

論文 超高強度繊維補強コンクリートの気中・水中曲げ疲労特性

田中 良弘^{*1}・横田 弘^{*2}・岩波 光保^{*3}・前堀 伸平^{*4}

要旨：通常の鉄筋コンクリート部材は、気中環境下の疲労に比べ水中環境下では微細な骨材によるすりへり影響を受けるために疲労抵抗が低下する事が知られている。最近開発された超高強度繊維補強コンクリートによる曲げ疲労試験を、気中および水中の環境下で比較試験しこれらの環境の相違が曲げ疲労特性に与える影響を明らかにした。また、超高強度繊維補強コンクリート特有の疲労機構について検討を行い、設計に有用となる S-N 曲線を求めた。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、曲げ疲労、S-N 曲線、水中疲労

1. はじめに

近年、超高強度繊維補強コンクリート（以降 UFC と称する）を用いた構造物が土木・建築の分野で数多く建設されるようになってきた。UFC は、セメントを主成分として細粒径の骨材やポゾラン材を最密充填するように配合設計したセメントマトリクスに高強度の短繊維を混入した超高強度、高じん性、高耐久を特長とする材料である。UFC に分類される材料の一つにフランスで開発された RPC (Reactive Powder Concrete)¹⁾があり、国内での施工実績が報告されている^{2),3)}。また、土木学会から UFC の設計施工に関する指針案が、コンクリートライブラリーとして発刊されている⁴⁾。

UFC の力学的特徴は、高い引張強度とひび割れ後の高じん性であり、設計荷重に対して引張強度を担保する設計をする。そのために鉄筋による補強を行わないのが原則であるため、引張に対する疲労特性を明らかにする必要がある。これまで、RPC の引張疲労に関する研究は少なく、唯一、フランス・ブイグ社⁵⁾の社内研究で曲げ疲労試験が行われたのみである。最近、繊維補強コンクリートはりを対象として、2次元の局所ひび割れモデルを適用して疲労挙動を求める解

析方法⁶⁾が提案されている。これによると、はりの曲げ疲労の S-N 曲線において二つの勾配が生ずる結果となっている。

本研究の目的は、RPC を対象として、気中と水中環境におけるはりの曲げ疲労試験を行い、湿潤環境による疲労強度への影響や引張応力度が発生するはりの疲労機構などを明らかにして、UFC の疲労強度照査法に反映することである。

2. 疲労載荷試験の概要

2.1 試験体の作成

RPC の粉体配合と補強用鋼繊維の特性を表 1 に示す。フランス・ブイグ社における気中曲げ疲労試験⁵⁾と比較するため、RPC の試験体寸法を 50×50×550mm とした。練混ぜは 20℃恒温恒湿室において容量 100 リットルのパン型ミキサーにて 2 バッチに分割して行い、それぞれのバッチで試験体数を 30 体とテストピース（各試験に 3 体ずつ使用）を作製した。RPC は自己充填性を有し、材料分離を防止するために粘性が高く設計されている。打込みは型枠の片側から流し込む成形方法によった。打込み後 2 日で脱型し、その後恒温恒湿器により温度 90℃、相対湿度 100% で 48 時間の熱養生を行った。

*1 大成建設（株） 技術センター 栄誉研究員 Ph.D. (正会員)

*2 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 室長 工学博士 (正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 博士 (工学) (正会員)

*4 太平洋セメント（株） 中央研究所研究開発部 研究員 工学修士 (正会員)

表－1 RPCの配合

| 単位：kg/m ³ | | | | |
|----------------------|--------------|------------------|--------|----------------|
| 水 | 低熱ポルトランドセメント | 珪砂，珪石，珪灰石微粉末，シリカ | 鋼繊維*1) | ポリカルボン酸系高性能減水剤 |
| 180 | 818 | 1479 | 157 | 24 |

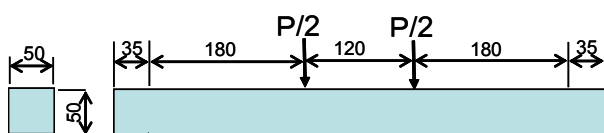
*1) 直径φ=0.2mm，長さL=15mm，引張強度 $f_u=2700\text{N/mm}^2$

表－2 試験体の材料特性

| 単位：N/mm ² | | | |
|----------------------|-------|------------|------|
| | 圧縮強度 | 曲げひび割れ発生強度 | 曲げ強度 |
| バッチ1 | 192.2 | 28.7 | 37.2 |
| バッチ2 | 208.4 | 21.4 | 40.9 |

2.2 試験体の材料特性

2つのバッチにおけるフレッシュ性状と力学特性を表－2に示す。バッチ2は試験体を追加するために練混ぜたもので、バッチ1と同じ配合であるが練上り温度が異なる。圧縮試験にはφ50×100mmのシリンダーを用いた。曲げ試験は40×40×160mmによる3等分点載荷(支点間距離120mm)を行い、曲げひび割れ発生強度は線形弾性が成立しなくなる時の全断面有効とした引張縁応力であり、曲げ強度は最大載荷荷重時の引張縁応力である。各バッチとも3体ずつのテストピースを用いて試験を行った結果で、若干のバラツキが見られた。



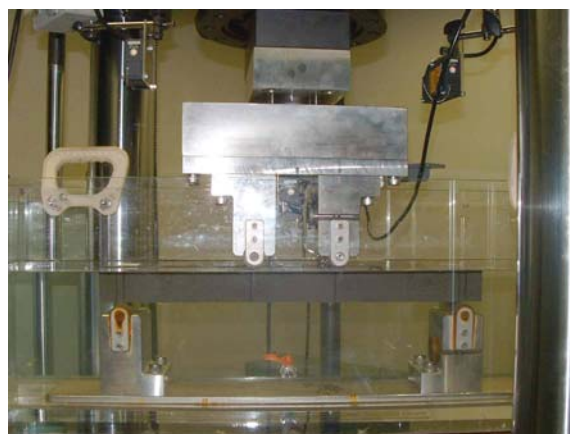
図－1 疲労試験方法



写真－1 疲労試験機の全景

2.3 疲労載荷試験の方法

気中・水中曲げ疲労試験は、写真－1に示すような疲労試験機を用いて図－1に示すような載荷方法により実施した。水中疲労試験は写真－2に示すように、試験体を貯水容器に浸して疲労載荷試験中でも常に試験体が水につかるようにした。載荷サイクルは試験体の応答変位が追従することを確認して3Hzの荷重制御で実施した。載荷時の上限応力 σ_{max} は静的強度の平均値 f_m の40%～86%とし、下限応力 σ_{min} は f_m の5%とした。変位測定はレーザ変位計とアクチュエータのストローク変位計によった。



写真－2 水中疲労試験の状況

疲労試験に先立ち、静的曲げ強度を求めるために静的載荷試験を行った。また、通常のコンクリートでは水中疲労試験時に支点部がすりへるため補強することが必要である。UFCはすりへり抵抗が大きいために、補強なしの試験体を用いた水中疲労の予備試験を行い400万回の繰返し載荷でもすりへりの影響がないことを確認した。

3. 試験結果と考察

3.1 静的載荷試験

疲労載荷試験に先立ち静的強度の平均値 f_m を求めるために、静的載荷試験をバッチ1とバッチ2に対して、それぞれ4体ずつ実施した。バッチ1に対して実施した荷重—中央たわみの関係を図－2に示す。この図より荷重 $P=5\text{kN}$ 付近

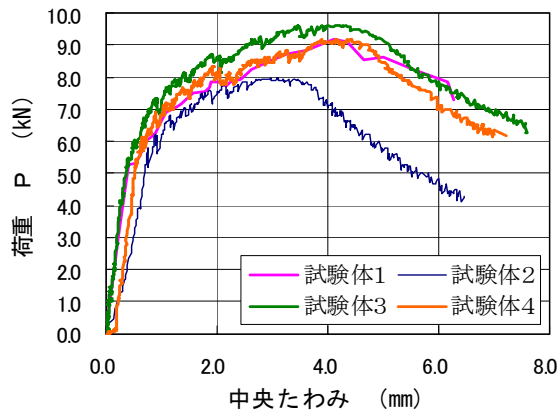


図-2 静的載荷の荷重とたわみ

表-3 静的載荷実験の結果

| | 最大載荷荷重 P | 曲げ応力平均値 f_m |
|-------|----------|------------------------|
| バッチ 1 | 8.98 kN | 38.8 N/mm ² |
| バッチ 2 | 9.05 kN | 39.1 N/mm ² |

までは弾性的挙動を示し、ひび割れ発生強度としては縁応力で 21~24N/mm² 程度である。曲げひび割れは分散するために 0.04~0.08mm のひび割れ幅であり目視による確認は困難であった。

最大荷重はたわみが 4mm 前後で発生し、ポストピーク以降にもじん性的挙動を示した。表-3 に各バッチの 4 試験体の最大荷重と曲げ応力平均値を示す。曲げ応力平均値は表-2 に示した 3 等分点載荷試験の結果と整合性がある。これは両者のはりの断面が 4cm 角と 5cm 角でほぼ同じはり高さであったためである。

3.2 繰返し回数とたわみの進展

水中疲労試験における応力比 S_{max} ($= \sigma_{max} / f_m$) が 0.40 の場合の一例について、疲労載荷回数とたわみの関係を追跡した。その結果、図-3 に示すように繰返し回数 N が増大すると剛性勾配は変わらないものの、たわみの 1 サイクル当りの増加率が変化していた。そこで、適当な繰返し回数ごとにたわみの計測を継続的に行い、たわみの変化を調べた。

応力比 S_{max} が 0.50 の場合の結果を図-4 に示す。この図は、疲労初期の段階ではたわみの増加率が高く、繰返し回数が 2000 回以降では徐々

に一定の増加率となり、最後にまた増加率が上昇する傾向を示している。このケースの場合には、定常的な部分の増加率は 5.5×10^{-8} (mm/cycle) となる。すべての疲労試験ケースについてたわみの時系列変化を調べると基本的に図-4 に示すような逆 S 形状を示すことがわかった。

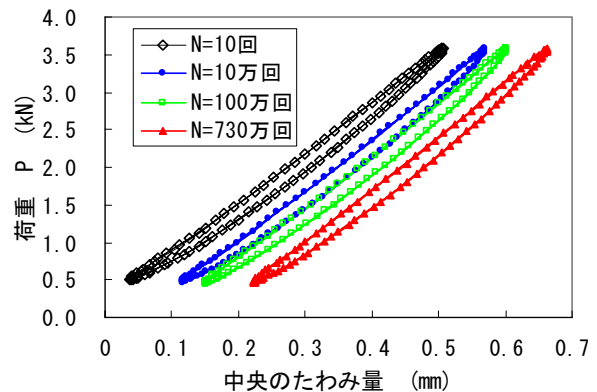


図-3 繰返し回数とたわみの変化

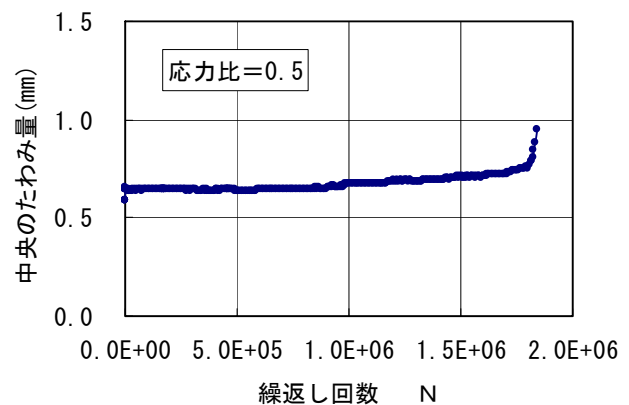


図-4 繰返し回数とたわみの増加

3.3 疲労の進展過程

図-4 における定常的な部分のたわみの増加率 R は、疲労寿命が短いものが大きく、疲労寿命が長いものは小さくなる傾向があることがわかった。たわみの増加率 R と繰返し回数 N との相関を調べた結果を図-5 に示す。両者は強い負の相関関係を示している。たわみの増加の勾配が高いということは、疲労載荷の 1 サイクルあたりのたわみが大きいことである。これを力学的現象でみると、曲げによるマイクロクラックが早く進展することにより 1 サイクルあたり

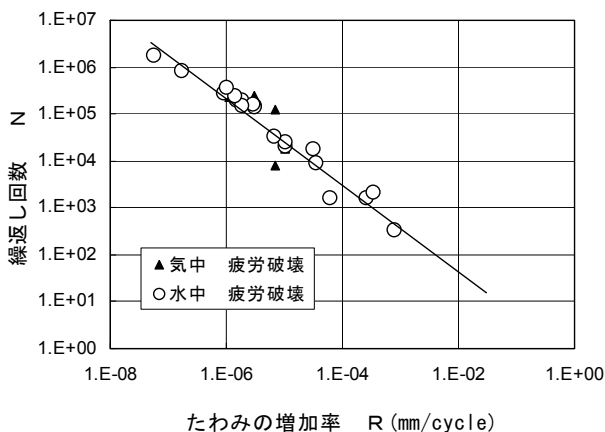


図-5 たわみ増加率と繰返し回数

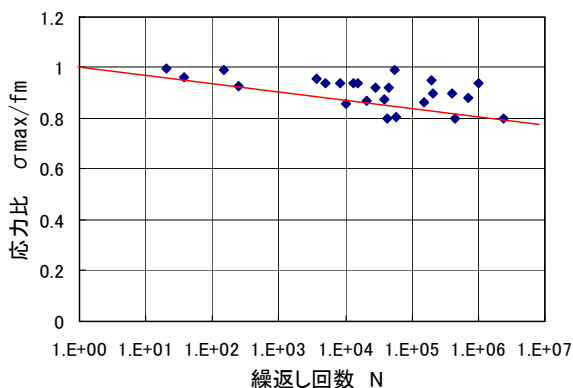


図-6 ブイグ社による気中疲労試験結果

のたわみが大きくなることを意味している。そのような疲労過程を示しているRPCは、当然、疲労寿命が短くなると考えられる。

マイクロクラックの進展は次に鋼繊維による架橋効果における鋼繊維とセメントマトリックスとの間の付着応力変動へとシフトしていく。一般的には鋼繊維とマトリックス間の付着力と鋼繊維そのものの引張耐力の比較では、付着力のほうが小さいので鋼繊維は切れることなく、徐々に鋼繊維が抜け出してたわみ変位が増大することが予測される。

図-5に示す試験データから対数の回帰直線を求めると、以下のような回帰式が得られる。

$$N = \frac{4.06}{R^{0.925}} \quad (1)$$

この回帰式を用いることにより、疲労試験をすべて破壊するまで実施しなくても、たわみの増加率が定常状態となるまで疲労試験を行い、たわみの増加率を求めるだけで、疲労寿命回数を基本的に推定できると考えられる。

3.4 水中と気中の疲労特性

図-6にブイグ社の気中疲労試験結果⁵⁾の、応力比 S_{max} と繰返し回数 N との関係を示す。試験体形状と荷重スパンは本試験のものと同じである。ブイグ社のRPC材料は基本的には同等であると考えられるが詳細配合は不明である。静的荷重試験の結果をみると、曲げ強度が本研究の材料よりも若干低い。6体の試験体による静的荷重で曲げ強度の平均値 f_m が 28.5N/mm^2 （本試験： $38.8, 39.1\text{N/mm}^2$ ）であった。試験データをみると繰返し回数が100万回以上のデータが少ないためにこれらのデータから最終のS-N曲線を導くことができるか疑問がある。また、静的試験の結果が低いので相対的にS-N曲線は緩やかな勾配となっている。

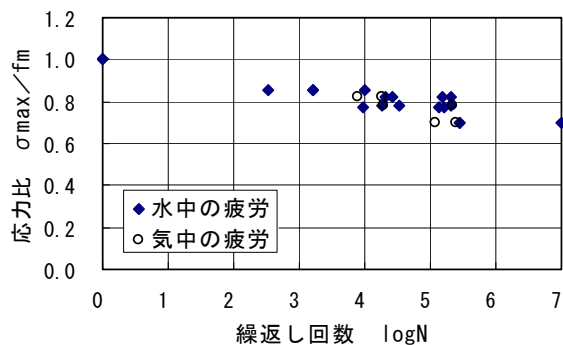


図-7 気中と水中の疲労試験比較

一方、本研究による気中と水中疲労データによる応力比 S_{max} と繰返し回数 N との関係を図-7に示す。ここに示す試験データはバッチ1からのデータで、応力比が0.7以上のデータをプロットしたので最終のS-N曲線ではない。ここでは、気中と水中の環境条件の相違による疲労強度への影響を注目した。両者の環境条件の相違は疲労強度に影響しないことがわかる。これは、

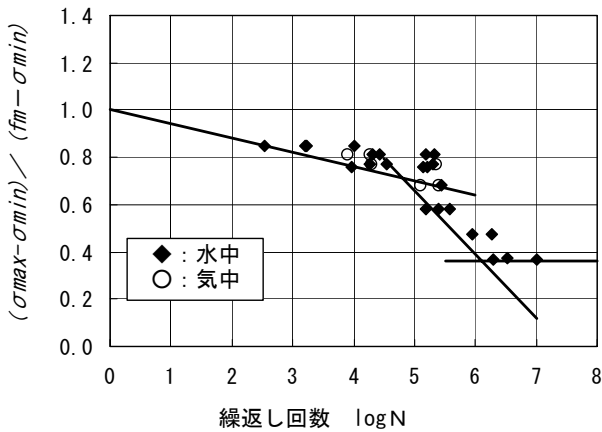


図-8 RPCの疲労S-N曲線

RPCの曲げによるひび割れが著しく分散したマイクロクラックとなるために、ひび割れ面において砕けた水和物や細骨材が生成されないので、湿潤状態であってもすりへり現象が生じないことが原因であると考えられる。

図-6と図-7を比較すると、応力比0.8以上の範囲におけるブイグ社の試験と今回の試験は、ほぼ同じ結果を与えている。そのため、この範囲におけるRPCの曲げ疲労挙動の信頼性を高める結果となった。

3.5 曲げ疲労によるS-N曲線

RPCの曲げ疲労性能照査を行うために、設計疲労強度式および等価繰返し回数の算定に必要なS-N曲線を求める。グッドマン線図の考え方に従い、試験結果を完全片振り時の状態に変換する。つまり、縦軸に $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / (f_m - \sigma_{\min})$ を、横軸に $\log N$ をとりプロットする。バッチ1とバッチ2のすべての試験データをプロットしたS-N曲線図を図-8に示す。設計疲労強度式および係数Kを決めるに当り試験データが強度式を下回る確率が5%以下となるように決めた。また、応力比が低いところは、明らかに傾きが異なるために別の強度回帰式を適用した。応力比 $S_{\max} = 0.4$ の試験では3体の試験体を対象に

水中疲労を行った。その結果、事前にひび割れを入れない試験体に対して繰返し回数が1000万回および200万回の载荷でも疲労破壊しないことが確認された。また、事前にひび割れを入れた試験体に対しては、250万回の繰返し回数でも疲労破壊しなかった。これらの結果から、応力比 $S_{\max} = 0.4$ は疲労限界状態であると考えられる。したがって、設計疲労式は繰返し回数に応じて、3区間に分類される。以下に設計疲労強度式を示す。

$N \leq 7.3 \times 10^4$ の場合：

$$f_{rd} = f_d \cdot \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right) \cdot \left(1 - \frac{\log N}{K_1}\right); K_1=16 \quad (2)$$

$7.3 \times 10^4 < N < 1.3 \times 10^6$ の場合：

$$f_{rd} = f_d \cdot \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right) \cdot \left(2.0 - \frac{\log N}{K_2}\right); K_2=3.7 \quad (3)$$

$N \geq 1.3 \times 10^6$ の場合：

$$f_{rd} = 0.36 f_d \cdot \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right) \quad (4)$$

ここに、 f_{rd} は設計疲労強度、 f_d は設計曲げ強度、 σ_p は永久荷重による応力である。なお、曲げ引張の場合の設計曲げ強度 f_d は、曲げ強度がはり高さに依存することを考慮する必要があることから、はり高さの修正式⁴⁾を用いて、引張強度 f_t から曲げ強度を求めるなど適切な評価が必要である。

応力比0.5の疲労荷重では疲労試験の初期段階ではひび割れが発生しないので、1体を初期にひび割れ発生させ、もう1体をひび割れ発生させないで疲労载荷を行った。その結果、事前にひび割れ発生させた試験体は184万回で、ひび割れ発生なしの試験体は87万回で疲労破壊した。多くの試験体の破壊は局所化したひび割れ破壊面において鋼繊維の拔出しによる破壊であった。しかし、これら2体の試験体の破壊は、



写真-3 応力比 0.5 の破壊面

写真-3に示すように、表面から2~3 cmまでの位置においてひび割れ破壊面の鋼繊維が破断していた。この破壊モードは低い応力比で係数Kが小さくなること(S-N曲線で異なる勾配係数Kを持つ)と関連していることも考えられる。Suthiwarapirak⁶⁾らの解析結果においても繊維補強コンクリートのほうがS-N曲線において二つのモードを示す解析結果を出しているので、繊維補強コンクリート特有の挙動である可能性もある。いずれにしても、この挙動を明らかにするにはさらなる疲労試験データの補足と疲労破壊までの過程を分析することが必要である。

4. まとめ

- 1) RPC はりの曲げ疲労強度は、気中と水中の異なる環境条件下で、その影響を受けない。したがってRPCの構造部材に対する疲労強度照査にあたって湿潤状態による特別の考慮が必要ないことが明らかになった。
- 2) RPCの曲げ疲労の進展過程において、はりのたわみ増加率と曲げ疲労強度に強い相関がある。この関係を用いることで少ない試験体の疲労試験により疲労強度を求めることができる。
- 3) RPCの曲げ疲労S-N曲線は、疲労限界状態の勾配をのぞくと二つの異なる勾配係数Kから構成される。疲労限は応力比が0.4程度であり、1000万回以上の疲労に耐える。

4) RPC部材は使用限界状態に対してひび割れの発生を許容しない⁴⁾。しかし、不測にも曲げひび割れが発生しても、応力比0.4程度の疲労荷重に対しては少なくとも250万回の繰返し回数でも疲労破壊しないことがわかった。

謝辞：本研究の一部は、土木学会超高強度繊維補強コンクリート研究小委員会、および幹事会において審議されたものである。二羽委員長（東京工業大学）、内田幹事長（岐阜大学）をはじめ、委員・幹事の皆様に深謝いたします。実験に際しては加藤絵万（港湾空港技術研究所研究官）および中村晃史（前港湾空港技術研究所研修生）両氏の協力を得た。ここに、感謝いたします。

参考文献

- 1) Richard, P. and Cheyrezy, M. H.: Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 N/mm² compressive strength, Metha, P. K. (ed.), Concrete Technology: Past, Present and Future, SP144-24, pp.507-517, 1994.
- 2) 田中良弘, 武者浩透, 大竹明朗, 下山善秀: 超高強度繊維補強コンクリートによるPC歩道橋の設計施工法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.1603-1608, 2002.
- 3) 田中良弘, 武者浩透, 大島邦裕, 安部吉広: 超高強度繊維補強コンクリートを用いたPC橋梁の長大スパン化に関する研究開発, コンクリート工学, Vol.42, No.8, pp.30-36, 2004.
- 4) 土木学会コンクリート委員会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, 2004.
- 5) Bouygues' Technical Report: The fatigue strength of Reactive Powder Concrete, 2000.
- 6) Suthiwarapirak, P. Matsumoto, T. and Horii, H.: Fatigue life analysis of reinforced steel-fiber concrete beams, コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.3, pp127-132, 2001