

論文 HPFRCC に発生する複数微細ひび割れの確率分布によるキャラクターゼーション

高田 浩夫*1・浅野 幸男*2・小林 孝一*3・六郷 恵哲*4

要旨: HPFRCC に発生する複数微細ひび割れのキャラクターゼーションに関して、ひび割れ幅の確率分布に着目して、ダンベル型供試体、RC はり供試体、円筒供試体に発生したひび割れについて検討を行った。ひび割れ幅の分布は対数正規分布に従い、ワイブル解析を行うことで RC はりの最大ひび割れ幅が推定できることを確認した。また、鉄筋を配置した円筒供試体を用いると、RC はり供試体のひび割れ性状が模擬できることから、耐久性に関する促進試験への利用が考えられた。

キーワード: HPFRCC, 複数微細ひび割れ, ひび割れ幅, 確率分布, 対数正規分布, ワイブル分布

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、引張力下で複数の微細なひび割れを生じ、ひずみ硬化しながら大きな引張ひずみを示す繊維補強セメント系材料である¹⁾。繊維がひび割れを架橋することで、引張りによる変位や荷重の増加に応じてセメントマトリックス中に生じるひび割れを、複数の高密度で微細なひび割れに材料自身が制御を行う点にこの材料の大きな特徴がある。

このように特徴的な材料特性と大型化、プレキャスト化、コスト削減、意匠の自由化など世界的な建設産業の趨勢を受け、HPFRCC の活発な研究が国際的に展開されている²⁾。その中で国際材料構造試験研究機関・専門家連合（RILEM）においては、2004 年から HPFRCC の構造体への利用に向けた委員会 TC HFC が活動しており、また新たに 2010 年に HPFRCC を用いたコンクリート構造体の耐久性設計に関する委員会 TC FDS が活動を開始している。TC FDS では、HPFRCC を適用した構造体の耐久性設計指針を制定するため、HPFRCC が供用状態の構造物に与える耐久性を適切にモデル化し、評価すること、さらに、具体的な耐久性の要求事項に対する材料の適応性を実証する試験規格の策定が重要課題とされている³⁾。著者らが参加した第 1 回 TC FDC 委員会においては、その実現を目指して、HPFRCC のひび割れのキャラクターゼーションが委員会の重要な目標であることが確認された。

著者らは、ダンベル型供試体を用いた HPFRCC の引張試験や、鉄筋で補強した HPFRCC はり部材の載荷試験を行い、HPFRCC のひび割れの計測データを蓄積している。そこで、本研究においては、HPFRCC に発生する複数ひ

び割れのキャラクターゼーションに関してひび割れ幅の確率分布に着目して、過去に実施したダンベル型供試体⁴⁾、RC はり供試体⁵⁾、円筒供試体^{6),8)}の実験で計測したひび割れ幅のデータを整理し検討を行った。

2. 実験概要

2.1 HPFRCC の種類と配合

実験に用いた HPFRCC には、高強度ポリエチレン繊維（以下 PE）を体積比で 1.5%混入した。使用材料を表-1 に、配合を表-2 に示す。RC はり供試体に用いた HPFRCC は、自己収縮ならびに乾燥収縮を補償するため膨張材をセメントの質量の内割で 6%添加した膨張型⁷⁾とした。

2.2 供試体とひび割れの計測方法

(1) ダンベル型供試体

一軸直接引張試験は、土木学会施工指針¹⁾に準拠して引張試験部の断面寸法 30×30mm、検長 80mm のダンベル型供試体を用いた。ひび割れの計測は、検長区間の一面（型枠面底面に対応する面）に中心線を引き、引張ひ

表-1 使用材料

材料	仕様, 物性
高強度ポリエチレン繊維 (PE)	繊維径 12 μ m, 繊維長 12mm, 密度 0.98g/cm ³ , 引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa
セメント (C)	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³
膨張材 (EX)	JIS A6202 エトリンガイト・石灰複合系 密度 3.05 g/cm ³
細骨材 (S)	7号珪砂, 密度 2.60g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸エーテル系
増粘剤 (MC)	水溶性メチルセルロース系

*1 岐阜県生コンクリート工業組合 技術センター所長 博士（工学）（正会員）

*2 岐阜大学 社会資本アセットマネジメントセンター 博士（工学）（正会員）

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 博士（工学）（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）

表-2 HPRFRC の配合

配合	水結合材比 W/B (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水 W	結合材 B		7号珪砂 S	高性能 AE 減水剤 SP	増粘剤 MC	繊維 PE
			セメント C	膨張材 EX**				
HPRFRC (PE:1.5%)	30	379*	1264		395	37.9	0.9	14.6

*W は SP を含んだ水溶液の質量を表す **EX は RC はり供試体に打設した HPRFRC に $B \times 6\% = 75.8 \text{ kg/m}^3$ 添加した

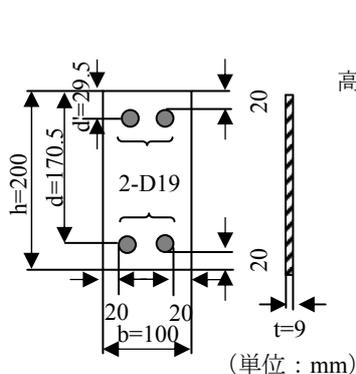


図-1 はりの断面と定着板の寸法

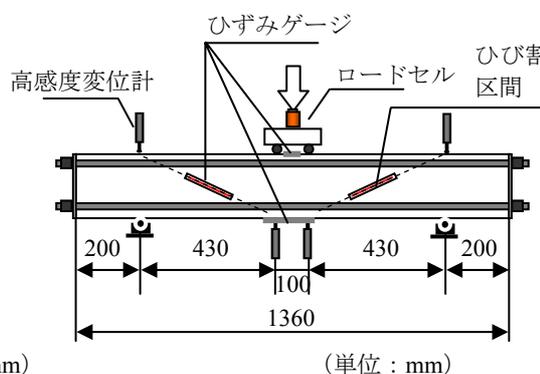


図-2 曲げ载荷試験方法
(a/d : 2.5 の場合)

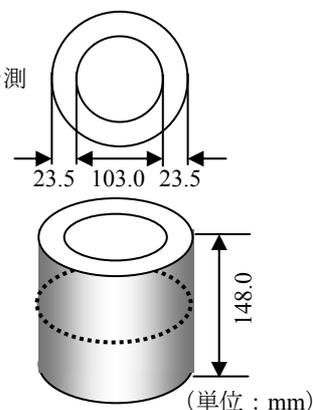


図-3 円筒供試体形状、寸法

ずみが 0.2%, 0.5%, 1.0% の段階で载荷を止め、また終局後の残留ひび割れを、その線に沿ってマイクロソープ (倍率 50 倍) を移動させ、ひび割れを画像としてパソコンに取り込み、ひび割れ幅とひび割れ本数を計測した⁴⁾。

(2) RC はり供試体

はりは、せん断補強鉄筋を配置せず、等曲げ区間の長さを一定として、支点間距離を移動させてせん断スパン比 (a/d) を 2.5, 2.25, 2.0, 1.75, 1.5 と段階的に変化させた。4 点曲げ载荷試験を行い、ひび割れ性状を確認した⁵⁾。はりの断面を図-1 に、はりの寸法を図-2 に示す。鉄筋比は、3.4% となる。はりの長さは、a/d が 2.0, 1.75, 1.5 のときは 1020mm とした。ひび割れの計測は、荷重が 60kN までは 20kN ごとに、60kN を超えて降伏までは 40kN あるいは 80kN ごとに等間隔で段階的に载荷を止め、マイクロソープにより等曲げ区間とせん断区間に発生したひび割れについて行った。せん断区間のひび割れは、図-2 に示す破線を計測した。ひび割れ計測区間のひずみは、引張縁とはり左右のせん断区間に検長 120mm のひずみゲージをそれぞれ貼付し測定した。

(3) 円筒供試体

円筒供試体の形状、寸法を図-3 に示す。供試体は、HPRFRC 単体によるもの⁸⁾と、 $\phi 3\text{mm}$ の異形鉄筋をらせん状に加工して配置したもの⁶⁾とした。供試体に直径 2.8mm の鋼球を充填し、これを圧縮して内圧を作用させることによりひび割れを導入した。ひび割れの計測は、マイクロソープを用いて図-3 に点線で示す供試体の高さ方向中央の円周上に発生した終局後の残留ひび割

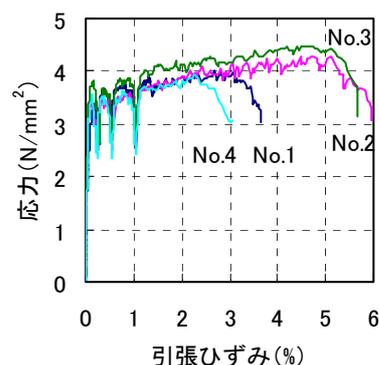


図-4 応力-ひずみ関係

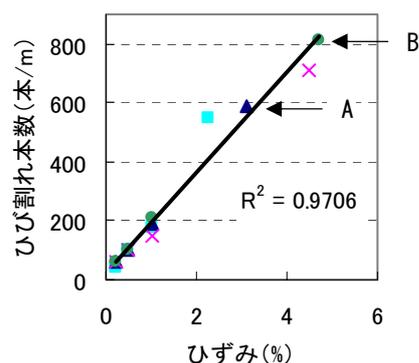


図-5 ひずみとひび割れ本数の関係

れについて行った。

3 実験結果と考察

3.1 ダンベル型供試体に発生したひび割れ

試験に供したダンベル型供試体の応力とひずみの関係を図-4 に示す。終局ひずみは 2.3%, 3.1%, 4.5%, 4.7% であった。図-5 に示す各供試体の計測点における

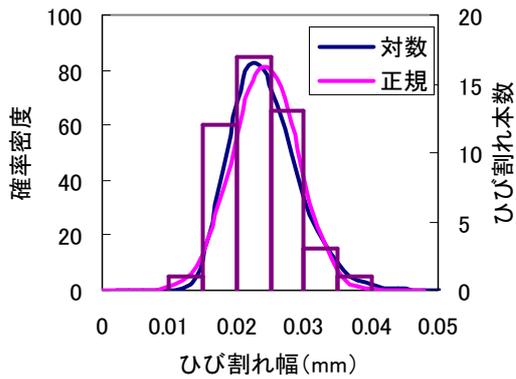


図-6 Aにおけるひび割れ幅のヒストグラムと確率密度

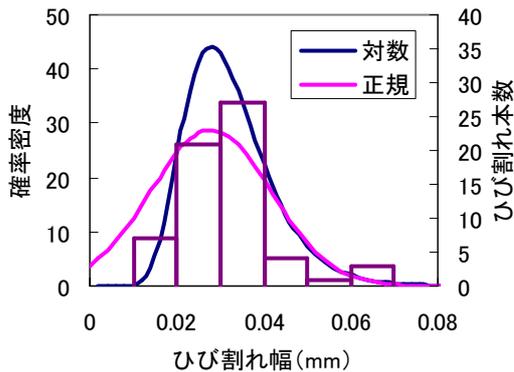


図-7 Bにおけるひび割れ幅のヒストグラムと確率密度

ひずみと単位長さ 1m あたりのひび割れ本数の関係は、全データのプロットが直線関係を示すことから、材料の特性値として関係が定まると考える。そこで、この材料のひび割れ幅の分布の特性として、図-5のAとBにおけるひび割れ幅のヒストグラムと確率密度を図-6, 7に示す。ヒストグラムはJIS Z 9041-1に準拠した。確率密度関数は、分布形状を対数正規分布とする場合と正規分布とする場合を図示した。対数正規分布とする場合の確率密度関数は式(1)による。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L t} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2}\right\} \quad (1)$$

ここに、 t はひび割れ幅 (mm)、 μ_L はひび割れ幅 t (mm) の自然対数 $\ln t$ の算術平均であり、 σ_L は $\ln t$ の不偏分散の平方根である。

また、正規分布とする場合は式(2)による。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

AとBにおけるひび割れ幅の分布を比べると、ひずみが相対的に小さいAにおいては、ひび割れ幅の分布形状を対数正規分布あるいは正規分布とした場合、各々の確率密度のプロットは同様の形状を示しヒストグラムと相似することを図-6は示すが、ひずみが大きくなるとひび割れ幅の分布は正規分布から外れることを図-7は

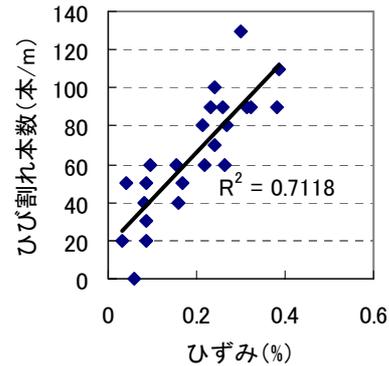


図-8 等曲げ区間のひずみとひび割れ本数の関係

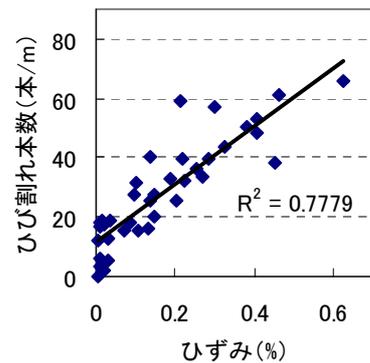


図-9 せん断区間のひずみとひび割れ本数の関係

示す。また、ひび割れ幅の分布を正規分布とすると、既往の研究⁹⁾において指摘され、また図-7でもみられるように、負の幅を有するひび割れが生じることになってしまう場合があるため、HFRCCに発生するひび割れ幅は対数正規分布に従うと仮説を立て、以降検討を行った。

3.2 RC はり供試体に発生したひび割れ

実験に供したRCはり供試体は、全て曲げ引張破壊した⁵⁾。載荷試験で測定した等曲げ区間とせん断区間のひずみとひび割れ本数との関係を図-8, 9に示す。せん断区間では、はりの載荷点直下と支点直上を結んだ対角線の長さでひび割れ本数を除して1mあたりのひび割れ本数を算出した。等曲げ区間、せん断区間ともダンベル型供試体と同様、ひずみとひび割れ本数は直線関係を示す。鉄筋が配置される等曲げ区間とせん断補強のないせん断区間では、ひずみとひび割れ本数の傾向が異なり、等曲げ区間では、同一ひずみに対して単位長さあたりに多くのひび割れが発生した。

次に、ひび割れ幅の分布について等曲げ区間とせん断区間で荷重 60kN, 140kN、と鉄筋降伏前に計測したひび割れの対数正規分布への適合について検討した。正規性の検討は、Q-Qプロットによる図的な評価¹⁰⁾を行った。正規分布において分位数 $q(j)$ は、式(3)で与えられる。

$$\phi(q(j)) = \{j - (1/2)\}/n \quad (3)$$

ここに $\phi(t)$ は、正規分布の分布関数である。

この場合、分位数とひび割れ幅の自然対数のプロット

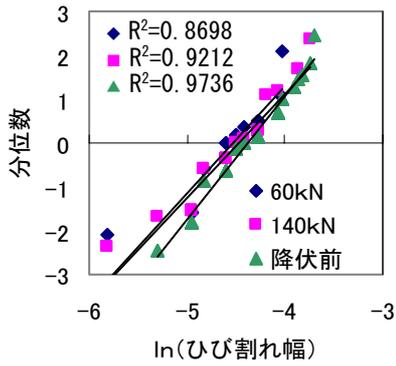


図-10 等曲げ区間のひび割れ幅のQ-Qプロット

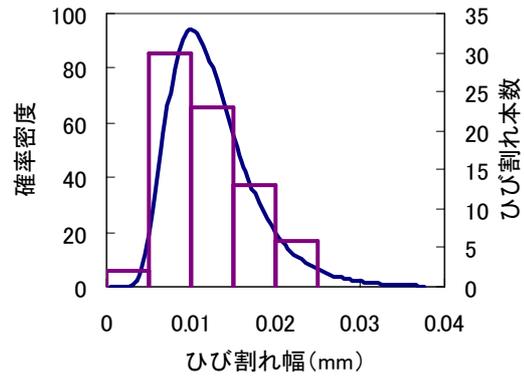


図-14 等曲げ区間のヒストグラムと確率密度

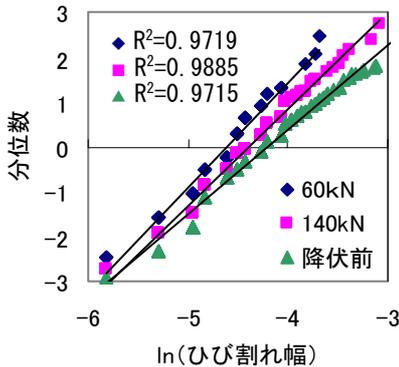


図-11 せん断区間のひび割れ幅のQ-Qプロット

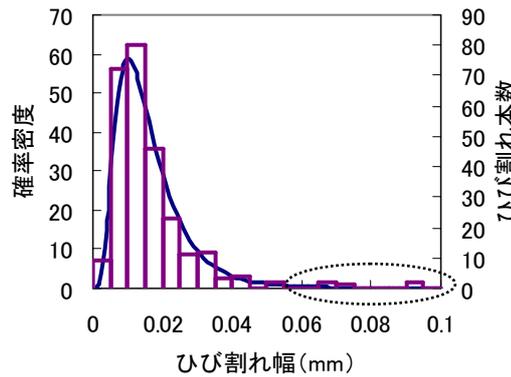


図-15 せん断区間のヒストグラムと確率密度

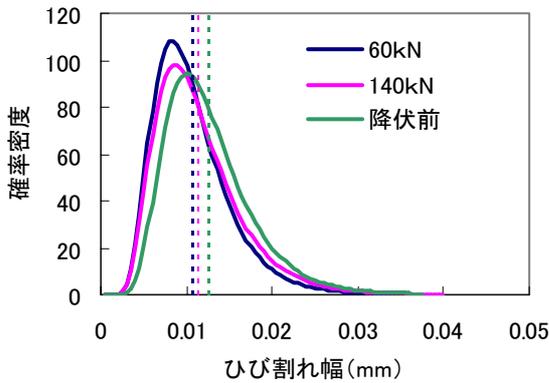


図-12 等曲げ区間のひび割れ確率密度の推移

したひび割れ幅の自然対数のQ-Qプロットを図-10, 11に示す。等曲げ区間、せん断区間に発生したひび割れ幅は、全ての荷重段階においていずれのQ-Qプロットも高い直線性を示し、対数正規分布に従うことを示す。

また、各荷重段階における式(1)による確率密度の推移を図-12, 13に示す。図中の破線は式(4)により求めた対数正規分布の平均値である。標準偏差は式(5)により与えられる。

$$\mu = \exp\left(\mu_L + \frac{\sigma_L^2}{2}\right) \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\exp(2\mu_L + \sigma_L^2) \{ \exp(\sigma_L^2) - 1 \}} \quad (5)$$

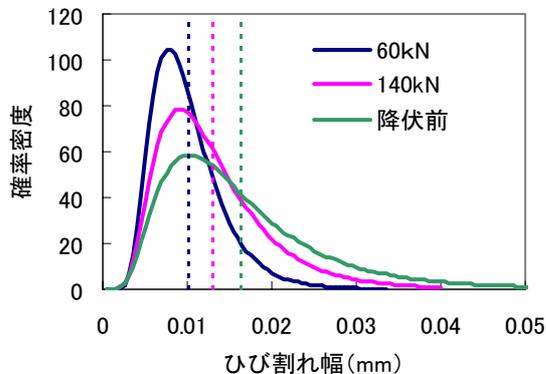


図-13 せん断区間のひび割れ確率密度の推移

図-13からRCはりのせん断区間に発生したひび割れは、降伏に近づくにつれて平均値が大きくなり、標準偏差が大きくなるため、ひび割れ幅の分布の裾が広がる傾向を示すことがわかる。図-12, 13における鉄筋降伏前におけるひび割れの標準偏差は等曲げ区間で0.0083mm、せん断区間で0.012mmであることから、鉄筋を配置することによりひび割れ幅の標準偏差が小さくなると考えられる。

図-14, 15にRCはりの降伏前の等曲げ区間とせん断区間に発生したひび割れ幅の確率密度とヒストグラムを示す。図-15のヒストグラムに破線で囲んだ区間において、確率密度曲線では発生確率がほとんど0となる

$(q(j), \ln\{t(j)\})$ ($j=1, 2, \dots, n$) が直線を形成すればひび割れ幅 t は、対数正規分布に従うといえる。

各荷重段階において等曲げ区間とせん断区間に発生

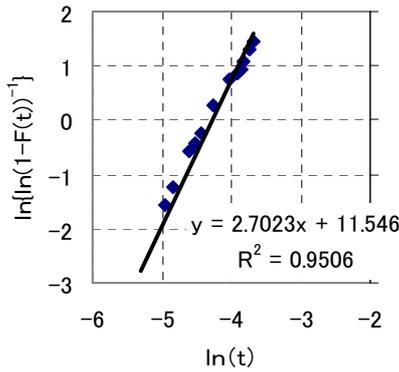


図-16 等曲げ区間のひび割れのワイブルプロット

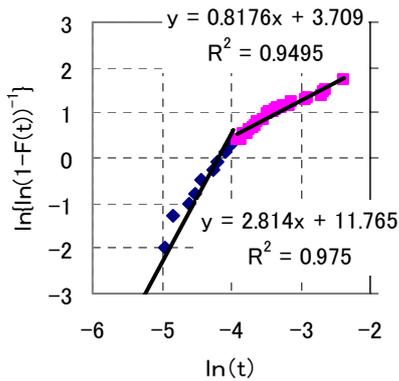


図-17 セン断区間のひび割れのワイブルプロット

0.06mm 以上のひび割れが散見される。ひび割れ幅が 0.1mm 程度以下では、ひび割れ幅の増加に伴い、塩化物イオンの拡散係数が大きくなる傾向がある¹⁾とされ、また、HPFRCC を用いた構造物の塩化物イオンに対する鋼材腐食に関する照査¹⁾において、塩化物イオンの拡散係数は最大ひび割れ幅と関係付けられていることから、この区間のひび割れ発生 の推定は重要と考える。

このことを検討するため、信頼性工学の分野で頻繁に用いられるワイブル分布への適合を試みた。信頼性解析には式(6)に示す、2 母数ワイブル分布を適用した。

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} \quad (6)$$

ここに、 $F(t)$ は信頼度関数、 t はひび割れ幅 (mm)、 m は形状パラメータ、 η は尺度パラメータである。 $F(t)$ の推定は、データの数が 20 以上あるため式(7)で与えられる平均ランク法を用いた¹¹⁾。

$$\hat{F}(t_i) = \frac{i}{n+1} \quad (7)$$

式(6)を $1/(1-F(t)) = \exp(t/\eta)^m$ と変形し、両辺の自然対数を 2 度とった $\ln\{\ln[1-F(t)]^{-1}\}$ を縦軸に、ひび割れ幅の自然対数の $\ln t$ を横軸にとったワイブルプロットを図-16、17 に示す。いずれの図のプロットも直線に当てはまり、ワイブル分布に従うことを示す。図-17 のプロットは 2 直線の折れ線になり、複合型ワイブル分布に従う

と考えられる。図-16、17 のワイブルプロットから、ひび割れ幅がおおよそ $\exp(-4)=0.02\text{mm}$ 以下では、等曲げ区間ならびにせん断区間に発生したひび割れ幅のプロットが、ほぼ等しい傾きと切片の直線に回帰されるため、両者は一つのワイブル確率密度関数で表すことができるといえる。また、図-17 に示すよう上述のひび割れ幅を超えた領域では、それ以下とは異なる直線にワイブルプロットが回帰されるため、この場合 0.02mm 以上のひび割れはそれ以下とは異なる確率密度関数で表されることがわかる。

図-17 に赤で示す幅の大きいひび割れに関するワイブルプロットの回帰直線の傾きと切片から式(6)のパラメータは $m=0.82$ 、 $\eta=\exp(-3.7/0.82)=0.011$ となる。これにより図-15 に示すヒストグラムの総数 267 本における最大ひび割れ幅 t は、式(8)の関係から 0.09mm と推定され、実際と合致する。

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left(t/0.011\right)^{0.82}\right\} = 1 - 1/267 = 0.996 \quad (8)$$

一方、式(1)の $\mu_L=-4.26\text{mm}$ 、 $\sigma_L=0.567\text{mm}$ から対数正規分布を適用した場合、最大ひび割れ幅は 0.06mm と推定され、実際と異なる。このことから、実構造物で HPFRCC に広範に発生しているひび割れ幅の最大値を推定するには、サンプリングで得られたワイブルプロットから推定される形状パラメータ、尺度パラメータを用いた分布関数に総ひび割れ本数を与えることで最大ひび割れ幅が推定できることから、ワイブル解析が好適と考える。

以上から、HPFRCC のひずみ、ひび割れ本数ならびに最大ひび割れ幅は相互関係があり、ひずみに関連するひび割れ本数から、サンプリングデータを用いて最大ひび割れ幅が統計的に推定できるといえる。ひび割れ本数の推定方法は、今後の研究課題としたい。

3.3 円筒供試体に発生したひび割れ

円筒供試体に発生したひび割れ幅の自然対数を横軸にとった Q-Q プロットを図-18 に示す。このときの、ひび割れ幅のヒストグラムと対数正規分布における確率密度を図-19 に示す。図中の破線は式(4)により求めた平均値を示す。円筒供試体に発生したひび割れは、RC はり供試体と同様に対数正規分布に従うことがわかる。

供試体外周における単位長さあたりのひび割れ本数は、HPFRCC 単体の場合が 76 本、鉄筋を配置したものが 331 本であり、鉄筋を配置することにより単位長さあたりのひび割れ本数は増えた。直径 150mm の供試体の外周 471mm の区間において、RC はりと同じ確率分布形状で、特に鉄筋を配置した場合、多くの複数微細ひび割れが発生することから、ひずみを制御することで RC はり供試体のひび割れ性状が模擬できると考える。このことから、塩化物イオンの拡散係数試験など耐久性に関す

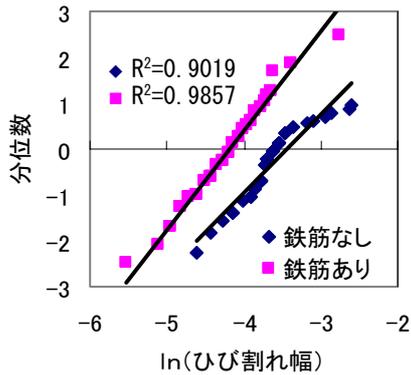


図-18 円筒供試体のひび割れ幅の Q-Q プロット

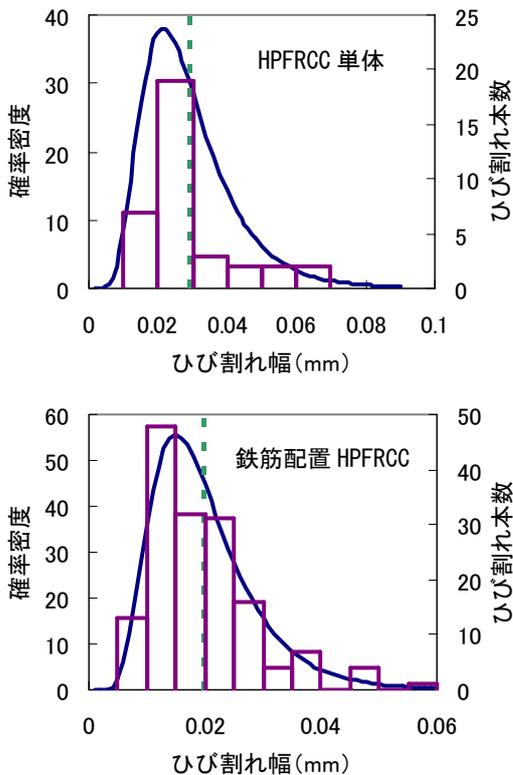


図-19 円筒供試体のひび割れ幅のヒストグラムと確率密度

る促進試験への円筒供試体の利用が考えられる。

以上により鉄筋を用いた HPFRCC のひび割れ性状の把握には、鉄筋を配置した円筒供試体による試験が適すると考える。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) HPFRCC に発生するひび割れ幅の分布は、対数正規分布に従うことを確認した。
- (2) HPFRCC に発生したひび割れの単位長さあたりの本数は、ひずみと直線関係があり、鉄筋があるとその本数は増加することを確認した。
- (3) 本実験における RC はりのせん断区間に発生したひ

び割れは、引張り鉄筋が降伏に近づくにつれて平均値、標準偏差が大きくなった。また、ワイブルプロットは、2 直線の折れ線に回帰された。

- (4) ワイブル分布を用いることで、RC はりの最大ひび割れ幅の推定ができることを確認した。
- (5) 鉄筋を配置した円筒供試体を用いると、RC はり供試体のひび割れ性状が模擬できることから、耐久性に関する試験への利用が考えられた。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，2007.3
- 2) G.P.A.G van Zijl: Durability of Strain-Hardening Cement Composites (SHCC)－An overview, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II-Alexander et al (eds), pp.199-205,2009
- 3) RIREM Homepage: Technical Committees FDS , <http://www.rilem.net/tcDetails.php?tc=FDS> Accessed, Dec.2010
- 4) 飯塚貴洋，水田武利，高田浩夫，六郷恵哲：PE 繊維の性能ならびに混入率が HPFRCC のひび割れ性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp.267-372, 2008
- 5) 高橋祐二，高田浩夫，浅野幸男，六郷恵哲：膨張型 HPFRCC を用いたせん断スパン比の異なる RC はりのひび割れ性状と破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, pp.1249-1254, 2010
- 6) 宮元智之，浅野翔也，浅野幸男，六郷恵哲：ひび割れを導入した円筒供試体を用いた止水材料の性能評価方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, pp.1601-1606, 2010
- 7) 高田浩夫，高橋祐二，阪口裕紀，小林孝一，六郷恵哲：膨張材の多量混入による鉄筋補強 HPFRCC はり部材のひび割れ性状の改善，土木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp337-347, 2010
- 8) 高田浩夫，飯塚貴洋，浅野幸男，六郷恵哲：HPFRCC のひび割れ性状を確認するための円筒供試体を用いた引張試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp.297-302, 2008
- 9) W.P.Boshoff, C.J.Adendorff: Modeling SHCC Cracking for Durability, Fracture and Damage of Advanced Fiber-reinforced Cement-based Materials , Proceedings, contribution to ECF 18, pp.195-202, 2010
- 10) 長野長一郎，江島伸興：基本 多変量解析，日本規格協会，1996
- 11) 田中健次：入門信頼性，日科技連出版社，2008