

論文 連続繊維補強材の耐久性評価に関する実験的研究

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

要旨:炭素やアラミドなどの新素材繊維を用いた連続繊維補強材は従来の鉄筋と比較して、耐久性に優れていると考えられているが、その劣化外力や評価方法については未だ明らかにされていない。本研究では、連続繊維補強材の耐久性評価方法を提案することを目的に、高温アルカリ浸漬試験および部分片振りによる引張疲労試験を実施し、基礎的検討を行った。その結果、アルカリ浸漬試験では、浸漬期間13週において炭素繊維補強材では引張強度保持率が90～95%となった。アラミド繊維補強材では引張強度保持率は約75%となった。

キーワード:連続繊維補強材、高温アルカリ浸漬、疲労特性、Goodman線図

1. はじめに

連続繊維補強材は鉄筋と比較して、高強度、高耐久性で軽量という特徴を有していることから、一般に連続繊維補強コンクリートは高耐久性が要求される構造物への利用が検討されている。

鉄筋コンクリート造における耐久性評価の指標としては、コンクリートの中性化や塩分浸透による鉄筋の腐食、およびそれらに起因するコンクリートのひび割れや剥離などに大別されるが、連続繊維補強コンクリート造の場合、中性化や塩分浸漬では、連続繊維補強材の劣化を促すことは極めて困難であるため、他の劣化因子を考えられている。しかし、連続繊維補強材の劣化プロセスは未だ不明な点が多く、劣化メカニズムに基づく耐久性の評価方法ならびにその評価基準の早期確立が切望されている。

一般的には、連続繊維補強材を構成する素材繊維や結合材は高分子化合物が多く使用されていることから、これら高分子化合物の劣化挙動が問題とされることが多い。高分子化合物の劣

化因子としては、強アルカリや湿熱による加水分解などが考えられる。このことから、本研究では、耐久性評価方法の一指標として高温アルカリ浸漬試験前後の力学特性・物理特性の変化について検討を行った。

一方、鉄筋コンクリート構造物の破壊の80%以上に繰返し負荷による疲労が関与しているといわれている。¹⁾したがって、鉄筋コンクリート構造物の設計においては疲労を考慮した各種の設計基準・規格が定められているが、連続繊維補強材については未だ研究の段階である。また、昨年度北海道で開催された連続繊維補強コンクリートに関する国際シンポジウム FRPRCS-3 (Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures) では、連続繊維補強材の疲労と耐久性の関連性について発表されている。本研究では、JCI・連続繊維補強コンクリート編集委員会提案の高サイクル疲労試験方法(案)²⁾を基に、部分片振りによる引張疲労試験を実施し基礎的検討を行ったのでここに報告する。

*1 建設省建築研究所 第二研究部 非常勤職員、工修（正会員）

*2 建設省建築研究所 第二研究部 有機材料研究室室長、工博（正会員）

*3 ニチアス(株) 浜松研究所（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）

2. アルカリ浸漬試験

2.1 実験概要

本実験で使用した連続繊維補強材の諸元を表-1、試験の要因と水準を表-2に示した。浸漬温度は80°C、浸漬溶液はコンクリート中の細孔溶液を考慮して表-3に示す組成(pH12.6)とした。所定の浸漬期間が終了した後3日間流水で洗浄し、その後4日間80°Cの乾燥炉で絶乾状態にさせてから供試体の質量を測定した。さらに、両端部に膨張モルタル型の定着材を用いて200mmの定着治具を取り付け、全長900mmの供試体を作製した後、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方法(案)²⁾に準じた引張試験を行った。引張弾性係数は、ストレンゲージを使用して得られた応力-ひずみ曲線を基に破断荷重の20~50%の範囲を直線回帰して求めた。

なお、浸漬開始前の引張強度および引張弾性係数に対する浸漬終了後の比率を、それぞれ引張強度保持率(%)、引張弾性係数保持率(%)とした。

2.2 実験結果

図-1に浸漬期間と質量変化の関係を示した。炭素繊維補強材の場合は8φ、12φいずれの単位表面積あたりの質量変化量も3($\times 10^{-5}$)g/mm²未満であった。しかし、アラミド繊維補強材の場合は浸漬4週間までに急激な質量の減少が認められた。実体顕微鏡により炭素繊維補強材では砂の欠落が認められたが、これは砂を固定している結合材(エポキシ樹脂)の表層部分が劣化したためと考える。したがって、アラミド繊維補強材の場合は、結合材の溶解だけでなく、繊維自身の劣化現象も存在したと考えられる。

図-2に浸漬期間と引張強度保持率、図-3に浸漬期間と引張弾性係数保持率の関係を示した。炭素繊維補強材の場合は浸漬期間13週までの範囲では、引張強度保持率は90~95%となっているが、引張弾性係数保持率にはほとんど変化が認められなかった。一方、アラミド繊維補

表-1 連続繊維補強材の諸元^{*1}

繊維種類	形状	呼径(mm)	繊維含有率(%)
炭素	砂付組紐	8.0	60
	砂付組紐	12.0	60
アラミド	組紐	7.3	60

*1メーカーCATALOG値参考

表-2 要因と水準

要因	水準
繊維種類	C F(砂付き), A F
繊維形状	8φ, 12φ(C F)
浸漬期間	0週, 1週, 4週, 8週, 13週, (26週)

供試体本数 n=4

表-3 アルカリ溶液の組成

pH	溶液1mlあたりの混入量(g/l)		
(80°C)	Ca(OH) ₂	KOH	NaOH
12.6	2.0	14.0	10.0

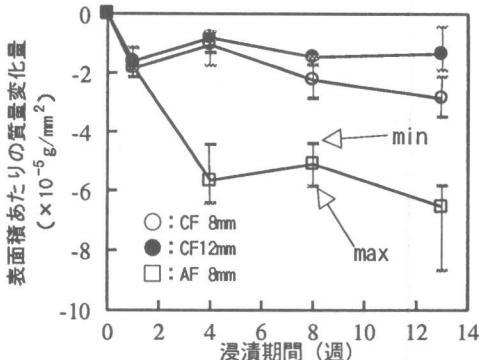


図-1 浸漬期間と質量変化の関係

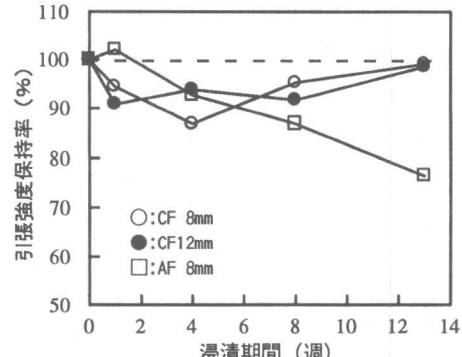


図-2 浸漬期間と引張強度保持率の関係

強材の場合、本実験の範囲内では、炭素繊維補強材と同様、引張弾性係数保持率の低下は認められなかったが、引張強度保持率は浸漬期間の経過に伴って、ほぼ直線的に減少し、13週では約75%までの低下が認められた。

以上から、高温のアルカリ溶液を劣化因子とした評価試験方法はアラミドなどの高分子化合物を素材繊維とする補強材には、適しているが、炭素などの無機系化合物(特にセラミック系)には適していないと考える。

3. 疲労試験

3.1 実験概要

疲労試験で使用した連続繊維補強材は表-1に示した炭素繊維補強材の8φである。試験の要因と水準を表-4に示した。試験方法は部分片振りとし、上限・下限応力比は引張最大応力に対する割合である。繰返し速度(周波数)は3Hzとした。なお、疲労限界は繰返し回数を100万回とし、100万回を超えたものは疲労試験終了後、引張試験を行った。

供試体はアルカリ浸漬試験と同様の方法で作製した。

試験装置は、容量50tf、最大周波数10Hzの疲労試験機を使用した。供試体の取付け状況を図-4に示した。なお、供試体を疲労試験機に取り付ける際、ねじれやせん断が供試体に作用しないように供試体と試験機との間にはフレキシブル治具を設けた。

3.2 実験結果

(1) 下限応力比の影響

図-5～7に下限応力比ごとの上限応力比と破断時までの繰返し回数(以下、繰返し回数と略す)の関係を、また、図中に回帰式および回帰式から求めた疲労限界応力比を示した。下限応力比の増加に伴い回帰式の傾きが減少し、疲労限界応力比が増大する傾向が認められた。

図-8に応力振幅と繰返し回数の関係を示した。図中に示した●(下限応力比0%) ■(下限

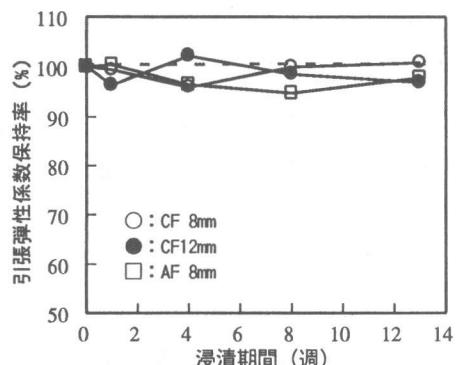


図-3 浸漬期間と引張弾性係数保持率の関係

表-4 要因と水準

要因	水準
下限荷重	0%, 35%, 65%
上限荷重	60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%

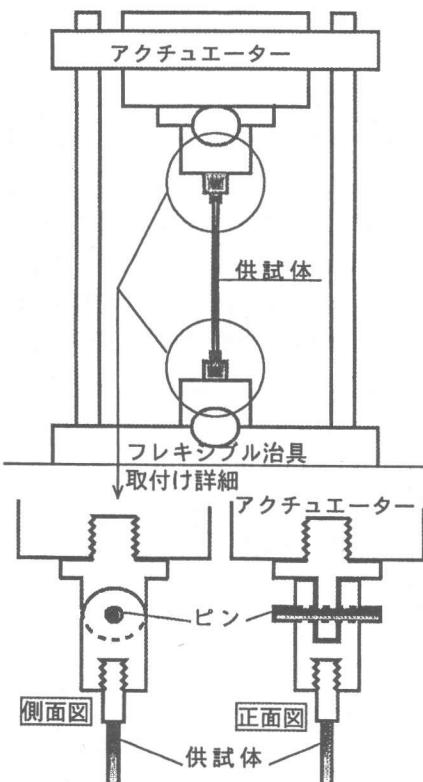


図-4 供試体取付け状況図

応力比 35%）▲（下限応力比 65%）は、鋼材に関する「土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法（案）」³⁾の疲労強度算定式（1）より算出した 100 万回繰返し時の応力振幅（疲労限界応力振幅と略す）の値に相当する。

$$f_{rsk} = (1 - \sigma_{sp} / f_u) 10^a / N^k \quad \dots \dots \quad (1)$$

f_u ：引張強度（本実験では 100%）

N：疲労寿命（繰返し回数）

f_{rsk} ：疲労振幅強度の特性値

（本実験では上限応力比 - 下限応力比）

σ_{sp} ：永久荷重による応力度

（本実験では下限応力比）

a：係数（本実験 = 4.3）

k：係数（本実験 = 0.18）

連続繊維補強材の疲労限界応力振幅は、下限応力比が 0%，35% の場合、鋼材に比べ、非常に高い値を示したが、下限応力比 65% の場合には、鋼材と同等の値を示した。

（2）鋼材との比較

図-9 に本実験における連続繊維補強材の疲労試験と土木学会における鋼材の疲労試験の考え方を示した。鋼材の疲労試験では、降伏強度を基準に上限と下限の応力比を定めているが、本実験においては連続繊維補強材は引張強度を基準に上限・下限応力比を定めた。このため、連続繊維補強材の疲労限界強度を鋼材の弾性限界（降伏強度）に相当する引張強度の 2/3 (65%)

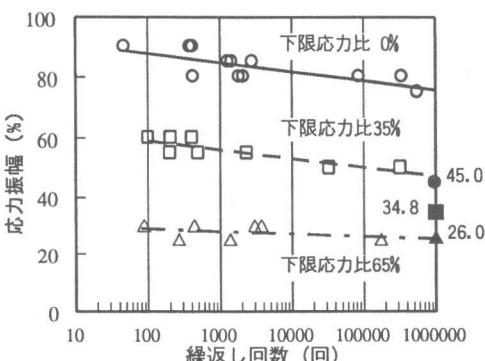


図-8 応力振幅と繰返し回数の関係

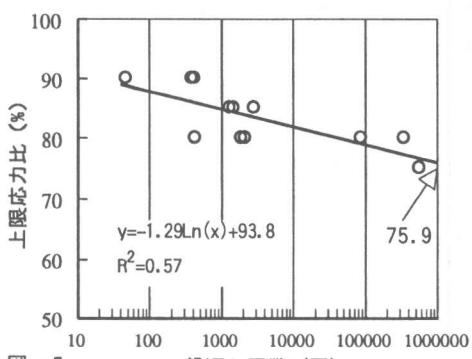


図-5 下限応力比 0% における上限応力比と繰返し回数の関係

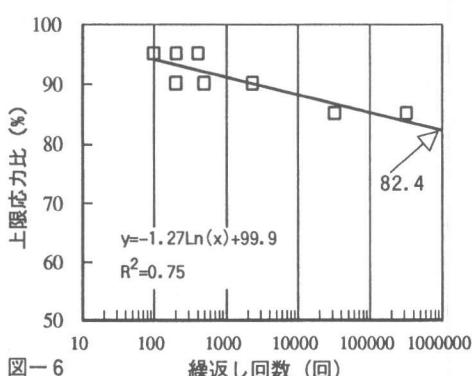


図-6 下限応力比 35% における上限応力比と繰返し回数の関係

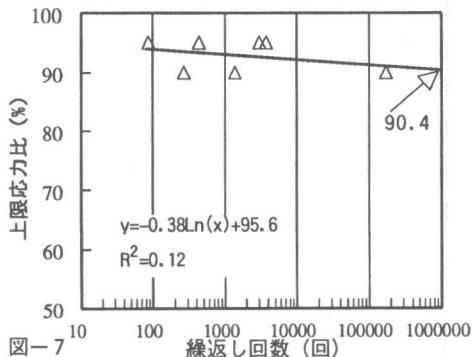


図-7 下限応力比 65% における上限応力比と繰返し回数の関係

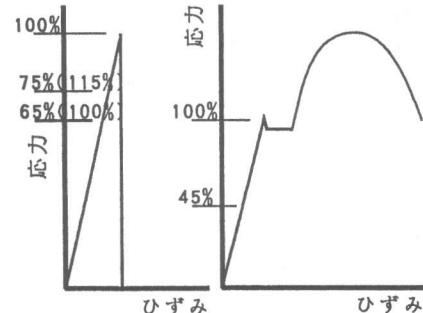


図-9 連続繊維補強材と鋼材の疲労試験図

と仮定すると、下限応力比0%の場合、本実験より求めた連続繊維補強材の疲労限界応力比約76%は上記引張強度の65%を基準とした場合には、約115%に相当し、上記式(1)より求めた鋼材の疲労限界応力比は45%となる。同様に下限応力比35%, 65%では、それぞれ127%, 140%となった。

以上より、疲労限界強度については、下限応力比3水準のうち最も条件の厳しい下限応力比0%の疲労限界応力比(75%)が一つの指標と考えられる。

(3) Goodman線図

一定の繰り返し回数における、下限応力比に対する上限応力比の影響をモデル化したものが図-10および式(2)に示したGoodman線図である。

図-5～7に示した回帰式から求めた連続繊維補強材の疲労限界応力比と下限応力比の関係およびGoodman線図と土木学会の提案式を図-11にプロットした。土木学会提案式で示されるように一般の鋼材は下限応力比の増加に伴い上限応力比が凸型に増加するが、連続繊維補強材の場合にはGoodman線図とほぼ同様、両応力比の間には直線的な関係が認められた。

(4) 疲労試験後の引張試験結果

図-12に引張強度保持率、図-13に引張弾性係数保持率を示した。引張強度保持率および引張弾性係数保持率の低下は認められなかった。

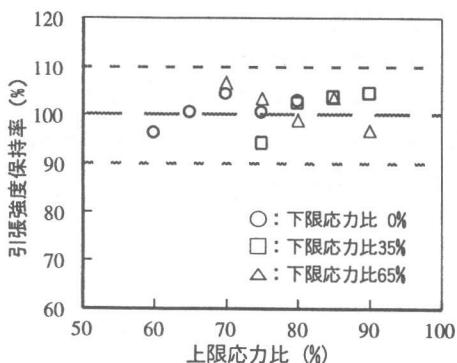


図-12 疲労試験後の引張強度保持率

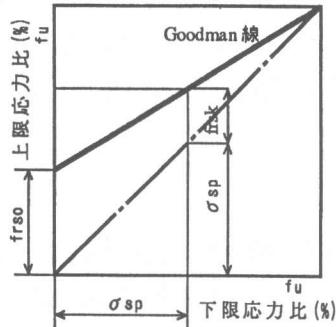


図-10 Goodman線図

$$f_{rso} = \frac{f_{rsk}}{1 - \sigma_{sp} / f_u} \quad \dots \dots \quad (2)$$

f_{rso} : 下限応力比0%の

疲労振幅強度の特性値(%)

f_{rsk} : 応力振幅強度の特性値

(本実験では上限応力比－下限応力比)

f_u : 引張強度

(本実験では100%)

σ_{sp} : 永久荷重による応力度

(本実験では下限応力比)

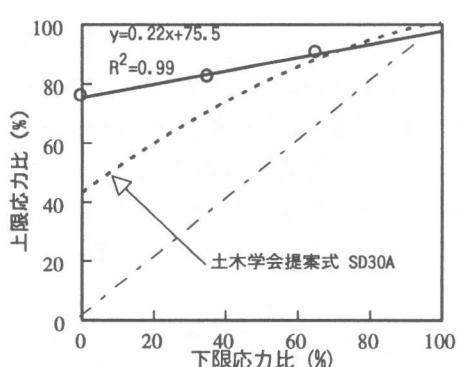


図-11 本実験のGoodman線図

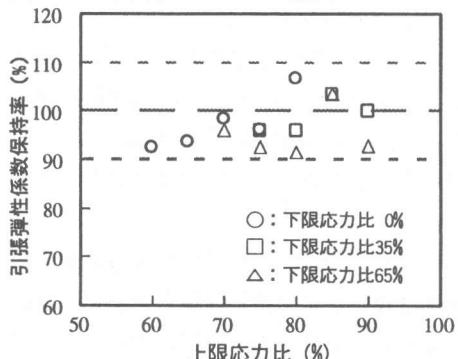


図-13 疲労試験後の引張弾性係数保持率

連続繊維補強材は、下限応力比0%，上限応力比75%において、100万回の繰返し疲労を加えても、引張強度および引張弾性係数の低下はないと考える。

4.まとめ

連続繊維補強材を建築分野で活用する上で連続繊維補強コンクリート部材の耐久性状を適切に評価することは極めて重要である。また、鉄筋コンクリート構造物の破壊の80%以上には繰返し負荷による疲労が関与しているといわれており、本研究では高温アルカリ浸漬試験および高サイクル疲労試験を実施し、検討を行い以下に示すような結果を得た。

4.1 アルカリ浸漬試験

(1) 炭素繊維補強材の場合、供試体の太さに関わらず引張弾性係数と質量にはほとんど変化は認められなかった。しかし、引張強度については5%～10%程度の低下が認められた。なお、実体顕微鏡観察により、砂の欠落が若干認められた。

(2) アラミド繊維補強材の場合、浸漬期間13週までで引張強度保持率は約75%となり、単位表面積あたりの質量変化量も浸漬期間4週までで約 $3(\times 10^{-5})\text{g/mm}^2$ の減少が認められた。よって炭素繊維補強材と異なり、アラミド繊維補強材では、素材繊維自身の劣化が顕著である。

4.2 疲労試験

(1) 下限応力比が0%，35%，65%の時、実験回帰式から求めた疲労限界応力比はそれぞれ75.9%，82.4%，90.4%であった。

(2) 一般の鋼材では、下限応力比の増加に伴い上限応力比が凸型に増加するが、連続繊維補強材の場合は、Goodman線図に示されるように、下限応力比と上限応力比にはほぼ直線的な関係が認められた。

(3) 疲労限界応力比以下の場合、疲労試験前後の引張強度ならびに引張弾性係数の変化は認められなかった。これらの特性に対する繰返し引張疲労による影響はないと考える。

<謝辞>

本研究を行うにあたり、東京理科大学理工学部建築学科重倉研究室の卒研生:井原信治、岡田知也、公平桂介の三君に多大な御協力を頂きましたので、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)城野政弘:疲労の基礎と新材料、材料、Vol.43, No488, pp587～pp593, 1994
- 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)土木学会:コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)、コンクリートライブラリー、第52号、1983
- 4)河野通之・富田勝信:異形鉄筋の疲れ強度に関する研究、コンクリートライブラリー、第2号、pp75～pp90, 1962
- 5)岡本直・田村富雄ほか:アラミド繊維による組紐状棒材の基本的特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10, No2, pp659～664, 1988
- 6)魚本健人・西村次男:プレストレスコンクリート用F R P ロッドの静的および動的疲労特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12, No2, pp1019～1024, 1990
- 7)猪八重由之・武若耕司:各種F R P ロッドの耐久性に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No1, pp1185～1190, 1994
- 8)勝木太・魚本健人:アラミド繊維の耐アルカリ性および耐酸性の評価方法に関する一試案、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No1, pp519～524, 1995
- 9)木村浩・榎本剛ほか:炭素繊維複合材ケーブルのアルカリ耐久性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No1, pp525～530, 1995