

論文 HPFRCC の動的引張特性

古田昌弘^{*1}・金久保利之^{*2}・松崎育弘^{*3}・関田徹志^{*4}

要旨：本研究ではビニロン短繊維を用いた高い靱性能を有するセメント系複合材料（HPFRCC）を対象とし、引張性能を評価するための静的純引張試験法について検討を行った後に、動的純引張試験を行った。実験結果から、歪速度の上昇により初期ひび割れ強度、引張強度、割線剛性が上昇し、脆性的な破壊性状を示すことが認められた。しかし、エネルギー吸収能力は歪速度の影響によらず、ほぼ一定であることが分かった。

キーワード：HPFRCC, 歪速度, 純引張加力, ひび割れ強度, 脆性化指標

1. はじめに

近年、モルタルに高性能短繊維による補強を適切に施すことにより高い靱性を実現するセメント系複合材料（以下、HPFRCC）が注目を集めている。HPFRCC は静的引張応力下では複数ひび割れ（マルチプルクラック）が発生し、引張歪が数%程度まで応力の低下がないとされている¹⁾。このような利点を利用し、HPFRCC をコンクリート構造物の地震時エネルギー吸収デバイスとして適用しようとする研究開発が進んでいる²⁾。一方、コンクリート構造物に入力される地震動により部材に生じる歪速度は $10^3 \sim 10^5 \mu/\text{sec}$ 程度といわれており³⁾、コンクリート構造物の主要構成要素であるコンクリート、鉄筋は歪速度の上昇に伴って強度、剛性が上昇する。さらに、コンクリートにおいては破壊が脆性的になり、破壊性状の変化が起こることも確認されている⁴⁾。

HPFRCC を地震時エネルギー吸収デバイスとして使用する場合、その動的特性を把握することは重要であると考えられ、特に歪速度の上昇に伴う破壊形態および破壊靱性（エネルギー吸収能力）の変化を確認しておく必要がある。

本研究では、HPFRCC を対象に、歪速度 ($10^{-1} \sim 10^2 \mu/\text{sec}$) をパラメータとした動的純引張試験を行い、歪速度が HPFRCC の力学特性、破壊性状に与える影響について検討する。HPFRCC の引張試験は板状の引張試験片あるいは曲げ加力試験で行われる場合が多いが、本研究では繊維の三軸配向を再現できるくびれ型試験体⁵⁾を用い、一軸引張靱性を評価する試験法として、佐藤らが提案したサーボ型万能試験機を用いた一軸引張試験法⁶⁾（以下、BRI-GripTest）、端部固定状態をピンーピンとした試験法（以下、P-PTest）、およびピンー固定とした試験法（以下、P-FTest）で静的純引張加力を行い、試験方法の検討を行う。次に、静的加力で安定した結果が得られたピンー固定試験法により、歪速度をパラメータとした動的加力を行い、破壊性状、ひび割れ強度、引張強度、破壊靱性の検討を行う。

2. HPFRCC の静的純引張試験法の検討

2.2 試験体および使用材料

試験体は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ シリンダーの中央部を $\phi 70\text{mm}$ とした区間を軸方向に 70mm 確保

*1 筑波大学大学院 理工学研究科 (正会員)

*2 筑波大学 機能工学系講師 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博(正会員)

*4 鹿島建設(株) 技術研究所 Ph.D. (正会員)

したくびれ型試験体を用いた。静的引張試験の検討に用いた材料は日標圧縮強度 20MPa (C2), 50MPa (C5) のコンクリート, ビニロン繊維 (type U) を体積混入率 1.5%とした HPFRCC (U15), およびビニロン繊維 (type R) を体積混入率 2.1%とした HPFRCC (R21) である。各試験体の調合を表-1に, ビニロン繊維の力学的特性を表-2に示す。

表-1 試験体調合一覧

名称	W/C (%)	S/B	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	a (kg/m ³)	V _f (%)
C2	64.0	3.22	165	258	1855	-
C5	35.5	1.36	185	521	1583	-
U15	45.0	0.40	429	789	394	1.5
R21	44.0	0.66	412	674	618	2.1

表-2 ビニロン繊維の力学的特性

使用繊維	L _f (mm)	d _f (μm)	σ _{fu} (MPa)	E _f (GPa)
ビニロン (typeU)	15.0	40.8	1850	43.9
ビニロン (typeR)	12.0	40.0	1600	40.0

L_f: 繊維長, d_f: 繊維径, σ_{fu}: 破断強度, E_f: ヤング係数

2.2 BRI-GripTest の検討

BRI-GripTest⁶⁾は HPFRCC の圧縮, 引張, および引張-圧縮繰り返し載荷を目的とした加力方法である。サーボ型試験機のヘッド間に試験体端部を治具で固定し, ヘッド間 0.5mm/min の載荷速度で加力を行う。本実験では各材料で3体ずつ (U15 は2体) 純引張加力のみを行った。計測は, 荷重, ヘッド間変位, くびれ直線部分 (検長 70mm), および試験体側面中央部表裏に貼付した2枚の歪ゲージ (ゲージ長 30mm) により軸方向歪を測定した。

歪ゲージにより測定した初期ひび割れ発生前の歪の値と応力の関係を図-1に示す。各試験体で, 載荷開始後から表裏の歪の差が拡大しており, 両端固定の引張加力による曲げモーメントの発生がかなり大きくなってしまっている。

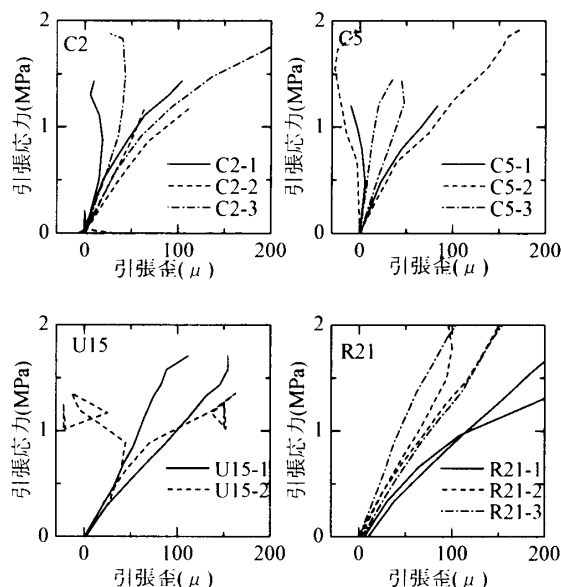


図-1 BRI-GripTest 応力-歪 (ゲージ) 関係

2.3 P-PTest の検討

加力方法を引張側のみに限定し, 試験体端部をピン-ピンとし加力を行った。試験体の設置方法を図-2に示す。くびれ型試験体の上下面にM24ボルトを溶接した厚さ15mmの鉄板を接着し, ロードセルおよびロードエンドを介して2MNユニバーサル試験機のヘッドチャックに設置する。試験機のヘッドスピードは0.5mm/minに設定した。試験体は BRI-GripTest と同様, C2, C5, U15 および R21 各3体 (C2は2体) である。計測は, BRI-GripTest と同様である。

歪ゲージにより測定した初期ひび割れ発生前の歪の値と応力の関係を図-3に示す。

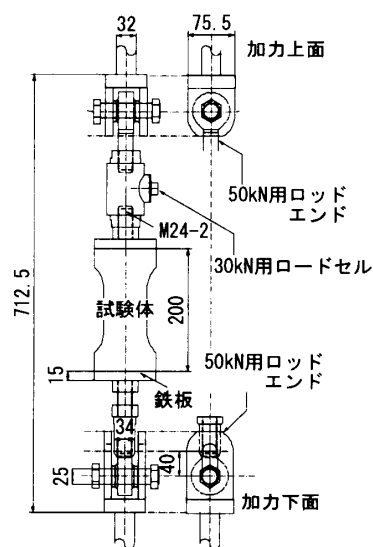


図-2 P-PTest 試験体

BRI-GripTest と比較すると試験体中央部に貼付した表裏の歪ゲージの値は、初期ひび割れが発生するまではほぼ同等の値を示しており、曲げモーメントの発生がかなり小さくなっている。

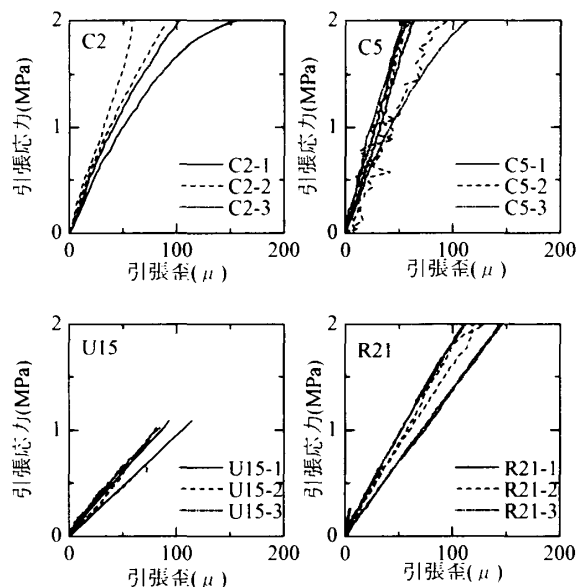


図-3 P-Test 応力-歪（ゲージ）関係

図-4にR21試験体の歪ゲージと変位計より得られた応力-歪関係の一例を示す。

変位計による歪の値より、初期ひび割れ発生後、片側圧縮、片側引張という状態が発生し、初期ひび割れ付近でひび割れの早期局所化が認められた。材料の不均一性等の理由により、破壊が断面片側で進行し、ピン-ピン支持のために断面全体の平均的な力を分担せずに、変形しやすい部分にのみ力が集中するのでその傾向が拡大する。そのため、ピン-ピン加力ではHPFRCCの変形能力を確認することができない。

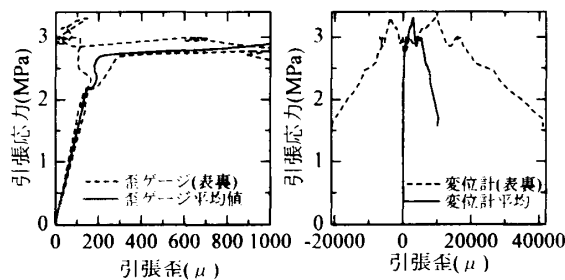


図-4 P-Test 応力-歪関係

2.4 P-Test の検討

初期ひび割れ発生後も安定した加力を行うために、試験体端部をピン-固定とした加力を行った。加力方法は P-Test とほぼ同様で、試験体下部のロッドエンドを取り外し、試験体に接着した M24 ボルトを直接試験機のチャックで挟んだ。試験体は C2, C5, および R21 の各 3 体である。R21 試験体の歪ゲージと変位計より得られたの応力-歪関係の一例を図-5に示す。歪ゲージの値より、P-Test と同様初期ひび発生まで安定した加力を行うことができ、さらに初期ひび割れ発生後も表裏変位計による歪にほとんど差が見られず、破壊の引張側局所化を防止できている。

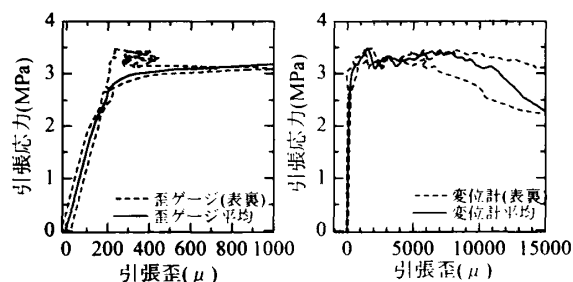


図-5 P-Test 応力-歪関係

P-Test と P-Test による初期ひび割れ強度 (fcr), 引張強度 (fu) の比較を表-3に示す。C2, C5 試験体は 4 体の平均, R21 試験体は P-Test で 12 体, P-Test で 11 体の平均値である。各強度は P-Test 結果より P-Test 結果の方が小さくなる傾向にあるが、その差は HPFRCC である R21 試験体では 10% 程度であり、ひび割れ発生後の挙動を重視する HPFRCC の引張実験としては P-Test が適していると考えられる。

表-3 P-Test・P-Test の引張強度比較

試験体名	P-Test (MPa)		P-Test (MPa)	
	fcr	fu	fcr	fu
C2	2.09		2.04	
C5	2.88		2.15	
R21	3.51	4.07	3.21	3.89

3. HPRCの動的純引張試験概要

3.1 試験体

試験体形状は静的引張試験に用いたものと同様であり、使用した材料もR21と同様である。材令4週時の $\phi 100 \times 200\text{mm}$ シリンダーによる6体の静的圧縮試験結果の平均値およびP-FTestにより得られた7体の静的純引張試験結果の平均値を表-4に示す。

表-4 圧縮および引張試験結果

圧縮強度 (MPa)	圧縮側 割線剛性 (GPa)	fcr (MPa)	fu (MPa)	引張側 割線剛性 (GPa)
46.2	12.8	3.39	3.78	16.3

3.2 加力方法

動的純引張加力では、P-FTestと同様に試験体を設置し、試験機のヘッド間速度をパラメータとして、静的(0.5mm/min)～動的(250mm/min)までの6段階で各6

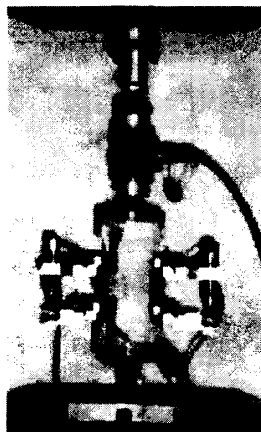


図-6 試験体設置状況

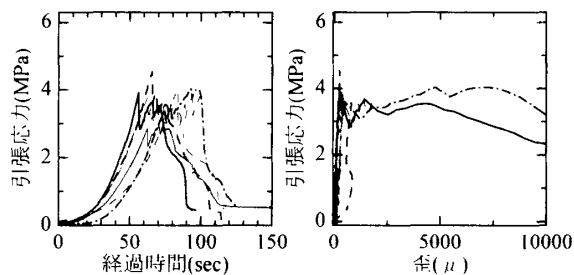
は3体の動的加力を行った。試験体上部に取り付けたロードセルにより荷重を、試験体中央部に取り付けた歪ゲージ(ゲージ長30mm)、くびれ直線部(検長70mm)、およびくびれ終了部(検長140mm)に設置した変位計により軸方向歪を計測した。データ計測は、サンプリング時間を最大5msとした。本実験では試験体に生じた歪速度を、载荷開始点から初期ひび割れ発生点までの歪ゲージによる平均歪速度で定義する。

4. 実験結果

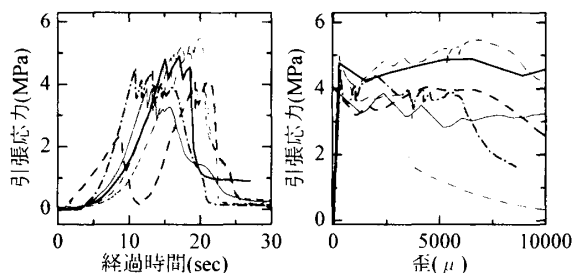
4.1 応力-歪関係

ヘッド間速度2.5, 12.5, 250mm/minとした試験体の引張応力-経過時間、引張応力-歪(検

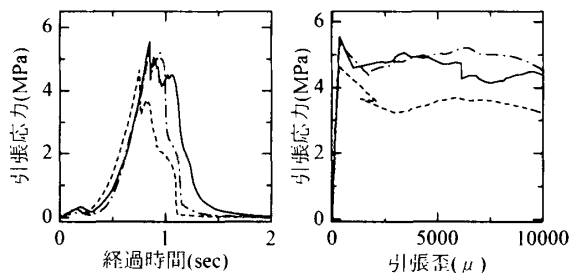
長70mm)関係を図-7に示す。同じ線種のものが同一の試験体での結果を示す。



ヘッド間速度 2.5mm/min



ヘッド間速度 12.5mm/min



ヘッド間速度 250mm/min

図-7 引張応力-時間・歪関係一覧

ヘッド間速度12.5mm/min(歪速度 $20 \mu/\text{sec}$ 程度)までは、初期ひび割れ発生後、ひび割れの分散を生じながら応力を維持もしくは上昇させる歪硬化現象が確認されたが、それよりヘッド間速度が速くなると、初期ひび割れ発生後、一気に耐力を低下させるものが目立ち、ひび割れの分散領域が狭くなった。

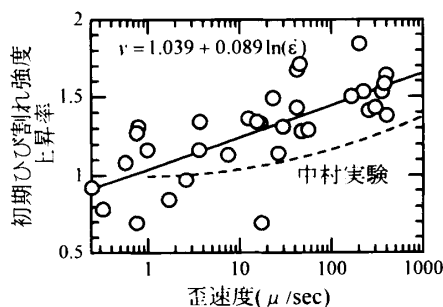
4.2 力学特性値の上昇率評価

各試験体について、力学特性値を静的試験結果の値で基準化した値をその上昇率として評価する。また、各特性値の上昇率-歪速度との関

係から回帰式を求め、 $y = a + b \ln(\dot{\epsilon})$ の形で表現する。ここで、 y は各特性値の上昇率、 $\dot{\epsilon}$ は歪速度 (μ/sec)、 a 、 b は定数である。

4.2.1 初期ひび割れ強度上昇率

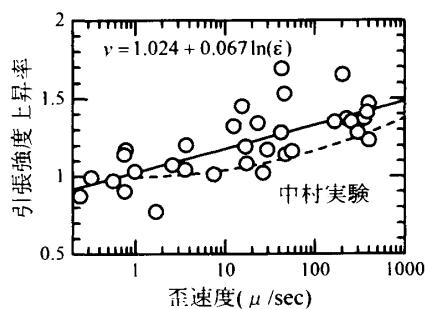
初期ひび割れ強度上昇率－歪速度関係を図－8に示す。図の横軸は、歪速度を対数でとったもので、縦軸は静的試験結果で基準化したものである。また最小二乗法により求めた回帰式を実線で示す。同図中には、中村らが行った動的割裂試験⁷⁾の引張強度上昇率の回帰式（圧縮強度 24MPa の普通コンクリート）を波線で示した。コンクリートの圧縮強度レベルが中村らの実験と異なるため直接の比較は難しいが、コンクリートより HPFRCC の方が上昇率が高い。



図－8 初期ひび割れ強度上昇率－歪速度関係

4.2.2 引張強度上昇率

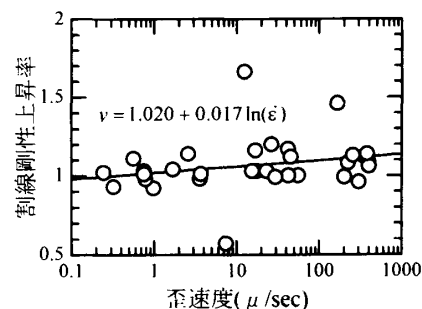
引張強度上昇率－歪速度関係を図－9に示す。中村らの実験結果より若干上昇率が高い。なお、歪速度が大きい範囲の試験体では、最大引張強度と初期ひび割れ強度が同一点である試験体が多い。



図－9 引張強度上昇率－歪速度関係

4.2.3 割線剛性上昇率

割線剛性上昇率－歪速度関係を図－10に示す。なお、割線剛性は引張強度の 1/3 点割線剛性である。割線剛性に関しても上昇傾向が認められる。

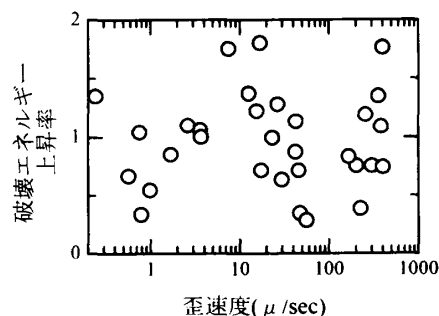


図－10 割線剛性上昇率－歪速度関係

4.2.4 破壊エネルギーの評価

破壊エネルギーを、初期ひび割れ点から引張強度の 50%強度まで低下した点までの応力－変位（検長 140mm の変位計による）曲線の囲む面積として定義する。これは、ひび割れが局所化するまでにひび割れを分散させながら消費するエネルギーであり、HPFRCC のエネルギー吸収能力と考えることができる。

破壊エネルギー上昇率－歪速度関係を図－11に示す。破壊エネルギーの上昇率を見ると歪速度によらずほぼ一定の値を示し、一定のエネルギー吸収能を維持していることが分かる。これは、歪速度の増大に伴い引張強度が大きくなり、初期ひび割れ以降の応力低下は大きくなったためである。



図－11 破壊エネルギー上昇率－歪速度関係

4.2.5 脆性化指標の評価

最大耐力後の破壊性状が脆性的であるかどうかを評価するために、弾性エネルギーと破壊エネルギーとの比で表現される脆性化指標を用いる。脆性化指標は下式で与えられ、弾性エネルギーとは、初期ひび割れ発生までの応力-ひび割れ幅曲線の囲む面積である。図-12に脆性化指標上昇率-歪速度関係を示す。歪速度の上昇により脆性化指標の値が増加し、脆性的な破壊性状を示すことが分かる。

$$\text{脆性化指標} = \frac{2 \times \text{弾性エネルギー}}{\text{破壊エネルギー}} = \frac{2 \times \left(\frac{1}{2} \frac{\sigma_p^2 L}{E} \right)}{\text{破壊エネルギー}}$$

σ_p ; 初期ひび割れ強度(MPa)
 E ; 割線剛性(GPa)
 L ; 検長(mm)

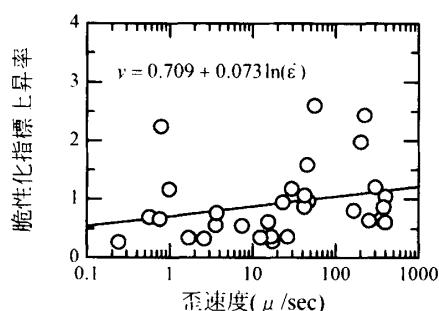


図-12 脆性化指標上昇率-歪速度関係

5. まとめ

HPFRCCの静的純引張試験は、初期ひび割れ発生以前の曲げモーメントの発生が小さく、初期ひび割れ発生後のひび割れの早期局所化を防止し、その後の純引張挙動を確認できる試験法として、端部拘束条件をピン-固定としたものが適当であることを確認した。

HPFRCCの動的純引張試験より、歪速度の増大による初期ひび割れ強度、引張強度、および割線剛性の上昇を確認した。また、歪速度の上昇に伴い破壊が脆性的になることが明らかになったが、初期ひび割れ発生後の破壊エネルギーの値は歪速度によらずほぼ一定であることから、

HPFRCCのエネルギー吸収能力が歪速度によらずほぼ一定であることが分かった。

謝辞：本研究の実験実施に当たっては、建築研究所福山洋氏、東急建設磯雅人氏にご協力いただきました。

参考文献

- 1) 福山 洋, 倉本 洋：スマートコンクリート-高じん性コンクリート, コンクリート工学, Vol.39, No.1, pp.104~pp.109, 2001.1
- 2) 八太 伸幸ほか：高靱性セメント系複合材料を用いたデバイスの構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術梗概集 C 構造IV, pp.515~pp.518, 2001.9
- 3) 岩井 哲：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 314 号, pp.102~pp.111, 昭和 57 年 4 月
- 4) 藤掛 一典ほか：歪速度の影響を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化, 土木学会論文集 No.669/V-50, 125-134, 2001.2
- 5) 占田 昌弘, 金久保 利之：セメント系材料の材料実験に用いるくびれ型供試体の提案, 日本建築学会大会学術梗概集, A 材料施工, pp.101~pp.102, 2001.9
- 6) 佐藤 幸博ほか：高靱性セメント系複合材料の一軸引張-圧縮繰返し試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集 No.539, pp.7~12, 2001.1
- 7) 中村 和行ほか：コンクリート構造物の挙動における高速載荷の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構成則 (1), pp.787~788, 1997.9