委員会報告　高靭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成果の概要

六郷恵哲[*1]・福山 洋[*2]・松尾庄二[*3]・金久保利之[*4]・鎌田敏郎[*5]・松本高志[*6]・閑田徹志[*7]・国枝稔[*8]

要旨：ひずみ硬化とマルチプルクラックという極めてユニークな特性を有する高靭性セメント複合材料（DFRCC）について，平成 13 年度に FS 課題として発足した高靭性セメント複合材料研究委員会（JCI-DFRCC 研究委員会）の活動の様子を報告する。また，平成 13 年度に技術の現状調査結果として取りまとめた中間報告「高靭性セメント複合材料を知る・作る・使う」[1)] の内容の抜粋と，本技術の適用と評価のための技術情報を取りまとめた委員会最終報告書[2)] の概要を紹介する。

キーワード：解析，製造施工，高靭性セメント複合材料，耐久性，適用，引張性能試験

1. はじめに

高靭性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会（DFRCC研究委員会）は，平成13年度にFeasibility Study（FS）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，この専門委員会の継続が認められ，活動期間は合計３年間となった。

１年目の活動に基づき，委員会活動の目的をDFRCC技術の普及と利用の促進に定め，材料の製造，材料特性の評価，施工，適用と設計，構造性能，耐久性，解析について，できる限り多くの情報を収集し技術の一般化を図ることとした。その目標のために，委員会活動２年目の平成14年10月には，国際ワークショップを開催して国内外の技術動向を把握し，３年目の平成15年12月には，国内シンポジウム（本シンポジウム）を実施して，国内における最新の技術情報を収集することとした。なお，平成16年５月には委員会成果を広く普及するための技術セミナーを開催することとしている。

本専門委員会において対象とする高靭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HPFRCC（High Performance Fiber Reinforced Cementitous Composites）だけでなく，靭性と強度が大きな Ductal や高靭性FRC（Fiber Reinforced Concrete）を含んでいる。

*1 岐阜大学教授　工学部社会基盤工学科　工博（正会員）
*2 独立行政法人建築研究所　上席研究員　工博（正会員）
*3 鉄建建設（株）技術研究所　主任研究員（正会員）
*4 筑波大学講師　機能工学系　工博（正会員）
*5 岐阜大学助教授　工学部社会基盤工学科　工博（正会員）
*6 東京大学助教授　大学院工学系研究科社会基盤工学専攻　工博（正会員）
*7 鹿島建設（株）技術研究所　主任研究員　工博（正会員）
*8 名古屋大学助教授　大学院工学研究科社会基盤工学専攻　工博（正会員）

ここでは，DFRCC研究委員会の活動の報告を行うとともに，その１年目に行った技術の現状調査に基づく報告書[1)]で提案した高靭性セメント複合材料の定義と，本技術の適用と評価のための技術情報を取りまとめた委員会最終報告書[2)]の概要を紹介する。

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，高靭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し，２～３年目には，高靭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こととした。

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，高靭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。

① 研究情報の収集加工と公開 → 報告書の作成，セミナーの開催，委員会ホームページの整備
② 技術の組織的な現状認識 → 性能比較試験・試験法比較試験・耐久性比較試験の実施
③ 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
④ 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
⑤ 試験方法や評価基準類の案の作成
⑥ 研究者や技術者の交流

本委員会の委員構成を表－１に示す。

表－１　委員会構成（平成 15 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：　金久保利之（筑波大学），鎌田敏郎（岐阜大学），閑田徹志（鹿島建設），松尾庄二（鉄建建設），水田真紀（ドーピー建設工業），松本高志（東京大学），三橋博三（東北大学）
委員：　内田和弘（フジタ），大岡督尚（東急建設），大塚浩司（東北学院大学），片桐誠（太平洋セメント），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），黒田一郎（防衛大学校），栗原哲彦（武蔵工業大学），佐伯竜彦（新潟大学），諏訪田晴彦（国土交通省），高木薫（オーエムプランテック），趙唯堅（大成建設），永井覚（鹿島建設），中村裕（新庄神室産業高等学校），浜田敏裕（クラレ），斎藤忠（クラレ），宮外清貴（倉敷紡績），宮里心一（金沢工業大学），平石剛紀（鹿島建設），藤元安宏（ピーエス三菱），堀井秀之（東京大学），前田徳一（東洋紡績），松崎育弘（東京理科大学），森井直治（デーロス），山田寛次（秋田県立大学），
協力委員：　久田真（土木研究所）

2.2 委員会活動の内容

(1)平成13年度の活動

平成13年度には，下記の活動を行った。

① 中間報告書：

高靭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「高靭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。

② 性能比較試験：

11 種類の高靭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，①の委員会報告に載せた。

③ セミナー：

中間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）において国内セミナー（有料参加者107名）を開催した。

(2)平成14～15年度の活動

平成14年２月に開催された研究委員会において上記の活動が評価され，この専門委員会の継続が認められ，活動期間は合計３年間となった。平成14および15年度には下記の活動を行った。

④ 国際ワークショップ：

高靭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した。全参加者は83名で，そのうち海外からは，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22名の参加があり，国際的な人的ネットワークが構築された。ワークショップでは，V. C. Li教授，H. W. Reinhardt教授，およびA. E. Naaman教授による基調講演３件，JCI-DFRCC委員会報告２件，一般講演23件[3] が行われた後，全体討議が行われた。そこでは，1)力学特性と試験方法，2)耐久性，3)品質管理，4)適用について今後の課題を明示するとともに，国際的なＷＧの設立や情報交換および技術の普及のためのさらなる活動の必要性などが共通認識として確立された[4), 5)]。

⑤ 耐久性比較試験：

高靭性セメント複合材料の鉄筋腐食に対する耐久性を明らかにするための試験を，金沢工業大学にて平成14年および15年に実施した。その内容は，DFRCCのマルチプルクラックと従来のセメント系材料の局所化ひび割れを対象に，塩害促進暴露試験と中性化促進暴露試験を実施し，塩害および中性化による鉄筋腐食速度を調査するものである。この試験結果は⑦のシンポジウムにおいて報告されるとともに，⑧の最終報告書にまとめられている。

⑥ 試験法比較試験：

高靭性セメント複合材料の引張性能評価法の標準化に向けた検討のために，４種類の材料について，圧縮試験，割裂試験，曲げ試験および引張試験を，鹿島建設技術研究所，独立行政法人建築研究所および筑波大学において平成15年上半期に行った。主なパラメータは，試験方法，打設方向，および引張試験の端部固定方法である。これらの試験結果は⑦のシンポジウムにおいて報告され，標準試験方法は⑧の最終報告書に提案されている。

⑦ 国内シンポジウム：

平成15年12月4～5日に，中央大学駿河台記念館（東京都千代田区）において国内シンポジウムを開催する計画を立て，高靭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した。シンポジウムでは，Victor C. Li教授の特別講

表－２　委員会最終報告書目次

1. はじめに
2. 製造施工
   - 材料ごとの製造例・施工例
   - 構成材料および調合／配合例
   - 諸物性（力学性能，耐久性，耐火性など）
3. 引張性能評価法
   - 既往の引張・曲げ試験法
   - 試験法比較のための共通試験
   - 引張性能評価試験法試案
4. 適用
   - 下面増厚工法
   - 表面保護工
   - コンクリート床版の下面底版
   - 高応力建築部材（梁・柱・壁・制振部材）
   - トンネル覆工コンクリートの補修・補強およびスラブ等の断面修復工
   - PC 橋梁

   （各々，適用のアイデア，材料の製造方法，設計方法，施工方法について記述）
5. 耐久性
   - 物質透過性試験
   - 鉄筋腐食試験
6. 解析
   - 曲げ挙動に関する解析および実験
   - せん断挙動に関する解析および実験
7. 今後の展望

写真－1　「ひずみ硬化型高靭性セメント複合材料」の両引き試験供試体の例

演と委員会報告，および25件の論文発表[6] が行われた（有料参加者84名）。

⑧ 委員会最終報告書：

材料の製造，材料の特性評価，施工，適用と設計，構造性能，耐久性，解析について，できる限り多くの情報を収集するとともに，技術の一般化を目指した提案を行い，DFRCC技術の普及と利用の促進に資するために，主として２～３年目の委員会活動の成果を反映させた委員会最終報告書[2] を取りまとめた。最終報告書の目次を表－２に示す。

⑨ 技術セミナー：

委員会最終報告書の内容を広く公開して本技術の普及と使用の促進を図るために，平成16年５月に技術セミナーを実施する。

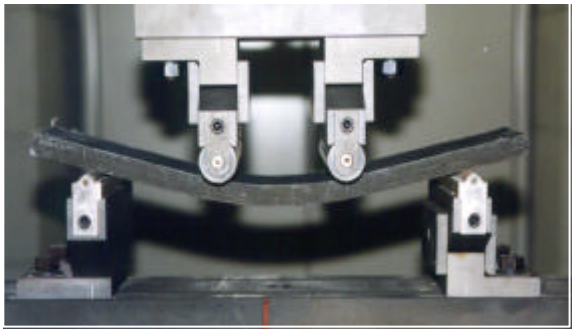
これらの活動を円滑に実施するために，委員会内に下記のWGを設けて活動を進めた。

＜研究WG＞

・製造施工WG（松尾庄二主査，閑田徹志副査）
・引張試験WG（金久保利之主査）
・適用WG（福山洋主査）
・解析WG（松本高志主査）
・耐久性WG（鎌田敏郎主査）
・指針作成WG（製造施工，引張試験，適用の合同WG）

＜運営WG＞

・国際WG（福山洋主査）
・シンポジウムWG（水田真紀主査）
・庶務WG（栗原哲彦主査）



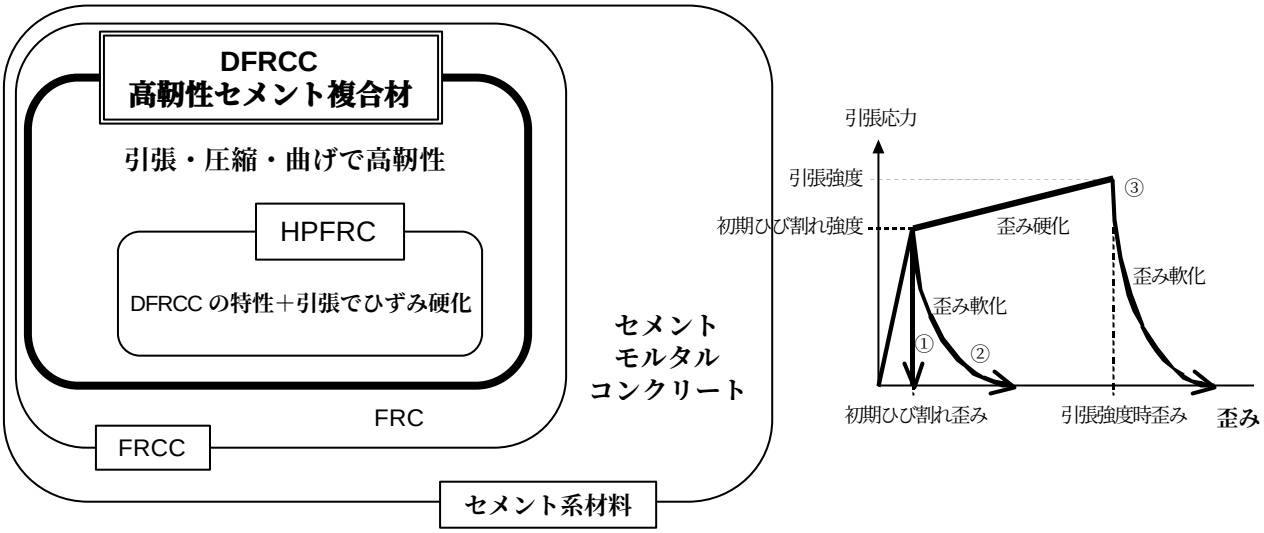
写真－２　DFRCC 薄板の曲げ試験の例

3. 高靭性セメント複合材料の概要

3.1 基本的な特徴

曲げモーメント作用下あるいは引張力作用下において，ひび割れ発生後も応力の低下が無く，みかけのひずみの増加に伴って応力が増加する「ひずみ硬化特性」と，多数の微細ひび割れが分散する「マルチプルクラック特性」を示す「ひずみ硬化型高靭性セメント複合材料」が国内外の少なくとも 10 以上の機関で研究・開発されている。例えば，この種の複合材料の中で代表的な ECC（Engineered Cementitious Composites）と呼ばれる材料は，直径が十～数十ミクロンのポリエチレン繊維やビニロン繊維などの有機繊維や鋼繊維を体積で１～２％程度含有しており，数％のひずみ能力を有するひずみ硬化特性とマルチプルクラッキング特性を示す。さらに，圧縮靭性を改善した材料も実現されている。一例として，鉄筋を ECC の中に埋め込んだ両引き試験供試体のひび割れの様子を写真－1 に示す。

この材料は，写真－２に示すように一般的なコンクリートの脆性的な性質を克服しているこ



図－1　各種材料の分類

表－3　各種材料の特徴

	セメントモルタル	コンクリート FRC	高靭性セメント複合材料（DFRCC）	
			右記以外	HPFRCC
材料挙動	脆性	準脆性	準脆性	延性
ひずみ硬化／軟化	－	ひずみ軟化	ひずみ軟化／硬化	ひずみ硬化
ひび割れ性状（曲げ）*	局所化	局所化	複数	複数
ひび割れ性状（引張）	局所化	局所化	局所化	複数

*：曲げのひび割れ性状は供試体寸法に影響を受ける。ここでは 10×10×40cm の供試体を対象としている。

とから，コンクリート系構造要素の構造性能や耐久性の大幅な向上が期待できる。さらに，この材料は，従来のセメント系材料に代わる高性能な補修用材料，衝撃緩衝材料，鋼材の被覆材など，新しい各種の用途が期待でき，土木建築のコンクリート工学分野に技術革新をもたらす可能性を有している。

3.2 用語の定義

本節では，高靭性セメント複合材料に関する用語の定義と各種高靭性セメント複合材料についての説明を行う。

(1) 高靭性セメント複合材料（DFRCC）

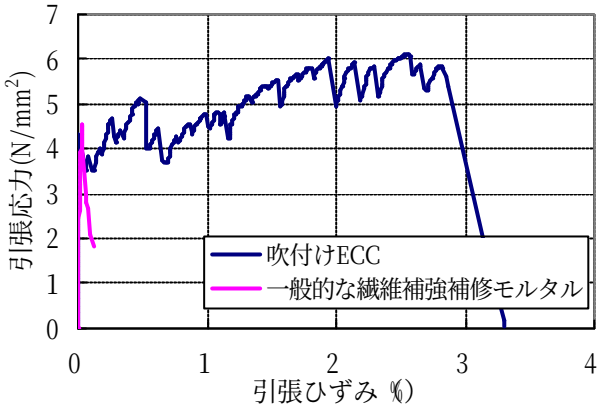
セメント系材料を繊維で補強した複合材料であり，曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示し，曲げ，引張，圧縮破壊時の靭性が大幅に向上した材料。DFRCC のなかには，一軸引張応力下においてさえ複数ひび割れ特性とひずみ硬化特性を示す材料（HPFRCC）があり，金属並の延性と破壊エネルギーが記録されている（図－1 および表－3 を参照）。

(2) 高性能セメント複合材料（HPFRCC）

A. E. Naaman と H. W. Reinhardt [7] により定義された HPFRCC（High Performance Fiber Reinforced Cement Composites）は一軸引張応力下において複数ひび割れ特性とひずみ硬化特性を示すような繊維補強セメント系材料であるとしている。一方，文献 [1]で定義された DFRCC は HPFRCC を包含し，より広範囲の材料を対象としている（図－1 参照）。これは DFRCC の各種応力条件下における高靭性の適用可能性を構造利用において探る視点による。DFRCC の Ductile は材料の破壊靭性のみならず構造物に適用された際の靭性・延性向上をも含めた意味をもつものである。

(3) 繊維補強セメント系材料（FRCC）

セメント系材料を繊維で補強した複合材料全体を指す。DFRCC に加えて，上記の DFRCC に



図－２　PVA 繊維を用いた吹付けの引張特性

写真－３　吹付け施工の様子

該当しない材料，例えば，繊維補強コンクリート（Fiber Reinforced Concrete, FRC）や繊維補強モルタルなども含まれる。

4. 委員会最終報告書[2)]の概要

4.1 製造・施工

『DFRCC は製造・施工の難易度が高い』，すなわち特殊な技術／設備等を必要とする材料であるという見方が，まだ一般には強くある。本委員会では，DFRCCはコンクリート材料の技術者であれば『誰でも製造でき，気軽に使える』材料であることを，必要な情報と共に広く紹介することとし，DFRCC の製造・施工方法について，個別の材料ごとに実例を紹介することとした。

製造・施工方法については，流し込み（打ち込み），吹き付け，押出成形，およびペースト充填の４種類に大別され，さらに要求性能を満足させるために，オートクレーブ養生や蒸気養生を必要とする材料もある。なお，使用される繊維としては，PVA（ポリビニルアルコール）繊維，PE（ポリエチレン）繊維，PP（ポリプロピレン）繊維，および鋼繊維の４種類である。また，品質管理，施工の合理化のためにマトリックス材料（粉体）をプレミックス化されたものも実用に供されている。

最終報告書で紹介した材料は，流し込みタイプでは，PVA 繊維を用いるもの（2 種類），PE 繊維を用いるもの（2 種類），および PE と鋼繊維を混合して用いるもの，繊維補強 RPC で流し込みの後に蒸気養生を行うものでは，鋼繊維または PVA 繊維を用いるもの，吹付けでは，PVA 繊維を用いるものと，PVA 繊維と PE 繊維を混合して用いるもの，押出成形では，PVA 繊維を用いるものと，PP 繊維を用いてオートクレーブ養生をするものと，PVA 繊維マットにモルタルを充填するものである。合計 11 種類の DFRCC 材料の製造，施工，および諸物性が紹介されている。一例として，写真－３および図－２に，PVA 繊維を用いた場合の吹付け施工の様子とその材料の引張特性を示す。

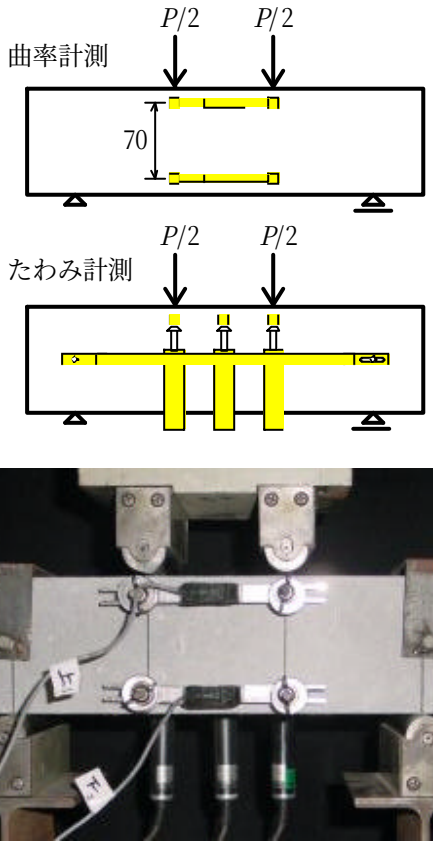
4.2 引張性能評価法

DFRCC の力学的特長は，引張応力下または曲げ応力下で複数ひび割れをともないながら荷重が増大することである。この特長を積極的に利用して何らかの構造を構築しようとしたときに，その特長を適切な方法で表現することは重要である。そこで，本研究委員会では，FSの1年目の活動として行われた種々のDFRCCを対象とした性能比較試験の結果を受け，DFRCCの構造利用を前提として力学性能評価と評価方法（試験方法）の提案を目的とした活動を行う引張試験WGを組織した。本WGでは，数種のDFRCCについて引張試験，曲げ試験による共通試験を行うとともに，引張性能評価とその評価

方法について議論を行い，構造利用のための引張性能評価法試案を提案した。

試案は，適用範囲，供試体，装置，試験方法，計算，報告および解説から構成されている。図－３に供試体と計測方法を示す。試験は100×100×400mm供試体の3等分点曲げ載荷である。なお，試案に書かれた本試験の適用範囲は以下の通りである。「この評価法試案は，たわみ硬化性状（曲げ応力下で初期ひび割れ以降，モーメントを増大させる性状）を示すセメント系材料に適応し，3等分点載荷法による曲げ試験から材料特性の基準値となる引張強度，引張終局歪を算定する。(中略)。なお，本評価法では，一軸引張応力下における引張応力－引張歪関係を得ることはできないので，特に一軸引張で歪軟化性状を示す材料に適用する場合には注意を要する。」

すなわち，本評価法は適切な引張試験によりその一軸引張性能が得られている材料に対して，品質管理のための試験を簡単に行うことができるといった特徴を有するものである。



図－３　提案する引張性能評価試験法

4.3　適用

DFRCCは，一般的なセメント系材料の脆性的な性質を克服していることから，その利用は従来のRC造構造物に対してより高い性能や新たな種類の価値を付与できる可能性を有しており，これが社会の要求と合致すれば性能設計における有用な一つの技術となる。このことは，DFRCCには新しい各種の用途が期待できることを示しており，土木・建築のコンクリート工学分野に技術革新をもたらす可能性をも有しているといえる。

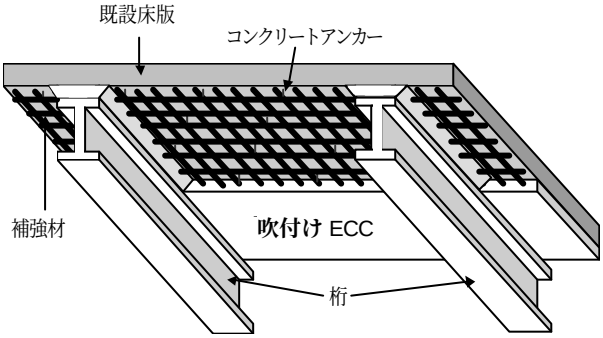
DFRCC の適用のためには，まず，その特徴ある材料特性を如何に構造物の特性向上に関連づけるかを明確にする必要がある。また，構成材料の特性からどのようにして構造要素や構造システムの性能を評価するかという設計の考え方も重要である。さらには，どのようにして材料を製造するか，また，どのように施工するかという情報も，欠かせないものである。委員会最終報告書では，６種類の適用方法と材料の組み合わせについて，「適用のアイデア」，「材料の製造方法」，「設計方法」，「施工方法」に関する現時点での最新情報を取りまとめ，これを提供することにより，DFRCC 技術の適用を促進することを目的としている。ここに示す適用のアイデアは，現時点において有効と思われるDFRCC 適用の例である。今後，さらにさまざまな適用のアイデアが創出され，実際に適用され，実績を積むことにより，本技術が熟成しそれによってより豊かな社会の実現に寄与することを期待したい。

１）PVA-吹付け-ECC の下面増厚工法への適用

DFRCC の引張靱性を直接利用する適用方法として，PVA-ECC 吹付けモルタルを道路橋床版下面に適用し，曲げ耐力を向上させる下面増厚補強への適用が提案されている（図－４）。この工法は，既設の RC 床版の下面に鉄筋等を配置し，コンクリートとの接着性に優れた吹付けECC で増厚することにより，床版などの曲げ耐

力や曲げ剛性の向上を図るものであり，設計においては ECC の引張強度を鉄筋に累加して曲げ耐力を算定することができる。また，床版下面への吹付け施工により流し込みに対しての施工上のメリットも得られる。

この工法ではECCの引張性能を設計に見込むことができるため，増厚厚さをより薄くし，鉄筋などの補強材料の量を少なくすることが可能である。これまで一般的なセメント系補修材料で増厚する場合には，増厚による自重増加の影響が無視できず補強効果があまり期待できないことがあったが，それに対して適用範囲の拡大が期待されている。



図－４　下面増厚工法への適用

２）PVA-ECC の表面保護工への適用

RC 構造物の表面に HPFRCC などを施工し，中性化，凍結融解，アルカリ骨材反応など構造物を劣化させる現象を防止して，構造物の耐久性を向上させることを目的とした利用が考えられている。このような適用を表面保護工という。これは，HPFRCC のマルチプルクラック特性を利用してひび割れ幅が広がることを抑制するもので，有害物質，水分，二酸化炭素のひび割れからの浸入を抑制し鉄筋腐食を遅延する効果などに期待している。

表面保護工の適用部位としては，曲げ疲労によるひび割れ進展が生じる鉄道橋の RC はりや，アルカリ骨材反応によるひび割れ幅の拡大が懸念される部材などへの適用が提案され，一部で実現している。図－５は，アルカリ骨材反応によって顕著なひび割れが生じた重力式コンクリート擁壁を対象に，主として修景の目的で HPFRCC を吹き付け表面を補修した例である。

図－５　表面保護工として ECC を吹き付けた重力式コンクリート擁壁

３）PP-DFRCC パネル（押出成形＋オートクレーブ養生）のコンクリート床版の下面底版への適用

DFRCC に用いられる繊維の量が多く，打込成形では製造できない場合，押出成形によってパネルを製造することが考えられる。しかも押出成形法では，複雑な薄肉断面形状の製品部材を大量に生産できる特徴がある。また，部材長手方向にジベル状の突起を設けることができ，コンクリートとの一体化を図る上で都合がよい。その最も代表的な適用法は，打込型枠として使用する方法である。特に，PP-DFRCC パネルは薄肉で比較的軽量なため，重機を用いない施工が可能となる場合が多い。

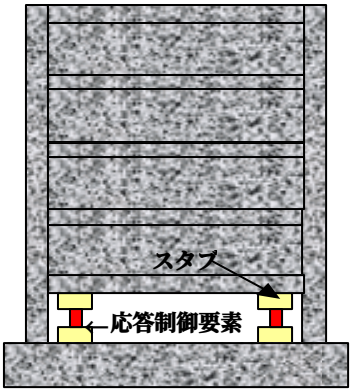
例えば，PP-DFRCC パネルを橋梁のコンクリート床版の下面底版に適用する床版構築方法として使用することが考えられる。PP-DFRCC パネルを橋梁の桁間の下面底版に設置し，コンクリート打設後そのまま存置する。このとき PP-DFRCC パネルは，現場における配筋の作業足場ならびにコンクリート型枠部材として機能する。このとき，PP-DFRCC パネルの有する優れた靭性により，作業足場ならびにコンクリート型枠部材としての強度と安全性を確保出来る。

４）HPFRCC や DFRCC 材料の柱・梁・壁・制振部材等の高応力が働く建築部材への適用

建築物において比較的高い応力が作用する短スパン梁や下層階の柱など，せん断力や軸力負担の厳しい部材のコンクリートの替わりに HPFRCC や DFRCC を使用することにより，部材の脆性的な破壊を防止する方法が提案されている。また，曲げ強度，せん断強度，および変形能の推定方法が提案されている。

また，建築物の長寿命化の観点や兵庫県南部地震の経験から，建築物が耐用年限中に遭遇する大地震等に対しても損傷・劣化を適切に抑制・防止し，地震後も容易な修復により（出来れば修復無しで）建築物の長年にわたる継続使用を保証する技術の開発が求められている。

このような要求に対して，構造物全体の応答変位を低減させ各建物構成部材の損傷を低減させる応答制御要素として，図－６に示すような HPFRCC を用いた短スパンの柱部材が提案されている。これは，高い剛性と強度および靭性能を兼ね備えた構造要素であり，小さな変形より高い応力を負担し効率的に応答制御を行うことができるため，鋼構造のほか鋼構造に比べて比較的剛性の大きな RC 構造物の応答制御に適したものである。しかも，要素の剛性や耐力は，その形状や配筋および HPFRCC の種類により容易に変えられることと，自由な成形性を有するセメント材料であることから，特性や形状が個々の構造物に最適化された応答制御要素を得ることができる。



図－６　応答制御要素

５）PVA 繊維マットのトンネル覆工コンクリートの補修・補強やスラブの断面修復工への適用

本工法は，既設のコンクリート面に PVA 繊維マットを取り付け，その表面に埋め込み型枠として PVA 繊維補強板を固定し，この状態で繊維マット部にモルタルあるいはセメントペーストを充填し固化させることにより，均一で密実な DFRCC を形成し補強材とする方法である。この補強材は，引張力が作用しひび割れが発生した後も PVA 繊維マットにより引張応力が伝達されるため，ひび割れ発生後も急激な引張応力の低下が見られない。また，圧縮強度も普通コンクリートよりも高く，非常に大きな曲げ耐力を示す。さらに，DFRCC 部のみならず埋め込み型枠についても複数ひび割れが発生するため，個々のひび割れ幅を小さく抑えることが可能である。これらの特徴を利用して，トンネル覆工コンクリートの補修・補強やスラブ等の断面修復工へ適用する方法が提案されている。

６）繊維補強 RPC の PC 橋梁への適用

本材料は，200N/mm^2 以上の超高強度を有する上に高張力鋼繊維が配合されているため，鉄筋の配置が不要であり，従来のRC構造物では実現し得ない非常に薄い部材厚が可能である。また，高い耐久性をも併せ持っている。この材料を用いて，スパン50 m の歩道橋「酒田みらい橋」が，山形県酒田市の市街地に建設されている。そのメリットは，薄い部材厚が実現可能，大幅な軽量化が可能（従来のコンクリート橋重量の 1/5 程度），低桁高で長スパンが実現可能，PC 定着部を含み鉄筋は一切使用しないことが可能，ブロックの大型化により製造・架設の効率化が可能などである。

4.4　耐久性

DFRCC における水や塩化物イオンなどの物質透過性と，DFRCC 中での鉄筋腐食に関する既往の知見を整理し，続いて耐久性 WG で行った中性化および塩害に関する基礎実験の結果を

示し，特に DFRCC の物質透過抵抗性や鉄筋腐食抵抗性の観点からの耐久性についてまとめた。その結果，１）普通モルタルではマクロセル卓越型腐食が，DFRCC ではミクロセル卓越型腐食が進行しやすいころ，２）普通モルタルに比較すると，DFRCC では腐食速度が遅いこと，がわかり，実験の範囲内においては，DFRCC の方が普通モルタルに比べて，塩害および中性化に対する抵抗性は優れていることがわかった。

4.5 解析

主として，曲げとせん断性状を対象に，有限要素法解析等の解析と実験結果との比較検討を行い，DFRCC 用解析モデルの提案と，解析によってどの程度現象の説明が可能であるかという検討が行われている。

５. おわりに

委員会最終報告書（Ⅱ）[2)]は，高靭性セメント複合材料を利用するために必要な情報として，１）材料の製造・施工と特性，２）引張性能評価法，３）利用技術と適用のメリットおよび設計法，４）耐久性の向上効果，５）解析技術，を現在までに得られた知見や研究成果などをもとにまとめたものである。また，評価法や設計法については委員会での議論を基に積極的に提案を行った。その意図は，第一に「高靭性セメント複合材料を知って貰うこと」，第二に「多様な高靭性セメント複合材料が製造・施工可能であることを理解して貰うこと」，第三に「ユニークな材料特性を活かした構造利用の方法を紹介し，さまざまな適用の可能性があることを感じ取って貰うこと」，第四に「評価法，耐久性，解析等の技術の現状を理解して貰い，今後の発展を促すこと」である。そして，より多くの技術者にこの材料の適用を豊かに創造して貰い，本技術が多様化・高度化する社会の要求を適切に充足するひとつの技術として一般化されることを大きな目的としている。

今後，高靭性セメント複合材料技術がより発展して，社会の要求が適切に充足されるようになり，豊かな社会の建設に大いに寄与することを切に願うものである。

参考文献

1) 高靭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：高靭性セメント複合材料を知る・作る・使う，日本コンクリート工学協会，2002.1
2) 高靭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（Ⅱ），日本コンクリート工学協会，2004.5
3) Japan Concrete Institute：Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation - (DFRCC 2002), 2002.10
4) 国枝稔：国際情報 Part1， JCI国際ワークショップ「高靭性セメント複合材料の適用と評価（DFRCC-2002）の報告」， コンクリート工学，Vol.41，No.2，pp. 54-55，2003.2
5) Gregor Fischer：国際情報 Part2，Summary of Findings and Recommendations of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)，コンクリート工学，Vol.41，No.2，pp. 54-55，2003.2
6) 日本コンクリート工学協会：高靭性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，2003.12
7) Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W.: Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPFRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC2), pp. 1-23, 1996