

論文 各種連続繊維補強材の高温引張強度特性

今井章博^{*1}・棚野博之^{*2}・白田太^{*3}・下井大輔^{*4}

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を予測する上で重要となる高温域での各種連続繊維補強材（炭素、アラミド、ガラス）の引張試験を実施し、素材繊維の種類や形状による力学的影響について検討を行った。その結果、素材繊維の種類による高温時の力学特性値の低下傾向はもとより、形状により低下傾向に違いがあることが確認された。また、連続繊維補強材自体は常温ではほぼ破断まで完全な弾性変形を示すのに対し、300℃以上の高温域では、破断に近い荷重域で塑性変形が認められた。

キーワード：連続繊維補強材、高温特性、引張強度、引張弾性係数、応力—ひずみ曲線

1. はじめに

近年、炭素繊維やアラミド繊維、ガラス繊維等の新素材繊維を用いた連続繊維補強材の建設分野への応用は多岐に渡っており、特に土木分野ではこれら連続繊維の持つ高強度、高弾性、軽量、非腐食といった特徴を生かし、PC コンクリート用緊張材ならびに厳しい塩分環境下におかれるコンクリート構造物への適用が盛んに行われている。しかし建築分野では、連続繊維補強材を鉄筋やPC鋼材の代替として耐力部材へ使用することは未だ認められていない。これは素材繊維や結合材に可燃性の材料を使用している連続繊維補強材の許容温度が未だ明確にされておらず、耐火性能を鋼材の許容温度で規定する現行の耐火試験法で評価することが困難なためである。よって連続繊維補強コンクリート部材の耐火性を適切に評価するためには、例えば載荷加熱試験などの新しい評価法とそれに基づく耐火設計方法の検討が必要である。本研究は、連続繊維補強コンクリート部材の耐火性能を予測する上で、極めて重要となる高温域での連続繊維補強材の力学特性を明らかにすること

を目的に、昨年度の結果¹⁾を基に引き続き高温引張試験を実施した。本年度は、素材繊維の種類ならびに補強材の形状による力学特性の影響を明確にするために、素材繊維として3種類、補強材の形状として5種類の検討を行った。

また、鋼材についても同様の高温引張試験を実施し、連続繊維補強材との相違点についても検討を行ったのでここに報告する。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本実験で使用した連続繊維補強材および鋼材の諸元を表-1に示した。

2. 2 供試体および試験装置

供試体長さは900mmとし、両端200mmの定着部を設け、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。

試験装置は、最高550℃まで加熱可能な容量10tfの電気炉を使用した。供試体の歪み測定には検長25mmの高温クリップゲージを用いた。加熱区間は供試体中央部400mm

*1 ニチアス(株) 浜松研究所 (正会員)

*2 建設省建築研究所 第2研究部 有機材料研究室室長, 工博 (正会員)

*3 建設省建築研究所 第2研究部 非常勤職員, 工修 (正会員)

*4 東京理科大学大学院 理工学研究科 建築学専攻 (正会員)

とし、K(CA)型熱電対を用いて供試体中央部、加熱区間の上端および加熱区間の上端から上方へ30mmの位置の計3点で供試体温度を測定し、このうち供試体中央部の温度を供試体表面温度として採用した。供試体の試験装置への取り付け状況を図-1に示した。

2. 2 試験方法

引張試験に関しては、JCI・連続繊維補強コンクリート研究委員会提案の引張試験法(案)に従って行った。試験温度は、常温(25℃)および100℃から400℃まで50℃ごとの水準で行い供試体中央部の温度が所定温度に達した後、中央部と表面温度が同じになるよう10分間温度を保持してから引張試験を実施し、引張荷重と歪みを測定した。

引張弾性係数は、高温用クリップゲージを用いて得られた応力-歪み曲線を基に、最大引張荷重の20%~50%の範囲で得られた測定値を直線回帰して求めた。

なお、常温時に対する高温時の引張強度および引張弾性係数の割合を、それぞれ引張強度保持率(%), 引張弾性係数保持率(%)とした。

3. 試験結果

3. 1 素材繊維の種類による影響

素材繊維の種類による引張強度保持率および引張弾性係数保持率の影響を検討するため、3種類(炭素, アラミド, ガラス)の螺旋糸巻状補強材の温度と各保持率の関係を図-2および図-3に示した。図-2より炭素繊維とガラス繊維補強材の引張強度保持率の低下傾向はほぼ同様で、250℃前後から保持率の低下がやや大きくなっている。炭素繊維およびガラス繊維自体は耐熱性が高いにも関わらずこのような強度低下を生じた原因として、結合材であるエポキシやビニルエステルの融解によって繊維間の拘束力が低下することで各繊維ごとの張力が異なり、高張力を受ける繊維の破断が連鎖的に

表-1 連続繊維補強材の諸元*

繊維種類	記号	形状	呼径(mm)	繊維含有率(%)
炭素	CFBR ^{E)}	組紐	8.0	60
	CFMS ^{E)}	砂付組紐	8.0	60
	CFSP ^{V)}	螺旋糸巻	10.0	47
	CFST ^{E)}	より線	10.5	64
	CFR ^{E)}	直線	8.0	65
アラミド	AFBR ^{E)}	組紐	7.3	60
	AFMS ^{E)}	砂付組紐	10.0	60
	AFSP ^{V)}	螺旋糸巻	10.0	43
ガラス	GFSP ^{V)}	螺旋糸巻	10.0	57
鉄筋	SD30A	異形	9.5	—

*:メーカーカタログ値参考

E): 結合材にエポキシを使用, V) 結合材にビニルエステルを使用

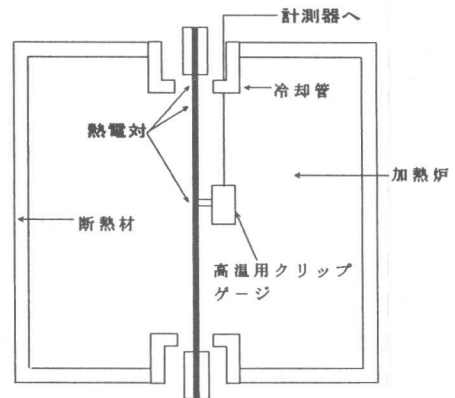


図-1 試験装置および供試体取り付け状況の概要

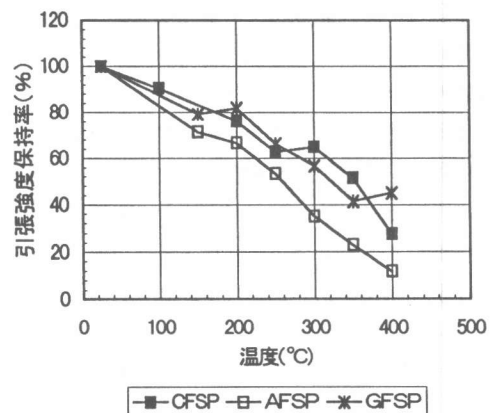


図-2 引張強度保持率に対する素材繊維種類の影響

増大するためと考えられる。また、繊維間に発生する摩擦力によって繊維の引張耐力が低下することも原因の一つとして考えられる。

一方、アラミド繊維補強材は、炭素繊維やガラス繊維補強材に比較して200℃前後からの強度低下が著しい。この原因として、アラミド繊維の耐熱性が他の繊維に比較し極めて低く、結合材の融解温度よりも低い温度(180℃)で繊維の分子結合鎖の破断(以下、繊維の熱劣化と略す)が始まるためと考えられる。

図-3より引張弾性係数保持率については、炭素およびガラス繊維補強材ともに100℃前後からゆるやかに低下している。一方、耐熱性の低いアラミド繊維については、150℃前後からの低下が著しい。但し、各保持率を比較した場合、350℃での引張強度保持率は、炭素およびガラス繊維補強材で約40~50%、アラミド繊維補強材で約25%であるのに対し、引張弾性係数保持率は、炭素およびガラス繊維補強材で約85~95%、アラミド繊維で約60%であり引張弾性係数に比べ引張強度の低下が著しいことが確認された。

3. 2 形状による影響

連続繊維補強材の形状による各保持率の影響を検討するため、5種類の炭素繊維補強材と3種類のアラミド繊維補強材を対象に比較検討した。温度と各保持率の関係を図-4~図-7に示した。炭素繊維補強材では、形状により各保持率の低下傾向に違いが認められた。図-4より組紐状やより線状の炭素繊維補強材は、直線状や螺旋糸巻状(中心部のストランドの外周に螺旋状に繊維を巻いた形状)の補強材に比べ、300℃および350℃での引張強度保持率が小さくなっている。この原因として、結合材が融解した以降の繊維に加わる応力に着目した場合、直線状や螺旋糸巻状では、軸方向にほぼ100%の応力が発生するのに対し、組紐状やより線状では、繊維方向と軸方向が異なるため繊維間の摩擦力や軸方向力以外のねじれやせん

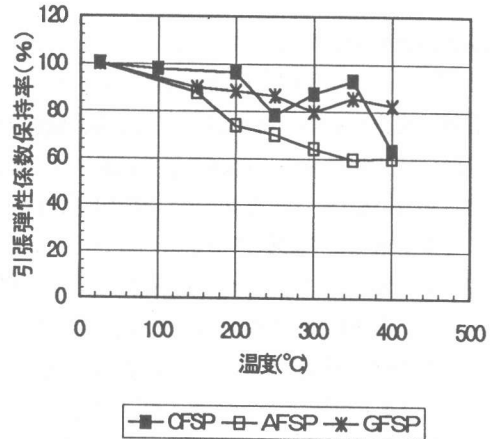


図-3 引張弾性係数保持率に対する素材繊維種類の影響

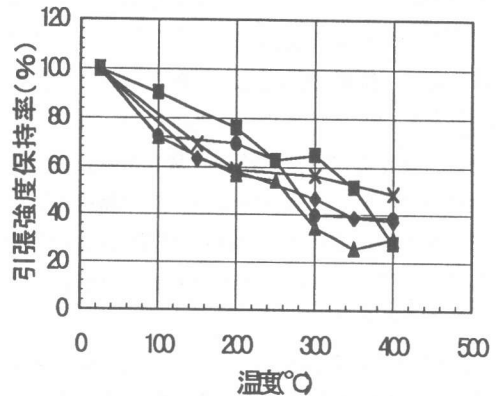


図-4 引張強度保持率に対する形状の影響(炭素繊維補強材)

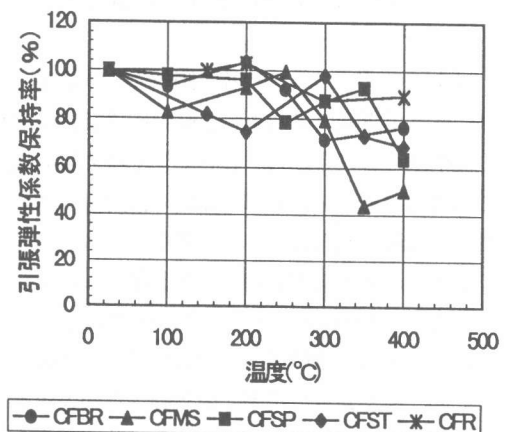


図-5 引張弾性係数保持率に対する形状の影響(炭素繊維補強材)

断力が発生するためと考えられる。

図一 5 より引張弾性係数保持率についても、直線状炭素繊維補強材の場合、本実験の範囲内では温度上昇に伴う保持率の低下はわずかであったが、組紐状やより線状の炭素繊維補強材は、250℃前後からの低下が認められた。

この原因として、結合材の融解によって斜め方向に組まれた繊維の拘束力が弱まり、見かけ上の繊維長が増加したためと考えられる。また、いずれの形状においても、同一温度であれば、引張強度保持率は引張弾性係数保持率に比べ半分程度であった。

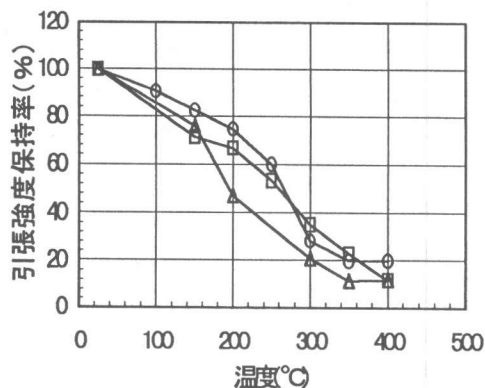
一方、アラミド繊維の場合、炭素繊維よりも耐熱性が低いため、図一 6 に示すように形状に関わらず引張強度保持率の低下傾向はほぼ同様であり、繊維の熱劣化が始まる200℃前後から著しい低下が認められた。なお、350℃から400℃付近で保持率の減少が停止している原因として、250～300℃で繊維の熱劣化速度が急速に増加し、最終的に熱分解温度(炭化開始温度：400～450℃)に近づいたためと考えられる。

引張弾性係数保持率についても、図一 7 に示したように若干のパラッキは認められるが、150℃前後からの低下が何れも顕著であった。

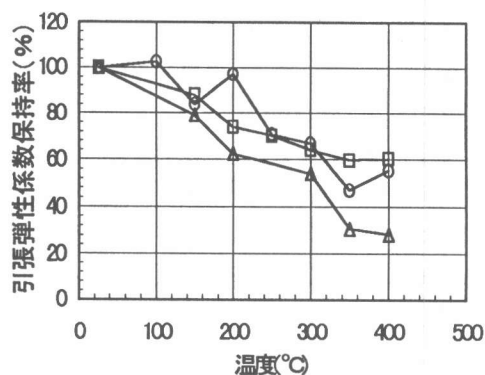
なお、炭素繊維補強材と同様同一温度の場合、引張強度保持率は引張弾性係数保持率の約半分であった。

以上の結果から、炭素繊維補強材の温度上昇に伴う引張強度保持率と引張弾性係数保持率の変化は、200℃から250℃までは形状による影響はほとんど認められないのに対し、結合材の融解温度である250℃前後からは、形状によって低下傾向が異なることが認められた。

一方、耐熱性の低いアラミド繊維補強材の場合、結合材の融解以前に繊維の熱劣化が始まるため、引張強度保持率と引張弾性係数保持率は直線的に低下し、形状による各保持率の差も認められなかった。よってアラミド繊維補強材の引張強度保持率および引張弾性係数保持率と



図一 6 引張強度保持率に対する形状の影響 (アラミド繊維補強材)



図一 7 引張弾性係数保持率に対する形状の影響 (アラミド繊維補強材)

$$Pf = -0.26 \cdot T + 114.9 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.89$$

Pf: アラミド繊維補強材の引張強度保持率 (%)

T: 試験体中央部の表面温度 (°C), 但し $T \geq 100$

$$Pe = -0.16 \cdot T + 109.3 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.68$$

Pe: アラミド繊維補強材の引張弾性係数保持率 (%)

T: 試験体中央部の表面温度 (°C), 但し $T \geq 100$

環境温度との関係は、式(1)、(2)のような一次回帰式で表すことが可能である。

3. 3 高温による変形挙動

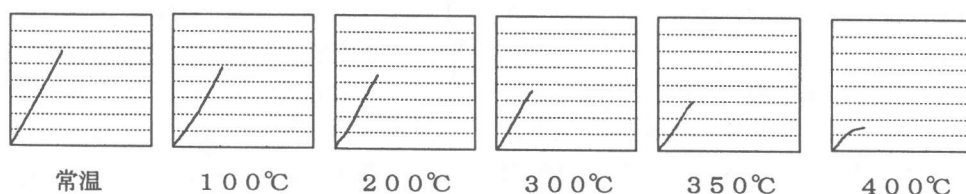
螺旋糸巻状の炭素、アラミド、ガラスの3種類の補強材と一般構造用異形鉄筋(SD30A D10)の温度上昇に伴う応力-歪み曲線の変化を図-8に示した。炭素繊維補強材の場合、常温から300℃までは破断に至るまでほぼ完全な弾性変形を示すのに対し、350℃では破断に近い荷重域で若干の塑性変形が認められ、さ

らに400℃では破断荷重の2/3程度の荷重域で塑性変形が顕著に認められることがわかった。アラミド繊維とガラス繊維補強材の場合、常温から200℃まではほぼ完全な弾性変形を示すのに対し、300℃から400℃にかけて破断近い荷重域で塑性変形が認められた。

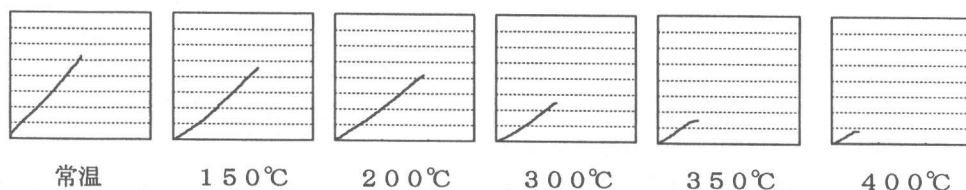
また、鉄筋では、200℃までは明確な降伏点を示すが、300℃からは降伏点が不明確になっている。

以上の結果から、連続繊維補強コンクリート部材の載荷加熱試験時の変形挙動を予測する際

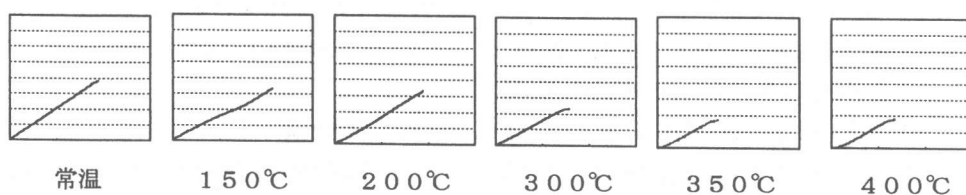
炭素繊維補強材 (CFSP)



アラミド繊維補強材 (AFSP)



ガラス繊維補強材 (GFSP)



鉄筋 (SD30A D10)

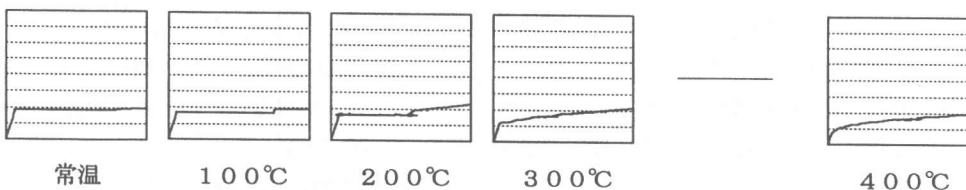


図-8 各種連続繊維補強材および鋼材の各温度ごとの応力-歪み曲線

には、連続繊維補強材を弾性体とした場合に適用される弾性係数（最大引張荷重の20～50%の傾き）などだけではなく、高温域での塑性変形を含めた応力-歪み曲線 またはこれらの曲線を基に提案されたモデル式を適用することが必要である。

4. まとめ

本研究は、連続繊維補強材コンクリート部材の耐火性能を予測する上で極めて重要となる連続繊維補強材の高温域での力学特性を明らかにすることを目的に、高温引張試験を実施し、素材の種類ならびに形状による力学特性の影響について検討を行った。その結果、以下の様な知見を得た。

- (1) 素材繊維の種類（炭素、アラミド、ガラス）による影響を螺旋糸巻形状で比較した場合、炭素およびガラス繊維補強材ともに、引張強度保持率は250℃前後から低下がやや大きくなった。また、引張弾性係数保持率は100℃前後からゆるやかに低下することが確認された。一方、耐熱性の低いアラミド繊維補強材の場合、引張強度保持率は200℃前後から、引張弾性係数保持率は150℃前後から著しく低下することが確認された。
- (2) 炭素繊維補強材の場合、形状の違いにより引張強度保持率と引張弾性係数保持率の低下傾向に違いがあることが確認された。直線状や螺旋糸巻状補強材は組紐状やより線状補強材と比較し相対的に各保持率の低下が小さい傾向にあった。これに対し、耐熱性の低いアラミド繊維補強材の場合、形状によらず各強度保持率の低下傾向はほぼ同様であり、各保持率と環境温度との関係を一次回帰式で表すことが可能である。
- (3) いずれの補強材も、同一温度であれば引張強度保持率は引張弾性係数保持率

に比べて半分程度であることが確認された。

- (4) 連続繊維補強材は、常温では破断に至るまでほぼ完全な弾性変形を示すが、炭素繊維補強材では350℃以上、アラミドとガラス繊維補強材では300℃以上から破断に近い荷重域で塑性変形が認められることがわかった。
- (5) 連続繊維補強コンクリート部材などの新材料を用いた構造部材の耐火性評価試験として荷重加熱試験が検討されているが、現行のこの試験法では、部材の限界たわみと限界速度しか評価基準の対象となっていない。鋼材の場合、加熱後の冷却により耐力はほぼ元どおりに復元するのに対し、連続繊維補強材は、高温により結合材および繊維が熱劣化を受けるため、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、残存耐力も評価基準に加えることが重要であり、加熱冷却後の補強材の残存強度、弾性係数を確認することが今後の研究課題である。

最後に、本研究を行うにあたり、東京理科大学理工学部 重倉研究室・公平桂右、井原信治、岡田知也の3君に多大なる御協力を頂きました。ここに深く感謝致します。

5. 参考文献

- 1) 棚野博之・坂下雅司ほか：連続繊維補強材の高温引張特性と荷重加熱時の梁の曲げ変形挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.2, pp.1551～1556, 1997.6
- 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
- 3) 棚野博之・坂下雅司：荷重加熱試験における連続繊維補強コンクリート梁の曲げ変形挙動に関する研究，日本建築学会報告集論文，1998.3