

論文 打込み方向及び水和熱が HPFRCC の力学特性に与える影響に関する基礎的研究

石川 直哉^{*1}・三橋 博三^{*2}・福山 洋^{*3}・菊田 貴恒^{*4}

要旨：一軸引張応力下において複数ひび割れ及びひずみ硬化特性を示す高性能繊維補強セメント系複合材料（High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites、以下 HPFRCC）に関する多くの研究が行われている。本論文では、HPFRCC で作製した、柱要素を模擬した 400mm×400mm×200mm の試験体からコア抜き及び切り出しを行って得られた力学試験用の試験体と、型枠を用いて作製した試験体の力学特性を比較し、打込み方向及び水和熱の力学特性に与える影響について検証した。また、複数の試験法で引張特性を評価し、得られる評価値の違いについて検証した。

キーワード：HPFRCC, 打込み方向, 水和熱, 収縮ひずみ, 試験法, 力学特性, ウォール効果

1. はじめに

今日、コンクリートは構造物の主要な材料となっている。しかし、引張力に弱いという欠点を有するため、これまでその補強方法について様々な研究がなされている。その成果物の一つである繊維補強セメント系複合材料（Fiber Reinforced Cementitious Composites、以下 FRCC）は、マトリクス中にポリエチレン繊維やビニロン繊維を混入させることによって、ひび割れが発生してもその部分を繊維が架橋するため荷重が伝達され、細かいひび割れが複数生じ高い靱性を示す新しい材料であり、構造物への適用を目指した研究も数多く行われている。FRCC の中でも、一軸引張応力下において複数ひび割れ及びひずみ硬化特性を示すものは、高性能繊維補強セメント系複合材料（High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites、以下 HPFRCC）と呼ばれ、特に、ミシガン大学の Victor C. Li によって開発された Engineering Cementitious Composites（以下、ECC）は、最大ひずみが 8%に達する非常に高靱性な材料であり、実用化に向けた実験が進められている^{例えば 1)}。また、本研究室で開発されたハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料（Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites、以下 HFRCC）は、ミクロレベルのひび割れを補強する短く細い合成繊維とメゾレベルのひび割れを補強する特殊加工された鋼繊維の 2 種類を用いることで、高い靱性を実現しており、現在実用化に向けた研究が進められている²⁾。

HFRCC はプレキャストへの適用を目的としており、部材製作に当たっては、基本的には横方向からの打込み（主筋方向に対して直角方向）に考えている。しかしながら、打込み方向が HFRCC の力学特性に及ぼす研究つ

いては、必ずしも十分にデータを収集・分析できてはいない。また、これまでは余り着目されていなかったが、基本的には富調合になる結果生ずる水和熱による強度の低下も懸念されている。さらに、HFRCC は施工性が悪いことが実用化への問題の一つであり、流動性及び施工性の改善に関する研究も行われている³⁾。そこで本研究では、流動性を改善した調合も含め、打込み方向が繊維配向を決める結果 HFRCC の力学特性に及ぼす影響及び水和熱による力学特性の低減に関する影響を実験により明らかにすることを目的とする。加えて、複数の試験法で材料評価を行い、得られる引張特性の相違点を明らかにすることを目的とする。また、同様の実験をポリエチレン（PE）繊維のみを用いた PE-ECC についても行い、HFRCC と比較することとする。

2. 実験方法

2.1 使用材料および使用繊維の特性

表-1 に使用した材料の特性について示す。セメントは早強ポルトランドセメント、フライアッシュはⅡ種を

表-1 使用材料の特性

材料名称	略号	密度
		g/cm ³
セメント	C	3.14
細骨材	S	2.61
シリカフューム	SF	2.20
フライアッシュ	FA	2.33
高性能減水剤	SP	1.05
AE剤	AE	1.04

*1 東北大学大学院 工学研究科都市建築学専攻 修士課程 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科都市建築学専攻 教授 (正会員)

*3 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ 上席研究員 (正会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科都市建築学専攻 博士課程 (正会員)

表-2 使用繊維の特性

繊維種類	略号	比重 g/cm ³	繊維長 mm	繊維径 μm	引張強度 MPa	弾性係数 GPa
スチールコード	SC	7.84	32	400	2850	—
ポリエチレン繊維	PE	0.97	6, 12	12	2580	73

表-3 調合

試験体名	W kg/m ³	SP kg/m ³	S kg/m ³	C kg/m ³	SF kg/m ³	FA kg/m ³	AE kg/m ³	SC kg/m ³	PE kg/m ³
HY-SF	451	10	461	871	153	0	0.0	59.8	7.3(6)
HY-FA	369	10	519	808	0	346	0.9		
PE-ECC	425	10	436	762	0	326	0.0	0.0	20(12)

使用した。また、表-2 に使用した繊維の特性を示す。PE 繊維は、HFRCC で 6mm、PE-ECC で 12mm のものを使用した。

2.2 調合

表-3 に調合を示す。本論文では、HFRCC の標準的な調合（以下、HY-SF）に加え、FA 及び AE 剤を用いて流動性を改善した調合（以下、HY-FA）及び PE 繊維のみを用いた PE-ECC の、計 3 調合を用意した。PE-ECC では、分離を抑えるために結合材（B）に対して 0.35wt.% の増粘剤を使用している。（）内の数字は、PE 繊維の繊維長を表す。

2.3 実験方法

(1) 練混ぜ方法及びフレッシュ性試験

練り混ぜには、オムニミキサー（容量 5ℓ）を使用した。練り混ぜ時間は、攪拌 1 分、水、減水剤および AE 剤投入後 5 分、PE を投入しながら 5 分、HY-SF 及び HY-FA の場合は、さらに SC を投入しながら 5 分である。

練り混ぜ終了後空気量測定およびテーブルフロー試験を行った。このとき、流動性はテーブルフロー試験の値で評価した。

(2) 打設及び養生方法

練り混ぜ終了後、専用の型枠を用いて各調合で圧縮及び引張試験用に φ100×200 の円柱試験体を 6 体、引張試験用に検長区間長さ 80mm、検長区間幅 30mm、厚さ 13mm のダンベル型試験体を 3 体、4 点曲げ試験用に 400mm×100mm×100mm の角柱

試験体を 3 体作製した。打込み後、ダンベル型試験体は 1 層、円柱試験体は 2 層ごとに打込み、繊維が沈み込まない程度に突き棒で突き、木槌を用いて振動を与え締め固めを行った。角柱試験体は 2 層に分けて打込み、振動台を用いて締め固めを行った。打設完了後、円柱試験体は打設面をビニール袋で封をし、さらにビニール袋で密封して養生室（気温 20℃、相対湿度 90%以上）にて試験日まで封かん養生を行った。ダンベル型試験体及び角柱試験体は、そのままビニール袋で封をし、同様に養生室にて一日間封かん養生を行い、その後打型を行い再びビニール袋で密封して、試験日まで養生を行った。

(3) 水和熱及び収縮測定用試験体

水和熱及び収縮ひずみの測定は 400 角の柱要素を模擬するために、寸法 400×400×h200mm 試験体の上下面に厚さ 150mm の断熱材（発砲スチロール）を施した簡易断熱試験体を制作して行った。試験体は、各調合に対して 2 体である。打設は、高さ 50mm ずつ 4 回に分けて行い、1 層ごとに突き棒及びバイブレータを用いて締め固めを行った。型枠は木製合板で作製し、上下面のみを断熱材で覆った。収縮ひずみは、型枠中央部に水糸で固定したひずみゲージを取り付けて測定する。同時に、型枠上面に設置した針金からつるした温度センサーを用いて

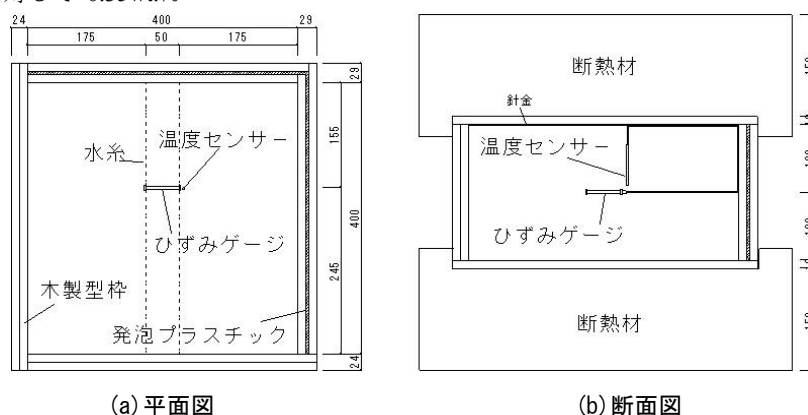


図-1 水和熱及び収縮測定方法

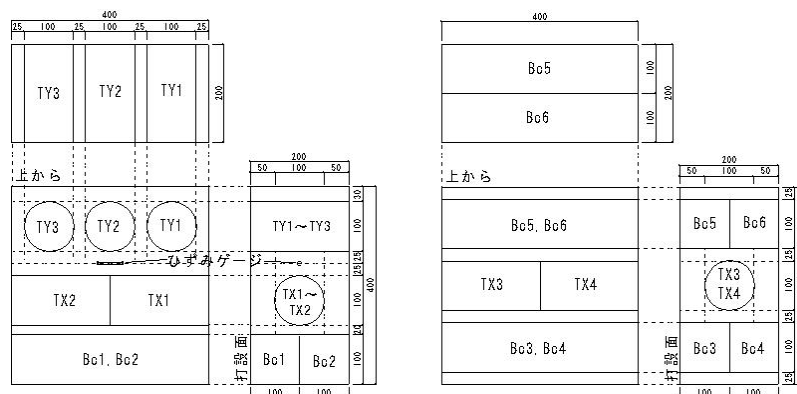
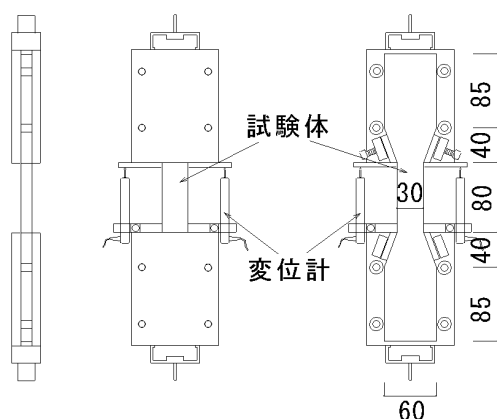
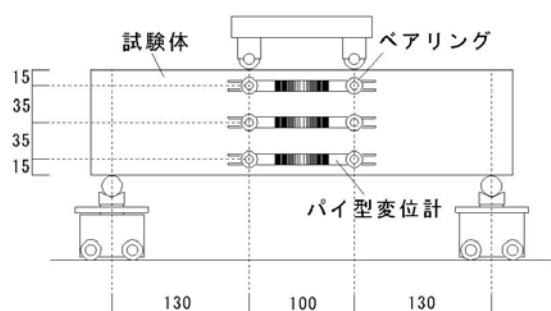


図-2 コア抜き及び切り出し図



(a) ダンベル型試験体の直接引張試験法



(b) 角柱の4点曲げ試験法

図-3 各試験法詳細図

表-4 引張特性を調べるための試験法と試験体作製法

試験法	試験体	略号
一軸引張試験	ダンベル型 専用型枠を用いて作製	D
	円柱型 モールドを用いて作製	Tm
	円柱型 400mm×400mm×200mmの試験体から、打設面に対して垂直にコア抜きして作製	TY
	円柱型 400mm×400mm×200mmの試験体から、打設面に対して水平にコア抜きして作製	TX
曲げ試験	専用型枠を用いて作製	Bf
	400mm×400mm×200mmの試験体から、切り出して作製	Bc

温度を測定した。

(3) 圧縮試験方法

圧縮試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って行った。材齢は28日である。

(4) 引張試験方法及び曲げ試験

引張特性を調べる試験として、ダンベル型試験体の直接引張試験、円柱試験体の直接引張試験及び角柱の4点曲げ試験を行った。角柱の4点曲げ試験では、得られたモーメント-曲率関係から、逆解析を用いて引張応力-ひずみ関係を求めた。円柱直接引張試験においては、モールドを用いて作製した試験体 (Tm) に加え、水和熱及

び収縮測定試験体から打設面に対して水平にコア抜きをした試験体 (TX) 及び垂直にコア抜きをした試験体 (TY) を用いて、引張性能に対する水和熱及び打設方向の影響について検討した。また、角柱の4点曲げ試験では、型枠を用いて作製した試験体 (Bf) に加え、水和熱及び収縮測定試験体から切り出した試験体 (Bc) を用いた。図-2にコア抜き及び切り出し図、図-3に各試験法、表-4に各試験法の詳細について示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状及び圧縮特性

表-5に、フレッシュ性状及び圧縮特性について示す。表-5から、HY-SFに比べてHY-FAの流動性が高くなり、流動性が向上していることがわかる。これは、FA及びAE剤を使用したことにより、ボールベアリング効果が得られたためであると考えられる。しかし、圧縮強度がHY-SFに比べて10MPa程度低くなっており、また、既往の研究³⁾から、過度な空気量の増加は、粘性を増大させ施工性を悪くすることから、流動性及び施工性の改善を目的とした空気量の増加には注意が必要である。PE-ECCでは、増粘剤を使用したためテーブルフロー値は低いものとなった。

3.2 水和熱測定結果

図-4に、打設完了後から10日後までの水和熱の測定結果を示す。それぞれの最高温度はHY-SFで111.6℃、HY-FAで106.8℃、PE-ECCで109.6℃であった。HY-SFよりもHY-FAのほうが4℃程度温度が低くなったが、大

表-5 フレッシュ性状及び圧縮特性

試験体名	テーブルフロー値 mm	空気量 %	施工性 -	圧縮強度 MPa	ヤング係数 N/mm ²
HY-SF	177.5	7.6	△	47.3	17200
HY-FA	191.0	11.2	○	35.6	19549
PE-ECC	145.7	8.5	×	38.2	14091

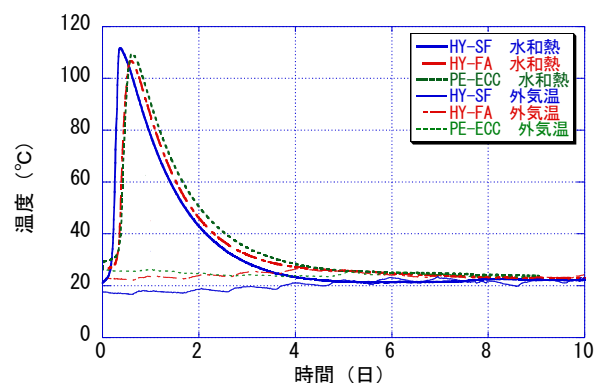


図-4 水和熱測定結果

幅な水和熱低減とはならなかった。単位セメント量を比較すると、HY-SF では 871kg/m^3 であるのに対し HY-FA では 808kg/m^3 である。HY-FA で使用した FA には水和発熱を低減する効果があり、本実験では HY-FA の水和熱の大幅な低減が期待されたが、HY-FA では FA の置換と同時に単位水量も減少しているため、単位セメント量が大きく変わらず、結果として水和発熱も変化のないものになったと考えられる。本実験では、セメント等の HPRCC の構成材料の単位量を固定することなく実験を行ったため、水和発熱の原因を明確に示すことができなかった。したがって、今後さらに検討する必要がある。

3.3 収縮測定結果

図-5 に、打設完了後から 10 日後までの収縮測定結果を示す。測定初期にひずみが引張側に出ているのは、温

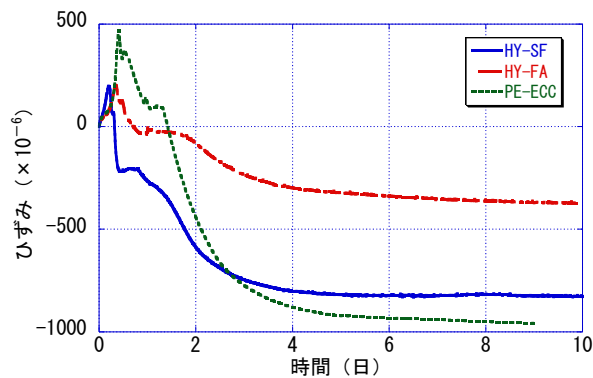


図-5 収縮特性

度による影響である。図-5 から、HY-FA は HY-SF に比べて収縮ひずみが大幅に小さくなっていると言える。一般に、水セメント比が低いと自己収縮は小さくなる傾向にあるが、HY-SF では自己収縮が大きくなる原因となる SF が使われていること、逆に HY-FA では自己収縮低減作用のある FA が使用されていることから、HY-FA の収縮ひずみが HY-SF に比べて小さくなっていると考えられる。また、PE-ECC では収縮ひずみが HY に比べて大きいことから、混入する繊維を SC と PE 繊維のハイブリッドにすることで、収縮ひずみを小さくすることが可能であると言える。

3.4 引張特性

図-6 に各試験から求めた引張強度-終局ひずみ関係、図-7 に HY-SF の各円柱試験体の最終的に局所化したひび割れ面の SC の状況、図-8 に各試験法から求めた引張応力-ひずみ関係曲線を示す。材齢は 28 日 (HY-SF の 4 点曲げからの逆解析結果は、試験の都合により 42 日) である。

まず、HY-SF について述べる。打込み方向による影響では、図-6 及び図-8(b) から、TX の終局ひずみは小さいが、引張強度と同等の応力をひずみ 1% 程度まで維持しているのに対し、TY はほとんどひずみ硬化を示しておらず、初期ひび割れ後緩やかに軟化していった。また、TY は TX よりも引張強度が 1MPa 程度低いものとなった。TY では、初期ひび割れ時に円柱試験体の外周を一周す

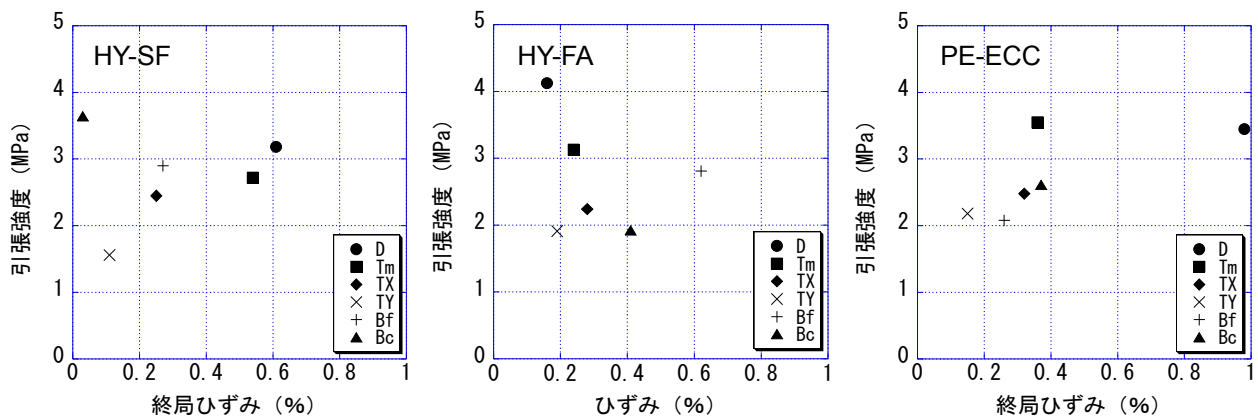


図-6 引張強度-終局

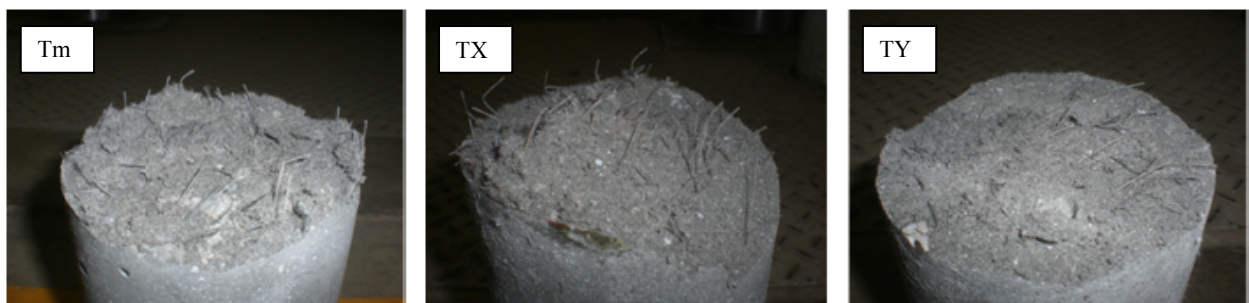


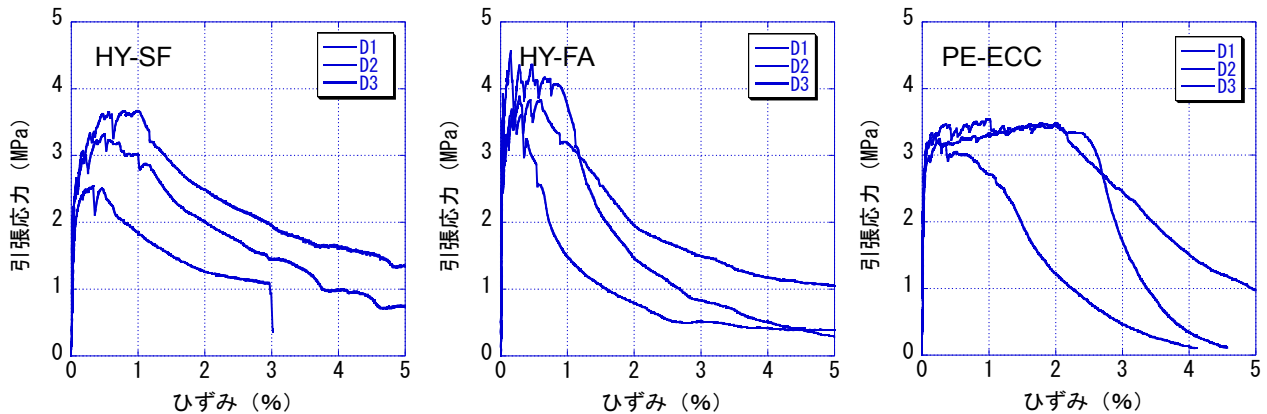
図-7 局所化したひび割れ面のスチールコードの引き抜け状況

るひび割れが確認された。これらの原因としては、図-7に示すように、TY のひび割れが局所化した面でのほとんどのスチールコードが引張軸方向に対して寝ていることで、繊維の架橋がなされなかったことが考えられる。Tm では、縦打ちであるが局所化したひび割れ面の SC で極端に寝ているものはなかった。

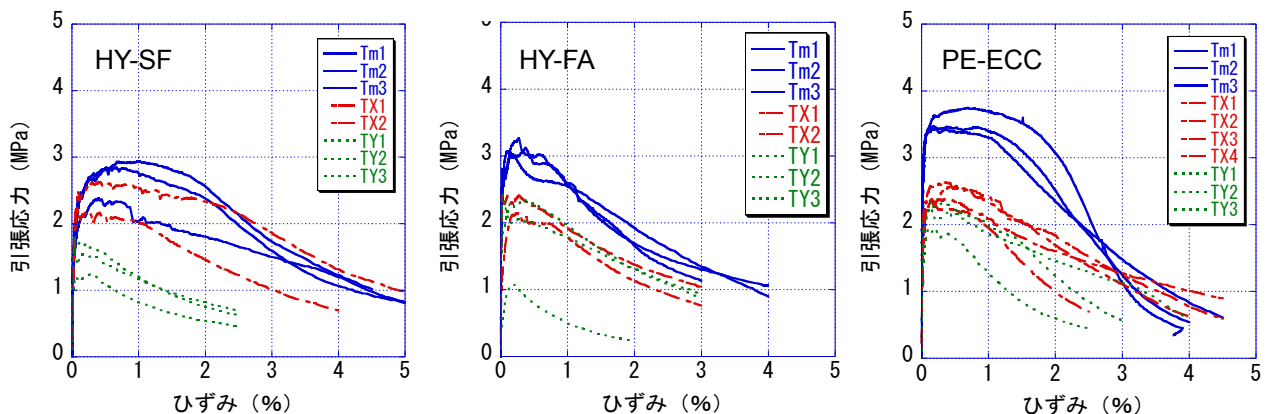
ダンベル型直接引張試験結果 (D) と円柱引張試験結果 (Tm, TX) を比較すると、ダンベル型直接引張試験体のほうが引張強度が 0.5~0.7MPa ほど大きく評価され

ると言える。また、軟化勾配については円柱直接引張試験体のほうが緩やかであると言える。

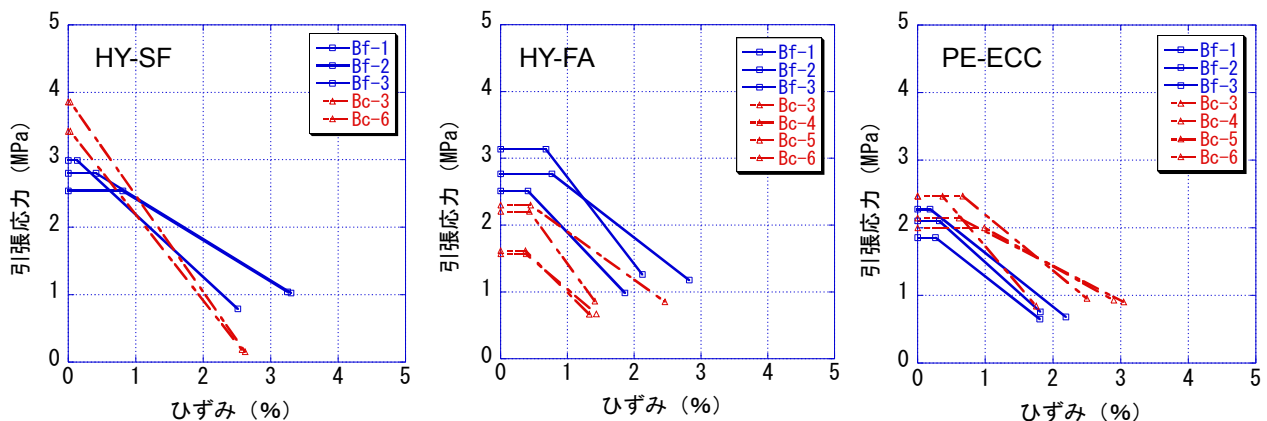
次に、HY-SF と同じ HFRCC タイプである HY-FA について述べる。HY-FA では、ダンベル型直接引張試験、円柱直接引張試験ともにひずみ硬化がほとんど見られず、全体の軟化勾配は HY-SF に比べると急なものとなった。円柱直接引張試験では、どの試験体もひずみ硬化域は短く、HY-SF と比べると脆性的なものとなった。打込み方向による違いとしては、TY のうち 1 試験体の引張強度



(a) ダンベル型試験体の直接引張試験



(b) 円柱試験体の直接引張試験



(c) 角柱の 4 点曲げ試験からの逆解析

図-8 引張応力-ひずみ関係

が 1MPa と非常に小さくなったが、その他の 2 試験体は TX と応力-ひずみ関係が同程度となった。応力が著しく低くなった試験体は TY2 であり、局所化したひび割れ面をみると SC の本数が他の 2 試験体に比べて少なく、かつ引張軸方向に対して寝ていることが確認された。これらの直接引張試験結果に比べ、角柱の 4 点曲げ試験から逆解析によって求めた終局ひずみは直接引張試験から求めたそれよりも大きくなると言える。

次に、PE-ECC について述べる。PE-ECC においても、他の調合と同様に円柱試験体の強度が Tm, TX, TY の順に小さくなると言える。特長的であるのは、ダンベル型直接引張試験の終局ひずみが他に比べて著しく大きいことである。図-8(a)に示すように、ダンベル型直接引張試験から得られた引張応力-ひずみ関係曲線において、ひずみ硬化域が長くなるものであっても、図-8(b)に示す円柱直接引張試験ではほとんどひずみ硬化を示しておらず、角柱の 4 点曲げ試験の逆解析から得られる終局ひずみもダンベル型試験に比べて小さくなることがわかる。

繊維配向がランダムになりやすい PE-ECC の、円柱直接引張試験と角柱の 4 点曲げ試験からの逆解析結果に着目すると、円柱の直接引張試験では、Tm と TX の引張強度に大きな差がある。しかしながら、角柱の 4 点曲げ試験からの逆解析では、Bc と Bf の強度に大きな差はなく、また角柱の 4 点曲げ試験を行う際には、試験体の打設面を側面にすることでウォール効果を見逃すことができることを考慮すると、水和熱による強度低下への影響は少ないと言える。円柱直接引張試験による強度の違いはウォール効果によるものと考えられる。

本実験で行ったダンベル型試験体の直接引張試験は、図-8 から、特に SC と PE 繊維を用いた場合、得られる引張応力-ひずみ関係に大きなばらつきが見られる結果となった。これは、単繊維の場合に比べて SC は長さ、太さともに大きく、ダンベル型試験体検長区間に均一に打設することが難しいためであると考えられる。したがって、SC と PE 繊維を用いた HFRCC の場合、円柱試験体や角柱試験体など、断面の大きな試験体を用い、繊維分散が均一になるようにする必要があると考えられる。また、PE-ECC において、ダンベル型試験体とその他の引張応力-ひずみ曲線が大きく異なるのは、繊維の配向性に加え、ダンベル型試験体の断面が他試験体に比べて小さいものであるからであると考えられ、評価値として、

どの試験法を用いていくのかを検討していく必要がある。

4. まとめ

本研究では、打込み方向及び水和熱の力学特性に与える影響を調べるために、型枠を用いて作製した試験体と、柱要素を模擬した試験体からコア抜き及び切り出した試験体を用いて円柱の直接引張試験を行った。加えて、3 種類の試験法で引張特性を評価することで、その違いについて検証した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 打込み面に対して垂直にコア抜きをした試験体の引張強度は、水平にコア抜きした試験体のそれに比べて小さくなる。したがって、HFRCC を実構造物へ適用させる際には、引張荷重方向と繊維方向が平行になるように、打込み方向に十分注意しなければならない。また、部材の形状や打込み方向によっては、引張荷重方向と繊維方向が直交する場合も生じ得るが、その場合には、繊維が有効に働かない方向に対して補強鉄筋を適切に配筋する必要がある。
- 2) 型枠のウォール効果を考慮すると、水和熱による強度の低下は少ないと考えられる。
- 3) 各試験法から得られる引張特性は異なり、特に PE 繊維のみを用いた ECC では、円柱直接引張試験から得られた終局ひずみよりもダンベル型直接引張試験で得られたそれが著しく大きくなる。したがって、材料評価値を実構造物の設計に使用する際など、試験法について考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 笠原美幸ほか：高靱性セメント複合材料を用いた柱部材の構造性能に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.385-390，2000
- 2) Kikuta, T. Mihashi, H. Choi Donguk and Ishikawa, N.: Pull-out Behavior of Anchor Bolt Embedded in High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite, Proceeding of the Seventh RILEM International Symposium(BEFIB 2008), PRO 60, pp.961-968, 2008
- 3) Ishikawa, N. Mihashi, H. and Kikuta, T.: Properties of Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites with Admixture, Proceeding of the Seventh RILEM International Symposium(BEFIB 2008), PRO 60, pp.201-208, 2008