

委員会報告 「高靱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」

松尾庄二^{*1}・関田徹志^{*2}・福山洋^{*3}・六郷恵哲^{*4}

要旨：平成 13 年度に新しい FS 課題として発足した高靱性セメント複合材料 (DFRCC) 研究委員会の活動の様子を紹介するとともに、11 種類の DFRCC を対象に行った性能比較試験(圧縮試験、曲げ試験、直接引張試験、両引き試験)の結果を報告した。試験の結果、既に規定あるいは提案されているような試験方法を用いれば、適用範囲には注意する必要があるものの、各種の DFRCC の性能をある程度評価しうることがわかった。性能比較試験全般を通して、合成繊維系材料は概ね良好な性能を示しており、引張応力下で靱性が高いことを確認した。
キーワード：繊維補強コンクリート、高靱性セメント複合材料、靱性、性能比較試験

1. はじめに

高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会は、平成 13 年度に FS (Feasibility Study) 課題として発足した。FS 課題の制度は、平成 13 年度に JCI 研究委員会に新設されたものであり、専門委員会は最初の 1 年間における調査研究により 2 ～ 3 年目の委員会活動の必要性と方向性を明確にし、その 1 年目の活動報告をもとに JCI の研究委員会(親委員会)が専門委員会の継続の可否を判断する制度である。後述のように、この専門委員会では、報告書を作成し、これをテキストとして平成 14 年 1 月にセミナーを東京で開催した。その結果、平成 14 年 2 月に開催された研究委員会において、継続が認められ、活動期間は合計 3 年間となった。

この専門委員会において対象とする高靱性セメント複合材料 DFRCC (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites) は、ECC (Engineered Cementitious Composites)、SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber CONcrete)などのひずみ硬化挙動を顕著に示す HPRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious

Composites) だけでなく、靱性と強度が大きな Ductal や高靱性 FRC (Fiber Reinforced Concrete) を含んでいる。

ここでは、1 年目(平成 13 年度)の委員会活動の報告と、2 年目以降の委員会活動の予定内容とを紹介するとともに、1 年目の活動として行った DFRCC の性能比較試験の結果を報告する。

2. 委員会活動

2.1 委員会活動の目的と特徴

専門委員会の活動の 1 年目には、高靱性セメント複合材料に関する技術の現状を調査し、報告書を作成し、この技術の課題と今後向かうべき方向とを整理する。2 ～ 3 年目には、高靱性セメント複合材料に適用できるような、性能評価のための試験方法や、数値解析のための材料構成則の提案を行い、さらに構造物等への利用方法とその場合の性能評価の考え方をまとめる予定である。

これらの委員会活動を通じて、コンクリート構造物の新たな性能向上の可能性を開拓し、高

*1 鉄建建設(株)技術研究所 主任研究員 (正会員)

*2 鹿島建設(株)技術研究所 主任研究員 工博(正会員)

*3 独立行政法人建築研究所 上席研究員 工博(正会員)

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

靱性セメント複合材料の普及と利用の促進を図るとともに、コンクリート工学の発展に寄与することが、この専門委員会の目的である。

この専門委員会では、次のような委員会活動に適した内容や、委員会活動でしか実施できない内容に重点をおいて、委員会活動を行うことを心がけている。

研究情報の収集・加工・公開 → 報告書の作成、セミナーの開催

共同の試験や解析 → 性能比較試験の実施

海外との組織的な研究協力 → 海外協力委員の制度化、国際ワークショップの開催

研究発表の場の提供 → 論文発表を伴うシンポジウムの開催

情報サービス・技術の普及 → インターネット協力委員の制度化、委員会ホームページの整備

試験方法や評価基準類の案の作成

この専門委員会では、次の3種類の委員種別を設けている。

委員（正規委員）： 表 - 1 に示すように、わが国において高靱性セメント複合材料に関する研究を行っている研究者により組織した。分野、年齢、地域等のバランスに配慮した。

海外協力委員： 高靱性セメント複合材料に関する研究を行っている海外の主な研究者に、海外協力委員として委員会活動に協力していただいている。海外協力委員には、2年目に予定している国際ワークショップに参加し論文発表を行っていただく予定である。

インターネット協力委員： 委員会のホームページやメールを用いて、委員会の行事案内、基本情報、委員会資料（議事録等）等をインターネット協力委員へ配布する。JCIの委員会ホームページ等を通じて参加を募っている。JCIの会員

表 - 1 委員会構成（平成13年度）

委員長： 六郷 恵哲（岐阜大学）
副委員長： 福山 洋（建築研究所）
幹事： 鎌田 敏郎（岐阜大学） 関田 徹志（鹿島建設） 堀井 秀之（東京大学） 三橋博三（東北大学）
委員： 大岡 督尚（東急建設） 片桐 誠（太平洋セメント） 金久保 利之（筑波大学） 上東 泰（日本道路公団） 橘高 義典（東京都立大学） 国枝 稔（岐阜大学） 栗原 哲彦（武蔵工業大学） 佐藤 幸博（フジタ） 諏訪田 晴彦（国土交通省） 趙 唯堅（大成建設） 永井 覚（鹿島建設） 中村 裕（前田先端技術研究所） 浜田 敏裕（クラレ） 藤元 安宏（ピー・エス） 前田 徳一（東洋紡績） 松尾 庄二（鉄建建設） 松尾 真紀（東京工業大学） 松崎 育弘（東京理科大学） 松本 高志（東京大学）

（個人会員、団体会員）であることを原則としている。

2.2 委員会活動の内容

平成13年度には、下記の活動を行った。

報告書： 高靱性セメント複合材料に関する技術の現状を整理し、今後の課題と方向をまとめた報告書「高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う」（128頁、定価4,200円）を作成した。

性能比較試験： 11種類の高靱性セメント複合材料を対象に、圧縮試験、引張試験、曲げ試験、両引き試験（鉄筋を埋め込んだ供試体を使用）を、鹿島建設技術研究所、独立行政法人建築研究所、鉄建建設技術研究所において平成13年11月上旬に実施し、性能を比較した。この性能比較試験の結果を、この委員会報告に載せた。

セミナー： 報告書をテキストとして、平成14年1月25日に、中央大学駿河台記念館（東京都千代田区）においてセミナー（有料参加者107名）を開催した。
国際ワークショップ： 平成14年10

月に国際ワークショップをわが国で開催できるよう、準備をすすめた。

平成 14・15 年度には、下記の活動を予定している。

国際ワークショップ： 高靱性セメント複合材料の構造利用とそのための性能評価方法に焦点を当てた国際ワークショップを、平成 14 年 10 月 21・22 日に、岐阜県高山市において開催する。海外からは、海外協力委員を中心に、この材料分野における中心的な研究者（10～30 名）の参加を予定しており、国際的な人的ネットワークを構築する。約 20 編の論文発表が予定されている。

シンポジウム： 平成 15 年 12 月に東京において国内シンポジウムを開催し、高靱性セメント複合材料の構造利用、試験方法、材料設計、製造、施工、数値解析等に関する論文を広く募集する。2～3 年目の委員会活動の成果を反映させて

新たに報告書をまとめ、シンポジウムにおいて報告する。

情報サービス： 高靱性セメント複合材料に関する最新の研究情報に加え、材料（特に繊維）の具体的な入手方法、代表的な配合や練混ぜ方法、各種の載荷試験方法、載荷装置の入手方法等を、委員会ホームページに掲示するなどして、JCI 会員への情報サービスに努める。

WG 活動： 委員会内に、下記の WG を設けて活動を進める。

< 研究WG >

- ・ 耐久性WG（鎌田主査）
- ・ 数値解析WG（松本主査）
- ・ 構造利用WG（佐藤主査）
- ・ 製造施工WG（松尾(庄)主査）
- ・ 引張試験法WG（金久保主査）

< 運営WG >

- ・ シンポジウムWG（松尾(真)主査）
- ・ 広報庶務WG（栗原主査）

表 - 2 性能比較試験参加材料一覧

参加機関	名称	繊維	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	混入率 (%)	W/B (%)	マトリックス
岐阜大	PE-ECC	PE	0.012	12	1.50	30	セメントモルタル
建研	PVA-HPFRCC	PVA	0.041	15	1.50	60	セメントモルタル
	PE-HPFRCC	PE	0.012	15	1.50	45	セメントモルタル
太平洋 & 大成	ダクトアル	鋼	-	-	2.00	-	リアクティブパウダー コンクリート
鉄建	SFRM	鋼	0.600	30	4.00	38	セメントモルタル
	既存 FRCC*	鋼	0.600	30	1.00	50	セメントモルタル
東急	東急建設式 VFRM	PVA	0.100	24	2.00	60	セメントモルタル
	東急建設式 VFRLM	PVA	0.100	24	2.00	40	セメントモルタル 人工軽量細骨材
鹿島 & クラレ	PVA-ECC	PVA	0.040	12	1.91	44	セメントモルタル
	吹付け PVA-ECC	PVA	0.040	12	2.00	32	セメントモルタル
東北大	ハイブリッド型 FRCC	鋼	0.416	32	1.50	30	セメントペースト
		PE	0.034	15	1.50		

* 比較の対象として実施

3. 性能比較試験

3.1 試験の目的

高靱性セメント複合材料 (DFRCC) は、プレーンマトリックスと比較すると曲げや引張などの強度面やひび割れ抵抗性を含めた変形性能の面で大きな改善が見られる。特に、変形性能に関しては従来の FRCC と比較しても遙かに優れている。このような特長を利用して実部材へ適用することにより、より良い構造物の実現が期待される。

本委員会では、各研究機関で研究 / 開発、あるいは発表されている各種の DFRCC について、その力学的性能を共通の試験を通して比較することにより、それぞれの DFRCC の特徴を明らかにするとともに、性能評価試験方法自体についてもその妥当性あるいは問題点について考えてみた。

3.2 試験の概要

(1) 試験の対象

性能比較試験の対象とした DFRCC は、表 - 2 に示す 7 機関 11 種類である。また、比較の対象として既存 FRCC (両端フック付き鋼繊維補強モルタル) についても同様に試験を行った。なお、それぞれの供試体は各研究機関において作製し、試験機関で一斉に試験を行った。

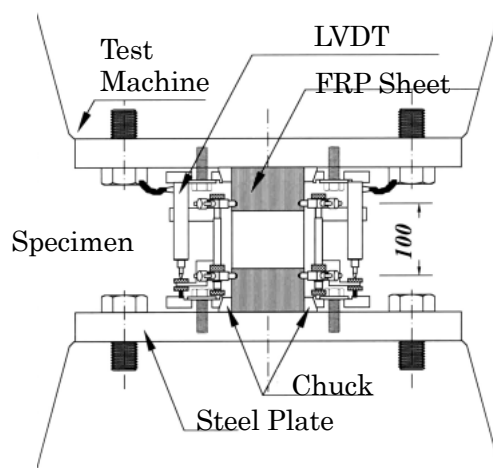
使用された材料のうち、繊維については PVA (ポリビニルアルコール) 繊維、PE (ポリエチレン) 繊維および鋼繊維の 3 種類に分類できる。また、マトリックスに関しては、大部分 (11 種中 9 種) がセメントモルタルであり、残りはセメントペーストおよびリアクティブパウダーコンクリート (RPC) である。

(2) 試験の種類

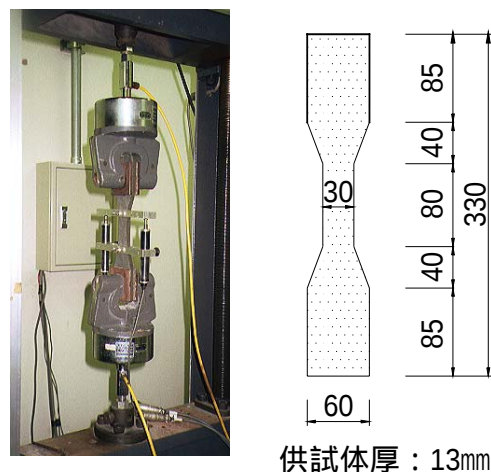
性能比較試験として、以下の各試験を行った。

・圧縮試験

JSCE-G551-1999 [鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度および圧縮タネ試験方法 (土木学会)] に準拠。ただし、圧縮靱性を考慮して圧縮ひずみ 1.5% まで計測。



図—1 円柱引張試験方法



供試体厚：13mm

図—2 ダンベル引張試験方法

・曲げ試験

JSCE-G552-1999 [鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタネ試験方法 (土木学会)] に基づく角柱供試体 (100mm 角断面、長さ 400mm) による 3 等分点荷の曲げ試験。

・直接引張試験

図 - 1、2 に示すような円柱供試体¹⁾ (直径 100mm、高さ 200mm) およびダンベル型平板供試体²⁾ (試験区間 80mm) を用いた 2 種類の一軸引張試験。

・両引き試験

中心に D25 の鉄筋を内蔵する角柱供試体 (100mm 角断面、長さ 400mm) を用いた両引き試験。

表 - 3 物性値一覧

材料	スラフ (mm)	スラフ フロー (mm)	テーブルフロー (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度時 ひずみ(×10 ⁻⁶)	単位体積重量 (kg/m ³)
PE-ECC	-	-	140	64.9	22.6	3591	1928
PVA-HPFRCC	233	455	191	34.3	13.6	4968	1928
PE-HPFRCC	156	310	156	51.1	19.4	4113	2028
ダクタール	-	-	272	223.7	56.1	4257	2540
SFRM	220	345	-	56.3	28.8	3240	2341
東急建設式 VFRM	150	290	145	36.1	19.1	3582	2127
東急建設式 VFRLM	130	263	132	44.2	13.5	4108	1576
PVA-ECC	-	435	156	55.9	18.4	4231	1867
吹付け PVA-ECC	195	350	173	47.7	19.4	4486	2045
ハイブリッド型 FRCC	-	-	130	100.8	23.5	5584	2138
既存 FRCC	-	435	218	46.7	25.7	2841	2200

3.3 試験結果

(1) フレッシュ性状および圧縮試験

表 - 3 にフレッシュ性状および圧縮試験結果をまとめて示す。ただし、フレッシュ性状は各参加機関における供試体作製時の計測値であり、スラフフローおよびテーブルフローについては直径の最小値を掲載した。

性能比較試験に際しては、物性値等に関する共通の仕様を定めたのではなく、実際に取り扱っている材料を持ち寄った形となっている。したがって、フレッシュ性状・圧縮試験結果ともかなり幅広く分布している。

PVA 繊維や PE 繊維など合成繊維系の材料の場合、弾性係数は鋼繊維系 DFRCC に比べてやや小さい傾向が見られた。一方、最大荷重（圧縮強度）時のひずみは、合成繊維系の方が大きな値を示した。鋼繊維と PE 繊維が混合したハイブリッド型 FRCC の場合、セメントペーストをマトリックスとするため弾性係数は小さいが、最大荷重時の

ひずみに関しては、他の合成繊維系 DFRCC と同様に大きな値を示した。

(2) 曲げ試験

3 等分点载荷の曲げ試験結果について、繊維種類別に整理した結果を図 - 3 ～ 5 に示す。いずれの DFRCC の場合も、初期ひび割れ発生後に応力の増加が見られた。しかし、曲げ応力下におけるひずみ硬化区間には材料により違いがあり、概して鋼繊維系、PE 繊維系、PVA 繊維系の順に長くなる傾向が見られた。しかし、ハイブリッド型 FRCC の場合も、合成繊維系と同様にひずみ硬化区間が長い。これは、鋼繊維と

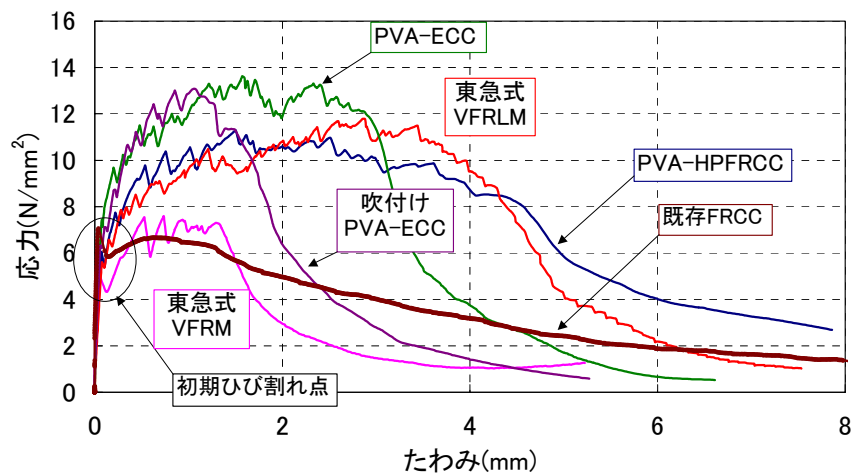


図 - 3 曲げ試験結果：PVA 繊維系

PE 繊維が互いに補い合うこと
によるためと考えられる。

ひずみ硬化が起きている区間
では、複数の微小なひび割れが
発生しているが、その発生状況
もまた材料により異なる。ひず
み硬化区間が長い PVA 繊維系
FRCC の場合、曲げスパン内に
微小なひび割れが万遍なく分布
するのに対して、PE 繊維系では
その発生領域が狭い範囲に集中
している。写真 - 1 および写真
- 2 にそれぞれのひび割れ発生
状況を示す。

(3) 引張試験

円柱引張試験の結果を図 -
6、7 に示す。試験結果を見
ると、全体的な応力 - ひずみ
関係は、3 等分点載荷の曲げ
試験結果(応力 - たわみ関係)
とよく似通った傾向を示して
いる。また、紙面の都合上割
愛したが、ダンベル引張試験
もほぼ同様の結果を示した。

PVA 繊維系の各 DFRCC や
一部の PE 繊維系 DFRCC につ

いては、ひずみが 1 % 以上に達するまで硬化状
態を呈しており、これらの材料は高い引張靱性
を有するものと評価できる。ただし、既存 FRCC
の場合、比較的大きなひび割れが入った状態で、
見かけ上ひずみが 1.5% 近くまで応力が再上昇
した例も見られたので、引張靱性の評価に当た
っては注意を要する。

引張試験においては、ばらつきを考慮して複
数の供試体について試験を行ったが、合成繊維
系 DFRCC の場合は個々のばらつきは小さく、
比較的精度の良い結果が得られる。ただし、円
柱引張試験の場合、鋼繊維系 DFRCC のように
高強度・高剛性の材料に対しては、GFRP シー
ト取付部において破壊した例が多く見られてお

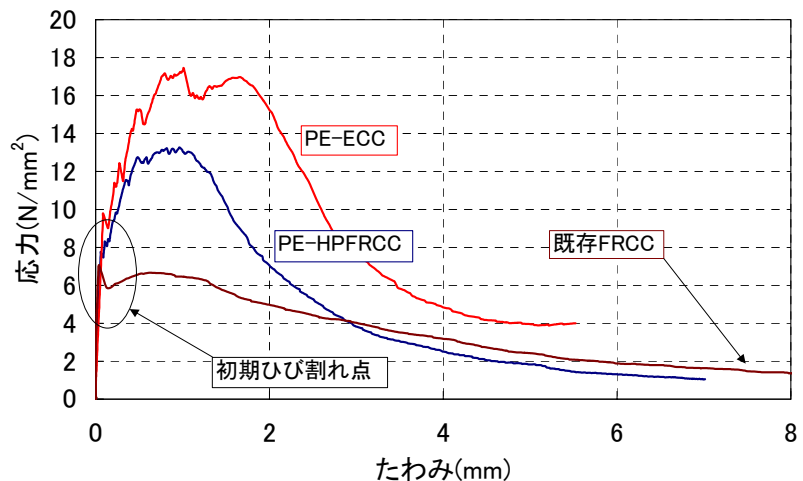


図 - 4 曲げ試験結果：P E 繊維系

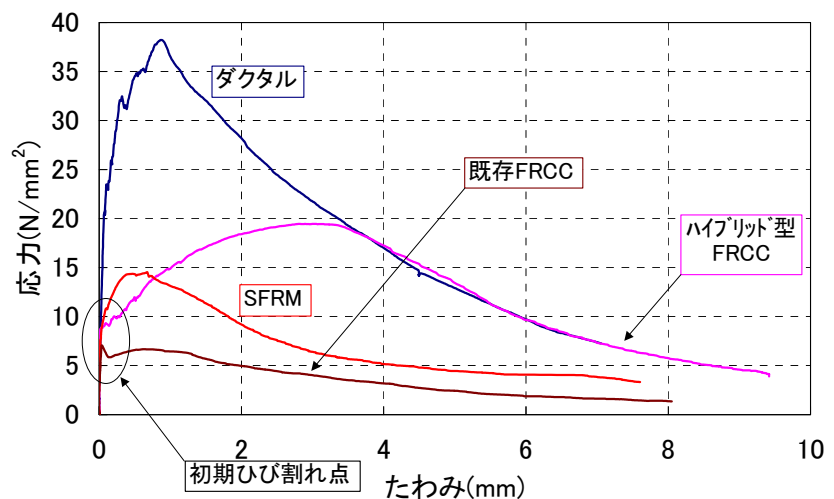


図 - 5 曲げ試験結果：鋼繊維系

り、適用性に限度があると考えられる。また、
ダンベル引張試験体の場合も、高強度・高剛性
のダクトルに関して、金属製の掴み具と供試体
の間で滑りが生じたため、試験が不可能となる
事態が生じた。さらに、ダンベル試験体は、試
験区間の断面が 13 × 30mm と非常に小さいため、
繊維長が長いものについては繊維の配向が 2 次
元的になってしまうので、正確な性能評価がな
されない可能性が高い。

(4) 両引き試験

両引き試験結果は、合成繊維 (PVA 繊維、PE
繊維) 系 DFRCC と鋼繊維系 DFRCC で大きく
異なった。前者は、SSC (Steady State Crack) 現
象により、輪切り状に軸直角方向の細かなひび

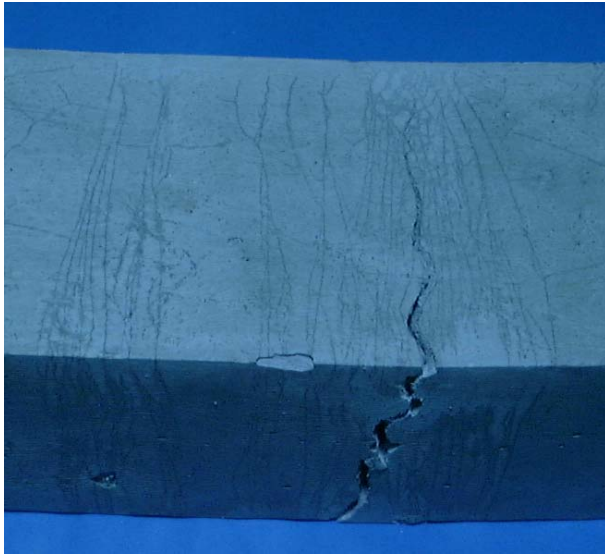


写真 - 1 ひび割れ状況：PVA繊維系



写真 - 2 ひび割れ状況：PE繊維系

割れが発生 / 進展していくため、供試体全面ではほぼ一様な変形挙動を示す。

これに対して、鋼繊維系の場合、ひび割れ開口にともなう2次曲げモーメントの影響を強く受けるため、ひび割れの局所化が早い段階から進む。したがって、図 - 8 に示すように各面ごとの変位量の計測値が大きく異なる現象が生じ、安定した試験結果が得られないこととなる。

また、一部の DFRCC については、鉄筋とマトリックス間の付着が切れて鉄筋の抜け出しが卓越してしまう現象も見られた。すなわち、材料あるいは鉄筋の性能によっては、DFRCC の性能を正しく評価できない場合もあり得る。

3.4 性能比較試験のまとめ

高靱性セメント複合材料 (DFRCC) の性能評価 / 比較を目的として、圧縮、曲げ、引張および両引きの各種試験を行っ

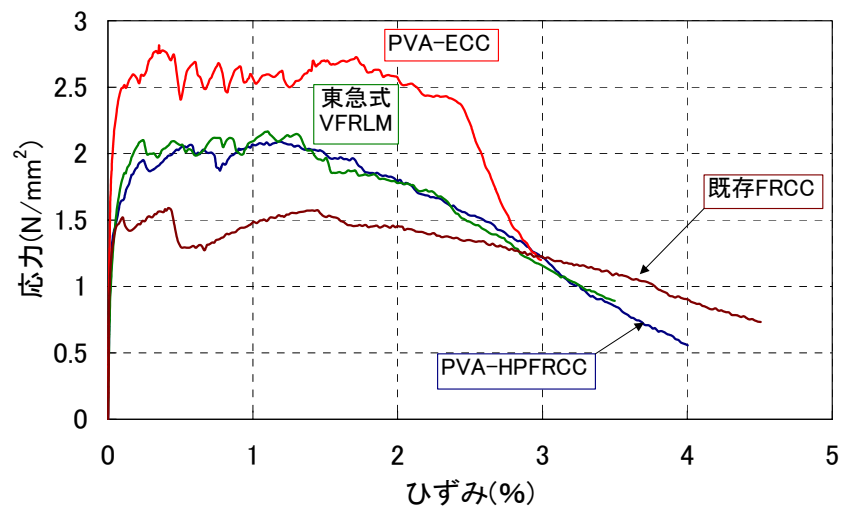


図 - 6 円柱引張試験結果：PVA繊維系

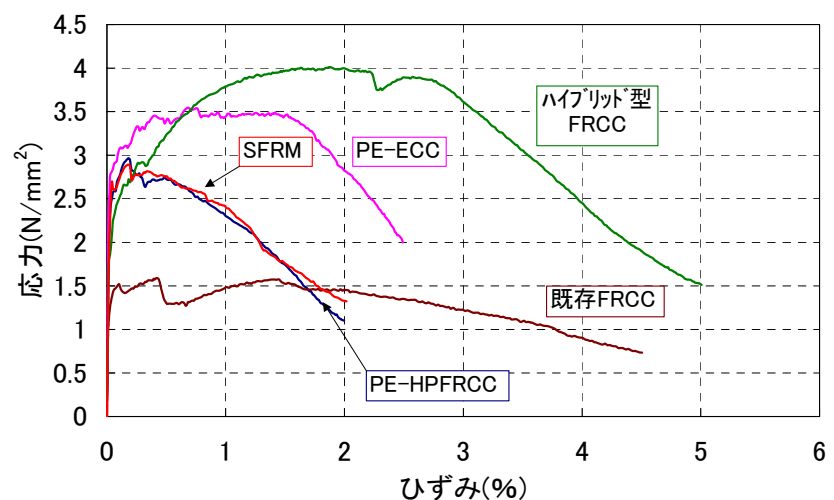


図 - 7 円柱引張試験結果：PE繊維系および鋼繊維系

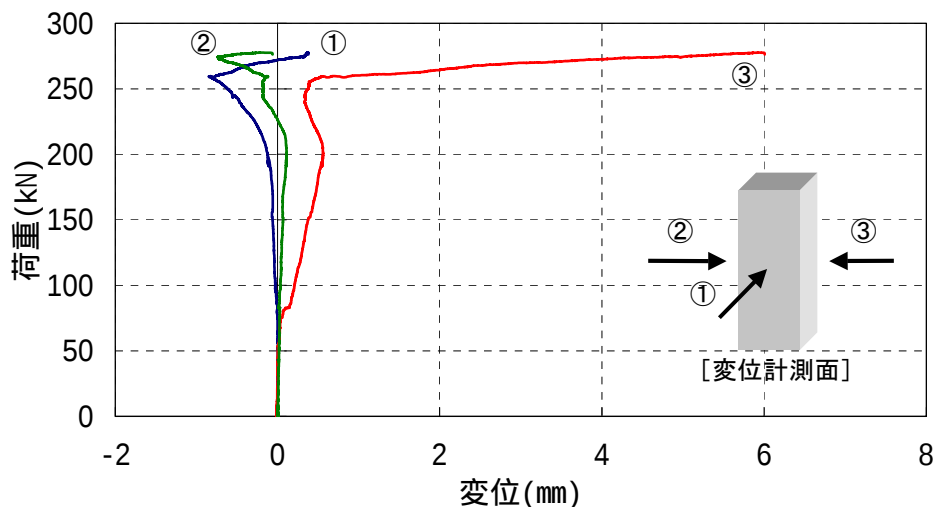


図 - 8 両引き試験結果：鋼繊維系

た。その結果、既に規定あるいは提案されているような試験方法により、ある程度の性能評価が可能であることがわかった。しかし、その適用範囲には注意する必要がある。

性能比較試験全般を通して合成繊維系材料は概ね良好な性能を示しており、引張応力下での靱性の高さが確認された。また、高強度・高剛性で、なおかつ曲げ応力下の靱性に優れる鋼繊維系 DFRCC や、鋼繊維と合成繊維の相互補完により優れた性能を示したハイブリッド型 FRCC などについても、使用目的／用途によっては有望な材料であると評価できる。

4. おわりに

この委員会報告では、平成 13 年度に FS 課題として発足した高靱性セメント複合材料 (DFRCC) 研究委員会の活動の様子を紹介した。

さらに、11 種類の DFRCC を対象として初年度に行った性能比較試験の結果を報告した。その結果、既に規定あるいは提案されているような試験方法を用いれば、適用範囲には注意する

必要があるものの、各種の DFRCC の性能をある程度評価しうることがわかった。性能比較試験全般を通して、合成繊維系材料は概ね良好な性能を示しており、引張応力下で靱性が高いことを確認した。

この委員会では、今後、国際ワークショップ（平成 14 年 10 月、高山）やシンポジウム（平成 15 年 12 月、東京）を開催し、DFRCC の構造利用と性能評価に関する調査研究を積極的に進める予定である。

参考文献

- 1) 佐藤他：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、建築学会論文報告集、No.539、pp.7-12、2001
- 2) Kanda, T. et al. : A New Micromechanical Design Theory for Pseudo Strain Hardening Cementitious Composite, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.125, No.4, pp.373-381, 1999