

論文 高靱性繊維補強セメント複合材料の引張剛性

尹 顯道^{*1}・梁 一承^{*2}・福山 洋^{*3}・諏訪田 晴彦^{*4}

要旨：単一鉄筋と鉄筋コンクリート部材内での鉄筋の引張挙動は大きく違う。これはひび割れ間のコンクリートが鉄筋に伝達する引張力の一部を負担するためである。本研究では引張力下で多数のひび割れを広く分散させ、1.0%以上の引張変形能力が確保できる高靱性セメント複合材料を製造して引張剛性を評価した。ここでは鋼繊維（SC）と有機繊維（PE）を使用した HPFRCC 試験体を製作し、材料水準での力学的特性を究明すると共に、HPFRCC と鉄筋との相互作用、即ち部材水準での引張剛性の特性を究明する。本研究の結果は今後 HPFRCC の構造的活用のために基礎資料として提示する。

キーワード：高靱性セメント複合材料、引張剛性、マルチプルクラック、引張強度

1. はじめに

一軸引張状態で鉄筋コンクリート部材の挙動におけるコンクリートの寄与分を引張剛性（tensile stiffening）効果と定義している。一般的に単一鉄筋と鉄筋コンクリート部材内での鉄筋の引張挙動とは大きく違う。これはひび割れ間のコンクリートが鉄筋に伝達される引張力の一部を負担するためである。引張剛性の特性に大きく影響する要因はマトリックスと鉄筋との付着性能である。ひび割れが発生した鉄筋コンクリートの引張材における鉄筋の応力、付着応力及びコンクリートの応力分布を比較して示している。ひび割れ面で鉄筋の変形は集中しており、鉄筋からひび割れ間のコンクリートへ引張力を伝達するためにはひび割れ境界面に高い付着応力が作用する。このような特性は鉄筋コンクリート部材が成立する基本条件である鉄筋とコンクリートとの一体化を損なう要因になり、終局的には鉄筋コンクリート部材の破壊を招く原因になる。コンクリートのようなセメント複合材料は低い引張強度及び脆性的特性による欠点を改善させるためにセメント複合材料に繊維

などを投入して、引張強度と靱性を向上させる研究が行われている¹⁾。

Abrishami と Mitchell²⁾によると一般的に鉄筋コンクリート部材に引張力が作用すると引張ひび割れが発生してから主筋に沿って割裂ひび割れ（splitting cracks）が発生する。このようなひび割れはコンクリートの引張剛性に対する寄与分を急激に低減させる主な要因であるが、セメント複合材料に鋼繊維を入れることにより割裂ひび割れを制御できる。それで、鉄筋コンクリート部材での引張剛性の特性を改善できると報告されている。

Fischer³⁾は PE1.5%を投入した HPFRCC の引張剛性効果について普通コンクリートに比べ優れていると報告している。また、三橋博三など⁴⁾は PE を 1.5%投入した FRCC と PE1.0%と SC0.5%、PE1.0%と SC1.0%をハイブリッドした HPFRCC について単調載荷での引張剛性について検討している。その結果、降伏強度が単一鉄筋に比べ 20%程度上昇すると報告している。

本論文では構造部材として繰返し荷重を受ける場合を想定しており、ひび割れの分散等を確

*1 忠南大学 工学部 建築工学科 教授 工博（正会員）

*2 忠南大学 工学部 建築工学科 講師 工博（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 工博（正会員）

*4 国土交通省 国土技術政策総合研究所 研究官（正会員）

認するために断面を 55×55mmにした。

本研究では鋼繊維（SC：steel code）と有機繊維（PE：Polyethylene）をハイブリッドした高韧性セメント複合材料（以下、HPFRCC と称する。）と PE のみ使用した HPFRCC の材料水準での力学的特性を究明する。また、HPFRCC と鉄筋との相互作用、即ち部材水準での引張剛性の特性を究明し、今後 HPFRCC を構造的な活用ができるように基礎資料を提示する。

2. 高韧性セメント複合材料の特性

2.1 対象とした試験体

対象とした試験体は 4 種類で、ポリエチレン繊維(PE)を体積混入率で 1.5%混入した HPFRCC（以下、PE1.50 と呼ぶ）、ポリエチレンと鋼繊維を両者 0.75%混入した HPFRCC（以下、SC0.75 + PE0.75 と呼ぶ）、鋼繊維を 2.0%混入した DFRCC（以下、RPC 或いは Ductal）及び普通コンクリートである。各試験体の調査及び使用繊維の性質を表-1 と表-2 に示す。

表-1 繊維特性

種類	比重	長さ (mm)	直径 (μm)	形状比	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
SC*1	7.85	32	405	79	2,300	206
PE	0.97	15	12	1,250	2,500	75
SF*2	7.85	15	200	75	3,000	206

*1 SC (Steel Cords)： 5-twisted strand fiber

*2 SF(Steel Fiber)： single fiber

表-2 調合条件

	W/C (%)	繊維混入率 Vf (vol.%)			単位重量 (kg/m ³)		
		SC	PE	SF	C	S	W
PE1.50	45	-	1.50	-	1047	419	471
SC0.75 + PE0.75		0.75	0.75	-	1041	417	469
Concrete	40	-	-	-	1735	637 932*1	198
RPC	25	-	-	2.0	2297*2		180

*1：組骨材 *2：Premixed Powder

2.2 既存引張剛性モデル

ひび割れ発生後にひび割れ間のコンクリートが引張力に抵抗し、引張力下で鉄筋コンクリート部材の剛性が増大する。初期ひび割れ後コンクリートの平均応力は減少し、ひび割れに進展することにより平均応力は更に減少する。鉄筋コンクリート部材での引張剛性効果は Collins など⁵⁾が提案した式（1）により評価できる。

$$f_c = \frac{\alpha_1 \alpha_2 f_{cr}}{1 + \sqrt{500 \varepsilon_{cf}}} \varepsilon_{cf} > \varepsilon_{cr} \quad (1)$$

ここで、 f_{cr} ：コンクリートの引張強度、 ε_{cr} ：ひび割れ時コンクリートの歪、 ε_{cf} ：最大応力時コンクリートの歪、 α_1 ：鉄筋の付着特性値（異型鉄筋）、 α_2 ：荷重の特性値（短期単調荷重で 1.0、繰返し荷重で 0.5）

2.3 圧縮挙動特性

図-1 にはコンクリート、HPFRCC 及び RPC の圧縮強度試験結果を比較した。圧縮強度は RPC（130MPa）＞コンクリート（54MPa）＞SC0.75 + PE0.75（46.7MPa）＞PE0.75（44MPa）順である。それと弾性係数は RPC（503GPa）＞コンクリート（283GPa）＞SC0.75 + PE0.75（189MPa）＞PE0.75（187MPa）順である。繊維を使用していないコンクリート試験体は繊維を混入した試験体に比べて最大強度後に脆性的な圧縮特性を示した。

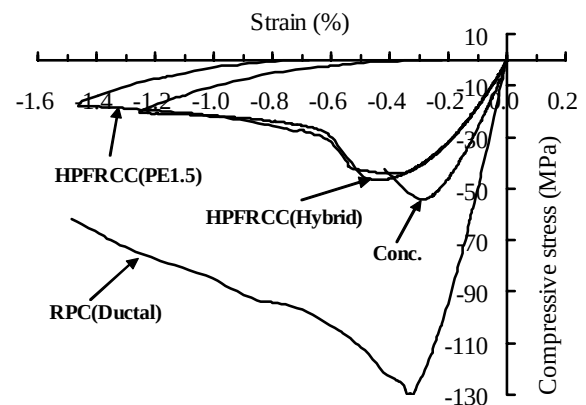


図-1 HPFRCC 圧縮応力-ひずみ関係

2.3 引張挙動特性

引張試験は図-2に示す方法で行った。圧縮試験と同じ直径 100mm, 長さ 200mm のシリンダーを用いて, 両端のくさび作用を利用した掴み治具によって掴み, 直接引張力を加えるものである。試験機は 2,000 kN サーボ式万能試験装置を用い, 一定の载荷速度(変位制御)にて加力した。本試験により得られた引張応力-引張ひずみ関係を図-3に示した。PE を使用した試験体(PE1.5)の引張強度及び引張変形能力(引張応力が急激に低下する時点)は 2.78MPa と 1.25% である。また, 付着性能と曲げ剛性に優れた SC と PE をハイブリッドした試験体(SC0.75+PE0.75)の引張強度及び変形能力は 3.53MPa と 1.49% であり, PE のみ使用した試験体より優れた性能を発揮した。一方, 超高強度コンクリート(RPC)は引張強度が 5.12MPa で高いものの, 引張変形性能は 0.19% で低かった。コンクリー

ト試験体について直接引張実験の代わりに割裂試験を行った結果, 割裂強度は 3.2MPa であった。

図-3(d)では HPFRCC 試験体の繰返し引張特性を示しており, 単調引張挙動特性と似た傾向である。PE1.5 試験体はハイブリッド試験体(SC0.75+PE0.75)に比べて引張強度と変形能力が小さく, 引張力の除荷時にも剛性が低い。これは引張力でマトリックスに発生したひび割れが除荷時に有機繊維(PE)より鋼繊維(SC)の曲げ剛性が優れているためである。

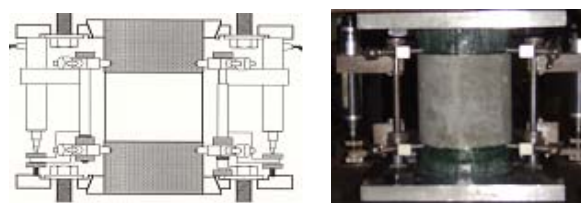
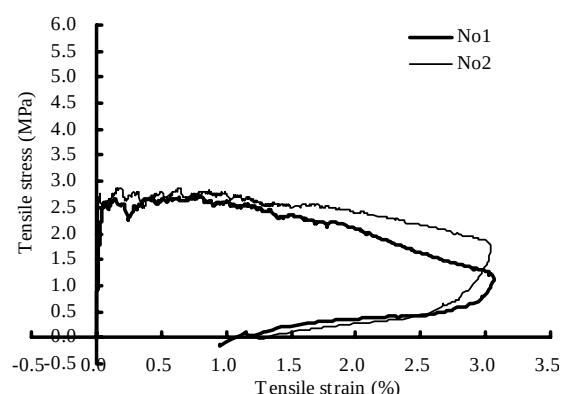
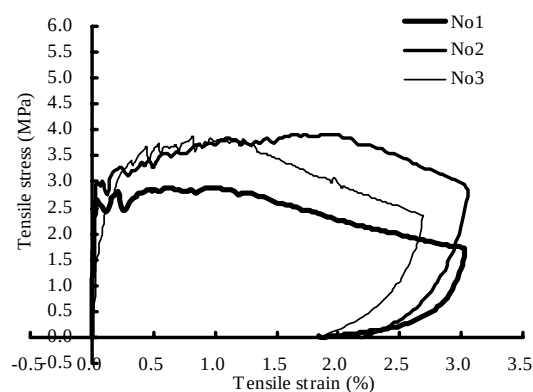


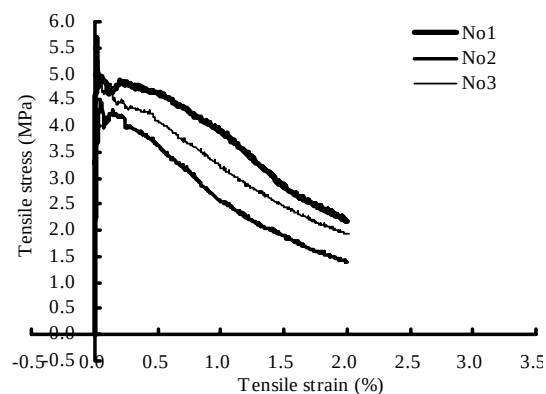
図-2 直接引張試験装置



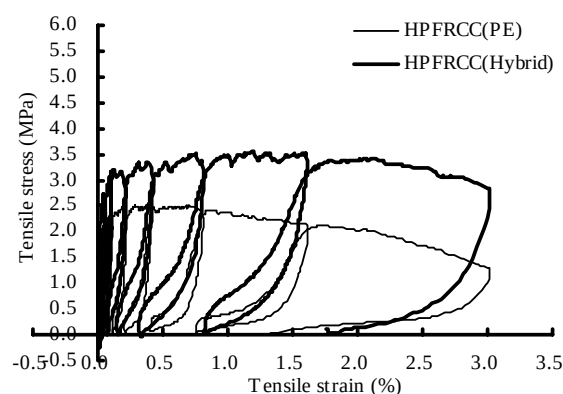
(a) HPFRCC (PE) の単調引張



(b) HPFRCC (Hybrid) の単調引張



(c) RPC (Ductal) の単調引張



(d) HPFRCC (PE 及び Hybrid) の繰返し引張

図-3 HPFRCC の直接引張応力-ひずみ関係

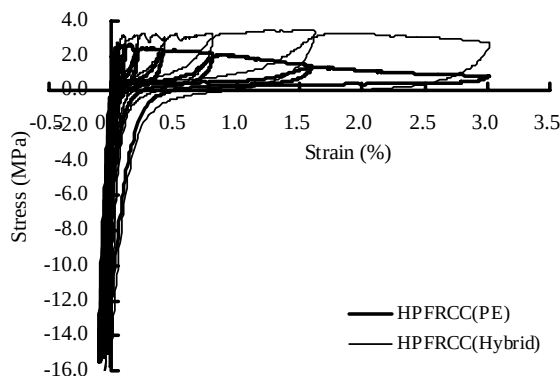
2.4 繰返し引張・圧縮挙動特性

図－4では引張/圧縮反復繰返しの実験結果を示しており、単調及び繰返し引張挙動と大きな差は見られないが、PE1.5の場合、引張強度の低下が急激に落ちている。図－4(b)で示すように、PE1.5試験体はハイブリッド(SC0.75+PE0.75)試験体に比べて引張除荷から圧縮载荷へ転換する過程で急激な Pinching 現象を示している。これは有機繊維(PE)より鋼繊維(SC)の曲げ剛性が大きく、引張から圧縮へ転換し引張ひび割れの閉合を抑制するためである。

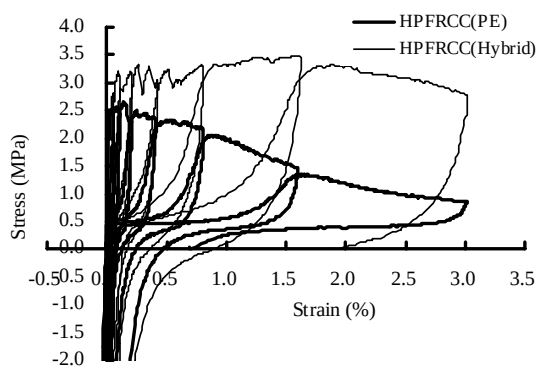
3. HPFRCC の引張剛性特性

3.1 試験計画及び試験方法

HPFRCC の引張剛性の特性を評価するために8つの試験体を計画した。図－5(a)に引張剛性試験体の形状及び断面を示した。



(a) 引張・圧縮のサイクル

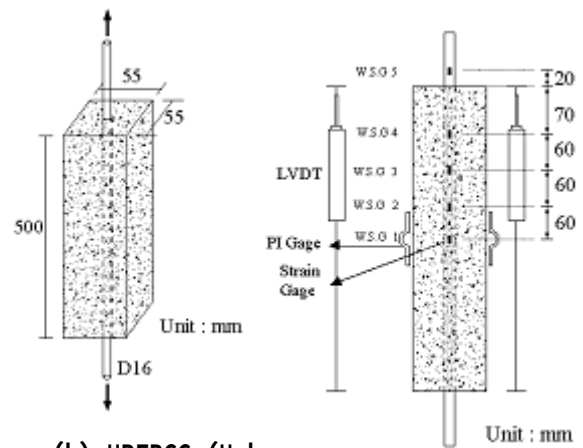


(b) 引張サイクルの拡大図

図－4 引張/圧縮繰返し時の応力とひずみ関係

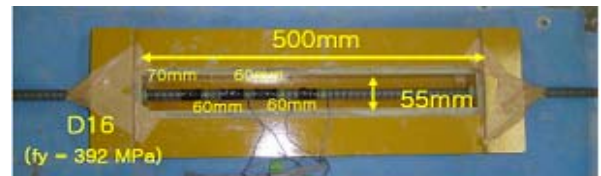
試験体の断面は 55×55mm、長さは 500mmであり、試験体の中央に D16 の異型鉄筋(鉄筋比 6.58%)を埋め込んだ。図－5(b)に示すように部材の変形とひずみを計測するために変位計とひずみゲージを設置した。ひずみゲージは中央から 60mm 間隔で 4 枚とセメント複合材料の端部から 20mm 位置に 1 枚を貼り付けた。

加力は 2,000 kN の油圧万能試験機(UTM)を用い、鉄筋を通して周辺のセメント複合材料へ引張応力が伝達できるように端部の鉄筋に引張力を加えた。また、繰返し荷重での HPFRCC の引張剛性を評価するために試験体の外部に貼り付けたゲージ(WSG 5)のひずみが 1000 μと 2000 μで除荷してから再び载荷した。試験体は打設してから 24 時間後に脱型し、一週間気中養生とした。



(a) 試験体形状

(b) 変位計・ゲージ付着位置



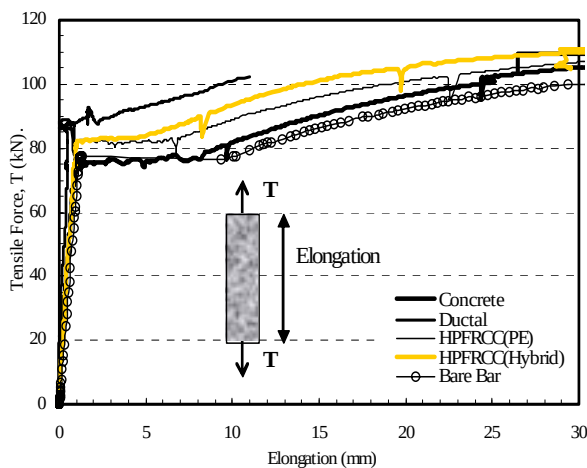
(c) 試験体形状及び配筋詳細

図－5 試験体の形状及び配筋詳細

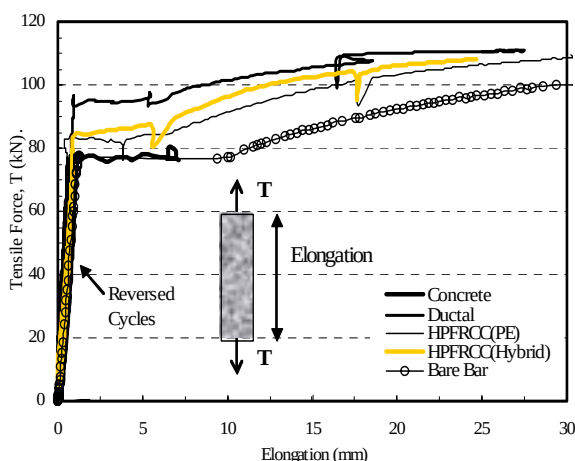
3.2 荷重と変形との関係

図－6には鉄筋に加えた引張力とセメント複合材料の引張変形との関係を示した。図－6(a)では単調载荷で、初期剛性は純鉄筋の初期剛性

より高く、降伏強度も高かった。試験体の降伏強度は $\text{RPC (444MPa)} > \text{HPFRCC-Hybrid (414MPa)} > \text{HPFRCC-PE (411MPa)} > \text{Concrete (393MPa)}$ の順である。HPFRCC の引張剛性効果は普通コンクリートに比べて高いものの材料レベルでのような大きな差はなかった。**図-6 (b)** では繰返し载荷での試験結果で、単調载荷との差は余り見られなかった。但し、コンクリート試験体は繰返し载荷の場合が単調载荷よりも小さい変形でコンクリートと鉄筋との剥落が発生した。繰返し载荷での降伏強度は $\text{RPC (469MPa)} > \text{HPFRCC-Hybrid (425MPa)} > \text{HPFRCC-PE (418MPa)} > \text{Concrete (394MPa)}$ の順である。



(a) 単調载荷



(b) 繰返し载荷

図-6 鉄筋で補強した HPFRCC の引張力-変形関係

3.3 ひび割れと破壊形状

鉄筋で補強した各セメント複合材料のひび割れ形状を図-7に示した。HPFRCC 試験体は試験前から乾燥収縮ひび割れが発生し、初期の引張载荷では乾燥収縮ひび割れ幅が大きくなったが、徐々に細かいひび割れが試験体の全体に広がり、多数のひび割れが発生した。一方、コンクリート試験体は引張力 18kN で初期のひび割れが発生し、引張力が大きくなるに従い初期のクラックが大きくなった。RPC の場合は 36.5 kN で初期のひび割れが発生し、その後は最初のクラックが大きくなり、鉄筋が降伏してからは試験体の端部から割裂ひび割れが発生した。



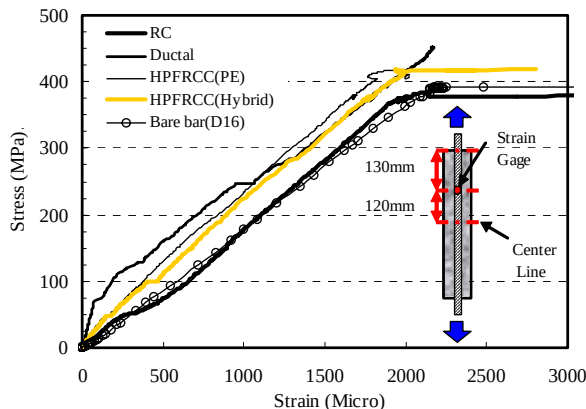
設置 Con. RPC PE Hybrid

図-7 ひび割れ形状

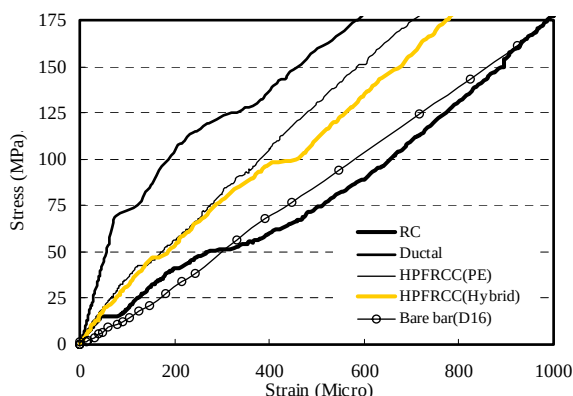
3.4 鉄筋のひずみ分布

鉄筋の引張応力（引張力/鉄筋の断面積）と鉄筋の中央から 120mm 位置でのひずみとの関係を**図-8**に示した。コンクリート試験体は 17MPa で初期ひび割れが発生し、急激に変形が進み純鉄筋と同一な挙動特性を示した。RPC 試験体の場合、引張応力（70MPa）で初期ひび割れが発生するが大きな剛性低下は見られなかった。RPC 試験体の引張応力とひずみ曲線で 75MPa, 125 MPa 及び 250MPa ではひび割れによる剛性低下が見られるが、純鉄筋の剛性よりは高かった。HPFRCC 試験体の剛性はコンクリートと RPC とは違い、鉄筋が降伏するまで大きな差はなかった。これは HPFRCC の硬化過程で乾燥収縮ひび割れが発生したためである。HPFRCC の実用化のためには乾燥収縮ひび割れは解決する必要がある。

ある。HPFRCC の応力-ひずみ曲線で凹凸は HPFRCC へ細かいひび割れが多数発生したためであり、コンクリートと RPC 試験体に比べ、ひび割れ発生後にも大きな剛性の変化はなかった。但し、鉄筋で補強した HPFRCC (PE) と HPFRCC (Hybrid) の引張挙動特性は鋼繊維の寄与度が小さいため、その差は余り出なかった。



(a) 降伏以降までの応力-ひずみ



(b) 弾性部分を拡大した応力-ひずみ

図-8 単調載荷時鉄筋の応力-ひずみ関係

3.5 既存提案式と実験結果との比較

図-9では Collins などが提案したコンクリートの引張剛性評価式(1)による計算結果と鉄筋で補強した引張剛性試験体へ作用する引張力から鉄筋の寄与分を引いて計算したセメント複合材料の実験結果を比較した結果、コンクリートの引張剛性評価式(1)は高靱性セメント複合材料の引張剛性効果を過小評価しており、HPFRCC へ適用するためには修正が必要である。

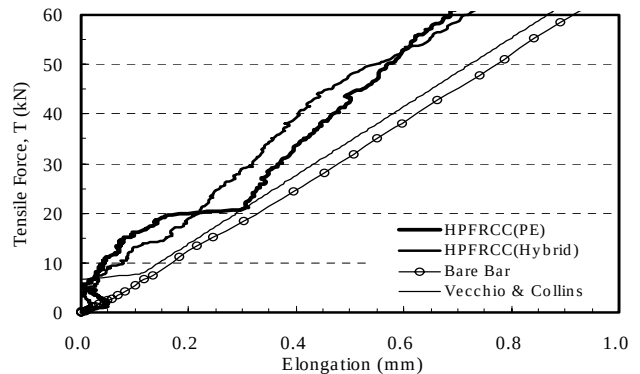


図-9 既存提案式と実験結果の比較

4. 結論

引張剛性の実験結果、次の結果が得られた。

- 1) 付着性能と曲げ剛性が大きい鋼繊維(SC)と有機繊維(PE)をハイブリッドしたHPFRCC試験体は有機繊維のみ使用したHPFRCC(PE)より引張強度と変形性能が優れている。
- 2) 鉄筋で補強したHPFRCCの引張剛性効果は普通コンクリートに比べて高いが、材料レベルのような大きな差はなかった。
- 3) コンクリート引張剛性モデルはHPFRCCの引張剛性を過小評価しており、HPFRCCの引張剛性を評価するモデルを提案する必要がある。

参考文献

- 1) Spencer, R.A.; Panda, A.K.; and Mindess, S.: Bond of Deformed Bars in Plain and Fiber Reinforced Concrete under Reverse Cyclic Loading, International Journal of Cement Composites, Vol.4, No.1, pp. 3-18, 1982
- 2) Abrishami, H. H., and Mitchell, D.: Influence of Steel Fibers on Tension Stiffening, ACI Structural Journal, pp. 769-776, 1997
- 3) Fischer, G, and Victor, C.Li: Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composite, ACI Structural Journal, V.83, No.2, pp. 104-111, 2002
- 4) 三橋博三, 外4人:高靱性セメント複合材料に埋め込まれた異形鉄筋周りの付着ひび割れとテンションスティフニング, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム, JCI, 2003
- 5) Vecchio, F.J, and Collins, M.P.: Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Structural Journal, V.83, No.2, pp. 219-231, 1986