

3.1 高靱性セメント複合材料の概要

3.1.1 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「ひずみ硬化型高靱性セメント複合材料」が国内外の多くの機関で研究・開発されてきている。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、圧縮靱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 3.1 に示す。

この材料は、写真 3.2 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。



写真 3.1 「ひずみ硬化型高靱性セメント複合材料」の両引き試験供試体の例

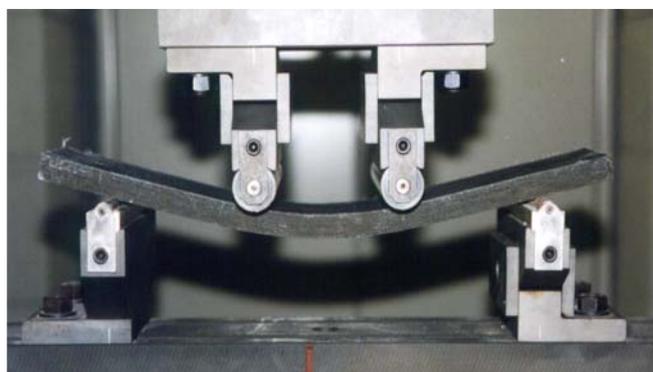


写真 3.2 DFRCC 薄板の曲げ試験の例

3.1.2 材料の分類と用語の定義

ここでは、高靱性セメント複合材料に関する用語の定義と各種高靱性セメント複合材料について紹介する。

(1) 高靱性セメント複合材料 (DFRCC) ^{1), 2)}

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、圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料。DFRCC (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites) 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 3.1, 図 3.2 および表 3.1 を参照)。

(2) 高性能セメント複合材料 (HPFRCC) ³⁾

A. E. Naaman と H. W. Reinhardt 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) および 2) 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 3.1 参照)。これは DFRCC の各種応力条件下における高靱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 は材料の破壊靱性のみならず構造物に適用された際の靱性・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。

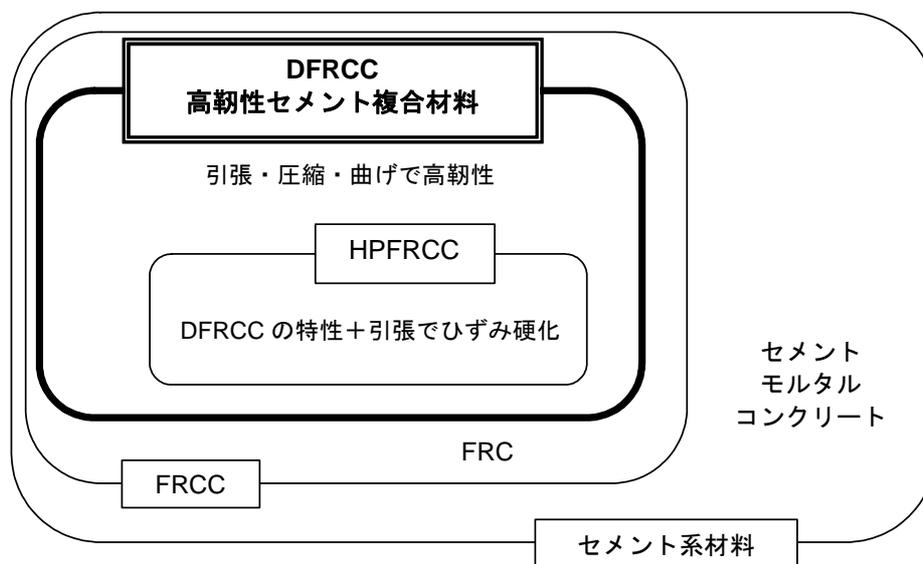


図 3.1 各種材料の分類

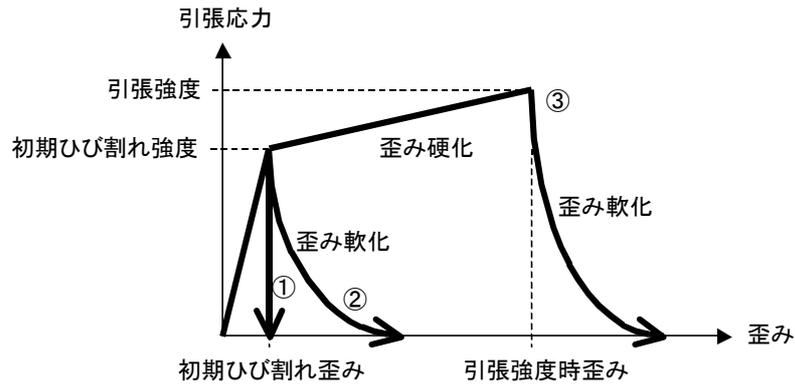


図 3.2 引張応力下の①脆性, ②準脆性, ③延性, ひずみ軟化, ひずみ硬化の違い

表 3.1 各種材料の特徴

	セメント モルタル	コンクリート FRC	高靱性セメント複合材料 (DFRCC)	
			右記以外	
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。

(4) 各種の高靱性セメント複合材料

高靱性セメント複合材料 (DFRCC) は、引張応力条件下における靱性向上にその特徴があり、曲げ引張において靱性を発揮する材料から、一軸引張においてさえ金属並みの靱性と延性を示す材料まで多様である。以下に代表的な各種 DFRCC について説明する。

1) ECC (Engineered Cementitious Composite)

ミシガン大学の Victor C. Li により開発された材料。その最大の特徴は、一軸引張応力下においてひずみ硬化を示し、微細で高密度の複数ひび割れを形成することにより最大引張ひずみが 8% にも達するという、極めて高靱性で延性な材料挙動である。ECC はマイクロメカニクスと破壊力学を設計原理としており、材料挙動の予測と設計の双方向が可能である。その特性を活かした適用例としては、耐震エネルギー吸収デバイス、補修・補強用材料 (断面修復もしくは増厚)、鋼材被覆材料、などがある⁴⁾。

2) SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete), SIMCON (Slurry Infiltrated Mat Concrete)

SIFCON は D. R. Lankard により 1984 年に提案された材料で、鋼繊維を予め型枠内に配置したところへセメントスラリーを浸透させることにより製造されるため、繊維体積混入量は最大で 20% を達成することも可能である。多量の繊維による拘束効果から圧縮強度は 210MPa に達し、またその架橋効果により引張ではひずみ硬化挙動を示すものもある。適用例としては、耐震・耐爆構造物、補修・補強用材料、プレキャスト構造物、などがあげられる。SIMCON は、鋼繊維の代わりに繊維マットを用いる⁵⁾。

3) 繊維補強 RPC (Reactive Powder Concrete)

繊維補強 RPC は反応性粉体コンクリートの概念から生まれた無機系複合材料である。RPC は反応性粉体を利用した材料であり、最密充填理論に基づいて開発されたセメント系マトリックスに金属繊維を混入した超高強度+高靱性という新しい概念の下に 1994 年に P. Richard により開発された。その特性は、超高強度(圧縮 240 MPa, 曲げ 45 MPa), 高耐久性(凍結融解抵抗性指数 100), 流動性(フロー値 250 mm) であり、適用例としては、歩道橋, 薄肉軽量防音パネル, 護岸壁用アンカープレートなどがある⁶⁾。

3.1.3 高靱性セメント複合材料の製造・施工

「DFRCC は製造・施工の難易度が高い」、すなわち特殊な技術・設備など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が、DFRCC はコンクリート材料の技術者であれば「誰でも製造でき使える」材料であるといえる。最近では、プレキャスト工場などのプラントにおける実機での製造が可能となってきている。

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 種類が代表的である。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。

これまでに国内で開発された材料としては, 流し込みタイプでは, PVA 繊維を用いるもの PE 繊維を用いるもの, 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, 吹き付けでは, 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などがある。一例として, 写真 3.3 および図 3.3 に, PVA 繊維を用いた場合の吹き付け施工の様子とその材料の引張特性を示す。

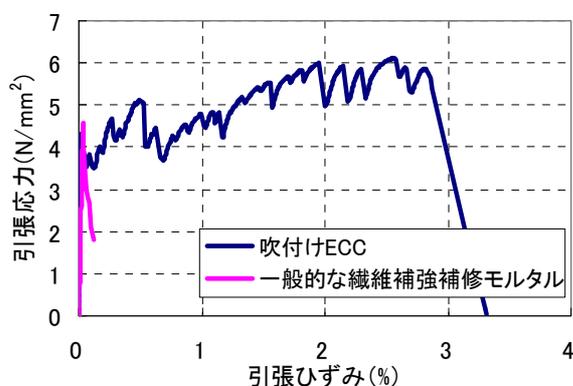


図 3.3 PVA 繊維を用いた吹き付けの引張特性



写真 3.3 吹き付け施工の様子

3.1.4 高靱性セメント複合材料の適用

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。

ここでは、現時点において材料の特徴を活かす DFRCC の有効な適用の例を土木の事例も含めて示す。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 3.4）。この工法は、既設の RC 床版の下面に鉄筋などを配置し、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。

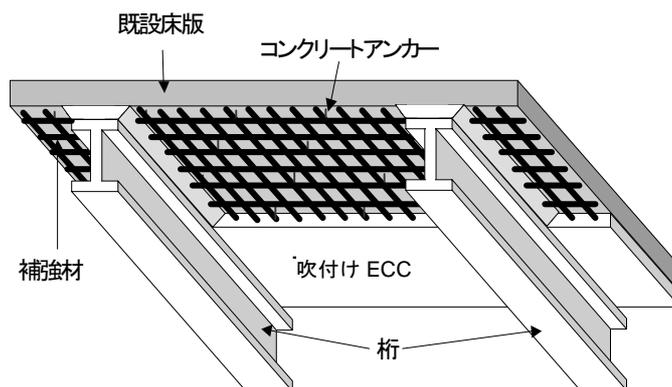


図 3.4 下面増厚工法への適用

(2) PVA-ECC の表面保護工への適用

RC 構造物の表面に HPRCC 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、HPRCC 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 梁や、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 3.5 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 3.5 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（図 3.6）。

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靱性により、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。



図 3.6 橋梁のコンクリート床版の下面底版に適用される PP-DFRCC パネル

(4) HPFRCC や DFRCC の柱・梁・壁・制振部材など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代わりに 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などに対しても損傷・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 3.7 および図 3.8 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靱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。

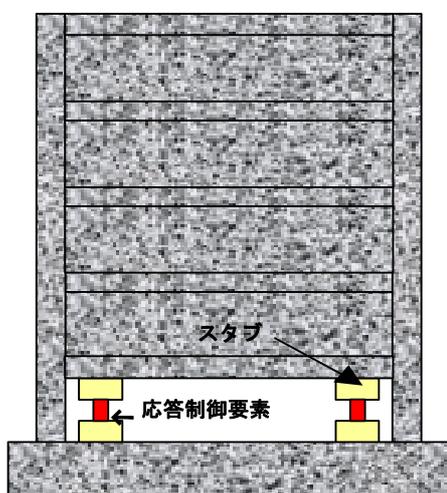


図 3.7 応答制御要素

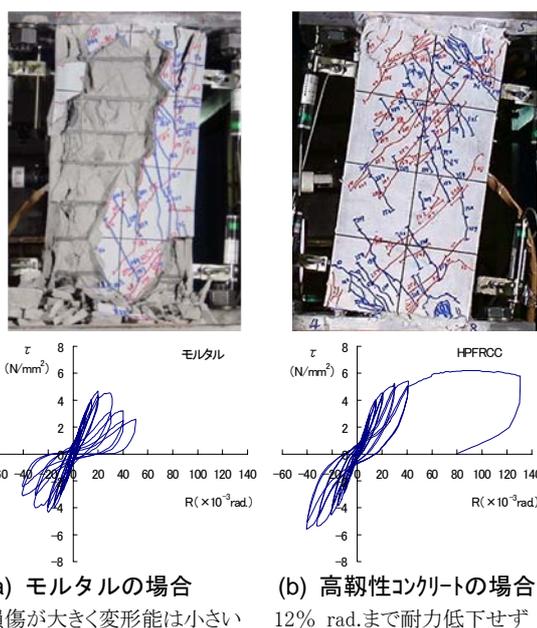


図 3.8 HPFRCC 応答制御要素の
水平加力実験結果

(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・補強やスラブなどの断面修復工へ適用する方法が提案されている（図 3.9）。



図 3.9 トンネル覆工コンクリートの補修・補強に用いる PVA 繊維マット

(6) 繊維補強 RPC の PC 橋梁への適用

本材料は、 $200\text{N}/\text{mm}^2$ 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 50m 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（図 3.10）。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。



図 3.10 繊維補強 RPC を用いた PC 橋梁（酒田みらい橋）

3.1.5 高靱性セメント複合材料の特長を活かした部材性能向上の可能性とそのメカニズム

DFRCC や HPCRCC の利用による構造性能の向上は、基本的にひび割れ間で力が伝達されることによる次の効果により得られる。

- a) 曲げ・せん断・付着ひび割れや圧縮に起因する内部の微細ひび割れにおける、ひび割れ発生 の遅延（強度の向上）やひび割れ開口変位の低減

さらにこの効果は、下記のようなメカニズムにより構造部材の性能の向上につながると考えられる。

- b) ひび割れ間での力の伝達による、ひび割れたコンクリート片の剥落の防止
- c) 曲げやせん断ひび割れの開口変位の低減による鉄筋腐食の抑制
- d) 曲げやせん断ひび割れの開口変位の低減による骨材のかみ合い機構の向上（ひび割れ幅の拡大に伴うせん断剛性低下の抑制）と、それによる部材せん断強度の向上
- e) 付着ひび割れの開口変位の低減による鉄筋とコンクリート間の応力伝達性能の劣化（付着劣化）の抑制と、それによる定着強度や部材の付着割裂耐力の向上、ならびに部材変形能の向上
- f) 圧縮時にコンクリート内部に発生する微細ひび割れに起因する脆性分離破壊の抑制による圧縮靱性の向上（横補強筋によるコンクリートの横拘束効果と同様な現象）や、ひび割れコンクリートの圧縮強度劣化特性の改善

すなわち、a) に起因する b) ～f) の特性により、部材の脆性的な破壊性状の緩和や、破壊耐力の向上、ひび割れ幅の減少による耐久性の向上などが期待できる。

また、繊維を用いることの効果は、横補強筋の働きを助けることにより得られることも考えられる。RC 部材では、横補強筋の降伏がいろいろなタイプの破壊（せん断破壊、付着割裂破壊、圧縮破壊）を引き起こす原因となる場合が多いが、繊維が引張力を負担することにより横補強筋のひずみは繊維のない場合よりも小さくなるためその降伏も遅れ、結果として部材の脆性破壊の発生を遅らせることが期待できる。例えば、曲げ降伏する RC 柱部材では、主筋降伏後も部材の斜め圧縮力によりコンクリートの横方向への膨張が生じるため、部材降伏以降はせん断力が増えな

いにも関わらず、横補強筋のひずみが増える。このような横補強筋によるコンクリートの拘束効果は横補強筋が弾性範囲であれば大きいですが、降伏すると横方向への膨張を押さえる補強筋の剛性が小さくなるためほとんど期待できない。そのため、部材が降伏するときの横補強筋のひずみを小さくできれば、その後のコンクリートの拘束に対する余裕ができ、結果として部材の靱性能が向上する。

性能設計においては安全性、修復性、使用性、耐久性といった基本的な各要求性能ごとに、高靱性セメント複合材料を適用する目的と利点を明確にする必要がある。例えば以下のようなことが考えられる。

- i) 安全性の評価では、人命に直接危険を及ぼすような破壊を適切に防止することが求められるため、安全性能の向上にはDFRCCの利用による前述のような部材耐力や変形能の向上が有効である。
- ii) 修復性評価では、修復コストの低減のために部材の損傷を許容範囲内に抑制することが求められる。修復は部材が当初保有していた安全性、使用性、耐久性などが低下した場合に必要となるものであるため、どれくらいの損傷でどの性能がどのくらい低下するのかを把握する必要がある。さらにその上で、修復の容易性を勘案して許容される損傷の程度を設定する必要がある。一般に、安全性の低下は、構造物や部材の耐力や変形能、あるいはエネルギー吸収能の低下に起因するため、DFRCCの利用により横補強筋の降伏を遅らせるといった損傷の低減効果が期待できる。また、使用性や耐久性の低下は、ある外乱が作用した後の残留変形や残留ひび割れの増大に起因するため、DFRCCの利用によるひび割れ幅の抑制やそれに伴う変形の抑制が有効である。
- iii) 使用性や耐久性の評価では、構造物に起因する機能障害や感覚障害の排除が求められるため、DFRCCの利用による乾燥収縮ひび割れや曲げひび割れなどの幅の抑制が有効である。

【参考文献】

- 1) 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：高靱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報告書（Ⅱ），日本コンクリート工学協会，2004.5
- 3) 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
- 4) Li, V. C.: From Micromechanics to Structural Engineering, The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, J. Struct. Mech. Earthquake Eng., Japan Society of Civil Engineers, Vol.10, No.2, pp. 37-48, 1993. 7
- 5) Reinhardt, H. W. and Fritz, C. : Optimization of SIFCON Mix, Fibre Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments, pp. 11-20, 1989
- 6) 鵜澤正美・山田一夫：RPCを用いた超高強度・高じん性コンクリートの開発動向，コンクリート工学，Vol. 39, No. 2, pp. 53-56, 2001