

# 論文 連続繊維補強材の高温引張特性と載荷加熱時の梁曲げ変形挙動に関する研究

棚野 博之<sup>\*1</sup>・坂下 雅司<sup>\*2</sup>・榊田 佳寛<sup>\*3</sup>・大野 吉昭<sup>\*4</sup>

要旨：本研究は連続繊維補強コンクリート部材の耐火性能に関する評価方法作成のための基礎資料を得ることを目的に、各種連続繊維補強材の高温下における引張り特性とその特性値を基に加熱時の部材の変形挙動の予測方法について検討した。

その結果、載荷加熱試験における連続繊維補強コンクリート梁部材の実測たわみ量が比較的容易に算出可能であることがわかった。

キーワード：連続繊維補強材、耐火性能、高温引張特性、載荷加熱、

## 1. はじめに

連続繊維補強材の建設分野への応用は多種にわたっており、特に土木ではPC橋の緊張材や海岸沿いや塩害の受けやすい地域に建設される構造物などへの利用が盛んに行われている。しかし、建築では、鉄筋やPC鋼材の代替材としての耐力部材への使用は未だ認められていない。これは連続繊維補強材の素材繊維や結合材に可燃性材料が使用されており、これらの可燃性材料からなる連続繊維補強材の許容温度が未だ明らかにされていない為、連続繊維補強材を使用したコンクリート部材の耐火性能を現行の試験方法で評価することが困難であることが最大の理由である。よって、連続繊維補強コンクリート部材の耐火性能を適切に評価し、建築分野の構造部材に利用する為には、許容鋼材温度に基づく現行の耐火試験方法ではなく、例えば載荷加熱試験などの新しい評価方法とそれに基づく設計方法の検討が必要である。

本研究は、第一に、連続繊維補強コンクリート部材の耐火設計に必要な連続繊維補強材の高温時の力学特性を明らかにすることを目的に、高温引張強度試験と高温引張弾性係数試験を実施し、高温時の力学特性とその評価方法について検討を行った。第二に、得られた高温時の力学特性を基に弾塑性解析を行い、建設省総合技術開発プロジェクト「建設事業への新素材・新材料利用技術の開発」(略称、新素材総プロ) [1]の一部として行われた連続繊維補強コンクリート梁部材の載荷加熱試験の実験結果との比較検討を行った。その結果、2種類の引張強度試験結果から得られた力学特性値を基に、載荷加熱試験の評価基準の一つである中央部たわみ量を弾塑性解析で比較的容易に推測できたのでここに報告する。

## 2. 研究概要

本研究は、1)アラミド繊維と炭素繊維について高温引張弾性係数試験および高温引張強度試験を行い、常温から500℃までの試験体温度と引張弾性係数との関係を検討、2)梁部材の載荷加熱試験結果と1)で得た高温時の引張弾性係数に基づく弾塑性解析との比較検討を行った。

\* 1 建設省建築研究所 第二研究部有機材料研究室長、工博 (正会員)

\* 2 (株)建材テクノ研究所、工修

\* 3 宇都宮大学教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

\* 4 (財)ベターリビング 筑波建築試験センター

## 2.1 使用材料

表-1、表-2に高温引張弾性係数試験および高温引張強度試験で使用した各連続繊維補強材の形状とメーカーのカタログ物性値を示した。

## 2.2 試験体

試験体長さは1000 mmで、両端に200 mmの定着部を設け、試験区間は600 mm(加熱区間は400 mm)とした。定着材には高温による抜けを防止するため膨張モルタルを使用した。

## 2.3 試験装置

最高550℃の加熱炉を有する容量10tonの疲労試験機に試験体をセットした(図-1)。試験体の変位は、試験体中央部にセットした高温用クリップゲージ(検長25 mm)および疲労試験機のクロスヘッド間の2種類を測定した。試験体表面温度は、試験体中央部、加熱区間の上端および定着治具端から70 mmの位置の計3カ所にステンレス線で固定した熱伝対(K型)で計測した。

なお、常温および50℃の場合はその他に試験体中央部に対で張付けた検長2 mmのストレインゲージおよび検長200 mmの変位計でも測定し、計4種類の歪み測定方法の検証も同時に行った。その結果、破断荷重の50%程度まではいずれの測定方法もほぼ同様の歪み量が計測されたが、ストレインゲージの場合はゲージの剥離などにより破断まで計測することは困難であった。

## 2.4 試験方法

### (1) 高温引張弾性係数試験方法

常温(20~25℃)ならびに50℃以降は500℃まで50℃ピッチで炉内温度を上昇させながら、各設定温度ごとに下限1 kN、上限9 kN(推定破断荷重の10%)の範囲で10回繰返し引張強度試験を行い、その応力-歪み関係から各温度ごとの引張弾性係数を算出した。ただし、温度上昇中に歪み量が急増した場合には25℃ピッチで試験を行った。なお、引張強度試験方法は新素材総プロの成果を基に提案された連続繊維補強材の引張試験方法(案)[2]に準拠したものである。

表-1 高温引張弾性係数試験での使用材料

繊維種類	記号	形状	直径(mm)	断面積(mm <sup>2</sup> )
アラミド1	AFRB1	組紐状	9.0	63.0
アラミド2	AFBR2	組紐状	9.0	63.0
アラミド	AFSP	螺旋糸巻	8.0	50.2
炭素	CFBR	組紐状	9.0	63.0
炭素	CFST	より線状	7.5	50.0
炭素	CFR	直線状	5.1	18.1

\*アラミド1とアラミド2は組み方のピッチが異なる

表-2 高温引張強度試験での使用材料

繊維種類	記号	形状	直径(mm)	断面積(mm <sup>2</sup> )
アラミド	AFBR	組紐状	9.0	63.0
炭素繊維	CFBR	組紐状	9.0	63.0
炭素繊維	CFST	より線状	7.5	50.0

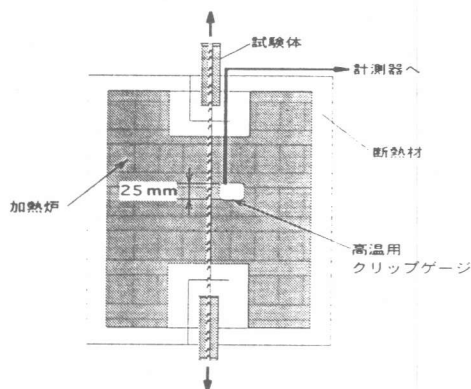


図-1 試験体の取付け概要

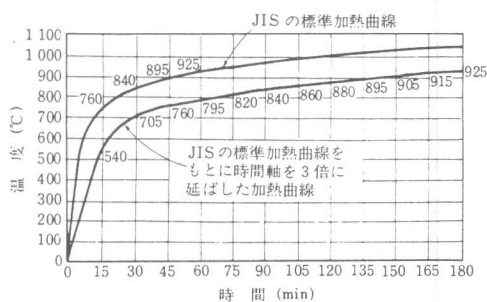


図-2 加熱時間温度曲線

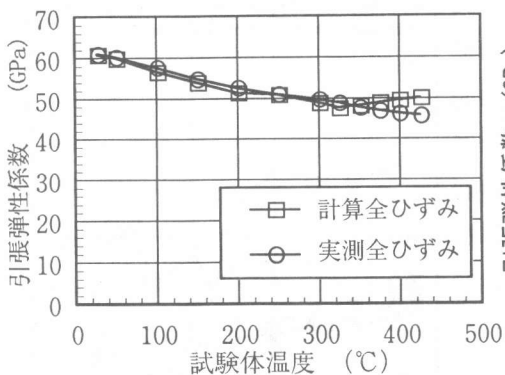


図-3 組紐状アラミド繊維補強材

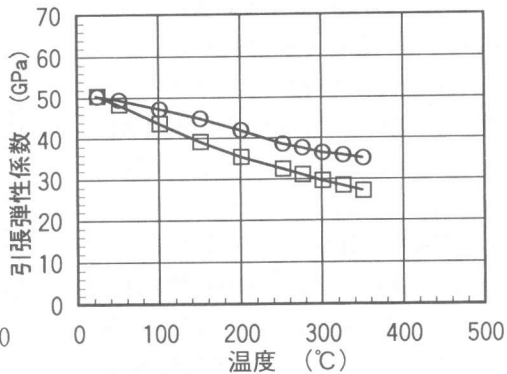


図-4 より線状アラミド繊維補強材

## (2) 高温引張強度試験方法

試験温度は常温、150℃、250℃、350℃および450℃の5水準とした。試験体中央部の温度が所定温度に達した後、中心部と表面部が同温度となるよう10分間温度保持してから引張試験を実施し、引張破断荷重と歪み量を測定した。

## (3) 載荷加熱試験方法

試験体は、200×300×4860mm、せん断補強筋比0.6%、複筋比1の単純梁で、主筋に組紐状のアラミド繊維補強材・炭素繊維補強材、螺旋状の炭素繊維補強材・ガラス繊維補強材、比較用の異形鉄筋を用いた。載荷方法は、載荷スパン1000mm、支持スパン4260mm、荷重は主筋(鉄筋)にかかる応力度が長期許容応力度となるように2.4tonとした。加熱曲線は、試験体の熱容量ならびに熱伝達率などを考慮して、標準加熱曲線を基に、時間軸を3倍に伸ばした加熱曲線(図-2)を使用した。その他、実験の詳細については参考文献[1][2]を参照されたい。

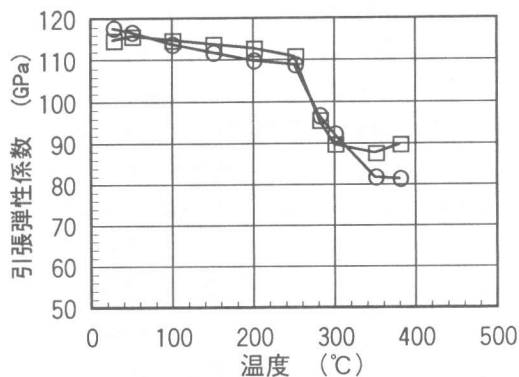


図-5 組紐状炭素繊維補強材

## 3. 連続繊維補強材の高温引張特性

### 3.1 高温時の変位置測定方法の検討

一般に、連続繊維補強材の引張試験における歪み計測には検長2mm程度のストレインゲージか、検長100mm以上の変位計を使用する場合が多く、上記引張強度試験方法(案)でもこのいずれかを推奨している。しかし、80℃以上の環境下で歪みを計測する場合、ストレインゲージでは高温用を用いても上限は300℃程度までで、それ以上では溶接によるゲージの張付けが必要となり、連続繊維補強材には使用できない。その他、ガイド棒によって試験体の歪みを環境炉外の変位計に伝えて測定する方法などがあるがガイド棒の熱膨張による誤差やガイド棒を環境炉外に出すための炉の改良など簡便な測定方法と言い難く、本研究では環境炉内の試験体に直接セット可能な高温用クリップゲージを用いて歪み測定を行った。なお、その信頼性を確認すること、ならびに試験体中央部の局所歪みと試験体全体の歪みとの関係を確認する為に、高温用クリップゲージで

測定した各温度の局所歪みと試験体各部の表面温度を基に算出した試験区間全歪み（以下、計算全歪みと略す）と、クロスヘッド間の変位量から算出した試験区間の全歪み（以下、実測全歪みと略す）とを比較検討した。図-3～図-5に一例として組紐状アラミド繊維補強材、より線状アラミド繊維補強材および組紐状炭素繊維補強材の温度と2種類の全歪みから算出した引張弾性係数の関係を示した。その他の連続繊維補強材も含めていずれも歪み算出方法による引張弾性係数の違いはほとんど認められなかった。よって、今回選定した高温用クリップゲージを連続繊維補強材の高温時の歪み測定に使用しても支障ないと考える。

なお、より線状アラミド繊維補強材の一部で実測全歪みから算出した引張弾性係数の方が、計算全歪みより算出した引張弾性係数よりも温度上昇に伴う低下が大きく300℃付近では低下率にして約15%の誤差が生じものがあつた。これは結合材の溶融によってより線のよりが戻った際、試験体自身も回転して試験区間が伸びた為と考えられる。よって、より線状のように無荷重の状態にあつても高温環境下で試験体自体の長さが増える補強材については長さ変化を何らかの手法で拘束する必要があると考える。

### 3.2 高温引張弾性係数試験結果

図-6に高温引張弾性係数試験の結果を、図-7に25℃を基準にした引張弾性係数

の比を示した。丸鋼に類似した直線状の炭素繊維補強材の場合、本試験の範囲内では温度上昇に伴う弾性係数の低下はほとんど認められなかった。一方、組紐状やより線状の繊維補強材は250℃前後で急激な引張弾性係数の低下が認められた。組紐状炭素繊維補強材の場合、素材である炭素繊維自体は860℃付近で燃焼するまではほぼ安定した強度特性を保つ。従つて、結合材であるエポキシ樹脂の融解によって素材繊維同士の拘束力が弱まり、斜め方向に組まれた素材繊維が補強材の軸方向に傾斜し、試験区間が増加したことが原因と考えられる。なお、急激な引張弾性係数の低下があつた後、更に温度を上昇させた場合、引張弾性係数の回復傾向が認められるが、これは前試験温度での残留歪による見かけ上の回復と考えられる。

一方、アラミド繊維を素材繊維とする補強材は、形状の差違に拘わらず温度上昇に伴う引張弾

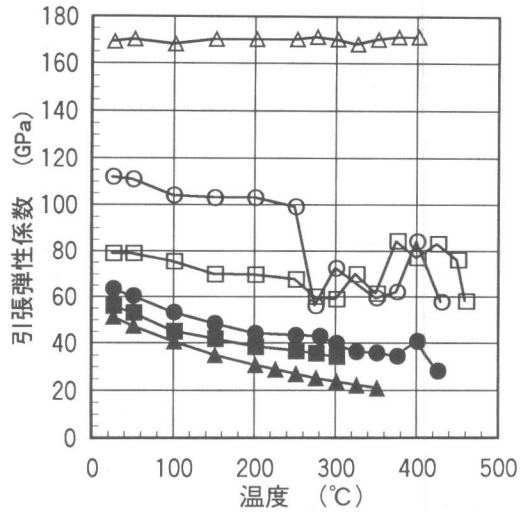


図-6 温度と引張弾性係数の関係

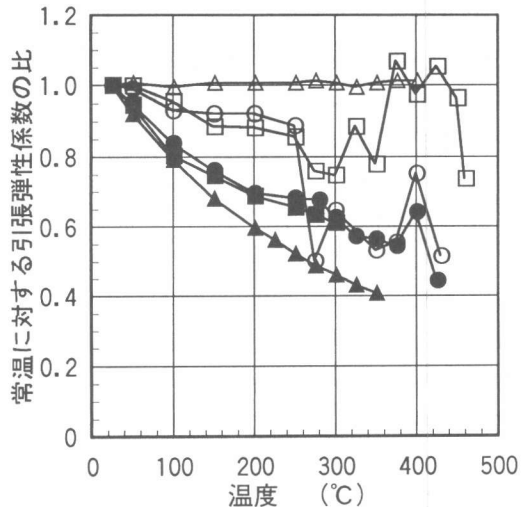


図-7 常温に対する引張弾性係数の比

- : AFBR1、■ : AFBR2、▲ : AFSP
- : CFBR、□ : CFST、△ : CFR

性係数の低下が顕著に認められた。これはアラミド繊維の耐熱性能が炭素繊維に比べ極めて低いためであり、その融点は、結合材に用いられるエポキシ樹脂の融点約 250℃よりも低い。その結果、結合材が軟化して素材繊維の配向による影響が現れるよりも低い温度で弾性係数の低下が生じたと考えられる。

### 3. 3 高温引張強度試験結果

図-8 に高温引張強度試験時の温度と破断強度との関係を、図-9 に温度と引張弾性係数との関係を示した。常温時に対する 350℃の破断強度の比は、より線状炭素繊維補強材で約 35%、組紐状アラミド繊維補強材で約 15%まで低下したが、引張弾性係数の場合の比率は炭素繊維補強材で約 80%、アラミド繊維補強材で約 35%となり、破断強度に比べ引張弾性係数の低下率は半分程度であった。従って、現在の荷重加熱試験では部材の限界たわみと限界たわみ速度しか評価基準の対象となっていないが、連続繊維補強コンクリート部材を対象とした荷重加熱試験では限界たわみおよび限界たわみ速度と共に、残存耐力も評価基準の対象に加えることが必要と考えられる。

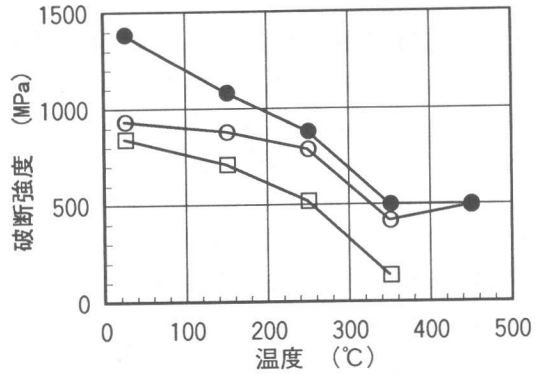


図-8 高温引張強度試験での破断強度の結果

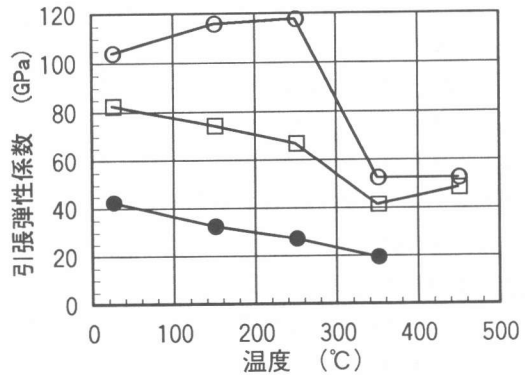


図-9 高温引張強度試験での弾性係数の結果

● : AFBR、○ : CFBR、□ : CFST

## 4. 荷重加熱試験との比較検討

前記新素材総プロで実施した連続繊維補強コンクリート梁部材の荷重加熱試験における試験体中央部のたわみ量と、前章で得た高温時の引張弾性係数および引張強度を基にした弾塑性解析からの予測値との比較を行い、連続繊維補強コンクリート部材の耐火設計の可能性について検討を行った。

### 4. 1 連続繊維補強コンクリート梁部材の荷重加熱試験結果の概要

図-11 に各試験体の中央部たわみ量を示した。いずれの連続繊維補強材も、加熱開始から 40 分ぐらいまで試験体が熱膨張の影響で湾曲してたわみが増大するため、加熱時間とたわみの関係はほぼ直線となった。その後、アラミド繊維補強コンクリート（組紐状）はたわみが急増し、連続繊維補強材が破断して破壊に至った。炭素繊維補強コンクリート（組紐状）も径の大小に時間差はあるものの、アラミドと同様の変形性状を示して破壊に至った。しかし、螺旋状の炭素繊維補強材や無機系の結合材を用いた補強材の場合は、たわみの増加は極めて小さく、3 時間後のたわみも比較用鉄筋コンクリートの 1/3 程度であった。ガラス繊維補強コンクリートは鉄筋と同様のたわみ変形を示したが、120 分以後、連続繊維補強材の破断前にたわみが急増し破壊に

至った。

#### 4. 2 連続繊維補強コンクリート梁部材の荷重加熱試験におけるたわみ変形予測

高温引張強度試験より得た組紐状のアラミ繊維補強材と炭素繊維補強材および螺旋状炭素繊維補強材の 450℃までの試験体温度と引張変形挙動の関係を基に、荷重加熱試験時の実測試験体内部温度に対応した引張強度と弾性係数を求め、弾塑性解析によって試験体中央部のたわみ量を算出した(表-3)。螺旋状炭素繊維補強材のように緩やかにたわみが増加し、試験終了まで破断せずに耐力を有する場合には比較的实验値に近い計算結果が得られ、連続繊維補強材コンクリート部材の耐火設計の可能性を確認することができた。なお、本報告の解析範囲内では急激にたわみが増加し、補強材が破断するなどの変形挙動を追随するまでには至らなかったが、現在、熱膨張による変形なども組入れた解析方法の検討を行っている。

#### 5. まとめ

本研究は、連続繊維補強材を建築分野で利用する上で、最も問題となっている耐火設計の可能性とその手法について検討を行った。その結果、

- (1) 本実験で用いた高温用クリップゲージは高温環境炉内の試験体に直接セット可能であり、他の歪み測定装置と同等以上の精度を有するなど、連続繊維補強材の高温引張強度試験に適していることが確認された。

- (2) 高温引張強度試験を行う場合、より線状繊維補強材

のように試験中に素線のよりが戻り試験長が変化する可能性のあるものについては、試験体の回転を防止することが重要である。

- (3) 高温時の引張強度や弾性係数を用いた弾塑性解析により、連続繊維補強コンクリート部材の高温時の変形挙動が一定の範囲で予測可能であることが確認された。

なお、本研究は(株)宇佐美組との共同研究の一環として行ったものである。

#### 6. 参考文献

- [1] 建設省総合技術開発プロジェクト「建設事業への新素材・新材料利用技術の開発」報告書、No-H-3-1 非金属分科会、1992.3
- [2] 連続繊維補強コンクリート編集委員会：連続繊維補強コンクリート【諸性質と設計法】、技報堂出版、1995

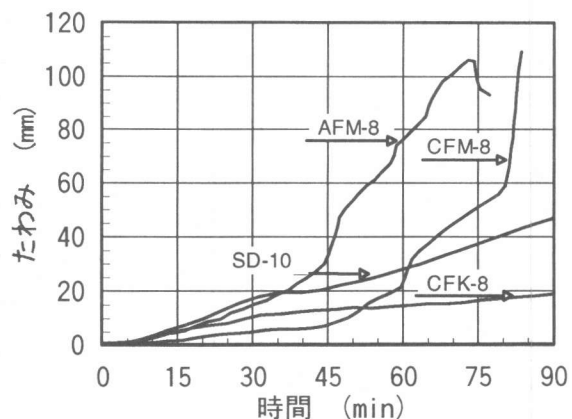


図-1 1 荷重加熱試験の結果

表-3 荷重加熱試験体のたわみ量算出 (単位: mm)

時間 (分)	アラミ(組紐)		炭素(組紐)		炭素(螺旋)	
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	14.5	6.5	4.5	6.7	10.0	6.9
60	76.0	7.6	21.0	9.7	14.0	6.9
90	—	18.7	—	13.7	18.0	6.9