 調整)、pH 4(HCL 水溶液)及び界面活性剤を添加し 50% に希釈した灯油を用いて人工的に浸漬する土壌を作成し試験を行った。

浸漬期間は 1 年とし、外観・バール硬さ・曲げ強さ・曲げ弾性率の変化を測定したが、顕著な変化は見られなかった[\[A3-4\]](#)。

浸漬液が有機溶剤の例

岡本らは、アラミド繊維による紐状棒材の研究で、水溶液以外に有機溶剤を用いて試験を実施。

トルエン・トリクレン・ジメチルホルムアルデヒド・灯油の各溶剤に 30 日間浸漬後、引張試験を実施。強度保持率 90%以上を確保し、顕著な差は見られなかった[\[A3-5\]](#)。

2)破壊機構

川田らは、酸応力腐食環境下での GFRP 織物積層板の亀裂進展挙動と破壊機構を調査するため、加重漸減法による応力腐食割れ試験を行い、 K_{ISCC} (亀裂進展下応力拡大係数)の定量化と破壊機構の解明を行うと共に、数値計算モデルを考案し、亀裂進展速度を推定した[\[A3-3\]](#)。

(文責:北川)

A - 4 その他

(1) 研究の動向

収集した文献では ,GPクロス ,GPマットの応力腐食に及ぼすマトリックス樹脂の影響 , 連続炭素繊維シートとFRP板(炭素 , アミド)の酸性環境下での耐酸性の影響および一方向繊維強化補強材を構成するアラミド繊維(テノラ , ケブラー-K49) , ガラス繊維 , カーボン繊維素材そのものとマトリックス樹脂材の化学的耐久性についての研究が主体となっている .

(2) 研究内容の概説

ここに収集した文献では , 藤井らは , GFRPの応力腐食に及ぼすマトリックス樹脂の影響について検討した結果 , 複合材料の応力腐食割れ抵抗には , マトリックスの最適じん性値が存在し , マトリックス損傷の発生とそのレベルは樹脂のじん性に大きく影響を受ける . また , 疲労損傷は , 酸中環境下において強度低下に大きな影響を与えるとしている [\[A4-1\]](#) .

次に , 酸性環境下での連続繊維シート(炭素繊維シート) , 樹脂 , FRP板のコンクリート補強への適用性の検討にあたり , これらにより補強したコンクリートを10%硫酸水溶液に6ヶ月間浸漬する促進試験での引張 , 曲げ , 微少硬度および中性化深さ試験結果において , 樹脂には劣化が認められたが , 複合構造としてのこれらの補強コンクリートでは顕著な劣化は認められなかったとしている [\[A4-6\]](#) .

また , Antonio NANNIらは , CFRPシートを貼付補強した場合のマトリックス樹脂の劣化とそのメカニズムは , 水泡の発生とはく離現象と言う形態で現れるが , 本文献中の実験では , 炭素繊維材と対面した鉄筋の腐食の促進が認められたものの , マトリックス自体の劣化である水泡の形成およびはく離等の現象は認められなかったと報告している [\[A4-7\]](#) .

さらに , 西村らは , 一方向繊維強化補強材を構成するアラミド繊維(テノラ , ケブラー-K49) , ガラス繊維 , カーボン繊維素材そのものを温度80 , 湿度60±2%の高温環境下での耐化学薬品性劣化促進浸漬試験(アルカリ溶液 , 塩酸水溶液および蒸留水)においていずれの繊維素材とも強度低下し , SEM観察結果では , アラミド繊維であるケブラー-K49材およびガラス繊維材で塩酸水溶液浸漬試験において繊維表面の劣化性状が観察されている . また , カーボン繊維素材は , 特に , 塩酸水溶液中に60日間浸漬した場合 , 約37%程度の強度低下が確認されたと報告がなされている [\[A4-8\]](#) . これは , 今後 , 温度等の環境条件の相違による各種繊維の劣化進行の程度を把握し , 使用環境によって何らかの対策の必要性を示唆するものであると考える .

(文責:久野)

[力学的耐久性]

B-1 動的疲労

(1) 研究の動向

連続繊維補強材 (FRP) の疲労特性に関する研究は、実験的なアプローチが多い。実験方法は、FRP の素材としての評価と部材 (ほとんどがはり) としての評価が行われている。

本章は、集計した 52 件の文献を実験方法に従い分類し、FRP 単体 (23 件) と FRP を用いた部材 (29 件) としての疲労特性について概観する。

(2) 研究内容の概説

1) FRP の疲労特性

魚本らは、FRP を構成する繊維の種類をパラメーターとする疲労試験を実施し、用いられる繊維の種類による FRP の引張疲労特性の差異を明らかにしている。200 万回引張疲労強度は、AFRP と CFRP が $90\text{kgf/mm}^2 \sim 100\text{kgf/mm}^2$ 、GFRP が $40\text{kgf/mm}^2 \sim 50\text{kgf/mm}^2$ で、その残留引張強度は、AFRP が 83%、CFRP が 100%、GFRP が 69% であるとしている [B1-7]。さらに、FRP の引張疲労強度は、平均応力が高い場合、引張クリープ破壊の時間の関数に支配される場合があることを指摘している [B1-37]。

特定の FRP 材の引張疲労試験は、[B1-1][B1-8][B1-14][B1-39][B1-41][B1-47]で行われており、実証的な実験の場合と疲労強度式の提案されている場合がある。各研究とも魚本らの研究を補完する意味合いをもっていると考えられる。

FRP の水環境効果について、樹脂系複合材料は、吸水することにより、樹脂が膨潤し、複合材料中の残留応力が変化、また微視き裂や層間剥離が生じる。その結果、繊維 / 樹脂界面が劣化して、複合材の強度およびじん性が大きく影響を受けるので注意を要する [B1-42]。

FRP の末端処理は、FRP を緊張するキー技術である。原田らは、膨張剤を用いた FRP の末端を開発し、その長期安定性および引張疲労特性を研究している。付着定着においては、FRP が末端から多少抜け出すこと、末端内の抜け出しが高い定着効率を生じる原因であることを解析的に明らかにしている [B1-3][B1-33]。

そのほか、引張 - 圧縮疲労試験が [B1-31][B1-43]等で行われており、疲労寿命は、塑性ひずみエネルギーで評価できるとしている。

FRP の引張疲労強度は、既往の鋼材より優れていると考えられる。

2) FRP を用いた部材の疲労特性

実験の対象となっている部材は、すべて単純はりである。用いられたはりの種類は、RC と PC である。RC はりでは、補強を対象として、はり下面に FRP をポリマーモルタルで貼り付けた形式の実験が主に行われている [B1-2][B1-9][B1-15][B1-19][B1-25][B1-29]。PC はりでは、主緊張材に FRP が用いられた実験が多数行われている。また、水環境下におけ

る疲労試験も行われている[\[B1-44\]](#)。

一部では、FRP を用いたはりのせん断疲労耐力に関する実験も行われている[\[B1-34\]](#)。

RC はりの曲げ疲労試験は、1987 年に小沢らにより、立体格子状の FRP を用いて行われており、純曲げ区間とせん断区間でそれぞれ疲労破壊を生じさせ、部材内で FRP の疲労耐力が普通鉄筋より高いことを明らかにしている[\[B1-26\]](#)。

CFRP を主筋に用いたせん断補強筋のない RC はりのせん断疲労耐力は、土木学会式で安全側に評価でき、鉄筋を主筋に AFRP もしくは CFRP をスターラップに用いたはりは、ひずみの増加傾向と斜めひび割れ幅を既往の鉄筋コンクリートはりの研究成果から推定可能としている[\[B1-26\]](#)。

PC はりに対する曲げ疲労試験は、ひび割れ荷重以上の上限荷重を与えて行われている。ほとんどの研究において、FRP を用いたはりの疲労強度は、既往の PC 鋼材を用いたはりよりも高い事を示している[\[B1-11\]](#)[\[B1-13\]](#)[\[B1-18\]](#)[\[B1-23\]](#)。また、水中環境におけるはりの曲げ疲労試験によると、疲労強度は緊張材の種類に依存し、大きい順に CFRP・AFRP・PC 鋼材の順になるとしている[\[B1-44\]](#)。

(文責:中井,古市)

B-2 リラクゼーション・クリープ

(1) 研究の動向

1) 収集文献の内訳

リラクゼーション・クリープ等を含む連続繊維補強材の長期特性に関する研究文献を収集した。収集文献は全部で 42 件であった。収集文献の内訳を図 1 に示す。

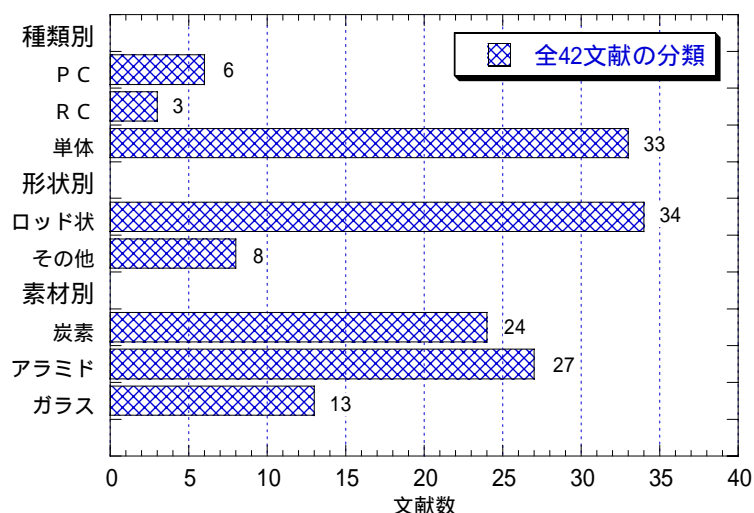


図 1 実験種類別・FRP 形状別・FRP 素材別の分類

図 1 は収集した文献を、実験された部材の種類別、FRP の形状別、FRP 素材別にそれぞれ再分類して、文献数をカウントしたものである。

部材の種類別分類の内訳

実験供試体の種類によって、PC 部材、RC 部材、単体の 3 項目に分類した。本研究分野では、FRP 単体での研究が全体の 79% であり、コンクリート部材としての実験データは比較的少ない結果となった。リラクゼーション・クリープが対称分野であるので、PC 部材としての実用的な研究成果の充実が望まれる。

形状別分類の内訳

コンクリート部材用補強材としてロッド状に成型したものと、その他（シート状、板状、筒状など）の 2 項目に分類した。ロッド状を用いた研究が全体の 81% で、ほぼ調査目的に合った文献が収集されている。

素材別分類の内訳

FRP の形状は無視して、素材の材質のみ（炭素繊維・アラミド繊維・ガラス繊維の 3 項目）に注目した分類を行った。一つの文献で複数の素材を扱った文献が多数あるので、これらは重複してカウントした。したがって、3 項目の合計数は全文献数より多くなっている。内訳としては、アラミドが一番多いが、炭素も同程度の研究が行われており、この 2 種類で全体の 80% を占めている。

2) ロッド状 FRP の分類

次に、今回の調査・検討の目的に合致すると思われる上記のロッド状 FRP を用いた研究 34 件に関して、さらに PC 部材、RC 部材、単体ごとに素材別分類を行った結果を図 1-2 に示す。図 2 は、複数の素材を扱った研究を重複してカウントしているため、合計数は 34 件より多くなっている。

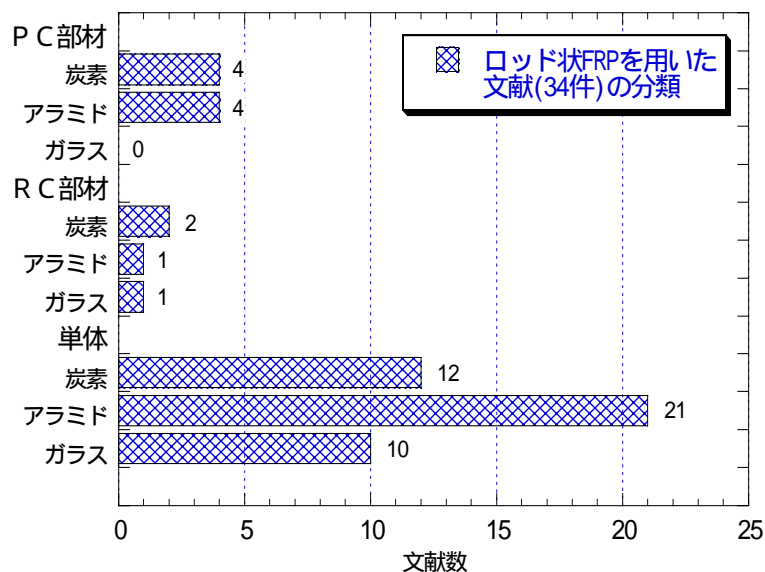


図 2 ロッド状 FRP を用いた PC・RC・単体それぞれの素材別分類

PC 部材としては、炭素繊維とアラミド繊維を使用した研究がそれぞれ 4 件であり、ガラス繊維を用いた研究は収集されなかった。RC 部材としての研究は PC 部材のそれよりも少なく、炭素繊維で 2 件、アラミド繊維・ガラス繊維はそれぞれ 1 件であった。ロッド状 FRP に関しても単体として研究されているものが多く、全体の 78% となった。単体の内訳は、アラミド繊維を用いた研究が多く報告されており全体の約 50% を占めている。残りは炭素繊維とガラス繊維を用いた研究で、件数は両者でほぼ等しい。

(2) 研究内容の概説

プレストレストコンクリート構造に連続繊維補強材 (FRP) を使用する場合、リラクゼーション率が重要な要因となるため、緊張材として利用可能な CFRP および AFRP 単体での研究が行われている [B2-5][B2-8][B2-10][B2-24][B2-28][B2-33][B2-35]。FRP のリラクゼーション率は温度依存性が認められているが、20 ~ 60 程度の範囲内では顕著な差異は無いと報告されている [B2-8][B2-10]。蒸気養生を想定して、CFRP と PC 鋼より線の 80 × 10 時間の温度履歴を受けた場合のリラクゼーション率の比較が報告されている [B2-5]。これによると、CFRP の高温リラクゼーションは PC 鋼より線と同等または小さいことが示されている。また、CFRP および AFRP の 3000 時間以上の長期リラクゼーション試験を行い [B2-28] 土木学会コンクリート標準示方書に示されている 1000 時間までの試験で、100 万時間 (約 114 年) 後のリラクゼーション率の設計基準値が設定できることが実証されている。以上まとめると、一般的な環境下で設計耐用年数を 50 年 ~ 100 年とした場合、CFRP のリラクゼーション率は 3% ~ 4%、AFRP のそれは 18% ~ 19% という結果が得られている。ACC 倶楽部では、「FRP 材を用いた道路橋設計・施工マニュアル (案) (4 訂版)」において、コンクリートの乾燥収縮およびクリープを考慮した見かけのリラクゼーション率を、CFRP で 6%、AFRP で 25% という値を提案しているので参照されたい。なお、FRP を用いた実構造物 (PC 橋) における計測結果では、限られた期間ではあるが、FRP の張力変動は小さく安定した挙動を示していると報告されている [B2-16][B2-34]。

FRP は大きな持続応力を長時間作用させた場合、静的耐力以下で破断 (クリープ破壊) することが認められている。静的耐力の約 90% の持続応力を載荷した場合、クリープ破壊までの時間は CFRP、AFRP、GFRP の順に短くなり、破断までの耐力低下は CFRP、AFRP、GFRP の順に大きくなる [B2-3]。また、持続応力比と時間には線形関係が認められ、耐用年数 100 年を考慮したの限界持続応力は、CFRP 93%、AFRP 45%、GFRP 30% と推定している [B2-3][B2-9]。クリープ破壊耐力は各々の研究によってバラツキが見られるが、FRP の種類によらず、クリープ破壊時間と載荷レベルには直線的な関係が認められる [B2-23][B2-27][B2-31][B2-36]。PC 橋梁緊張材を対称とした研究では、クリープ破壊の限界値を、50 年後の 50% 生存値として、CFRP で 79%、AFRP で 66% というデータを報告している [B2-8][B2-10]。一方、CFRP では静的耐力の 75% の持続荷重下においても、クリープひずみは無視できるほど小さいという報告もある [B2-38]。最近では、クリープ破壊モデルの構築を目的とした研究も行われ始めている [B2-7][B2-32]。部材レベルでの報告は極めて少ないが、CFRP および AFRP を用いた PC 部材の長期たわみ性状にクリープの影響を考察した研究 [B2-1][B2-22]、GFRP を用いた RC 部材のクリープたわみに関する研究 [B2-21]、CFRP および AFRP を用いた RC 部材の付着クリープに関する研究 [B2-41] 等が報告されている。

(文責:伊藤,織田,湊)

B - 3 長期試験

(1) 研究の動向

収集した 14 の文献を部材種類別，FRP 形状別，FRP 素材別に分類し，文献数をカウントしたものを図 3 に示す．

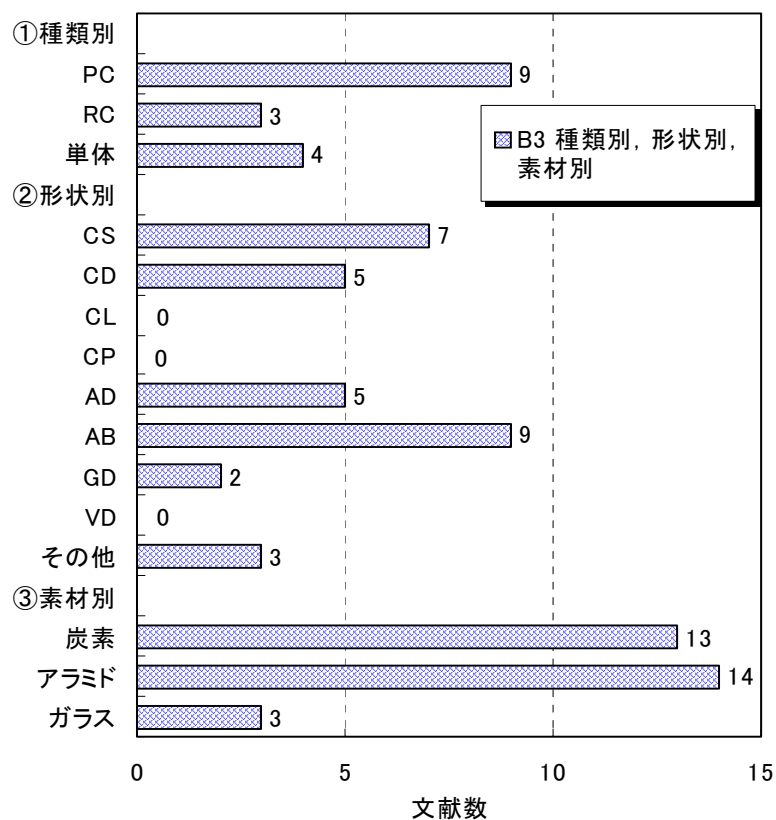


図 3 部材種類別，FRP 形状別，FRP 素材別

1)部材種類別

部材の種類は，PC, RC, 単体に分類した．PC(56%)，RC(19%)，単体(25%)である．

2)FRP 形状別

FRP 形状は素材および形状の記号別に分類した（土木学会基準に準拠する）．

形状は，組紐，より線，ロッドに分けられる．

3)FRP 素材別

FRP 素材は，炭素，アラミド，ガラスに分類した．割合は炭素(42%)，アラミド(48%)，ガラス(10%)である．

4)試験内容

PC, RC は，長期載荷試験が主であり，特に長期たわみ試験，曲げ試験（曲げ破壊試験含む）であった．単体は，クリープ試験（クリープ破壊試験含む），レラクセーション試験，アルカリ暴露試験であった．

(2) 研究内容の概説

各文献におけるポイントを項目ごとに整理する。

1) たわみ :

[\[B3-1\]](#)[\[B3-2\]](#)[\[B3-7\]](#)[\[B3-9\]](#)[\[B3-12\]](#)[\[B3-13\]](#)に長期たわみ(PC, RC)について記されている。
[\[B3-1\]](#)[\[B3-7\]](#)にプレストレス導入によりたわみを抑制できることが記されている。

2) ひびわれ :

[\[B3-3\]](#)にひびわれ(PC)について記されている。
[\[B3-3\]](#)ではひびわれ幅の算出法が記されている。

3) すべり(付着) :

[\[B3-4\]](#)[\[B3-10\]](#)[\[B3-14\]](#)にすべり(付着)について記されている。すべり(付着)は材料により異なるようである。

4) その他 :

[\[B3-6\]](#)にアルカリ性高温促進試験(単体)について記されている。結果,リラクゼーションおよびクリープ試験は水の影響を受けるが,温度 60℃ までは温度の影響はないことが記されている。[\[B3-8\]](#)に温泉雰囲気における促進試験について記されている。結果,耐食性に関しては鋼材より優れていることが分かった。ただし,熱影響については別途考慮しなければならない。

PC, RC, 単体とも室内における各種長期試験結果は文献として公開されていると思われる。

今後, 暴露試験等「環境の変化」と「長期試験」に関する研究結果が必要と思われる。

(文責:古賀,中村)

B - 4 その他

(1) 研究の動向

収集した文献を部材種類別，FRP 形状別，FRP 素材別に分類し，文献数をカウントしたものを図 4～6 に示す．

また，小テーマごとにカウントしたものを図 7 に示す．

1) 部材種類別件数

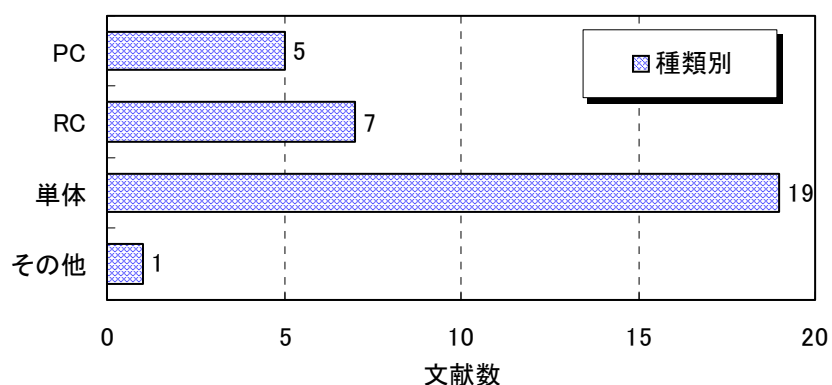


図 4 部材種類別

本項目の部材種類は半数以上が FRP 単体である．これは FRP を構成している繊維とマトリクス樹脂との物理的關係に着目した文献が多いことに由来する．その他の 1 件は繊維化ガラスの物性に関する試験であり，本来 FRP とは異質なものであるが，参考として本項目に含めることにした．

2) FRP 形状別件数

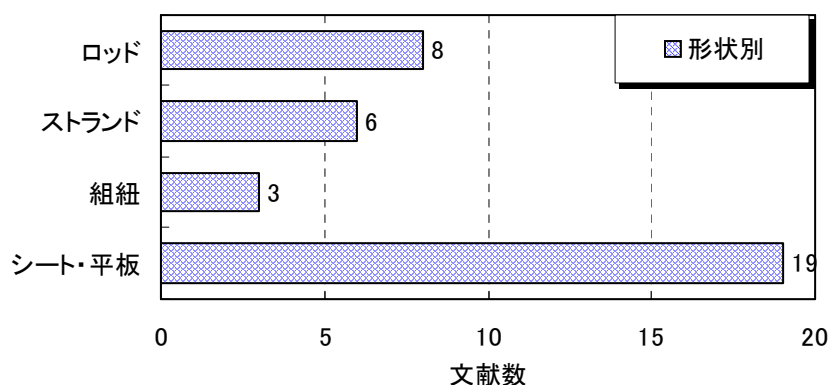


図 5 FRP 形状別

FRP の形状別ではシート・平板状が最も多く、a. の単体の半数以上が平板状である。また、この形状の中にはシートを丸めて円管状にしたもの（1件）や、単繊維の特性について調べたもの（1件）も含まれている。

3) FRP 素材別件数

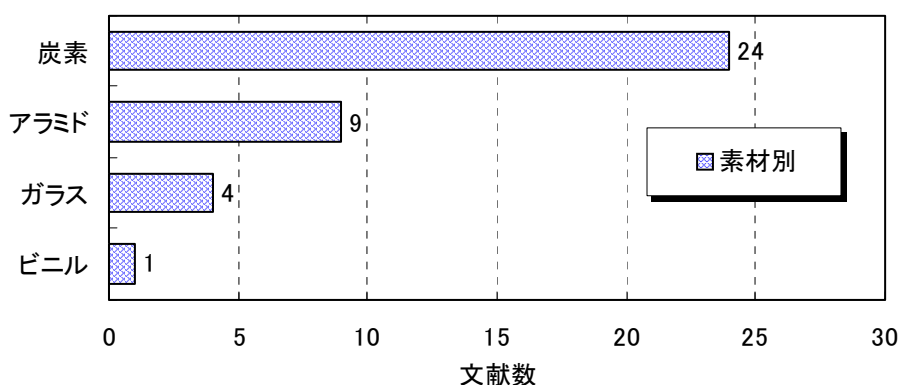


図 6 FRP 素材別

FRP の素材はほとんど炭素繊維である。入手のしやすさ、採用物件数の多さを考えると、当然の結果と言える。

4) テーマ別件数

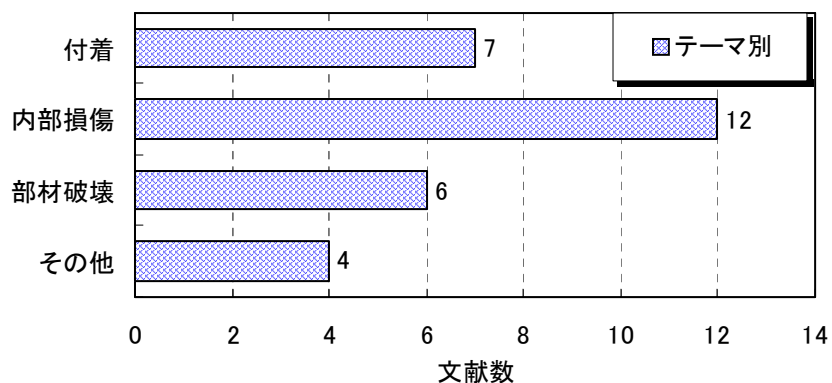


図 7 テーマ別件数

テーマ別では内部損傷、特に積層体の層間はく離に関する文献が多い。次いでコンクリートと FRP の付着を扱ったもの、FRP 単体またはコンクリート部材に発生するひび割れに着目したものが数件ずつある。その他には FRP を用いた人道橋の載荷試験、吸湿による物性変化を調べたもの、単繊維の引張試験などが報告されている。

(2) 研究内容の概説

1) FRPとコンクリートとの付着に関するもの

付着に関する実験は炭素・アラミド・ガラスの各材料に対して行われており、部材形状は円柱や直方体の引抜き[B4-11][B4-16][B4-18][B4-25]のほか、はり型の躯体にFRPを配置したものの[B4-15][B4-21][B4-22]もある。パラメータとしては緊張材の表面形状(ロッド・組紐・ストランド等)、定着長、PC部材の場合は緊張力などがある。載荷方法は片引き・曲げ引張に分けられ、静的破壊、動的疲労および長期クリープの3種類について試験が行われている。

測定方法は緊張材端に変位計を取り付けるのが一般的だが、AE(アコースティック・エミッション)法による非破壊試験を行った報告もある[B4-21]。

結果はつぎの4点にまとめられる。

- ・付着性能はFRPの表面形状や弾性係数に著しく影響を受ける。
- ・付着強度と定着長はほぼ比例関係にある。
- ・プレストレスの導入は付着性能に大きな影響を与える。
- ・AE法は付着劣化の時空的プロセスを把握するのに有効である。

2) 内部損傷に関するもの

内部損傷に関する論文は、FRP積層材の層間はく離[B4-4][B4-5][B4-6][B4-7][B4-10][B4-12][B4-13][B4-23][B4-24]と、繊維-母材間の界面破壊[B4-6][B4-17][B4-20][B4-26]の2種類に分けられる。

素材は12文献中11件が炭素、残る1件はガラスであり、内部損傷に関してアラミドを対象とした報告はない。部材形状はすべて平板またはシートであるが、積層板の場合繊維層に比べて母材樹脂層の強度が著しく低いため、この部分の破壊メカニズムを解明、または補強方法を提案した報告がほとんどである。

載荷方法は軸引張、3点曲げ、片持ちはりなど静的載荷のほか、繰り返し衝撃による破壊過程を追跡したものもある[B4-10]。

結果はつぎのようにまとめられる。

- ・供試体の支持方法、載荷方法とその速度などの違いはあるが、積層構造の破壊は繊維の方向に大きく依存し、繰り返し載荷ではこの影響がより顕著となる。
- ・荷重負担能力の最も高い繊維方向は 0° (供試体軸に平行)である。
- ・微視的な破壊形態はひずみ速度に依存し、ひずみ速度が小さい場合は母材樹脂、大きい場合は繊維-母材樹脂間の破壊が支配的である。

3) 部材破壊に関するもの

部材破壊に関する論文には、FRPを用いたRC・PCはりの各種特性を調べたもの[B4-2][B4-3][B4-14][B4-28]、FRP単体の平板供試体に発生する亀裂を追跡したもの[B4-8]

[\[B4-9\]](#)[\[B4-30\]](#)がある。

前者はひび割れに着目したり，載荷方法が繰り返し衝撃だったり，通常のはり供試体を用いながら独自の視点で実験を行っている。後者は 2. にまとめた層間はく離などの内部損傷について触れていない文献をまとめた。部材形状や載荷方法などは文献によりまちまちであるが，いずれも FRP の微視的構造における解析の妥当性を検証したものになっている。特に[\[B4-30\]](#)は部材の亀裂進展を光学的手法により観察するユニークな実験を行っている。

4) その他

前記 1)～3)に該当しないものとして，つぎのような文献があった。

- ・炭素ストランドを使用した PC 人道橋の載荷実験[\[B4-1\]](#)
- ・吸湿による CFRP の粘性係数変化[\[B4-19\]](#)
- ・直径変化を伴う炭素単繊維の引張試験[\[B4-27\]](#)
- ・炭素繊維強化ガラスの 4 点曲げ試験[\[B4-29\]](#)

(3) 今後の展望

コンクリートの分野における FRP の利用に際しては，弾性挙動やクリープ特性など，通常の使用範囲における FRP 単体または PC, RC の性質を把握することのほかに，複合体としての特性が維持できる限界点を知ることがより重要になってくる。(2) の 1), 2)にあるような，FRP とコンクリートの付着性能を調べたり，繊維 - 母材樹脂間のはく離に着目した論文が多いのは，FRP を補強筋や緊張材として用いる上での前提条件が整備され，より実構造に近いレベルでの特質の把握が求められていることを示している。また 3)のような切欠きを設けた FRP の引張試験は，取扱いが難しいとされる FRP の損傷に対する鋭敏度を定量化したものと言える

本項目にまとめられた文献より提案された理論が，FRP の持つメリットを最大限に生かし，計画・設計・施工レベルにおける信頼度を向上させるとともに，今後より多様な形式で試験を行うことで，FRP がさらに身近な存在としてコンクリート分野のみならず，広く土木分野で採用されることを期待する。

(文責:渡部,細谷)

[熱力学的耐久性]

C - 1 耐熱性

(1) 研究の動向

連続繊維補強材の耐熱性に関する研究文献としては 24 件が抽出された。それらの内訳を下表に示す。縦軸には部材の種類を、横軸には連続繊維の種類を分類した。なお、件数についてはひとつの文献中に複数の部材種類あるいは連続繊維の種類を扱ったものがあるので合計数は文献数よりも多くなっている。

表 3 耐熱性に関する研究分類

	炭素繊維	アラミド繊維	ガラス繊維	ビニロン繊維	計
FRP	10	5	4		19
RC	8	8	4	1	21
PC	2	1	1		4
計	20	14	9	1	44

1) 部材の種類別分類

試験供試体の種類によって、FRP (単体)、RC 部材、PC 部材の 3 項目に分類した。本研究分野では、FRP 単体での実験及び研究がコンクリート部材としての実験および研究が FRP 単体でのそれよりも多くなっている。このことは、連続繊維補強材の耐熱性に関してはコンクリート部材としての性能についての関心が高いことを示している。

連続繊維補強材単体の耐熱性はマトリックスレジン耐熱性に支配される場合が多いので、必然的に FRP 単体では耐熱性は期待できない場合が多い。ところが、実際の使用状況を考慮するとコンクリートとの複合体として機能することから、コンクリートとの複合体としての耐熱性を研究することのほうが、より現実的であることが示されている。

2) 連続繊維の種類別分類

連続繊維の種類別による分類結果では、炭素繊維 45%、アラミド繊維 32%、ガラス繊維 20%、ビニロン繊維 2% であり、炭素繊維とアラミド繊維で全体の 8 割弱を占めており、両者に対する関心が高いことを示している。

(2) 研究内容の概説

調査した範囲では耐熱性の評価方法は、千差万別で各種の方法が用いられている。FRP単体の耐熱性の研究例を示す。温度条件としては多くの場合高温下の影響を研究しているが、低温特性に着目した研究も見られる。この例として藤崎らは[C1-5]において20~-170の温度範囲での炭素繊維およびガラス繊維とビニルエステル樹脂とのFRPの引張強度を測定している。それによると、いずれのFRPとも20~-60の範囲では、破断荷重および剛性とも温度による影響が見られなかったこと、さらに低温の場合には破断荷重は増加することを報告している。

高温下の研究例としては、Kumahiraらによる60~400の範囲での熱間および加熱後の常温下での引張強度測定が報告されている[C1-7]。それによると加熱温度が250以下の場合は、アラミド繊維およびビニルエステルをマトリックスとしたガラス繊維を除いて、熱間での引張強度保持率は約80%であったこと、ヤング係数の低下は非常に小さいとしている。また、400まで加熱した場合の引張強度保持率は、マトリックスが有機材料の場合、40~60%、無機材料の場合は80%以上と報告している。

(文責:谷木)

C - 2 耐候性

(1) 研究の動向

連続繊維補強材の耐候性（一部，“浸漬試験”等も複合された実験を含む）に関する研究文献 15 件の内訳を図 8～10 に示す。

図 8～10 は，収集した文献を 部材の種類別， FRP 形状別， 素材別にそれぞれ再分類したものである。

1)部材の種類別分類

試験供試体の種類によって，PC 部材，RC 部材，単体の 3 項目に分類した。

本研究分野では，FRP 単体での実験及び研究が全体の 75%を占めており，PC 及び RC のコンクリート部材としての研究データが少ない事が判明した。

基本的に，FRP 素材の耐候性（耐久性）等物性については，まだ，解明されていない部分が多く，素材単体での研究が中心となるのは，ある意味で仕方がない状況と考える。

今後，素材でのデータがある程度蓄積された後，並行して，PC 及び RC 部材での研究が増加する事と期待される。

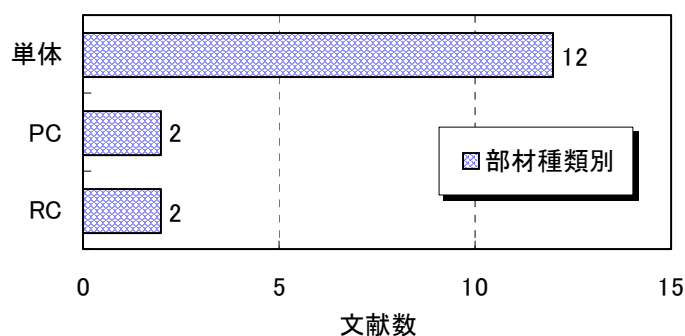


図 8 部材種類別

2)素材別分類

FRP の素材別（ビニロン繊維，ガラス繊維，炭素繊維，アラミド繊維）による分類を実施した。比率としては，上位から炭素繊維 38%，アラミド繊維 30%，ガラス繊維 24%，ビニロン繊維 8%であり，炭素繊維とアラミド繊維で全体の 62%を占めている。

ガラス繊維についても，安価で，物性的に非常に有用である事から，数多くの研究が今でも行われているが，前者よりも強度的に優位で，“最先端材料”の感が強い炭素繊維，アラミド繊維が研究分野においても，クローズアップされがちである事は，周知の事実である。

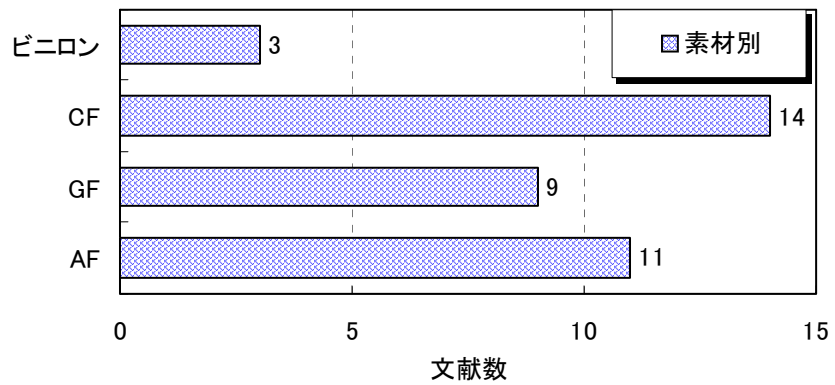


図 9 素材別

3)形状別分類

本分野の研究に使用された連続繊維補強材の形状は、ロッド状に成形したものが最も多く、全体の 79% を占め、以下、ストランド 5%、格子状 5%、組紐状 5%、矩形 3%、繊維素材 3% となっている。

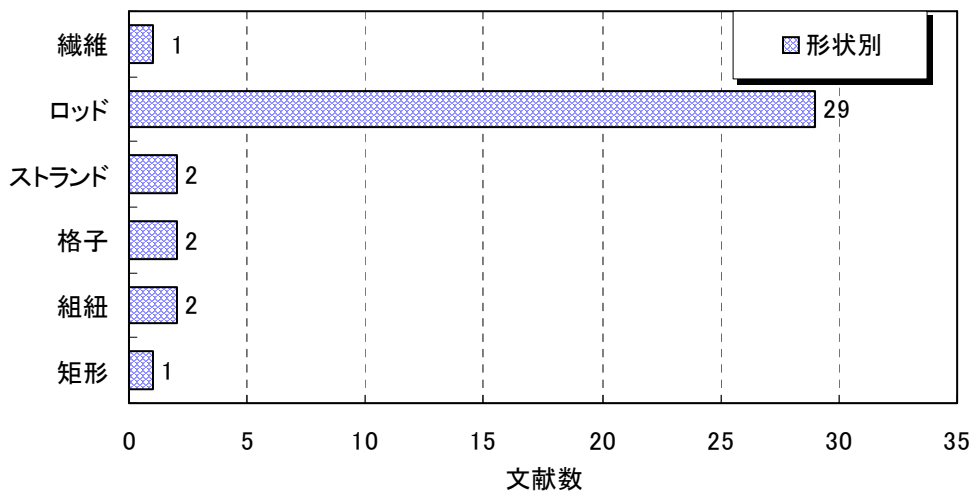


図 10 形状別

(2) 研究内容の概説

耐候性の評価方法には、数種のアプローチが存在するが、本分野における調査文献で最も多い評価方法は、ウエザーメータを使用した紫外線照射による促進試験であり、全体の53%を占める。([C2-2] [C2-4] [C2-7] [C2-9] [C2-10] [C2-12] [C2-13])

これらの研究の中で、ガラス繊維及び炭素繊維に関しては、紫外線照射による極端な強度劣化は、殆ど確認されないが、アラミド繊維は明らかに強度低下が確認される事(紫外線照射量 約 $0.2\text{MJ}/\text{m}^2$ を 1000 時間で強度低下 55%) が述べられている。([C2-2] [C2-4] [C2-7] [C2-13])

上記の実験の供試体は、約 80% が FRP ロッド材であった。また、CFRP の一方向シートのプリプレグの促進試験についても、[C2-10] で述べられており、曲げ強度比で 3~5% 程度、曲げ弾性率比で 4% 程度しか低下しない事が判っている。更に、エポキシ樹脂で含浸した炭素繊維メッシュについても、実験されており[C2-12]、CFRP 材の強度劣化の低さが証明されている。

また、促進ではなく、一般環境よりも過酷な条件での暴露試験として内陸及び海洋暴露試験による評価方法がある。([C2-1] [C2-3] [C2-6] [C2-8])

[C2-1] [C2-3] では、GFRP、CFRP、AFRP 全てのロッドにおいて、海洋よりも内陸暴露の方が強度劣化が激しいという結果が得られており、その中でも AFRP ロッドの場合、内陸、海洋の両条件において強度低下が著しく、また、GFRP 及び CFRP ロッドは、海洋よりも内陸暴露の方が劣化が進行する事が判明している。

一般的な屋外暴露試験においても、アラミド繊維の耐候性の弱さが指摘されている。[C2-11] では、アラミド繊維の組み紐棒材について、屋外暴露試験が行われているが、断面積の小さな部材ほど強度劣化の進行が早く、大きいものほど進行が遅いという結果が得られている。これは、紫外線が部材中央部に到達するまでに外壁のマトリックス及び繊維にエネルギーを吸収されるためと考えられる。

ここまでは、ガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維に関してのみの研究文献であったが、ビニロン繊維を供試体として使用した実験もある。[C2-14]にてビニロン繊維の耐候性についての実験が行われている。ここでは、同じ熱可塑のポリエチレンが照射 800 時間で 80% も強度保持率が低下したのに対し、ビニロンは 10% 程度しか低下せず、優れた耐候性を有する事が実証されている。ビニロンに関する研究は希少であるため、非常に有用である。

また、[C2-5]では、実験的研究ではなく、耐候性の用語の定義や、耐候性を評価する各種試験方法の解説、そして、促進耐候性試験と屋外暴露試験の相関性等について、記述している文献もある。

(文責:金野)

C - 3 耐凍結性

(1) 研究の動向

耐凍結性に関係する文献は 5 件であったが、各文献とも独自の研究を展開しており、全体的な動向を窺い知ることはできない。

内容としては、マトリックス性能比較、連続繊維補強材の付着力、極低温化衝撃力検証などである。

(2) 研究内容の概説

炭素繊維補強セメントの凍結融解物性を検証するため、PAN系炭素繊維によるセメントプリプレグシート供試体の曲げ試験を実施したところ、強度、弾性率とも弾性率の低下は認められていない[C3-1]。

炭素、アラミド、ガラス、ビニロンのロッドをコンクリートに埋め込んだ供試体による凍結融解試験では、アラミドのみがやや付着力の低下が見られた [C3-2]。

また、CFRP ロッド補強押出セメント板の検討において、通常の押出成形マトリックス（比重 1.9）と軽量押出マトリックス（比重 1.65）との凍結融解性能の比較では、ほぼ同等の性能を示している[C3-3]。

伝導施設対応の極低温下（ - 196 ）における耐衝撃性に関する研究では、炭素繊維ロッドの場合は一定のひずみ速度のときに引張破断が生じる可能性があるが、アラミド繊維ロッドの場合には破断が見られなかったと報告されている[C3-4]。

他、炭素繊維コンクリートパネルをカーテンウォール材として使用する場合の耐久性試験の中で凍結融解性能も問題ないとするレポートが提出されている[C3-5]。

(文責:小林)

C - 4 耐火性

(1) 研究の動向

耐火性に関する文献は全部で 15 件であった。耐火性を特に問題とするのは建築分野であり、C4 に属する文献の出展もそれを裏付けている。文献の内訳は、日本建築学会で発表されたものが 9 件、日本コンクリート工学協会(JCI)で発表されたものが 4 件、「工業材料」、
「FRPRCS」が各 1 件であった。

著者は、建築学会で発表されたものは別として、JCI では 4 件中 2 件[C4-2] [C4-3]が建築関係者、「工業材料」および「FRPRCS」についても共に建築関係者であった。つまり、C4 の文献 15 件中、建築関係の文献が 13 件と、約 9 割を占めている。

特徴的なのは、FRP 単体のみの文献は全体の 1/3 と少なく、FRP を用いた RC、PC 部材としての耐火特性に関する文献が大部分であることである。これは、耐火という性質上、コンクリート自体も影響を受けるため、FRP とコンクリートとの複合部材としての評価が必要であることが理由であると考えられる。また、文献が発表された当時の建築分野では評定制度というものがあり、実際に試験を行い、その性状を確認する必要があったことも理由の一つとして挙げられるであろう。一方、土木関係の 2 件については、RC および単体が各 1 件ずつであった。

(2) 研究内容の概説

使用された材料は、炭素、アラミド、ガラスの順に多く、炭素およびガラスに関しては異型タイプが多く、アラミドに関しては組み紐状タイプが多かった。

試験方法としては、コンクリート部材を載荷した状態で加熱する方法が主であった。

一般的な結果として、載荷した状態で加熱した場合、加熱に伴うたわみの増加が認められている。これは、コンクリートの熱膨張の影響もあるが、加熱されたことによって FRP のヤング係数が低下したことが主要因であるとされている。また、その後の性状については、使用した材料や形状に依存している。炭素繊維を使用した RC 部材の場合、組紐状やストランド状のものを使用した場合では、たわみが急激に増加した後、FRP の破断によって破壊しているのに対して、同じ炭素繊維でも、異型ロッド状のものは破壊には至っていない。これは、単体での高温引張試験を行った結果、組紐状やストランド状では、ヤング係数や引張強度の低下率が異型ロッド状のものに比べて大きくなるという傾向と一致している。

アラミド繊維を使用した場合は、形状に関わらず、加熱後、時間とたわみはほぼ比例関係を示すが、その後急激にたわみが増加して、FRP の破断によって破壊している。この場合も炭素繊維の場合と同様に、単体での試験結果と一致している。すなわち、アラミド繊維の場合、高温では著しいヤング係数および強度の低下が認められている。

このような現象は、マトリクス材料に影響されるという報告[C4-1]もある。有機系のマトリクスを使用したものはマトリクスの溶解によって温度の影響を受けやすく、無機系の

マトリクスの場合は影響を受けにくいというものである。

また、FEM 解析や、弾性解析を行い、試験結果と比較・検討している報告[C4-10] [C4-13] [C4-14]もあった。これらの報告では、比較的コンクリート表面に近い部分の温度推移は FEM 解析によって追跡可能であるが、より内部に近い部分では水分の移動を考慮する必要があり、FRP の劣化は単体の試験によって得られた温度と FRP の劣化の関係から推定できると述べられている。ただし、より内部に近い FRP の劣化については、水蒸気の影響を考慮する必要があるとの記述もある。また、弾性解析を行う場合には、熱膨張変形や亀裂からの熱流入についても考慮する必要があり、異型ロッド状の炭素繊維では比較的实验値と近い値が得られている。

重ね継手を設けた RC 部材の挙動に関する報告[C4-6]もあった。ここでは、有機系のマトリクスの熱劣化により、重ね部の強度が低下し、加熱中に RC 部材が破壊している。

以上、C4 の文献について総括的に見てきたが、熱の影響は FRP の材料やその形状よりも、むしろマトリクス対して大きく、マトリクスの劣化が FRP の劣化に大きく影響しているという傾向が見られた。

(文責:白濱)

C - 5 その他

(1) 研究の動向

対象文献数は 6 件で、特別な傾向はみられなかった。

(2) 研究内容の概説

複合材の機能特性の一つである非磁性を生かした鉄筋代替及び環境問題から処理方法の研究が行われており、以下代表例を紹介する。

非磁性 FRP 開発のための立体補強材の磁気特性

柿沢らは、外部からの低周波磁気ノイズを防ぐ「アクティブシールド」技術について、炭素繊維 FRP による 3 次元織物補強コンクリートを用いて(比較材として鉄筋、ワイヤメッシュ)非磁性 FRP を建造し磁気特性について検討を加え、炭素繊維製が他材料に比較して優れていることを見いだしている [\[C5-1\]](#)。

炭素繊維抵抗膜を用いたテレビ電波吸収壁の開発

中川らは、炭素繊維抵抗膜を埋設した外壁 FRP のテレビ電波吸収特性に関して、UHF 帯テレビ電波に対しては外壁断面内に電波吸収材を収めることが可能としている [\[C5-5\]](#)。

コンクリート補強用耐放射線アラミド繊維強化樹脂の開発

松原らは、硬化剤を含む FRP の樹脂の粘度が室温付近で 103cps 以下の耐放射線用樹脂を見いだすことにより、100Mgy の大線量に耐えるアラミド繊維 FRP 筋の仕様を確立した [\[C5-3\]](#)。

CFRP の熱分解法によるリサイクル

牛越しらは、FRP の樹脂及びフェノール樹脂を用いた CFRP の熱分解試験により、炭素繊維がほぼ 100%に近い収率で残さとして回収出来ることが判明した。また、回収繊維の表面状態及び力学的特性に大きな変化は無く、再使用可能との結果を得た [\[C5-2\]](#)。

(文責:北川)

1.4 調査のまとめ及び今後の課題

本報告書は、1987年より1998年までの12年間にわたるFRP材を使用したコンクリート部材の耐久性に関する国内外約230件の論文を化学・力学・熱力学の3分野に分類した上で、調査した全ての論文を抄訳としてまとめたものである。

論文の研究動向は、下表に示すように、化学的問題を取扱ったものが1994から1998年の5年間に集中して発表されてはいるものの、力学的・熱力学的問題を取り扱った研究が圧倒的に多く調査件数の約80%を占めている。

表4 年代別文献数

	A1	A2	A3	A4	計	B1	B2	B3	B4	計	C1	C2	C3	C4	C5	計	合計
	耐 セ メ ・ ア ル カ リ	耐 塩 水	耐 薬 品	そ の 他		疲 労	リ ラ ク ・ ク リ ー プ	長 期 試 験	そ の 他		耐 熱	耐 候	耐 凍 結	耐 火	そ の 他		
1987			1		1	1				1	1					1	3
1988					0					0	1					1	1
1989					0	4		1	1	6			1	1		2	8
1990					0	9	1	2		12	3			2		5	17
1991	1				1	4	2	2		8	2	1				3	12
1992	1				1	6		3	1	10	1	1		2		4	15
1993	1				1	7	7	1	2	17	4		1	1		6	24
1994	1		1	1	3	5	3	1	6	15	1				1	2	20
1995	3		1	2	6	5	11	4	6	26	3	2	2	2	1	10	42
1996	3		1	2	6	4	7	1	3	15	3	2		2	1	8	29
1997	8	8	3	2	21	12	18	4	4	38	4	6	1	3	2	16	75
1998	4		3	2	9	2	3	1	10	16	2	1		2	1	6	31
1999					0					0		2				2	2
合計	22	8	10	9	49	59	52	20	33	164	25	15	5	15	6	66	279

また、研究は、FRP単体の評価からFRP材を補強材とするコンクリート部材の評価へ移行する傾向が見られたものの、近年は、FRP単体を構成するマトリックスそのものやマトリックスと補強繊維間の界面問題など、今後予想される幅広い適用分野に対応するための微細構造の評価、環境問題対策としての回収・再利用性の評価などについても行なわれている。

化学的耐久性については、次のようにまとめることができる。

FRP単体は、耐セメント・耐アルカリ・耐水・耐塩水に関する劣化促進試験の結果において、一般に、その引張強度が低下する傾向にある。しかし、アルカリに弱いとされているガラス繊維強化プラスチック(GFRP)でさえもコンクリート程度のアルカリ度であれば引張強度の低下は殆ど認められず、一般のアルカリ雰囲気中において実用上の問題はないと思われる。その一方で、酸性環境下での引張強度劣化の報告があり、一部の薬品などの環境下における問題が残ることも事実である。なお、炭素繊維シートで補強したコンクリート試験体の劣化促進試験結果からは、FRP材表面の劣化が認められるもののマトリックス内部への劣化進行がなく、炭素繊維シートとコンクリートとの複合部材としての諸耐力に関する部材性能に顕著な劣化は認められてはいない。

力学的耐久性については、次のようである。

力学的耐久性に関する研究は、FRP単体またはFRP材を引張補強材とするコンクリート部材を用いた疲労、リラクゼーションおよびクリープの研究がほとんどである。これらの研究によれば、FRP単体は、既往の鋼材に比して、引張疲労特性が一般的に優れていること、および、リラクゼーション・クリープも顕著な差異がないことが明らかにされている。FRP単体の引張疲労特性は、補強繊維の種類により差が認められている。引張疲労強度は、定性的に炭素繊維強化プラスチック(CFRP)とアラミド繊維強化プラスチック(AFRP)がほぼ同等でGFRPがその半分程度であり、これを残留引張強度率で見れば、CFRPがほぼ10割、AFRPは約8割、GFRPが7割である。また、静的疲労特性では耐力の90%の持続応力を載荷したFRP単体のクリープ破壊までの時間が、CFRP、AFRP、GFRPの順に短くなるのが通常である。なお、コンクリート部材中に緊張材として使用したFRP材のコンクリートの乾燥収縮およびクリープを考慮した見かけのリラクゼーション率は、当ACC倶楽部で提案しているCFRPで6%、AFRPで25%の値が、今回の調査結果から見ても妥当であると評価することができた。一方、鉄筋コンクリート梁の研究成果によれば、FRP材を引張補強材として用いたコンクリート部材での、FRP材のひずみ増加とひびわれ幅の関係が明らかにされてきている。

熱力学的耐久性に関しては、次のようである。

FRP単体の耐熱・耐候・耐凍結・耐火性は、その性能レベルの評価と性能発揮過程の研究が進められている。特に、FRP単体の耐熱・耐火性能は、補強繊維よりもエポキシ樹脂等の有機系マトリックスの性能に左右されることが明らかにされている。FRP単体は、熱や火に直接曝される場合では金属ほどの耐熱・耐火性能を期待することが出来ないが、かぶりコンクリートがFRP材までの熱伝達を遅らせる被覆材として働くコンクリートとの複合体として用いられる場合の評価が重要である。FRP単体の耐候性は、補強繊維が炭素またはアラミドなどの場合、使用繊維の品種や外部形状毎に異なった傾向にあることが判明している。

その他、磁気特性、電波吸収性などの電気物理的研究に関する報文も多々みられている。

以上の研究結果によれば，FRP 単体の力学的特性および通常の化学的環境下での耐蝕性に関する耐久性は，一般の鋼材より優れていることが明らかにされており，当 ACC 倶楽部編『FRP 材を用いた PC 道路橋設計・施工マニュアル - 4 訂版 - ，平成 10 年 4 月』を利用して設計すれば，実用上の問題はないと評価できよう．

しかしながら，耐久性設計やライフサイクルコスト(LCC)的評価を実施し，鋼材の適用が難しいとされるコンクリート部材の軽量化を図る薄いかぶりでの採用や，防錆被覆の無い露出状態での使用を積極的に進めるには，FRP 単体に関する，力学的特性および耐蝕性に関する耐久性以外の，化学的・熱力学的性能を適切に評価することが必要であり，必然的にこれらの耐久性に関する定量化が要求され，この要求に応える研究が必須となる．

そのための課題として次のものが挙げられる．

- ・ FRP 材劣化の主要因であるマトリックスの劣化，および補強繊維とマトリックス間の界面剥離に関する機構の解明および改良
- ・ FRP 材とコンクリート間の界面剥離現象の挙動解明および定量化
- ・ 劣化予測のシミュレーション手法の開発
- ・ 微細かつ長期的劣化解明のための，FRP 材にセンサー機能やモニタリング機能を取り入れた FRP 材のインテリジェント化

ACC 倶楽部技術委員会としては，引き続き文献調査の継続と調査報告書の充実(改訂版)を行なうとともに，耐久性設計法の確立に貢献する資料の提供をしていきたい．

以上