論文 HPFRCC 梁のひび割れ性状に及ぼす鉄筋量ならびにかぶりの影響

前川 恭子*1•稻熊 唯史*2•水田 武利*3•六郷 恵哲*4

要旨:ポリエチレン繊維を用いた HPFRCC の一軸引張試験および HPFRCC で作製した RC 梁の曲げ試験を実施し,ひび割れ性状に及ぼす鉄筋量やかぶりの影響について検討した。その結果, HPFRCC のひび割れ幅や本数に及ぼす一軸引張および曲げの作用応力状態,鉄筋量,かぶりの影響は小さいことを明らかにした。また,ひび割れの分布については鉄筋の有無による相違が明らかとなり,鉄筋を配置すると,ひび割れがより均等に分散することを確認した。

キーワード: HPFRCC, RC 梁, ひび割れ性状, 画像解析

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下 HPFRCC)は、短繊維で補強したセメント複合材料の一つで、一軸引張応力下において、ひずみ硬化特性、複数微細ひび割れ特性、 高引張靱性を示す材料である¹⁾。

普通コンクリートの RC 構造物の設計におい て、一般に、使用限界状態では、ひび割れ幅の 照査を行う。曲げ荷重を受ける普通コンクリー トの RC 梁の設計の場合、鉄筋使用時の鉄筋のひ ずみや鉄筋量、かぶりなどの部材の特性により ひび割れ幅は評価される。一方、HPFRCC の場 合、発生するひび割れ幅は構造特性によらず、 材料特性によって決定されるとして、ひび割れ 幅の照査には、一軸引張試験で得られる材料特 性を基準として検討する。HPFRCC は設計上引 張荷重を分担できるものとして設計するが、実 構造物では RC 構造とする適用が多いと思われ るため、材料単体のひび割れだけでなく、構造 部材としてのひび割れ性状を把握する必要があ る。

また, HPFRCC の微細なひび割れの観察は, 既往の研究²⁾において主としてマイクロスコー プによる直接観察など,ひび割れに対する部分 的な計測はされているが,ひび割れの幅,本数, それらの分布などの面的なひび割れ性状に関す る検討は十分には行われていない。

そこで本研究のひび割れ幅の計測には、マイ クロスコープを用いた精度の良い計測方法に加 え、ひび割れを面的な分布として評価できる画 像解析の手法を用いた。本研究では、応力条件 や構造条件が異なる場合におけるひび割れ進展 状況の把握を目的とし、一軸引張試験に加えて、 鉄筋量とかぶり(普通コンクリートのRC 梁のひ び割れ幅の影響因子)をパラメータとして、 HPFRCC 梁の曲げ試験を行い、曲げ応力下と一 軸引張応力下における引張ひずみとひび割れ 幅の関係について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1に、配合の概要を表-2に示 す。有機繊維材料には、高強度ポリエチレン繊 維を用い、体積比で1.5%混入した。

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)
*2 ジェイアール東海コンサルタンツ(株) 調査事業部開発技術部 (正会員)
*3 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)
*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

. 仕様				
繊維径12μm,繊維長12mm 引張強度2600MPa,弾性係数88GPa				
JIS R 5210早強ポルトランドセメント				
JISA6201 2種				
エトリンガイト系				
7号珪砂				
カルボキシル基含有ポリエーテル系				
低級アルコール				
アルキレンオキシド付加物				

表-1 使用材料

表一之	2 配	合の	概要
-----	-----	----	----

単位粉体量 B(kg/m ³)	フライアッシュ置換率 FA/(C+FA+CS*) (%)	水粉体比 W/B (%)	繊維 添加量 vol (%)
1262	30	30	1.5

*CS:膨張材

2.2 一軸引張試験

ー軸引張試験の試験体の形状と試験概要を図 -1 に示す。試験体の形状は試験断面を 30× 30mm とし、中央 100mm を検長区間とするダン ベル型とした。端部の固定条件は、上端を回転 自由支持、下端を回転固定支持とした。試験体 は合計6体作製した。

載荷には変位制御型の油圧サーボ 式試験機を用いた。荷重はロードセル, 変位は高感度変位計にて計測した。

2.3 曲げ試験

(1) 試験体概要

曲げ試験体の形状を図-2 に示す。 試験体寸法は高さ 200mm, 幅 150mm, 長さ 1800mm とした。鉄筋は SD345 の D13 および D16 を使用し,かぶり を 20mm と 50mm とした(試験体名称

では c20, c50 と表記)。試験体名称はそれぞれ D0-c0(無筋), D13-c50, D13-c20, D16-c20 とし た。

(2) 曲げ試験方法

図-2に示すように、支点間距離1600mm,等 モーメント区間300mmの2点曲げ載荷とした。 荷重はロードセルにて計測した。圧縮縁ひずみ は、試験体中央部および中央から左右に75mm の位置に貼り付けた3点のひずみゲージにて計 測した。また、等モーメント区間内に75mm間 隔で5ヶ所設置した高感度変位計により、試験



図-1 一軸引張試験体の形状と試験概要



図-2 曲げ試験体の形状と試験概要

体中央部および載荷点の変位を計測し,式(1)を 用いて検長区間内の曲率を算出した。求めた曲 率と圧縮縁ひずみの関係から,隣接する3ヶ所 の変位量を用いて式(2)より引張縁ひずみを算出 した。

$$\phi = \frac{4}{l_0^2} \left(2\delta_B - \delta_A - \delta_C \right) \tag{1}$$

ここで、 ϕ :純曲げ区間の曲率(1/mm)、 l_0 :検 長区間(mm)、 δ_B :検長区間中央のたわみ(mm)、 δ_A, δ_C :検長区間両端のたわみ(mm)である。

$$\varepsilon_t = \phi \times h + \varepsilon_c$$
 (2)
ここで、 $\varepsilon_t : 引張縁ひずみ、h : 断面高さ(mm)、$

 ε_c : 圧縮縁ひずみである。

2.4 ひび割れ計測方法

(1) マイクロスコープを用いたひび割れ幅計測方法

発生したひび割れのうち,特定のひび割れを マイクロスコープ(倍率 50 倍)を用いて載荷途 中の各段階でひび割れ画像を撮影してデータを 取り込み,ひび割れ幅の推移を計測した。この 方法は,特定のひび割れの変化を精度良く計測 できることが特長である。

(2) 画像解析手法を用いたひび割れ計測方法

ひび割れが発生した HPFRCC 試験体表面をデ ジタルカメラで撮影した。撮影した画像をデジ タル画像としてピクセルに分割し,256 階調の色 情報に処理した。ひび割れ境界近傍の輝度勾配 を利用したサブピクセル処理を利用することで、 0.5 ピクセルの分解能でひび割れを抽出すること が可能である。この方法を微細なひび割れ計測 に用いることで、面的な情報の取り扱いが可能 であり、ひび割れの幅や本数の分布などが計測 できることが特長である³⁾。

3 画像解析手法の検証

画像解析手法によって計測したひび割れ幅を 検証するため、マイクロスコープで計測された ひび割れ幅と比較した。

3.1 検証概要

被写体には、ひび割れの入った HPFRCC 試験 体を用いた。対象とするひび割れ幅の分布を考 慮して 49 ヶ所のひび割れ幅を、あらかじめマイ クロスコープにて計測した。

画像解析手法によるひび割れ幅の計測には, 撮影範囲(約80mm×100mm)を800万画素(解 像度0.03mm/ピクセル)の条件でデジタルカメラ で撮影した画像を用いた。画像処理を行うにあ たり,ひび割れ幅を抽出するしきい値は, 0.00mmから0.10mmまでを0.02mm間隔で5段 階に分けて設定した。

3.2 検証結果

画像解析手法により得られたひび割れ幅とマ



図-3 マイクロスコープのひび割れ幅と画 像処理のひび割れ幅の関係

イクロスコープで計測したひび割れ幅の関係を 図-3に示す。

画像処理前のデジタル画像上において, 0.03mm/ピクセル程度の解像度で0.02mmの微細 なひび割れまでも画像上で認識することができ た。また,画像解析手法で計測したひび割れ幅 は,全体的な傾向として,マイクロスコープで 計測したひび割れ幅よりも小さく評価する傾向 にあった。この誤差はデジタル画像の解像度や 処理手法によるものであると考えられ,高解像 度化することでさらに精度向上が期待できると 考えられる。

4. 実験結果および考察

4.1 一軸引張および曲げ試験による力学特性

ー軸引張試験結果を図ー4に示す。いずれの試 験体も初期ひび割れ発生後脆性的に破壊せず, ひずみの増大に伴って引張応力が増加する,ひ ずみ硬化特性が現れた。

曲げ試験結果を図-5に示す。全ての材料にお いて、ひび割れ発生後も応力が増加する、たわ み硬化が確認できた。なお、終局時のひび割れ は無筋の試験体では、モーメントスパン外でひ び割れが局所化した。一方、鉄筋を配置した試 験体においてはかぶりの違いによらず、モーメ ントスパン内でひび割れが局所化した。一軸引 張試験結果における終局ひずみは、試験体内の 欠陥の分布や、短繊維の分布などに敏感に影響 を受け、また、一軸引張試験では 2 次曲げの影 響も受ける。そのため、終局ひずみがばらつい たと考えられる。これらの圧縮強度および弾性 係数はそれぞれ 78N/mm², 22.0kN/mm²であった。 4.2 ひび割れの計測条件

各ひずみ段階(0.2%, 0.5%, 1.0%および1.0% 以降は1.0%間隔)における一軸引張試験の検長 内および,曲げ試験の引張縁に発生したひび割 れをマイクロスコープ及び画像解析手法でそれ ぞれ計測した。マイクロスコープを用いた計測 は,初期に発生したひび割れ3本を計測し追跡 した。画像解析手法による計測では,デジタル カメラにて試験体表面を撮影後,画像処理を行 い,ひび割れ幅および分布を計測した。ひび割 れ計測の撮影条件は,800万画素のデジタルカメ ラを用い,撮影範囲は約100mm×130mmとした (解像度は0.04mm/ピクセル程度)。撮影角度は 撮影箇所に正対して撮影を行い,フラッシュは 使用しなかった。

4.3 平均ひび割れ間隔とひび割れ幅

平均ひび割れ間隔と引張ひずみの関係を図-6に示す。平均ひび割れ間隔は、ひび割れ計測区 間(75mm)を計測区間内に発生したひび割れ本 数で除したものである。一軸引張応力を受ける 試験体と曲げ応力を受ける4水準のそれぞれの 試験体において、引張ひずみ1%付近までは新た に発生するひび割れが増加することにより、平 均ひび割れ間隔が急激に小さくなり、終局ひず みにおいてひび割れ間隔は2mm程度に収束する 挙動を示した。

ひび割れ幅と引張ひずみの関係を図-7 に示 す。ひび割れ幅の値にはマイクロスコープによ る計測結果を用いた。一軸引張応力を受ける試 験体と曲げ応力を受ける4水準のそれぞれの試 験体において、ひび割れ幅のばらつきはあるが、 ひずみの増加に伴い、ひび割れ幅はある一定値 に収束する傾向を示し、局所化して破壊の原因 となったひび割れを除いて、ひび割れ幅は 0.1mm以下であった。





以上 2 つの結果から、鉄筋降伏の使用状態レ ベルのひずみ範囲で、かつ、ひび割れ本数の増 加する 1%程度のひずみまではかぶりの影響は ほとんど認められず、ひび割れ幅の拡大が開始 する 1%以降のひずみ範囲では鉄筋かぶりの小



図-7 ひび割れ幅と引張ひずみの関係

さい試験体の方がややひび割れ幅が小さいと思 われる。このことからひび割れ幅の照査を行う 鉄筋降伏ひずみ以下の範囲では HPFRCC におけ るひび割れ間隔(ひび割れ本数)およびひび割 れ幅に及ぼす鉄筋の有無,鉄筋量,かぶりの違 いによる影響は小さいと考えられる。普通コン クリートの RC 構造では,鉄筋ひずみが同じであ れば,かぶりが大きいほどコンクリート表面で のひび割れ幅は大きくなる。これに対してかぶ り部分の HPFRCC はひび割れ発生後においても, 引張応力を維持することから,かぶり厚さの変 化の影響を受けにくいと考えられている。

4.4 ひび割れの分布

画像解析手法により得られた各試験体におけ るひずみ1%時のひび割れ分布を写真-1に示す。 無筋の試験体はひび割れの間隔にばらつきがあ るのに対して,有筋の試験体は鉄筋量やかぶり に関係なく,均等にひび割れが分布した。また,









ひび割れ抽出の凡例: -------:0-0.02mm -------:0.02-0.04mm

写真-1 ひび割れ分布

等モーメント区間内の曲率について検討した。 等モーメント区間内を 3 つの区間に分割し(図 -2 参照), それぞれの区間における曲率(φ1, φ2, φ3)を求め, 各ひずみ段階における曲率 の変化を無筋および有筋の試験体で比較した。 その結果を図-8に示す。無筋の試験体は各ひず み段階で各区間の曲率にばらつきがみられるが, 有筋の試験体は各ひずみ段階で曲率のばらつき が少なく, 均一になった。ひび割れ発生状況と 計測した曲率の分布から, 鉄筋と複合した試験 体では等モーメント区間内で HPFRCC のばらつ きが緩和されていると考えられる。

以上のことから鉄筋を配置することにより, 試験体長さ方向において曲げ変形が均一化し, ひび割れが均等に分散したと思われる。これは, 図-5に示した通り,曲げ強度における鉄筋の補 強が大きく寄与している。繊維の分散,配向に よって材料にばらつきを生じる HPFRCC に対し て,安定して伸びる鉄筋が半分以上の引張力を 分担している。そのため,鉄筋が均等に変形す るに伴い,HPFRCC の変形も均等に分布したと 考えられる。

5. まとめ

ポリエチレン繊維材料を用いた HPFRCC の一 軸引張試験および HPFRCC で作製した RC 梁の 曲げ試験を実施し,ひび割れ性状に及ぼす鉄筋 量やかぶりの影響について検討した。得られた 結果を以下にまとめる。

- (1)本研究で用いた画像解析手法により推定したひび割れ幅はマイクロスコープで計測した値よりも小さく評価する傾向にあった。この誤差は解像度や処理手法によるものと考えられる。
- (2) ひび割れ幅の照査を必要とする鉄筋降伏ひ ずみ以下の範囲では、 HPFRCC の平均ひび 割れ間隔(ひび割れ本数),ひび割れ幅共に 鉄筋の有無や鉄筋量の大小,およびかぶりの 大小の差異から受ける影響は小さいと確認 できた。
- (3) ひび割れの分布については、無筋の試験体で はひび割れの間隔にばらつきがあるのに対





し、有筋の試験体では均等にひび割れが分布 した。これは、長手方向にばらつきのある HPFRCC に鉄筋を配筋することにより、引張 力の大部分を分担する鉄筋が均等に変形し、 HPFRCC も均等に変形したため、ひび割れの 発生も均等に分布したと考えられる。このこ とは、各区間で計測した曲率の変化からも確 認できた。

参考文献

- 日本コンクリート工学協会: 高靱性セメント 複合材料の性能評価と構造利用研究委員会 報告書, 2002.1
- 福田一郎,平石剛紀,閑田徹志,須田久美子: 高靭性セメント複合材料に生じる引張ひず みとひび割れ幅の関係に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.1, pp.353-358, 2006
- 材上伸一: 画像処理工学, 東京電機大学出版
 局, 1996.9