# 論文 HPFRCC の一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響

清水 克将\*1・金久保 利之\*2・閑田 徹志\*3・永井 覚\*4

要旨:HPFRCCの打設方向が一軸引張性状及び曲げ性状に与える影響を調べるため,引張試 験は横打ち供試体に新たに提案した筑波大・鹿島式供試体,縦打ち供試体にシリンダー状く びれ型供試体を用い,曲げ試験は横打ちと縦打ちの角柱供試体を用いて比較検討を行なった。 その結果,両性状において横打ち供試体は縦打ち供試体に比べ変形能が優れていることがわ かった。また,一軸引張性状における終局歪を用いて断面曲げ解析を行なった結果、曲げ試 験結果における最大曲げモーメント時の曲率とよい対応を示した。

キーワード: HPFRCC, 一軸引張, 曲げ, 打設方向

#### 1. はじめに

近年国内外の機関で関心を集めている新材料 として, 高い引張靭性を有する高靭性セメント 系複合材料(以下, HPFRCC)がある。HPFRCC とは, モルタルの練混ぜ最中に高性能短繊維を 混入させ,繊維とマトリクスとの付着力により 初期ひび割れ発生後も繊維が架橋することで 次々に多数の微細なひび割れ(マルチプルクラ ック)を発生させ、数%の歪に達するまでひび 割れ発生以後の応力を維持し、さらに上昇をも 期待できる材料である。この材料を構造部材に 利用するためには、同材料の特長である引張性 能を適切に評価し、構造設計に反映させること が重要である。これまでに一軸引張性能を評価 するための試験方法が種々検討されており、薄 板状のダンベル型供試体<sup>1)</sup>やシリンダー形状の くびれ型供試体<sup>2)</sup>等が提案されている。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った り、後者ではシリンダー形状のため打設方向が 縦方向に限定され、部材中での挙動と異なる性 状を示すことが懸念される。また、HPFRCC の材料試験として角柱供試体の曲げ試験がよく

行われるが、角柱供試体の打設方向は通常横方 向であり、打設方向による影響を見た研究、報 告はされていない。打設方向による HPFRCC の 性状の差異を把握することは、実際の適用にあ たって解決すべき問題の一つであろう。

本研究では、新たに一軸引張試験用供試体と して 100×100×400mm の角柱供試体の中央部 を 60×100mm とした筑波大・鹿島式供試体を提 案する。この供試体は測定断面積が大きいため 繊維を三次元配向させることが可能となり、 HPFRCC の真の一軸引張性能評価の一助になる ものと考えられる。本報ではこの供試体を横打 ち方向打設で作製し、また、先のシリンダー状 くびれ型供試体を併用して、HPFRCC の一軸引 張性能の打設方向による影響について検討を行 なう。さらに、100×100×400mm の角柱供試体 により打設方向が HPFRCC の曲げ性状に与え る影響についても検討を行い、一軸引張試験結 果と曲げ試験結果の対応を、主として断面曲げ 解析により考察する。

#### 2. 供試体及び使用材料

供試体は,一軸引張試験用の横打ち供試体(筑

\*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 鹿島建設(株)技術研究所 建築生産グループ上席研究員 Ph.D. (正会員)
\*4 鹿島建設(株)技術研究所 建築構造グループ主任研究員 工修 (正会員)

波大・鹿島式)を3体,縦打ち供試体(くびれ 型)を5体、曲げ試験用の縦打ち及び横打ち供 縮試験用供試体を3体,合計17体を2バッチ, 全34体を作製し、20℃封緘養生を1週間行なっ た後、現場封緘養生させた。使用材料の調合計 画,使用繊維の材料特性及び供試体名称をそれ ぞれ表-1,表-2及び図-1に示す。横打ち の筑波大・鹿島式供試体は、図-2に示すよう に, JIS A 1106 に規定されている 100×100× 400mm の角柱供試体作製用鋼製型枠の内側に アルミ製の型枠を固定し、その中に HPFRCC を 打設して作製した。縦打ちのくびれ型供試体の 作製方法は文献 2)と同様であり、形状は 0100 ×200mm シリンダーの中央部を Ø70 とした区 間を軸方向に 70mm 確保したものである。また, 縦打ちの曲げ試験用供試体の型枠は合板により 作製した。

表一1 調合計画

W/C (%)	S/B	W (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{S}{(\text{kg/m}^3)}$	空気量 (%)	$V_f$ (%)
46.0	0.80	364	636	10	1.9

使用繊維	$L_f$ (mm)	D <sub>f</sub> (μm)	<i>о<sub>fu</sub></i> (MPa)	E <sub>f</sub> (GPa)
ビニロン (PVA-R)	12.0	40.0	1600	40.0

表-2 使用繊維

 $L_f$ ; 繊維長,  $D_f$ ; 繊維径,  $\sigma_{fu}$ ; 破断強度,  $E_f$ ; ヤング係数



R: PVA-R繊維混入(数字は繊維体積混入率1.9%)





図-2 筑波大·鹿島式供試体用型枠

3. 一軸引張試験

## 3.1 試験方法

一軸引張試験の加力方法はくびれ型供試体の 加力方法<sup>3)</sup>と同様に,端部固定条件を曲げモー メントの影響や初期ひび割れ発生後の二次曲げ モーメントの影響等を考慮したピンー固定とし た。筑波大・鹿島式供試体の試験方法を図-3 に示す。M24 ナットを固定した鋼板をエポキシ 樹脂系接着剤で供試体上下面に接着させ、ロッ ドエンド及び M24 ボルトを試験機のヘッドチ ャックにて固定した。試験機のヘッド間速度は 0.5mm/min に設定した。計測方法はくびれ型供 試体は,荷重,供試体中央部表裏に貼り付けた 歪ゲージ(検長 30mm), くびれ直線部分(検長 70mm)及びくびれ終了部分(いずれも表裏) に取り付けた変位計(検長140mm)により引張 軸方向歪を計測した。筑波大・鹿島式供試体は 荷重及び供試体中央部表裏に取り付けた変位計 (検長160mm)により軸方向歪を計測した。



図-3 筑波大·鹿島式引張試験方法

## 3.2 試験結果

変位計により得られた引張応力-盃関係の例 を図-4及び図-5に示す。なお、くびれ型供 試体の歪は検長 140mm の変位計より得られた 変形を用い、図中破線は表裏それぞれの変位計 による歪を、実線はそれらの平均を示す。縦打 ちのくびれ型供試体は初期ひび割れ発生後耐力 低下が見られるが,その後ひび割れを分散させ て耐力を維持しながら引張歪 0.5~1%程度まで 変形し破壊に至った。一方,横打ちの筑波大・ 鹿島式供試体では明確な歪硬化が認められ,引 張歪 1~2%程度まで引張応力を上昇させ破壊に 至った。試験結果の一覧を表-3に示す。なお, 終局歪は最大荷重の 1/2 まで低下したときの歪



供試体	割線剛性 <sup>*1</sup> <i>E</i> (GPa)	初期ひび割れ強度 <sup>*2</sup> <i>o<sub>cr</sub> (MPa)</i>	終局歪 <sup>*3</sup> <i>E</i> u (%)
縦打ち	16.7	3.83	0.57
横打ち	16.4	2.17	1.52
縦/横	1.02	1.76	0.38
41 - <del>5</del> 17 - <del>1</del> 17 - 71 - 71			トキチバナバ

\*1:初期ひび割れ 1/3 割線剛性 \*2:初めて明確な荷重低下が 見られたときの応力 \*3:最大強度の 1/2 まで低下した時の歪 とした。横打ち供試体の終局歪は縦打ち供試体の2.7倍程度であった。

## 4. 曲げ試験

## 4.1 試験方法

曲げ試験方法を図-6に示す。載荷方法は三 等分載荷を行い,載荷速度は0.5mm/minとした。 供試体表側には曲率計測用として純曲げ区間の 上下2点の伸縮を変位計により計測し,供試体 裏側では純曲げ区間3点のたわみを変位計によ り計測した。



## 4.2 試験結果

縦打ち供試体,横打ち供試体の破壊状況の例 を図-7に,曲げモーメントー曲率関係と曲げ モーメントーたわみ関係の例を図-8に示す。 縦打ちの供試体は純曲げスパン外で破壊するも のが2体あり,目視上,少数のひび割れで最終 破壊に至っている。一方,横打ちの供試体は5 体が純曲げスパン内で最終破壊した。また,縦 打ち供試体ではひび割れ位置が表裏で異なるも のが多かった。曲げ試験結果の一覧を表-4に 示す。これらの値は縦打ち及び横打ち供試体そ れぞれ6体の平均値である。横打ち供試体の最 大曲げモーメントは縦打ち供試体の2倍程度, 最大曲率も2.5倍であった。これは,縦打ちは 横打ちに比べて,気泡の残留し易すさや繊維の 配向性等の影響によるものと思われる。



図-7 破壊状況



供試体	割線剛性 <sup>*1</sup> EI (kNm <sup>2</sup> )	最大曲げモーメント <i>M<sub>u</sub></i> (kNm)	最大曲率 <sup>*2</sup> φ <sub>u</sub> (μ/mm)
縦打ち	155	1.06	73.0
横打ち	154	2.05	179
縦/横	1.01	0.52	0.41
k1 . 大口廿日イ\、			2

表-4 曲げ試験結果一覧

\*1:初期ひび割れ時の割線剛性 \*2:M<sub>u</sub>時の曲<sup>室</sup>

## 5. 断面曲げ解析

ー軸引張試験,曲げ試験ともに打設方向によ り性状が異なることが確認された。特に縦打ち 供試体の変形性能(終局歪,最大曲率)が横打 ち供試体より劣っている。本章では両試験の関 連を検討することを目的とし,モデル化にあた っては一軸引張試験より得られた引張応力-歪 関係を簡易な完全弾塑性モデルで表現して断面 曲げ解析を行った。

引張応力-歪関係を完全弾塑性モデルに置換

するにあたり、一軸引張での破壊エネルギーお よび終局歪に着目した。破壊エネルギーの定義 と完全弾塑性モデルを図-9に示す。破壊エネ ルギーG<sub>f</sub>は、一軸引張試験の応力-変位関係よ り、初期ひび割れ点から終局点(最大引張応力  $\sigma_{max}$ の 1/2 まで応力を低下させた点)までを囲 む面積として定義した。ここで、変位計の検長 をL、終局点の歪を終局歪 $\varepsilon_u$ とした。また、完 全弾塑性モデルは、応力喪失点の歪を終局歪*ε*。 と同一とし,降伏以降のエネルギーが破壊エネ ルギーと等価になるように降伏点 $\sigma_{cr}$ を定めた。 弾性係数は、引張試験結果の値をそのまま用い **0**)を参考にして、最大圧縮応力 $\sigma_B$ とそのとき の歪 EBから定まる放物線モデルとした。解析モ デルのパラメータを表-5に示す。







図-10 圧縮試験結果と放物線モデル

	圧縮側 故物線モデル		引張側		
	<b>瓜初称</b>	$\Gamma / P$	元王理型性モナル		
供試体	圧縮強度	圧縮強	弹性係数	降伏点	終局歪
	$\sigma_{\!\scriptscriptstyle B}$	度時歪	E	$\sigma_{cr}$	$\mathcal{E}_{u}$
	(MPa)	$\mathcal{E}_B$ (%)	(GPa)	(MPa)	(%)
縦打ち	37.8	0.41	16.7	2.97	0.57
横打ち	57.0	0.41	16.4	3.37	1.52

表-5 解析モデルのパラメータ

注:縦打ち,横打ち各供試体における平均値

## 5.2 解析結果

前節のモデルを用いて断面曲げ解析を行なっ た。曲げモーメントー曲率関係の解析結果の例 と断面応力分布の推移を図-11に示す。ここ で図中のAは初期ひび割れ発生時,Bは初期ひ び割れ発生後,Cは最大曲げモーメント時,D は最大曲げモーメント後を示している。引張側 が完全弾塑性モデルの場合,最大曲げモーメン ト時に断面の引張縁において終局歪を迎えてい ることがわかる。また,最大曲げモーメント時 においても圧縮側は最大応力まで達しておらず, 応力の分布は直線分布に近い。

曲げモーメントー曲率関係の解析結果と実験

結果の比較を図-12に示す。図中の○及び■ は、それぞれ実験結果及び解析結果の最大曲げ モーメント点を示す。なお、純曲げスパン外の ひび割れの局所化により最終破壊に至った供試 体の実験結果は省いてある。解析結果は実験結 果の傾向をおおむね捉えているが、最大曲げモ ーメントは解析結果が実験結果より、縦打ち供 試体では大きめに、横打ち供試体では小さめに 評価している。この一因として、引張側モデル として終局歪以降応力が0となる完全弾塑性モ デルを適用したため、引張試験における最大応 力以降の歪軟化域を適正に表現できていないこ とが考えられる。

初期剛性,最大モーメントおよびその時の曲 率(最大曲率)の解析結果と実験結果の比較を 表-6に示す。初期剛性は解析結果と実験結果 の適合性がよい。最大モーメントに関しては先 に述べたとおりである。最大曲率に関しては解 析結果が実験結果をよく表しており,実験値の 解析値に対する比較値は,縦打ち供試体で1.03,



横打ち供試体で1.00である。本解析に使用した 引張側モデルでは一軸引張試験における終局歪 の実験値をそのまま用いており,曲げ試験によ る供試体の変形能力から引張試験における変形 能力を推定できる可能性がある。

供試体		初期剛性 EI (kNm <sup>2</sup> )	最大モーメ ント <i>M<sub>u</sub></i> (kNm)	最大曲率 <i>φ<sub>u</sub></i> (μ /mm)
24	実験値	155	1.06	73.0
縱打、	解析值	144	1.26	71.0
	実/解	1.08	0.84	1.03
40	実験値	144	2.05	179
横打	解析值	145	1.47	179
	実/解	0.99	1.39	1.00

表-6 実験値と解析値の比較

## 6. 曲げ試験結果を用いた引張特性評価

HPFRCC の実構造物への適用にあたっては, 引張側の性能が簡易な加力試験で随時確認,評 価できることが望ましい。一軸引張試験は試験 方法が特殊であることから,特殊な型枠や治具 を必要としない圧縮試験や曲げ試験がよいと思 われる。本章では,前章で解析結果と実験結果 によい対応が見られた最大曲率について,曲げ 試験結果から一軸引張試験結果の評価を行なう。

前章の断面曲げ解析から,最大曲げモーメン ト時には引張縁でちょうど終局歪に達し,また 圧縮側応力はほぼ直線分布であったことから, 圧縮側の応力分布を常に直線,最大曲げモーメ ント時の引張側モデルを完全剛塑性と仮定し

(図-13右図),以下の(1)式及び(2)式により 最大曲げモーメント時に対応する引張終局歪*ε*<sub>u</sub> を求めた。なお,完全剛塑性モデルの応力値は 曲げ試験におけるひび割れモーメントに対応す るものとした(図-13左図)。計算結果と引張 試験結果との対応を表-7に示す。実験値と計 算値はよく対応しており,曲げ試験における最 大モーメント点の曲率から,一軸引張性状にお ける終局歪が評価できる可能性が伺える。

$$\sigma_{cr} = 6M_{cr}/bD^2 \tag{1}$$

$$\varepsilon_u = \left( E \phi_u D + \sigma_{cr} - \sqrt{\sigma_{cr} \left( 2E \phi_u D + \sigma_{cr} \right)} \right) / E \qquad (2)$$

ここで、 $\sigma_{cr}$ : ひび割れ応力(降伏点)、 $M_{cr}$ : ひび割れモーメント、b: 幅、D: せい、 $\varepsilon_{u}$ : 終 局歪、E: 弾性係数、 $\phi_{u}$ : 最大曲率



図-13 歪分布と応力分布

表-7 引張性能評価の比較

	供試体	終局歪 <i>E</i> <sub>u</sub> (%)
24	実験値	0.57
<u></u>	計算値	0.60
潊	実験値/計算値	0.95
24	実験値	1.52
横打	計算値	1.52
	実験値/計算値	1.00

- 7. まとめ
- 一軸引張性状,曲げ性状とも横打ち供試体 は縦打ち供試体に比べ変形能に優れていた。
- (2) 引張側に完全弾塑性モデルを用いた曲げ解 析により、打設方向にかかわらず一軸引張 性状における終局歪と曲げ性状における最 大モーメント時の曲率がよい対応を示した。
- (3) 曲げ試験結果を用いて一軸引張性状の終局 歪を算定する方法を示した。

## 参考文献

- JCI:高靭性セメント系複合材料の性能評価 と構造利用研究委員会報告書,2002.1
- 2) 古田昌弘,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講演梗概集,A材料 施工,pp.101~pp.102,2001.9
- 古田昌弘,金久保利之,松崎育弘,閑田徹志:HPFRCCの動的引張特性、コンクリート工学年次論文集,Vol.24,No.1,pp.225~230,2002.6