

高靱性セメント系複合材料の一軸引張モデル評価法

その1 初期ひび割れ点の簡易実験評価法

EVALUATION OF UNI-AXIAL TENSILE MODEL
FOR HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES

Part I Experimental evaluation method for first crack strength and strain

古田 昌弘*, 金久保 利之**, 関田 徹志***, 永井 寛****
Masahiro FURUTA, Toshiyuki KANAKUBO, Tetsushi KANDA
and Satoru NAGAI

High performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) have tensile capacity of several percent strain. The objective of this study is mainly to evaluate uni-axial tensile model of HPFRCC for design procedure utilization and certification on construction site. In this paper, experimental evaluation method for first crack strength and strain is proposed using results of splitting and compression test of cylinder test pieces. The first crack strength obtained by splitting test shows a good agreement with that obtained by uni-axial tensile test using hourglass test piece. Elastic modulus obtained by compression test has a good relationship with that of uni-axial tensile test. As a result, crack strength and strain can be evaluated by the simple experimental tests.

keywords : fiber reinforced cementitious composites, first crack strength, elastic modulus, uni-axial tensile test,

hourglass test piece, splitting test

繊維補強セメント系複合材料, 初期ひび割れ強度, 弾性剛性, 純引張試験,
くびれ型試験体, 割裂試験

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、高い靱性能を実現するセメント系複合材料（以下、HPFRCC）が開発、研究されている。HPFRCCは引張応力下においてひび割れ発生後も歪の増加にともなって応力を維持もしくは上昇させる「歪硬化特性」と、無数の微細なひび割れを発生させる「マルチプルクラック特性」を示す。これらの特性により、部材の脆性的な破壊性状の緩和や最大耐力の向上、ひび割れ分散による耐久性の向上などが期待でき、構造部材やエネルギー吸収デバイスへの適応が期待されている¹⁾。HPFRCCの実際の適用に向けて基盤となるものは構成材料であるHPFRCCの基本的力学特性を正確に把握・評価することであり、さらにその特性から構造部材の性能を評価できることが重要である。特にHPFRCCの利点を最大限に生かすためには引張側力学特性の評価が不可欠であるとともに、それは例えば鋼材やコンクリートの応力-歪関係モデルのように、部材性能評価に反映することのできる簡易な構成則であることが望ましい。

コンクリートに代表されるセメント系複合材料では、その引張特性、特に伸び能力を評価するためには特殊な形状のテストピースや加力治具が必要とされる。しかし、HPFRCCの一般的な実用化に向けては、HPFRCCの作製時や供用時において、引張側力学特性点を随時確認し、

さらには保証していくことが必要になると考えられる。そのためには、特殊な加力方法によらない簡易な実験方法で引張側力学特性を確認できるようにすることが望まれる。

本研究では、HPFRCCの引張応力-歪関係を完全弾塑性モデルで表現することを提案し、その特性点を簡易な加力実験で評価する方法を検討することを目的とする。本報では、完全弾塑性モデルの降伏点に対応するHPFRCCの初期ひび割れ点に着目し、それを通常のコンクリートに対して行われる円柱テストピースを用いた割裂試験および圧縮試験で評価する手法を提案する。本報ではまた、HPFRCCの引張特性評価のための基準データとするための純引張試験法についての検討も行う。HPFRCCの引張試験としては、薄板状のダンベル型試験体²⁾や佐藤らの提案による円柱テストピース試験体³⁾が用いられている場合が多い。しかし、前者では薄板状のため繊維が二次元に配向され部材中での挙動より過大な評価をしてしまうおそれがあり、後者ではテストピース端部補強のための手間を要することや、本報中でも触れるように加力時端部拘束条件による影響が懸念される。本報では筆者らの提案によるくびれ型試験体⁴⁾を用い、佐藤らの提案による純引張試験とともに、端部拘束条件を変えた純引張実験の結果を報告する。次報—その2—ではHPFRCCの引張側完全弾塑性モデルにおける終局点の

* 一条工務店 工修
(元筑波大学大学院理工学研究科 大学院生)
** 筑波大学機能工学系 講師・博士(工学)

*** 鹿島建設技術研究所 上席研究員・Ph. D.
**** 鹿島建設技術研究所 主任研究員・工修

Ichijo Corporation, M. Eng.
(Former Graduate Student, University of Tsukuba)
Assistant Prof., Inst. of Engineering Mechanics and Systems, Univ. of Tsukuba,
Dr. Eng.
Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Ph. D.
Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, M. Eng.

実験的簡易評価法の検討を報告する予定である。

2. HPFRCC の一軸引張モデル

HPFRCC の引張挙動は、図 1 に示すように、弾性挙動後、初期ひび割れ点によって剛性が急変しその後微細な複数ひび割れをとましながら耐力を維持もしくは上昇させ、最終的にひび割れが局所化し耐力が維持できなくなり終局点を迎える。ここで HPFRCC の引張挙動を簡便に表現する構成則としては、完全弾塑性型モデルが適している。完全弾塑性型モデルにおける降伏点を初期ひび割れ点に対応させることで、その後歪硬化特性を示す HPFRCC に対しても安全側に評価することになる。本モデルの構築のために必要な力学特性は 3 つで、初期ひび割れ強度 f_{cr} 、弾性係数（または初期ひび割れ時歪 ε_{cr} ）、および終局点の歪 ε_u である。本報では初期ひび割れ強度および弾性係数を検討対象とする。

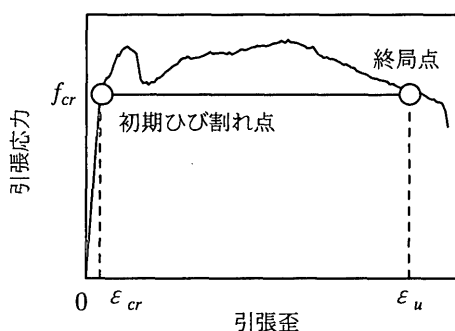


図 1 HPFRCC の一軸引張モデル

3. くびれ型試験体を用いた純引張試験方法の検討

HPFRCC の引張特性を評価するための純引張試験法は、特殊な加力装置や治具などを必要とするために標準試験法として定められているものはない。そこで、HPFRCC の引張特性、特に初期ひび割れ点を正確に把握するためにくびれ型試験体を用いた純引張試験について端部拘束条件に着目した加力方法の検討を行う。本節で検討した適切な初期ひび割れ強度実験値を、次章で提案する割裂試験による初期ひび割れ強度評価法の基準データとする。

3.1 試験体

試験体は、通常のコンクリート材料試験に用いられる $\phi 100 \times 200\text{mm}$ のシリンダーの中央部を $\phi 70\text{mm}$ とし、軸方向に 70mm 確保したくびれ型試験体⁴⁾を用いた。くびれ部分の曲率半径は 48.3mm である。本試験体の型枠は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の簡易モールドの内側にくびれ形状を持つ鋼製型をねじ止めするだけで作製でき、試験体の脱型も容易である。なお、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の通常シリンダーを用いた場合との圧縮および引張特性値の差異は文献 4) を参照されたい。使用材料は、目標強度 20MPa 、 50MPa の普通コンクリート (C2、C5)、PVA 繊維またはポリエチレン繊維を用いて繊維体積混入率を 1.5% とした HPFRCC (U15、R15、PE15)、PVA 繊維を用いて繊維体積混入率を 2.1% とした HPFRCC (R21)、および R21 試験体の調合から短繊維を取り除いたモルタル (M5) である。繊維体積は、繊維重量を繊維の比重で除すことにより求めた。各試験体の調合計画、材令 4 週時圧縮強度、1/3 割線弾性係数、および HPFRCC 試験体に用いた繊維の力学的性質をそれぞれ表 1、表 2 に示す。なお、試験体名末尾に数字が付き

であるものは、練混ぜバッチの異なる試験体群を指す。圧縮強度および割線弾性係数は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の通常シリンダーを用いた圧縮試験結果の 3 体の平均である。

U15、R15、PE15 の各試験体は、文献 5) と同一の方法で練混ぜを行ったが、同文献にも見られるように繊維の分散性について必ずしも良好な結果は得られていない。また、これらの試験体については圧縮試験結果の弾性係数が極端に低く、過大な空気量の連行または繊維混入による欠陥の導入が予想される。本研究では HPFRCC の引張側力学特性の簡易実験評価法の提案を目的としており、様々な、例えば練混ぜが適当でなく十分な引張性能が発揮できないような材料に対しても簡易実験評価が行えることが必要であると考えられるため、これらの試験体も同様に検討対象とした。

表 1 試験体調合計画および材令 4 週時圧縮特性値

試験体	調合			圧縮特性		実施引張試験			
	水パインダー比 W/B (%)	砂パインダー比 S/B	繊維体積混入率 V_f (%)	圧縮強度 (MPa)	1/3 割線弾性係数 (GPa)	Grip Test	P-P Test	P-F Test	割裂試験
C2-1	64.0	3.22		23.6	24.9	○	○		
C2-2				29.6	29.6		○	○	○
C5-1	35.5	1.36		50.2	33.7	○	○		
C5-2				57.3	34.3		○	○	○
M5	44.0	0.66		52.3	17.8		○	○	○
U15	45.0	0.40	1.5	40.5	9.72	○	○		
R21-1	44.0	0.66	2.1	40.4	14.9	○			
R21-2				47.9	16.4		○	○	
R21-3				48.7	11.0		○	○	○
R21-4				43.6	14.7			○	○
R21-5				42.0	14.3		○	○	○
PE15	45.0	0.40	1.5	13.4	8.65			○	○
R15	45.0	0.40	1.5	22.9	9.72			○	○

表 2 使用繊維(値はメーカー公称値)

繊維種類 (試験体)	比重	繊維長 L_f (mm)	繊維径 d_f (μm)	引張強度 σ_{bf} (MPa)	弾性係数 E_f (GPa)
PVA-U (U15)	1.30	15	40.8	1850	43.9
PVA-R (R21・R15)	1.30	12	40.0	1600	40.0
ポリエチレン (PE15)	0.97	15	12.0	2500	75.0

3.2 加力方法および計測方法

佐藤らによって提案されている試験方法として、試験体端部を掴み治具により固定しサーボ型万能試験機で加力する試験法³⁾(以下、Grip Test)、端部拘束条件をユニバーサルタイプのピンーピンとし機械式万能試験機で加力する試験法(以下、P-P Test)、端部拘束条件をピンー固定とした試験法(以下、P-F Test)で純引張加力を行い、純引張試験法の検討を行った。各試験法の概要を以下に述べる。

Grip Test は HPFRCC のシリンダータイプ試験体の引張圧縮繰返し加力を行う目的で発案された試験法であり、2MN サーボ型万能試験装置に、試験体端部上下 10mm づつを掴み治具により試験体を固定し載荷する。本試験では単調引張加力のみを行った。P-P Test は試験体の純引張加力に限定し、試験体端部拘束条件をピンーピン(ピンはユニ

バーサルタイプ)として、試験体の作製精度や設置状況により発生する曲げモーメントの影響をなるべく小さくしようと意図した加力方法である。試験体は図2に示すように、試験体端部上下面にエポキシ樹脂系接着剤により厚さ15mmの鉄板を接着し、引張加力用のロッドエンドを取り付け加力を行う。一方、P-P Testではひび割れ発生前の曲げモーメントの影響を小さくすることができるが、初期ひび割れ発生以降はいわゆる2次曲げモーメントの影響を受けてひび割れの局所化が顕著に表れることが懸念される⁹⁾。したがって、P-F Testでは、下側のロッドエンドを取り外し鉄板に固定した鋼棒を試験機のチャックで直接掴むことにより、端部拘束条件をピン固定とした加力を行う。

測定項目は全加力方法とも同一で、引張荷重値をロードセルで、くびれ直線部分の変形を精度1/2000mmの電気式変位計(検長70mm、表裏2ヶ所)で、試験体側面中央部の歪をゲージ長30mmの歪ゲージ(表裏2ヶ所)で測定した。初期ひび割れ発生点の歪は100~200 μ 程度(検長70mmで変形0.01mm程度)であり、変位計の測定精度から、初期ひび割れ発生までは歪ゲージによる測定値を主として検討し、ひび割れ発生後は変位計による測定値を主として検討することとする。

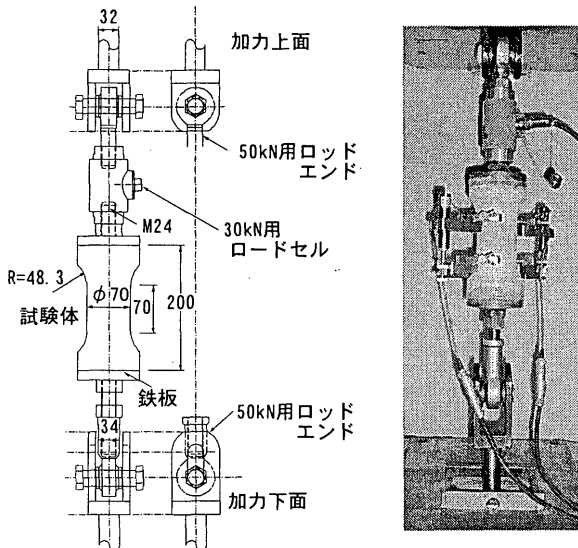


図2 P-P Test 試験体設置状況

3.3 各試験方法による結果の検討

3.3.1 破壊状況

各試験方法によるR21試験体の加力終了後の状況を図3に示す。終局時までのひび割れの発生および進展状況は、目視上は各試験方法により大きな差異はない。まず、くびれ直線部分に試験体直交方向垂直

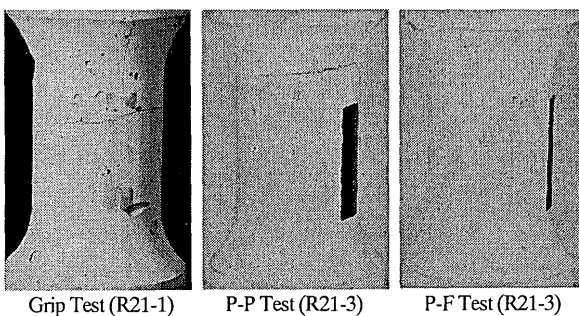


図3 各試験方法による試験体の破壊状況

に断面を貫通する代表的なひび割れが発生する。その後その周辺に微細な複数ひび割れの発生をともないつつ、くびれ直線部分にさらに2~3本の代表的なひび割れが発生する。さらにそれらのひび割れの周辺に微細な複数ひび割れが生じ、最終的にはひび割れの開口がいずれか1つのひび割れに集中局所化して引張荷重が低下する。P-P Testでは、最終的に局所化したひび割れの開口幅が試験体表裏で異なり、2次曲げモーメントの影響が見られた。

3.3.2 Grip Testによる応力-歪関係

Grip TestによりC2、C5、U15、R21の各試験体から得られた引張応力と表裏の歪ゲージによる歪値の関係を図4に示す。図中の同線種が同一の試験体から得られた表裏の歪を示している。加力が進むにつれて表裏のゲージの値で差が大きくなるようになり、曲げモーメントの発生が確認される。初期ひび割れ強度を適切に評価する試験法としては、Grip Testは適当でないと考えられる。

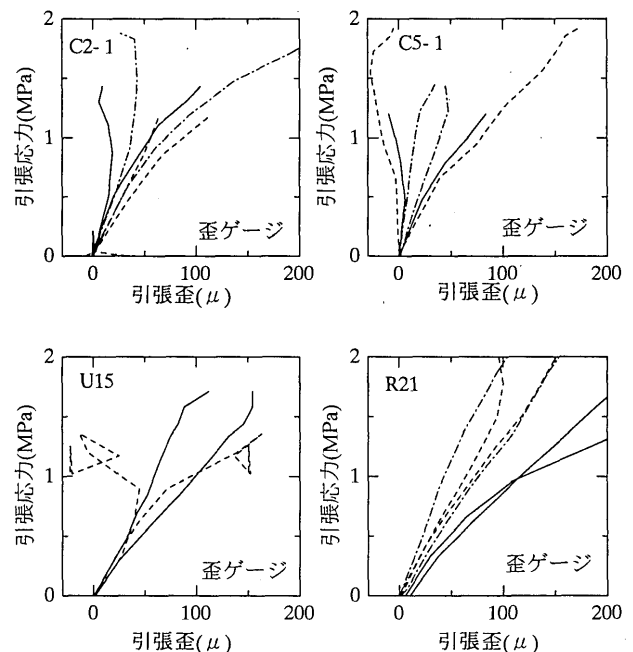


図4 引張応力-引張歪関係(Grip Test)

3.3.3 P-P Test、P-F Testによる応力-歪関係と初期ひび割れ強度

P-P TestおよびP-F TestによりR21試験体から得られた引張応力と歪の関係をそれぞれ図5、図6に示す。両図において、左図が歪ゲージにより得られた歪との、右図が変位計により得られた歪との関係を示しており、破線が表裏それぞれの歪を、実線がそれらの平均を表す。弾性範囲の挙動を左図のグラフから見ると、P-P Test、P-F Testでは、Grip Testと比較して、初期ひび割れ発生前まで表裏の歪の値に大きな違いが見られず、純引張に近い加力が行われていることが分かる。しかし、初期ひび割れ発生以後の挙動は、右図のグラフより、P-P Testにおいて、ひび割れ発生側とその反対側での剛性の違いから片側圧縮、片側引張といった2次曲げモーメントが発生する試験体が見られる。一方、P-F Testにおいては、初期ひび割れ発生後も純引張に近い状態で加力を行うことができています。

P-P TestおよびP-F Testによる初期ひび割れ強度の実験値の一覧とその比較値を表3に示す。ここで、初期ひび割れ強度の実験値は、応

力-歪関係上で明確な剛性の低下が表れた点の応力とし、この点は目視による初期ひび割れ発生点とほぼ対応していた。P-P Test による実験値が P-F Test による実験値を若干上回る傾向にあり、比較値の平均は 1.10 である。HPFRCC に限ると、比較値の範囲は 0.98~1.13 にある。

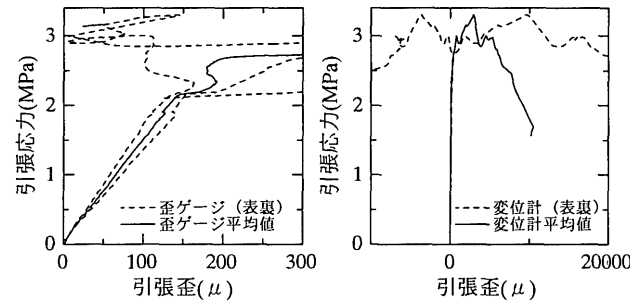


図5 P-P Test による応力-歪関係の例(R21-3)

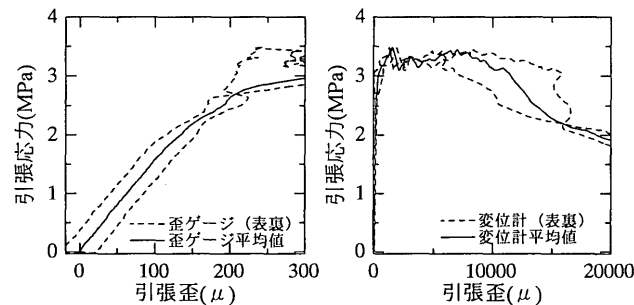


図6 P-F Test による応力-歪関係の例(R21-3)

表3 P-P Test と P-F Test による初期ひび割れ強度の比較

試験体	初期ひび割れ強度(MPa)		比較値 P-P/P-F
	P-P Test	P-F Test	
C2-2	2.09	2.04	1.02
C5-2	2.88	2.15	1.34
M5	4.25	4.34	0.98
R21-2	5.22	4.61	1.13
R21-3	3.04	2.70	1.13
R21-5	2.28	2.32	0.98

3.3.4 P-F Test による初期ひび割れ強度と解析値の比較

線形破壊力学に基づいた初期ひび割れ強度の予測式²⁾により得られた各試験体の解析値を表4に示す。解析方法の詳細については文献を参照されたい。表中には解析に用いた繊維およびモルタルの特性値、繊維-モルタル界面での影響因子をあわせて示した。

表4で示す初期ひび割れ強度の解析値と、P-F Test から得られた純引張試験結果との比較を表5に示す。PE15、R15 試験体については圧縮試験結果の弾性係数が極端に低く、過大な空気量の連行または繊維混入による欠陥の導入が予想され、それらの影響によりマトリクスの引張強度が大きく低下することが考えられる。このような状態と同等なマトリクス単体の実験データを得ることは難しく、解析ではマトリクスの引張強度を高く評価したため、解析値が実験値に比べ大きいものと考えられる。また、繊維の分散状態の影響はひび割れ強度予測モデルには反映されておらず、解析では個々の繊維が独立して良好な分散状態にあることを仮定しているため、実際の架橋性能および初期ひび割れ強度を過大に評価していると考えられる。R21 試験体では、P-F Test による初期ひび割れ強度の実験値と解析値はおおむね良好に

対応している。

表4 解析に用いた入力値の一覧と初期ひび割れ強度解析値

範疇	要因	PE15	R15 ⁷⁾	R21 ⁷⁾
繊維	繊維長 L_f (mm)	15	12	12
	繊維径 d_f (mm)	0.0120	0.0400	0.0400
	弾性係数 E_f (GPa)	75.0	40.0	40.0
	見かけの繊維強度 ^{*1} σ_{fc}^* (MPa)	2790 ⁸⁾	1009	1009
	繊維体積混入率 V_f (%)	1.5	1.5	1.9 ^{*3}
モルタル	弾性係数 E_m (GPa)	8.7	13.7	13.7
	破壊靱性 K_m (MPa・m ^{0.5})	0.23 ²⁾	0.23	0.23
	引張強度 σ_{mu} (MPa)	1.13	1.13	1.13
繊維- モルタル 界面	摩擦付着強度 τ_i (MPa)	0.66 ²⁾	2.03	2.03
	化学付着強度 τ_s (MPa)	-	21.7	21.7
	スナビング係数 ^{*2} f	0.5 ²⁾	0.5	0.5
	繊維強度低減係数 f	0.195 ⁹⁾	0.39	0.39
初期ひび割れ強度 解析値 (MPa)		3.33	2.78	3.30

*1: ひび割れ面に対する繊維の配向による繊維強度の低下を考慮した値⁹⁾

*2: ひび割れ面に対する繊維配向による付着強度の増加具合を表す値⁹⁾

*3: 練上がり時の空気量実測値で補正した値

表5 P-F Test による実験値と解析値との比較

試験体	PE15	R15	R21
実験値 (MPa)	2.45	1.61	3.03*
解析値 (MPa)	3.33	2.78	3.30
実験値/解析値	0.74	0.58	0.92

*: R21-3、4、5の平均値

以上の検討より、P-P Test と P-F Test により得られた初期ひび割れ強度には 10% 程度の差があるものの、HPFRCC の引張特性として初期ひび割れ点とともに今後終局点の評価も行うことを考慮すると、P-F Test による純引張試験が基準データとして適当であると考えられる。本報では、次章の実験方法により得られる特性値の基準値として、P-F Test により得られた実験値を用いる。

4. 割裂試験による初期ひび割れ強度評価法

純引張試験により得られる初期ひび割れ強度を簡易な試験法により算出するために、 $\phi 100 \times 200$ mm シリンダーを用いた割裂試験を行い、純引張試験結果との比較から妥当性を検討する。

4.1 試験体および実験の概要

試験体は HPFRCC を 5 種類 (R21-3、R21-4、R21-5、PE15、R15) とコンクリート (C2-2、C5-2) およびモルタル (M5) である。各試験体 3 体ずつ (R21-4 は 4 体、R21-5 は 5 体、R15 は 2 体) の加力を行った。試験体形状は $\phi 100 \times 200$ mm シリンダーである。

計測項目は、コンクリート、モルタル試験体では 2MN 機械式万能

試験機での荷重値、HPFRCC 試験体では荷重値と試験体側面中央部表裏 2 つの π 型変位計 (精度 1/1000mm、検長 80mm) による割裂面ひび割れ幅 (図 7) である。変位計は、シリンダーの打設面を研磨処理した後、瞬間接着剤により変位計取付けゴマを貼付し、試験体側面表裏 2 ヶ所に設置した。

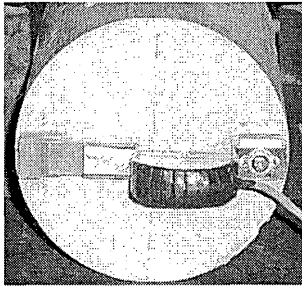


図 7 割裂試験における変位計設置状況

4.2 実験結果

本試験法によって得られた割裂引張応力-ひび割れ幅関係の例を図 8 に示す。HPFRCC の割裂試験では、コンクリートなどの試験と異なり初期ひび割れ発生後も荷重が増加し、最終的には加力面の変形が大きくなり、応力状態が徐々に引張場から圧縮場に移行する。しかし、図 8 から分かるように、初期に比べ勾配を低下させ、ひび割れ幅が進展する点が存在する。これらを定量的に評価することにより、割裂試験結果から HPFRCC の初期ひび割れ強度を評価する。

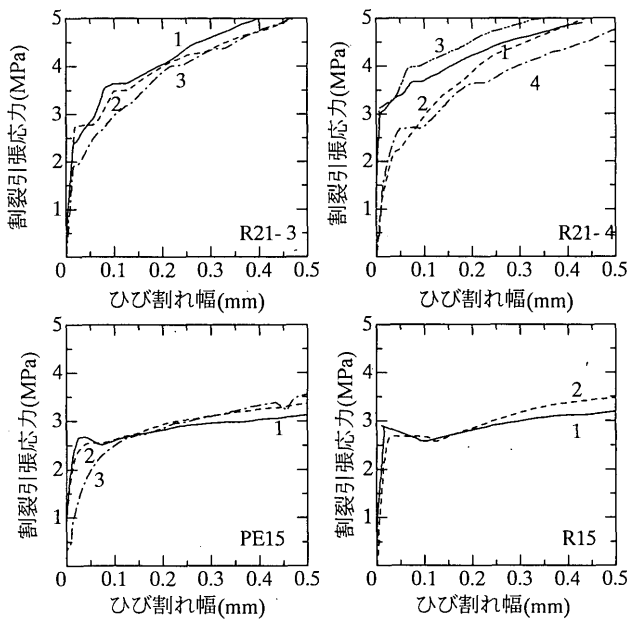


図 8 割裂引張応力-ひび割れ幅関係

4.3 評価法の提案および検討

割裂引張応力-ひび割れ幅関係における勾配の変化を定量的に評価するために、図 9 に示すように、載荷開始点と i ステップの時の測定点を結んだ傾きを K_{cr} とし、測定点 i ステップと $i+1$ ステップの点を結んだ傾きを ΔK_{cr} とする。なお載荷のごく初期段階においては、荷重進展に比べ変位の進展が緩慢であり、 π 型変位計により測定できる最

小桁数において変位が減少するデータが含まれ、 ΔK_{cr} が負の値を取ることがある。そのため、測定誤差を考慮できるように実験データを事前に処理する必要がある。

本報では、割裂引張応力-ひび割れ幅関係から初期ひび割れ点決定するにあたり、 $\Delta K_{cr}/K_{cr}$ の値に着目する。これは、図 8 に示すように、割裂引張応力-ひび割れ幅関係の勾配が徐々に減少していく HPFRCC では、割裂試験において純引張応力が作用する状態は初期ひび割れが発生するまでの弾性範囲で、その後の性状における力学的意味合いが不明瞭であること、割裂引張応力-ひび割れ幅関係において応力を増大させつつも勾配の低下点が複数回発生する (複数ひび割れの発生と対応していると思われる) こと、の理由による。また、 $\Delta K_{cr}/K_{cr}$ の値に着目することによって、初期ひび割れ以降さまざまな性状を示す HPFRCC においても対応することができる。しかし、本法では測定データ間の局所的な低下率を用いるため、データの測定間隔によって結果が影響を受けることが考えられる。

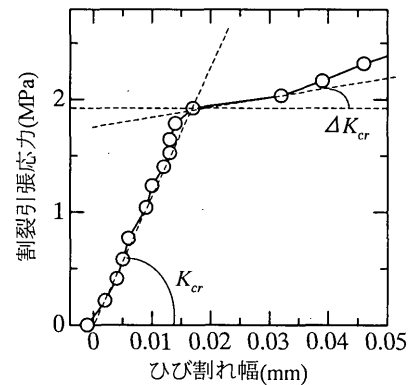


図 9 割裂試験における勾配の定義

R21-3 試験体から得られた割裂引張応力-ひび割れ幅関係、 $\Delta K_{cr}/K_{cr}$ -ひび割れ幅関係を図 10 に示す。初期ひび割れ強度を決定するために満足する条件として、 $\Delta K_{cr}/K_{cr} \leq 0.1, 0.2$ および 0.3 となる点について、すなわち割裂試験における個々の測定データ間の勾配が初期勾配の $0.1, 0.2, 0.3$ 倍を始めて下回る点の割裂引張応力を割裂試験による初期ひび割れ強度とし、純引張試験 (P-F Test) 結果と比較、検討した。さらに、実験データの測定間隔のばらつきによる影響を検討するため、計測点を本実験により得られたデータから 1 ステップ、2 ステップ、および 3 ステップ間隔とした実験データを作成して算出した $\Delta K_{cr}/K_{cr}$ についても検討を行った。上記により算出した割裂試験に

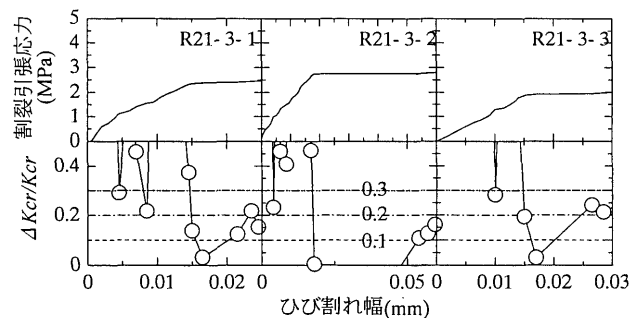


図 10 $\Delta K_{cr}/K_{cr}$ -ひび割れ幅関係

表6 割裂試験とP-F Testによる初期ひび割れ強度の比較

試験体	P-F Test 結果 (MPa)	元データ			1 ステップ間隔データ			2 ステップ間隔データ			3 ステップ間隔データ		
		$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.1 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.2 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.3 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.1 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.2 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.3 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.1 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.2 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.3 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.1 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.2 (MPa)	$\Delta K_{cr}/K_{cr}$ ≤0.3 (MPa)
PE15-1	6 体平均	2.64	2.08	1.24	2.67	2.55	1.01	2.67	2.58	1.63	2.67	2.55	2.36
PE15-2		2.44	2.28	1.12	2.49	2.24	1.24	2.49	2.24	1.49	2.52	2.32	1.64
PE15-3		2.72	2.61	2.29	2.71	2.61	2.23	2.71	2.64	2.18	2.36	2.55	2.23
平均	2.45 (0.46)	2.60 (0.14)	2.32 (0.27)	1.55 (0.64)	2.62 (0.12)	2.47 (0.20)	1.49 (0.65)	2.62 (0.12)	2.56 (0.17)	1.77 (0.37)	2.85 (0.45)	2.47 (0.13)	2.08 (0.38)
R15-2	6 体平均	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.65	2.65	2.65	2.88	2.88	2.88
R15-3		2.64	2.64	2.49	2.64	2.64	2.49	2.59	2.59	2.49	2.55	2.55	2.55
平均	1.61 (0.32)	2.76 (0.17)	2.76 (0.17)	2.69 (0.28)	2.76 (0.17)	2.76 (0.17)	2.69 (0.28)	2.62 (0.04)	2.62 (0.04)	2.57 (0.11)	2.72 (0.23)	2.72 (0.23)	2.72 (0.23)
R21-3-1	3 体平均	2.40	2.36	1.11	2.36	2.36	2.36	2.40	2.40	2.40	3.63	2.21	2.21
R21-3-2		2.75	2.75	0.99	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.57	2.57	2.57
R21-3-3		1.92	1.87	1.30	1.92	1.92	1.92	4.35	1.79	1.79	-	1.79	1.79
平均	2.70 (0.39)	2.36 (0.42)	2.33 (0.44)	1.13 (0.16)	2.34 (0.42)	2.34 (0.42)	2.34 (0.42)	3.17 (1.04)	2.31 (0.49)	2.31 (0.49)	3.10 (0.75)	2.19 (0.39)	2.19 (0.39)
R21-4-1	4 体平均	2.32	2.09	2.09	3.02	3.02	3.02	2.99	2.99	2.65	2.90	2.90	2.90
R21-4-2		2.23	2.20	1.31	2.20	2.20	1.31	-	2.17	2.17	-	2.14	2.14
R21-4-3		2.69	2.69	0.48	2.69	2.69	2.62	2.62	2.62	2.62	2.69	2.69	2.57
R21-4-4		3.09	2.07	2.07	3.09	3.09	2.40	3.13	3.13	2.72	3.09	3.09	3.09
平均	4.07 (0.35)	2.58 (0.39)	2.26 (0.29)	1.49 (0.76)	2.75 (0.41)	2.75 (0.41)	2.34 (0.73)	2.91 (0.26)	2.73 (0.43)	2.54 (0.25)	2.89 (0.20)	2.71 (0.41)	2.68 (0.42)
R21-5-1	3 体平均	3.50	2.95	1.88	-	3.50	2.67	-	4.06	2.95	-	3.50	2.88
R21-5-3		3.54	3.54	3.49	-	3.49	3.49	-	3.45	3.45	-	4.11	3.68
R21-5-4		1.16	1.16	1.16	-	1.50	1.20	-	3.36	1.34	-	1.50	1.50
R21-5-5		1.19	1.19	0.84	-	1.19	1.19	-	3.06	1.50	-	3.12	2.53
R21-5-6		-	-	1.87	-	-	3.12	-	-	3.08	-	-	3.53
平均	2.32 (0.60)	2.35 (1.35)	2.21 (1.22)	1.85 (1.02)	-	2.42 (1.25)	2.14 (1.14)	-	3.48 (0.42)	2.46 (0.97)	-	3.06 (1.12)	2.82 (0.88)

注：平均値の下（ ）内の数字は標準偏差を示す。「-」は該当データなし。

よる初期ひび割れ強度（平均値、標準偏差）を、P-F Testによる結果とともに試験体ごとにそれぞれ表6に示す。表中「-」は、データ内に $\Delta K_{cr}/K_{cr}$ の値が条件を満たす点が存在せず、初期ひび割れ強度点を算出できないことを示す。

$\Delta K_{cr}/K_{cr} \leq 0.3$ とした場合は $\Delta K_{cr}/K_{cr} \leq 0.1, 0.2$ に比べ初期ひび割れ強度をP-F Testの結果よりかなり小さく評価する場合がある。 $\Delta K_{cr}/K_{cr} \leq 0.1$ の場合には計測間隔が大きくなると初期ひび割れ強度点を算出できなくなるケースが多くなる。 $\Delta K_{cr}/K_{cr} \leq 0.2$ とした場合には、P-F Testの結果との対応も良く、さらに計測空き間隔による影響も少ない。また、0.1、0.3とした場合よりも総じてばらつきが小さい。これらの比較を図11に示す。左図は計測空き間隔のない場合の異なる $\Delta K_{cr}/K_{cr}$ から決定した初期ひび割れ強度と純引張試験との対応を、右図は $\Delta K_{cr}/K_{cr} \leq 0.2$ とした時の異なる計測間隔から決定した初期ひび割れ強度と純引張試験との対応を示す。

以上より、HPFRCCの初期ひび割れ強度は、 $\Delta K_{cr}/K_{cr} \leq 0.2$ の条件

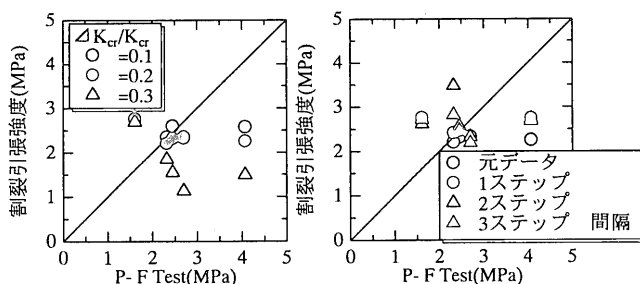


図11 割裂試験と純引張試験結果との比較

を最初に満たす点での割裂引張応力とするのが妥当であると考えられる。この時の割裂引張強度算出値の純引張試験結果との比較値の平均値は、全試験体で1.01である。なお、 $\Delta K_{cr}/K_{cr} \leq 0.2$ とした場合でも、R21-5-6試験体のように該当点が現れない場合があるので、例えば3体分のデータが必要な場合には試験体を多めに用意しておく必要がある。

5. 圧縮試験による弾性係数評価法

HPFRCCの初期ひび割れ点を決定するためには、初期ひび割れ強度とともに引張側弾性係数が必要となる。ここでは、 $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ シリンダーを用いた圧縮試験から得られた割線弾性係数と純引張試験より得られた弾性係数を比較、検討する。

純引張試験（P-F Test）により得られた引張側弾性係数（引張応力-歪関係における初期ひび割れ点までの近似直線の勾配）と圧縮試験より得られた圧縮側弾性係数（1/3割線弾性係数）の比較を、表7および図12に示す。P-F Testに用いた試験体は、C5-2試験体で2体、R21-3、R21-5試験体で各3体、C2-2、M5、R21-4試験体で各4体、PE15、R15試験体で各6体である。圧縮側割線弾性係数は試験体3体の平均である。コンクリート、モルタル、およびHPFRCCの間にほとんど差異は認められず、P-F Testにより得られた弾性係数は圧縮試験により得られた値とよい相関が見られる。圧縮試験により得られた弾性係数の純引張試験に対する比の平均は0.88である。圧縮時弾性係数は1/3割線係数であり、一方、引張時は弾性係数算出点の応力レベルが低いことから初期弾性係数になっており、圧縮試験により得られる弾性係数が純引張試験結果より若干小さいと考えられる。

表 7 圧縮試験と P-F Test による弾性係数の比較

試験体	試験方法		比較値
	P-F Test (GPa)	圧縮試験 (GPa)	
C2-2	32.0	29.6	0.93
C5-2	34.8	34.3	0.99
M5	18.4	17.8	0.97
R15	10.9	8.65	0.79
PE15	11.4	9.72	0.85
R21-3	16.2	11.0	0.68
R21-4	16.5	14.7	0.89
R21-5	15.3	14.3	0.93

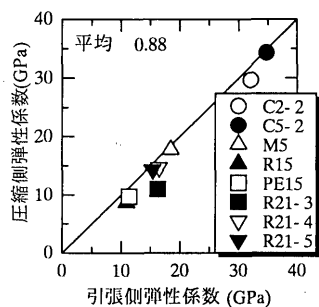


図 12 弾性係数の比較

以上の検討により、HPFRCC の引張挙動を簡便に表現する構成則となり得る完全弾塑性モデル構築のために必要な、初期ひび割れ強度、弾性係数および終局点のうち、初期ひび割れ強度および弾性係数は、通常のコンクリートに対して行われている円柱テストピースによる割裂試験および圧縮試験で評価が可能であると考えられる。

6. まとめ

くびれ型試験体による、端部拘束条件をピン固定とした純引張試験で得られた初期ひび割れ強度および弾性係数を基準として、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ シリンダーによる割裂試験および圧縮試験による HPFRCC の初期ひび割れ点の実験的評価法を提案した。

HPFRCC の割裂試験では、試験体に変位計を設置しひび割れ幅を計測することによって、割裂引張応力-ひび割れ幅関係における勾配の変化によって初期ひび割れ強度を評価できる。また、圧縮試験により

得られる割線弾性係数は純引張試験で得られる弾性係数とよい対応を見た。両者を用いることによって、HPFRCC の初期ひび割れ点を決定することができる。

なお、本報で提案した初期ひび割れ点の評価法は、HPFRCC の作製時や供用時において引張側力学特性点を随時簡易に確認するための方法であり、使用材料の選定や調合設計においては文献 2) に示されるような方法で行われる。

謝辞：本研究の実験実施に当っては、建築研究所福山洋氏、国土技術政策総合研究所諏訪田晴彦氏、東急建設磯雅人氏にご協力いただきました。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高弾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，pp.1-2，2002.1
- 2) 関田徹志，Li, V.C.：疑似ひずみ硬化性引張挙動を有する短繊維補強セメント複合材料の設計ガイドラインその 1 マイクロメカニクス理論に基づく初期ひび割れ強度の推定法，日本建築学会構造系論文集，No.539，pp.13-21，2001.1
- 3) 佐藤幸博，福山 洋，諏訪田晴彦：高弾性セメント複合材料の一軸引張-圧縮繰返し試験法の提案，日本建築学会構造系論文集，No.539，pp.7-12，2001.1
- 4) 古田昌弘，金久保利之：セメント系材料の材料試験に用いるくびれ型試験体の提案，日本建築学会大会学術梗概集，A 材料施工，pp.101-102，2001.9
- 5) 日本コンクリート工学協会：高弾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，pp.50-52，2002.1
- 6) 松尾庄二，関田徹志，福山 洋，六郷恵哲：高弾性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会の活動と性能比較試験結果，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.43-50，2002.6
- 7) 関田徹志，小川敦久，浜田敏裕：PVA 繊維を用いたひずみ硬化性高弾性セメント複合材料の耐久性に関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.219-224，2002.6
- 8) 清田雅量，川又 篤，三橋博三，関田徹志：配向角が埋め込み繊維のひび割れ架橋性能に与える影響に関する研究，第 56 回セメント技術大会講演要旨，pp.274-275，2002.5
- 9) 清田雅量，三橋博三，関田徹志，川又 篤：セメント系複合材料における繊維の付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.187-192，2001.7
- 10) 日本コンクリート工学協会：高弾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，pp.22-27，2002.1

(2002 年 5 月 9 日原稿受理，2003 年 3 月 20 日採用決定)