

委員会報告 繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法研究委員会

金子 佳生^{*1}・国枝 稔^{*2}・金久保 利之^{*3}・栗橋 祐介^{*4}

要旨：繊維補強セメント系複合材料においては、材料設計と構造設計の要素を融合させることで、構造物に付加価値を見い出せるにも関わらず、両者を融合（シームレス化）した合理的な設計法については十分に検討されていないのが現状である。本研究委員会では、長期性能設計の概念を取り入れることで、より繊維補強セメント系複合材料の優位性が発揮されることを念頭におき、(1)新しい利用法 WG, (2)性能評価 WG, (3)環境対応 WG の3つを設置し、繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法の提案を行った。

キーワード：繊維補強セメント系複合材料、長期性能設計、材料・構造のシームレス化、ひび割れ幅

1. はじめに

1970年代に鋼繊維を用いた短繊維補強コンクリートの技術が導入され、約40年が経過したところである。短繊維補強セメント系複合材料は、いうまでもなくコンクリートに短繊維を混入した材料であり、コンクリートにひび割れが発生しても、繊維の架橋によって外力に抵抗することができることから、通常のコンクリートに比べれば曲げ強度や靱性を飛躍的に向上させることが可能である。特に、繊維の種類や混入量を自由に設定できることから、構造物あるいは部材の要求性能にあわせて自由に材料設計ができる面白い材料である。言い換えれば、材料・構造のシームレス化が実現でき、コンクリート構造物に要求される性能を明確にしたうえで材料開発を行えば、材料の持ち味を活かした適用が発掘できる可能性がある。

公益社団法人日本コンクリート工学会では、2001～2003にかけて、「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（委員長：六郷恵哲岐阜大教授）」が活動を行い、高靱性セメント系複合材料という新しい材料の普及に資する活動が行われた¹⁾。

本研究委員会は、繊維補強セメント系複合材料の材料開発および適用の変遷を踏まえ、更なる利用拡大に資する情報提供を行うことを目的に発足し、3つのWGを設置して2年間の活動を行った。表-1に委員会の構成を示す。

WG1（新しい利用法WG 主査：栗橋）では、過去10年間に発表された文献調査をとおして、新しい利用法を模索、提案した。

WG2（ひび割れ幅評価WG 主査：金久保）では、繊維補強セメント系複合材料の優位性の一つとして、ひび割れ幅低減に着目し、過去のひび割れ幅の評価方法について調査するとともに、当該材料に関するひび割れ幅の

評価方法のあり方について提言した。

WG3（環境対応WG 主査：国枝）では、繊維補強セメント系複合材料のライフスパン全体における環境負荷について考える必要性を示し、まずはLCCO₂に関する議論、環境負荷低減という観点からの新しい利用法の提案、繊維補強コンクリートのリサイクル性について検討した。

表-1 委員構成

委員長	金子 佳生	京都大学大学院
幹事長	国枝 稔	名古屋大学大学院
幹事	金久保 利之	筑波大学大学院
幹事	栗橋 祐介	室蘭工業大学大学院
	浅井 貴幸	(株)高速道路総合技術研究所
	網野 貴彦	東亜建設工業(株)
	石原 誠一郎	(株)浅沼組
	磯 雅人	福井大学
	伊藤 始	富山県立大学
	岩波 光保	(独)港湾空港技術研究所
	小川 敦久	(株)クラレ
	菊田 貴恒	東北大学大学院
	斯波 明宏	三井住友建設(株)
	塩永 亮介	(株)IHI
	諏訪田 晴彦	国土技術政策総合研究所
	瀬古 繁喜	愛知工業大学
	長井 宏平	東京大学大学院
	永井 覚	鹿島建設(株)
	平田 隆祥	(株)大林組
	堀口 賢一	大成建設(株)
	前田 徳一	東洋紡績(株)
	前田 信之	清水建設(株)
	室賀 陽一郎	萩原工業(株)
	渡辺 健	(公財)鉄道総合技術研究所
	山野辺 宏治	清水建設(株)
通信委員	佐藤 裕一	京都大学大学院
オブザーバ	浅野 浩平	筑波大学博士課程
事務局	井上 和久	日本コンクリート工学会

*1 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 Ph. D. (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*3 筑波大学大学院 システム情報工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域講師 博(工) (正会員)

いずれのWGにおいても、構造物の「長期性能」を向上させる上で、繊維補強セメント系複合材料の優位性をどの部分で発揮させるかという観点から検討した点に特徴がある。ここでは、各WGの活動の概要について紹介する。

2. 構造物の長期性能向上に向けた繊維補強セメント系複合材料の可能性 (WG1)

構造物の長期性能向上に向けた繊維補強セメント系複合材料(FRCC)の可能性を探るため、現在までの研究開発や実用化の動向を調査するとともに、新しい利用法を開発するためのアプローチを4つの観点から提示した。また、最後にコンクリート構造物の長期性能を確保するためにFRCCの適用が必須である利用法を提示した。

2.1 研究開発および実用化が進められている新しい利用法

ここでは、コンクリート構造物の長期性能向上を目的に、繊維補強セメント系複合材料を利用した研究開発や実用化に関する文献調査の概要を示す。調査対象とした文献は、2000年～2011年におけるコンクリート工学論文集、コンクリート工学年次論文集、コンクリート工学(雑誌・テクニカルレポート)、土木学会論文集、日本建築学会構造系論文集、構造工学論文集、ACI Materials Journal, ACI Structural Journal であり、全646編である。また、適用事例については本委員会委員およびその関係者からのヒアリングによりとりまとめた。これらの文献や適用事例について、以下の事項を一覧にして整理した。

- 1) 対象構造物 (新設 or 既設)
- 2) 使用材料(繊維の種類)
- 3) 適用部位

- 4) 研究目的
- 5) 検討方法
- 6) 長期性能の検討
- 7) 既存の設計指針, 評価法
- 8) 用いた標準試験方法等
- 9) 提案した評価法
- 10) メリット
- 11) 今後の検討項目
- 12) 引用文献

なお、これらのデータは本研究委員会報告書添付のCD-ROMに、建築(材料・構造)、土木(材料・構造)に分類して収録している。

また、これらの論文について、新設構造物への利用法としては、剥落防止、ひび割れ防止、耐荷性向上、耐震性向上、疲労耐久性向上、耐衝撃性向上、耐爆性向上、耐火性向上、施工の省力化および長期耐久性の10分野に、また既設構造物への利用法としては、剥落防止、断面修復、耐荷性向上、耐震性向上、疲労耐久性向上の5分野に分類し、それぞれ使用されているFRCCの種類、適用部位、研究の動向、今後の検討課題等について分析した。表-2には、各分野における年ごとの論文数を示している。

表より、新設構造物に対する利用法としては、耐荷性向上を目的としたものが最も多く、現在においても数多く研究が進められていることが分かる。特に、土木・構造分野において、梁部材のせん断耐力や版部材の押抜きせん断耐力の向上を目的としたものが多い傾向にあった。

次に多いのは施工の省力化である。主な利用方法は、FRCCの適用により部材の耐荷性や耐震性を向上させて断面寸法を縮小しその軽量化を図る方法や、軽量コン

表-2 研究開発および実用化が進められている新しい利用法に関する文献数

掲載年		'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	計
新設	剥落防止				2	1	1						1	5
	ひび割れ防止	2	1	4	5	5	4	6	8	4	2	5	3	49
	耐荷性向上	3	4	1	4	9	7	16	19	14	10	18	18	123
	耐震性向上	3	2	10	6	3	8	10	9	8	8	6	1	74
	疲労耐久性向上	2		2	1		1		1		1	2	3	13
	耐衝撃性向上		2	2		1				1		1	3	10
	耐爆性向上								2	1		4		7
	耐火性向上	1	2	1	1	3	3	4	10	5	4	4	1	39
	施工の省力化	1	3	6	5	14	7	7	6	14	5	6	3	77
	長期耐久性				1		1	5	5	3	4	5	2	26
既設	剥落防止				3	1	1						1	6
	補修材		6	2	1		1		1	1	2		1	15
	耐荷性向上					3		3	3	5	5	2	3	24
	耐震性向上			1	2	5	3		5	2	6	3	2	29
	施工の省力化								3	1	2	3		9
疲労耐久性向上			1							1	4		6	

クリート製 RC/PC 部材のせん断耐力不足分を FRCC で補い部材の軽量化を実現する方法などである。従って、これらの利用法は、部材の耐荷性向上や耐震性向上を拠り所とする施工の省力化となる。その他、埋設型枠および各種接合部に用いる方法なども見られた。

また、耐震性向上を目的とした研究も多く、これは主に建築・構造の分野の割合が高い傾向にあった。柱、梁-柱接合部および境界梁への適用の他、鉄骨と FRCC のみで構成される CES (Concrete Encased Steel) 合成構造に関する事例も多い。また、長期耐久性に関しても、塩害、凍害、中性化、寸法安定性、耐摩耗性など積極的に検討が進められている。最近では、FRCC のひび割れ抑制効果をもたらす自己治癒性能に関する研究も進められている。

一方、既設構造物に関する利用法としては、耐震性向上を目的としたものが最も多い。適用方法は、FRCC を付加柱、耐震壁および構造物支持部等に制震デバイスとして用いる方法や CES 合成構造を付加柱等に用いる方法がある。次に多いのは耐荷性向上に関するものであり、補修補強用吹付けコンクリート、増厚コンクリートおよびあと施工パネル等への適用が見られた。

その他、各分野の適用方法については、委員会報告書を参照されたい。

2.2 新しい利用法開発の道標

繊維補強セメント系複合材料 (FRCC) の新しい利用法の創出や、その適用範囲の拡大のためには、これまでの研究を継続してデータを蓄積し、その設計施工法を確立する方法の他、1) FRCC の利用法に対する新しい概念や 2) 既存材料の改良を含む新しい材料の開発、についても検討する必要があるものと考えられる。

FRCC の利用法に関する新しい概念については、本委員会では長期性能設計の概念の適用と環境負荷の低減に着目した。また、既存材料の改良を含む新しい材料の開発については、既存の FRCC が抱える問題解決と新しい FRCC の開発のアプローチについて整理することとした。表-3 には、各アプローチにおける着目点の一覧を示している。以下、これらの概要について紹介する。

(1) 時間軸を考慮した長期性能設計の観点からのアプローチ

建築の分野において、長期性能設計とは、構造物が供用期間中、設定した使用性・安全性や耐久性に関する品質や性能を確保できるようにする設計と定義されている。また、土木の分野においても、要求性能としての耐久性は、設計耐用期間にわたり各種の性能を満足することとしている。

さらに、これらの性能設計の中に時間軸を取り入れることにより、連続的な時間軸に対する性能評価（ヘルス

表-3 新しい利用法開発の道標

新しい利用法開発のアプローチ	着目点
長期性能設計の観点から	長期性能設計の概念
環境負荷低減の観点から	メンテナンスフリーの半永久的構造物
	補修・補強を伴う半永久的構造物
	断面のスリム化
	LCCO ₂ 評価
問題解決の観点から	エコ材料
	品質
	経済性
新材料開発の観点から	法規制
	新しい繊維材料
	新しい設計思想の材料
	既存材料の改良

モニタリング) をベースに、構造物の長寿命化や維持管理に関する社会的な動向を考慮しながら管理していくことが可能となるため、極めて合理的な設計が可能になるものと考えられる。

一方、FRCC は、ひび割れ発生後において、ひび割れ開口抑制効果を期待できることから、ひび割れ発生後の引張応力は徐々に増加もしくは減少する性状を示す。このように、FRCC は通常のコンクリートやモルタルと異なり、ポストピークの挙動が緩やかであるため、ひび割れ幅の経時変化を比較的容易に推定可能であると推察される。FRCC を用いた各種構造物の設計において、推定されたひび割れ幅を拠り所とした長期性能設計の概念を適用することにより、FRCC の利点を最大限に活用した構造設計が可能になるものと考えられる。

現在のところ、文献 2) においてその概念が述べられているに留まっており、今後は具体的な長期性能の評価法について検討する必要がある。特に、ひび割れ幅の経時変化の推定が重要となるため、本研究委員会 WG2 の成果をきっかけとして、さらなる研究が推進されることを期待する。

(2) 環境負荷低減の観点からのアプローチ

FRCC は、ひび割れ発生後においても、繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制されるため、高い靱性能を有していることを特徴としている。その反面、構造物解体時に必要とするエネルギーは通常のコンクリートよりも大きく、環境負荷も大きくなることが予想される。一方で、FRCC の力学的特性および耐久性を向上させることにより半永久的に供用可能な構造物として設計することも可能であるものと考えられる。具体的には、メン

テナンスフリーもしくは補修・補強を伴う半永久的構造物として設計する方法が考えられる。

また、FRCC の適用による上部工の軽量化に伴う下部工や基礎工のスリム化により、コンクリート使用量が低減され、セメント製造時に排出される CO₂ 量を抑制することも可能である。さらに、FRCC を再生材料や廃棄物混合セメント等で構成することによっても環境負荷を低減することが可能であるものと考えられる。

(3) 問題解決の観点からのアプローチ

2.1 節で研究開発および実用化が進められている新しい利用法を紹介しているが、その実用化については十分に推進されていないのが現状である。主要因の1つとして、品質の安定性の問題が挙げられる。FRCC は、繊維の分散性や配向性が場合によっては大きくばらつき、力学特性に直接的な影響を及ぼすことが少なくない。解決策としては、分散・配向性の安定方法の開発、施工上の工夫などが挙げられるが、第1歩としてコンクリート2次製品についてその技術を確認することが必要であるものと考えられる。

2つめは、経済性の問題である。この種の問題の要因の大半は、FRCC 適用による初期コストの増加である。ただし、既にこの問題を解決した事例は、シールドトンネルセグメントへの適用³⁾などいくつか報告されている。従って、初期の費用対効果をもたらす適用方法を探ることで、新たな利用法を発見することができるものと考えられる。勿論、今後は、初期コストのみならず FRCC の有する長期性能を活かし、ライフサイクルコスト (LCC) の観点から費用対効果を検討する設計思想を押し広めることも重要である。

また、FRCC には材料性能が要求性能よりも遙かに高く、このことがコスト高の要因となり実用化に至らないケースも見受けられる。従って、構造物の要求性能に応じた材料設計法を確立することにより、余剰性能を極力抑えた配合設計が可能となり、経済性の問題が解決されることも考えられる。

最後に挙げられるのが、法規制の問題である。特に建築物の場合には、JIS に適合しない FRCC のような材料を用いる場合には、建築物ごとに個別の大臣認定を受ける必要がある。解決策としては、本委員会のような研究活動により、FRCC のメリットを提唱し続けるとともに、材料と構造および施工の流れが一貫したシームレスな設計施工法を確立することが重要であるものと考えられる。

(4) 新材料開発の観点からのアプローチ

これまで数多くの FRCC が開発されているが、さらに費用対効果の高い材料を提案することで、新たな適用方法を創出することができるものと考えられる。ここでは、3つの着目点とその現状について紹介する。

1つめは、新しい繊維材料の適用である。今後の技術開発により従来よりも力学性能、耐久性能等に優れる繊維材料が開発されることも考えられる。また最近では、鉄の切削くず（スチールチップと呼ぶ）を適用することにより、経済的かつ高性能な FRCC を製造可能であることなどが明らかになっている。

2つめは、新しい設計思想に基づく材料の開発である。具体的には、既に検討されている事例もいくつか見受けられるが、繊維のハイブリッド化である。FRCC は混入する繊維の特性や形状寸法を変化させることで力学特性が大きく変化し、かつ2種類以上の繊維を組み合わせることで適用することにより、さらにその性能を変化させることが可能となる。また、最近では、超高強度でひずみ硬化特性を有するモルタルの開発事例も報告されており、今後も新しい設計思想に基づく材料開発の推進が期待される。

3つ目は、既存の FRCC の改良である。例えば、UFC は従来、熱養生が必要でかつその収縮量が多いことから、その適用範囲は無筋部材かもしくはポストテンション PC 部材のみに限定されていた。しかしながら、最近では、熱養生が不要でかつ収縮量を補償可能な UFC が開発されている。このように、従来の FRCC の改良により新しい利用方法を創出することも可能であるものと考えられる。

以上、本節では各アプローチの概要について述べてきたが、より詳細な検討内容については委員会報告書を参照して頂きたい。

2.3 繊維補強セメント系複合材料の必須適用部位の提言

前節までの報告では、FRCC の有する種々のメリットや、FRCC の利用法を開発するためのアプローチについて述べてきた。一方、コンクリート構造物の現状に目を移すと、製造、運搬、施工、養生および供用のプロセスで数多くの問題を抱えているのが現状である。特に、供用後における第三者影響度の高い問題については、FRCC の適用等により既に対策されている事例も多いが、未対策箇所も多く存在する。

そこで、本節では FRCC の適用が必須であるものと判断される部位やその利用法について述べる。

(1) コンクリート片の剥落防止

1999 年以降続出したコンクリート片の剥落事故以来、数多くのコンクリート構造物に剥落防止対策が施されるようになってきた。しかしながら、地方自治体や構造物管理者によっては、未だ十分な対策が講じられておらず、ガイドライン等も整備されていないのが現状である。

従って、コンクリート片の剥落防止に関しては、新設構造物への対処方法や維持管理方法を整備することが重要である。特に FRCC の適用はコンクリート片の剥落

防止に極めて有効であることから、トンネル、高架橋、ロックシェッド等の第3者被害の可能性が高いコンクリート構造物に対しては、FRCCの適用を義務化することを提案したい。

(2) 脆性破壊の防止

橋梁の維持管理は、その長寿命化によるLCCの節減のみならず、車両等の安全な走行に必須な作業である。しかしながら、最近では、床版の疲労に伴う押抜きせん断破壊による陥没等の事例が増加しつつある。また、建築物の現状を見ると、近年の高層化により超高強度コンクリートの利用が推進される傾向にある。ただし、高強度コンクリートは圧縮破壊時に極めて脆的な破壊性状を示すことに十分に留意する必要がある。

これらの脆的な破壊の抑制に対してFRCCの適用は極めて有効であることから、この種の破壊が想定される部位についてはFRCCの適用を義務化することを提言したい。

3. ひび割れ幅の評価 (WG2)

繊維補強セメント系複合材料では、マトリックスにひび割れが発生した後も繊維がひび割れを架橋し、応力を伝達するため、繊維が混入されていないマトリックスと比較してひび割れ幅の拡大が抑制される。本章では、繊維補強セメント系複合材料のひび割れ幅の定量評価を試み、関連する情報と利用拡大への情報の整理を行う。

3.1 コンクリート部材における長期性能設計とひび割れ幅評価

構造物において、材料の経年劣化とともに長期的には構造耐力上の経年劣化も予想される。本報告では、材料特性と構造性能の関係をシームレスに設計可能となる新たな設計法として、繊維補強セメント系材料の適用による「長期性能設計」の考え方を図-1に提案する^{2),4)}。ここでは、時間軸を横軸として供用年数を設定し、構造物の構造性能を定量化するための性能指標を縦軸に設定する。図中の性能指標は、構造物の構造性能を評価する尺

度を示す指標、要求長期性能は、供用期間内で継続して確保が要求される長期性能、目標保有性能は、設定した供用期間中の要求長期性能を満足させるために、最低限必要な長期性能の目標値と定義する。実構造物の構造性能が目標保有性能を下回ると、供用期間内では要求長期性能を確保できないことを示している。通常の構造物では、目標保有性能を満足させるために補修補強が必要となる。繊維補強により構造性能の劣化速度は緩慢になることや、短期的外乱による損傷程度も少なくなるものと考えられる。時間軸を考慮した長期性能設計を考えると、コンクリート（もしくはセメント系）構造物の構造性能にとって繊維補強が有効であると考えられる。

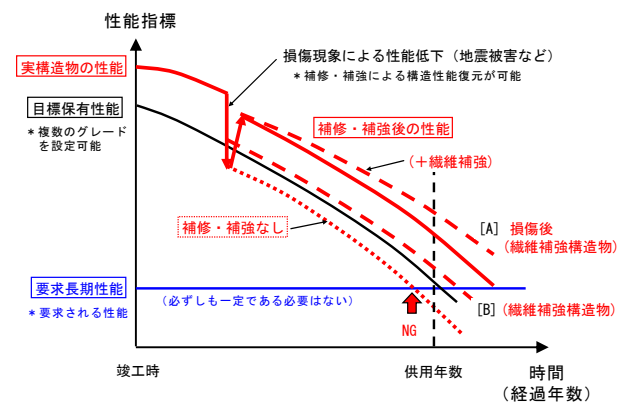


図-1 「長期性能設計」の概念

3.2 歪硬化型材料に関わる情報の整理

(1) ECCにおける材料設計技術

初期ひび割れ発生後、引張応力下でマルチプルクラックおよび数%の引張歪にいたる変形状を期待できるECC (Engineered Cementitious Composite) では、構成材料のミクロレベルの性能を用いて、それを用いた部材レベルの構造挙動を評価することが可能であるといわれている⁵⁾。ECCにおける材料設計技術の概要⁵⁾を図-2に示す。レベル1では、ミクロレベルでの繊維やマトリックスの性能を表すマイクロメカニクスパラメータを用いて、

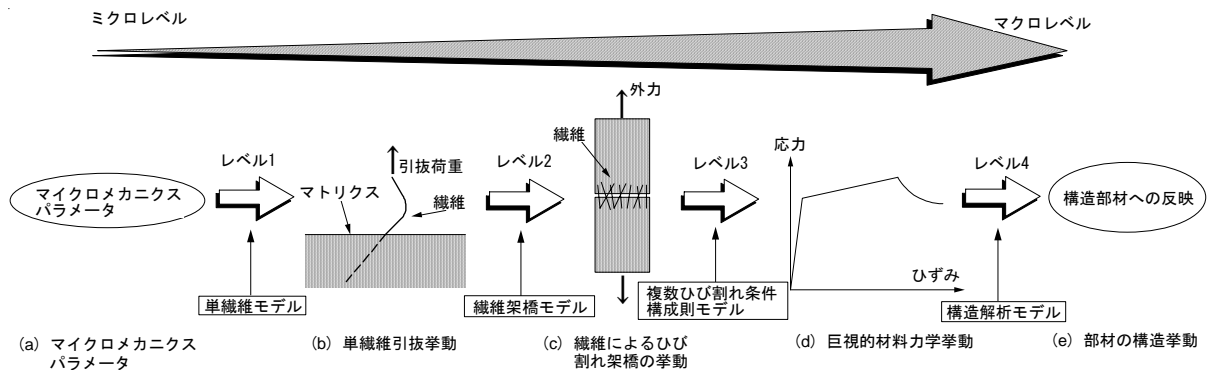


図-2 ECCにおける材料設計技術⁵⁾

単繊維のマトリクスからの引拔挙動を表現する。レベル 2 では、単繊維の引拔挙動をベースとし、多数の繊維がひび割れを架橋するときの架橋則を表現する。レベル 3 では、架橋則を用いて、材料の巨視的な挙動である応力-歪関係を表す。さらに、レベル 4 では材料の応力-歪関係を部材の構造挙動に反映させる。

すなわち、構造物や部材レベルのひび割れ幅も、ミクロレベルでの材料パラメータを利用すれば評価が可能となることを示唆している。ただし、それぞれのレベル評価において解決すべき課題もあり、また、実験的に求める必要のある評価変数（例えば、単繊維とマトリクスの界面せん断応力=付着応力）もある。

(2) UFC におけるひび割れ幅評価

UFC (Ultra High-Strength Fiber-Reinforced Concrete) は、セメント、ポゾラン材、粒径 2.5mm 以下の骨材からなるマトリクスと鋼繊維（引張強度 $2 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 以上、直径 0.1~0.25mm、長さ 10~20mm）で構成され、鋼繊維を 2.0vol.% 以上混入し熱養生を行うことで、 150N/mm^2 以上の圧縮強度と 10N/mm^2 程度の引張強度を発揮する。UFC はひび割れ発生強度が最大引張強度となり、ひび割れ発生後はある開口幅まで最大引張強度を保持し、さらに幅が増加すると繊維の架橋により伝達される引張応力が徐々に減少する引張軟化特性を示す。UFC のひび割れ幅や部材耐力の評価方法は文献 6) に詳述されており、図-3 に示す引張軟化モデルに基づく流れが示されている。

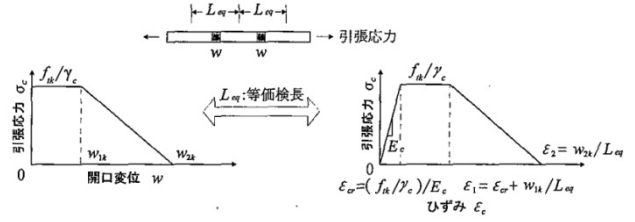


図-3 引張軟化曲線と引張応力-歪曲線の関係⁶⁾

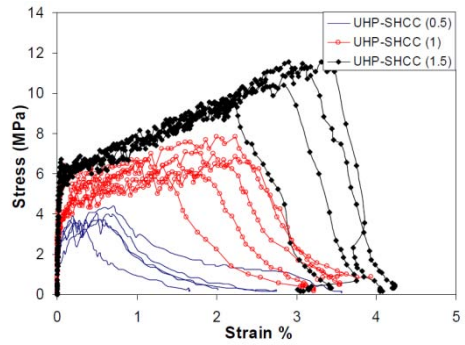


図-4 UHP-SHCC の引張応力-歪関係⁷⁾

(3) UHP-SHCC におけるひび割れ幅評価

近年、超高強度および高靱性の特性を併せ持つ UHP-SHCC (Ultra High-Performance Strain-Hardening Cementitious Composite) が開発され、研究が進められている⁷⁾。本材料は、水結合材比 0.22 かつシリカフューム混和によりマトリクスを緻密化し、高強度 PE 繊維を混入することで、引張応力作用下にて歪硬化性を発揮す

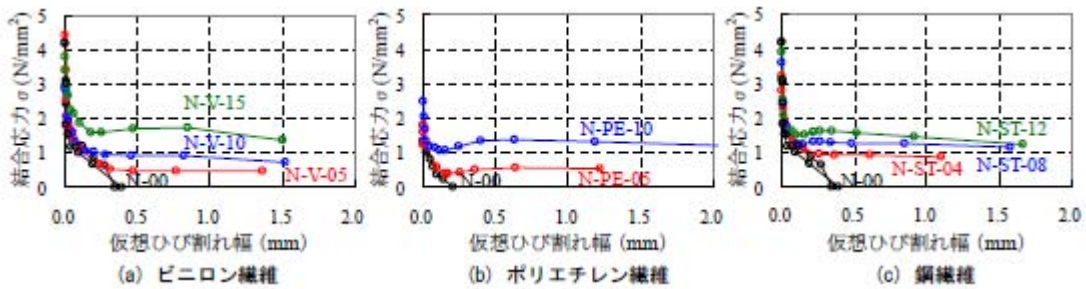


図-5 各種繊維を混入したコンクリートの引張軟化曲線の比較¹²⁾

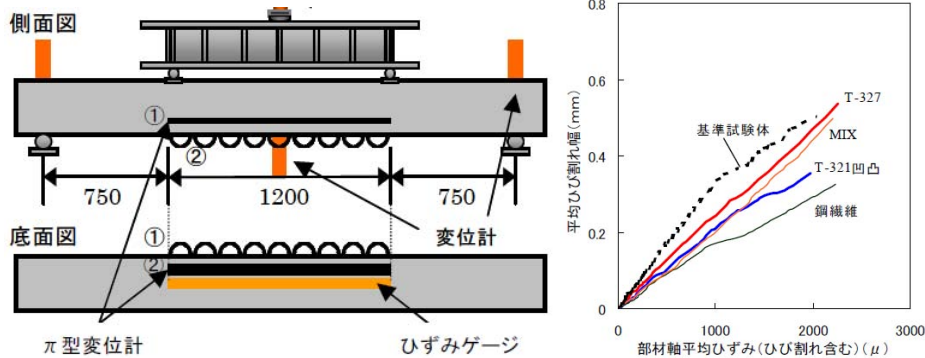


図-6 各種繊維を混入した鉄筋コンクリート部材の平均ひび割れ幅の評価¹³⁾

る(図-4)。本材料の単繊維の付着挙動^{8),9)}、応力-歪-ひび割れ幅の関係^{例えは9),10)}、部材レベルでの評価事例^{例えは11)}については現在も研究が進められている。

3.3 引張軟化型材料に関わる情報の整理

FRC (Fiber-Reinforced Concrete) の場合、短繊維混入の効果は、コンクリートひび割れ発生後の引張力の保持性能として発揮される。この性能を定量的に示すため、一般に引張応力とひび割れ開口変位との関係で示される「引張軟化曲線」が用いられる。この特性は、FRC 自身の材料構成則として非線形 FEM 解析等に導入されることで、柱や梁などの部材に短繊維を用いた場合の変形や耐力、平均ひび割れ幅等の数値的評価を可能とする。

FRC の引張軟化曲線に関して、SFRC (Steel Fiber-Reinforced Concrete) については、鋼繊維の形状や繊維混入率、配向性が軟化特性に影響を与える。さらに近年開発が進む非金属性の繊維(アラミド繊維、ビニロン繊維、ポリプロピレン繊維など)については、3点曲げ試験等で得られた引張軟化曲線により、材料ごとに系統立った軟化特性の整理が行われている(図-5)¹²⁾。また、FRC を適用した構造部材のひび割れ幅評価といった観点では、各種繊維を混入した鉄筋コンクリート梁部材の曲げひび割れ幅に関して、短繊維の種類や繊維混入率が曲げひび

割れ幅に与える影響が検討されている(図-6)¹³⁾。

3.4 ひび割れ面でのせん断特性に関わる情報の整理

繊維補強セメント系複合材料のひび割れ面でのせん断特性は、コンクリートのせん断伝達に関する研究で体系化されているひび割れ面での接触に起因する応力伝達に加え、繊維の架橋効果を考慮することで把握できると考えられる。しかしながら、骨材の量や繊維の特徴(長さ、形状、付着、剛性等)など影響因子が多様であり統一的な理論構築には至っていない。ここでは、ひび割れ面でのせん断特性を定量化するために考慮すべき要因と、関係する既往の研究について紹介する。

一般に繊維補強セメント系複合材料は骨材を含まないか粗骨材量が少ないため、ひび割れ面は普通コンクリートと比較して平滑である。そのため、マトリックスによるせん断伝達は小さいと思われる。これに繊維による貢献分が加算されるが、ずれに対してランダムに配置された繊維の引張分担と繊維の剛性による抵抗を特定する必要があり、主要因である前述の繊維の特徴を個々に解明し、さらにスナビングや、複数繊維の群効果を考慮すると現象は複雑である。ただし繊維の貢献分については引張モデルと同様の因子であるので、繊維の方向を含んだ引抜け挙動に立脚したモデルが構築されれば、せん断

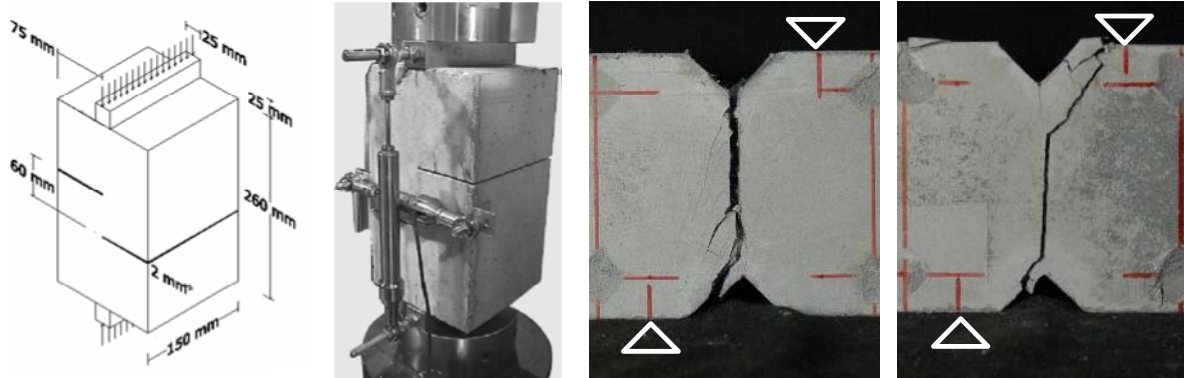


図-7 直接せん断試験の例^{14),15)}

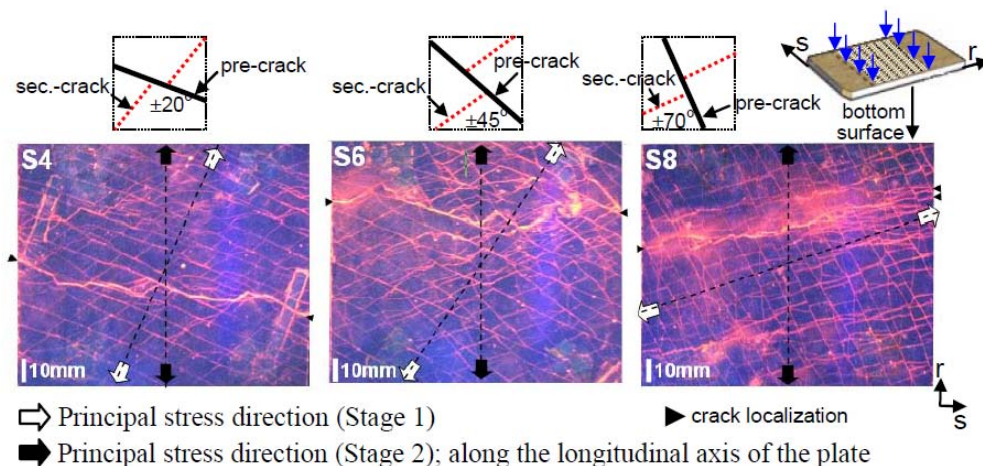


図-8 主応力軸回転による多方向ひび割れの発生¹⁶⁾

性能への応用は可能であると考えられる。

ひび割れ面でのせん断伝達に関する研究は、現状ではそれぞれの材料に対してその特性を把握する研究が主であり、直接せん断試験は繊維を含まないコンクリートと同様に試みられている^{例えは 14),15)} (図-7)。ここではランダムに配置された繊維の引張力がひび割れ面に角度を有し力を発生させるため、純せん断の状態の維持が困難で第二ひび割れが生じる問題がある。近年では、複数ひび割れ型繊維補強セメント系複合材料のせん断特性を空間平均的に計測しモデル化した研究が Suryanto らにより試みられている¹⁶⁾ (図-8)。薄型プレートに初期ひび割れを導入したうえで主応力軸を回転させ载荷する実験から、せん断特性を既存のコンクリートのせん断伝達モデルを修正することで同定し、パネルや部材レベルでの検証を行っている。

3.5 単繊維とマトリックスの付着試験法

繊維補強セメント系複合材料においてひび割れ幅を評価するためには、繊維の架橋則(繊維架橋応力-ひび割れ幅関係)の導入が不可欠である。しかしながら、実験的に架橋則を導出するのは困難である。架橋則はマトリックスに埋め込まれた単繊維の界面性状に大きく依存し、界面性状を支配する大きな因子は繊維-マトリックス間の付着性状と繊維の破断である。さらに繊維が配向角を有することで引抜抵抗が向上するスナビング効果が挙げられる。これらを直接的に把握する有効な試験法として単繊維の引抜試験が行われており、様々な試験体製作方法や加力方法が提案されている^{17),18)} (図-9 および図-10)。このようなメゾスケールのデリケートな試験を行う場合、実験結果は試験体製作方法や加力方法にも影響を受ける。

3.6 簡易的なひび割れ幅評価法

単繊維がマトリックス中に埋め込まれ、引張荷重が生じている場合を考える。繊維体積混入率を V_f 、単位長さに含まれる繊維の本数を N_f とし、単繊維の付着応力-拔出し量関係の初期勾配を K_b とすると、断面 A_m のマトリックスに新たなひび割れが発生するとき(引張強度 f_t)の繊維の拔出し量 s_f は次式で与えられる。ただし、繊維の引張荷重の有効係数を ν_f 、繊維の周長を ϕ_f とする。

$$N_f \cdot \nu_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \phi_f \cdot K_b \cdot s_f^2 = f_t \cdot A_m \quad (1)$$

ひび割れ幅 w_{cr} は繊維の拔出し量の2倍であると考え、繊維の断面が直径 d_f の真円であるとする次式を得る。

$$w_{cr} = \sqrt{\frac{2 \cdot f_t \cdot d_f}{V_f \cdot \nu_f \cdot K_b}} \quad (2)$$

(2)式は、繊維の引張荷重の釣合をマトリックスの引張

強度とし、繊維の付着応力が繊維軸範囲内において完全に定着されているとすることによって、繊維長やひび割れ間隔に依らずにひび割れ幅を与える式である。釣合条件がマトリックスの引張強度であるので、ひび割れが発生していく過程での最大のひび割れ幅を与えることができる。

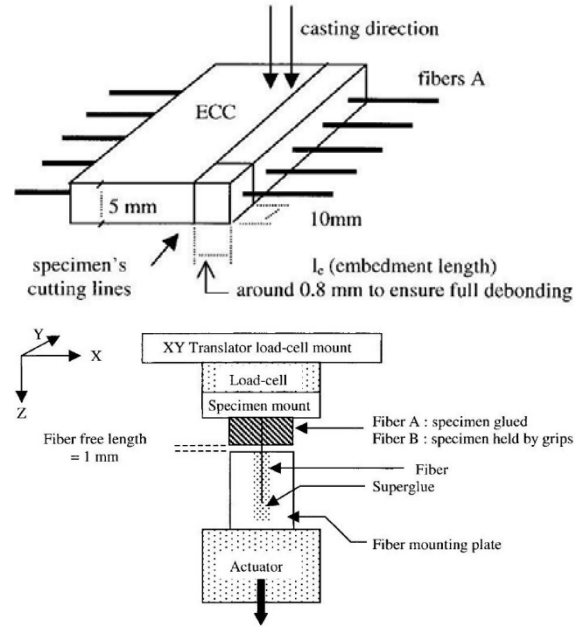


図-9 単繊維の付着試験法¹⁷⁾

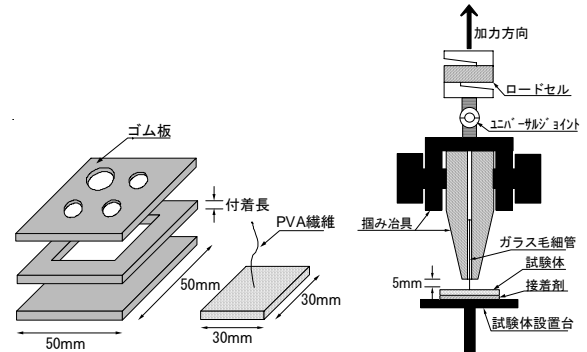


図-10 単繊維の付着試験法¹⁸⁾

4. 繊維補強セメント系複合材料の環境対応のあり方(WG3)

4.1 概要

2章および3章において、繊維補強セメント系複合材料を用いた構造物の長期性能設計を実現するための事例調査ベースの検討およびひび割れ幅評価方法について紹介された。繊維混入による効果が陽な形で構造物の長寿命化に資することが期待される。一方で、構造物の長寿命化を議論するにあたり昨今の環境問題を抜きにして議論することができないのが現状である。

コンクリート構造物を対象とした環境影響評価については、JCIにおいて「コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会」および「サステナビリティ委員会」において様々な検討、

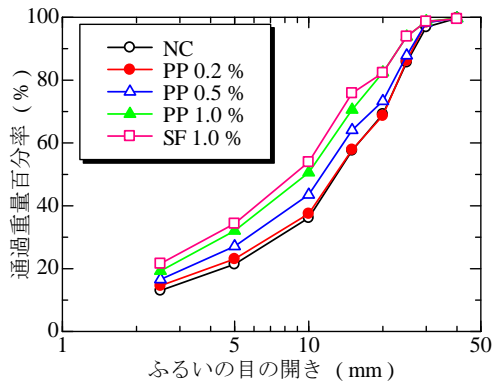


図-11 粒度曲線

データの蓄積が行われているところである。一方、環境の側面からみた繊維補強コンクリートの評価については、未だ行われていないのが現状である。なお、繊維補強セメント系複合材料（繊維混入率 1%程度）の環境負荷について、通常のコンクリートとの比較した場合、材料調達時および廃棄時において特に繊維補強セメント系複合材料の環境負荷が大きいことが予想された。

そこで、繊維補強セメント系複合材料を用いた構造物の解体時を想定し、普通コンクリートと同様の利用方法（例えば、路盤材として使用する、再生骨材として利用する）を検討するための基礎的情報を提供することを目的に、ひずみ軟化型繊維補強コンクリート(FRC)の破砕性状を把握した。

なお、鋼繊維及びポリプロピレン繊維の2種類をそれぞれ使用したFRCを作製し、破砕後のコンクリート塊のふるい分け試験、吸水率試験を行うことで、短繊維がFRCの破砕性状に与える影響について、普通コンクリートのそれらと比較しながら検討した。

4.2 繊維補強コンクリートのリサイクル性

(1) 使用材料

本実験で使用したコンクリートは普通コンクリート(NC)と繊維の種類および混入率の異なる5種類のFRCとに大別できる。普通コンクリートはレディーミクストコンクリート(W/C=42%)とし、FRCは、普通コンクリートに対して、ポリプロピレン繊維(PP繊維)または鋼繊維(SF)を添加するのみとした。鋼繊維は、長さ30mmで両端フック付きの繊維であり、かつ集束タイプのものである。PP繊維は、長さ48mmのインデント付きストレートタイプである。各コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートで56MPa、繊維補強コンクリートで44~50MPaの範囲にあった。

本実験では、φ150×300mmの円柱供試体をコンクリート種別毎に20本作製した。作製した供試体の破砕は、材齢28日に実施した。破砕方法は、市販の自走式ジョークラッシャー(処理能力38ton/h、排出口の隙間55mm)により1回のみ破砕処理を行った。



(a) PP 繊維混入率 0.2%のコンクリート塊



(b) PP 繊維混入率 0.5%のコンクリート塊



(c) PP 繊維混入率 1.0%のコンクリート塊



(d) SF 混入率 1.0%のコンクリート塊

写真-1 10mmのふるいにとどまったコンクリート塊

(2) ふるい分け試験結果

図-11 にふるい分け試験によって得られた各コンクリートの粒度曲線を示す。PP 繊維を混入したFRCに関しては、繊維混入率が増加するに従って各ふるいを通しての量が多くなっている。すなわち、破砕後のコンクリート塊の寸法が比較的小さいことを表している。ただし、繊維混入率が0.2%の場合には、普通コンクリート(NC)と明確な違いが認められなかった。排出されたコンクリート塊の寸法が、FRCにおいて小さくなった理由は、破

砕時に繊維が架橋し、原骨材周辺に付着しているモルタルが破壊するなど、局所的な破壊を誘発したためと推察されるが、詳細についてはさらなる観察が必要である。また、繊維種別に関しても、SFを混入したFRCは、繊維混入率が同一のPP1.0%の粒度分布に比べると、やや粒径が小さくなっているが、全体的な傾向は類似している。

写真-1に各FRC供試体のふるい分けにおいて、呼び径10mmのふるいにとどまったコンクリート塊の様子を示す。40mmや20mmのふるいにとどまったコンクリート塊と比較して、繊維が付着していないコンクリート塊が数多くみられた。このことは、本研究で使用したコンクリートであれば、10mmふるいにとどまるコンクリート塊まで破砕することで、短繊維をほとんど除去できることを示している。

5. おわりに

本研究委員会では、繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法の発掘を目指して、特に過去10年程度の既往の技術を整理するとともに、ひび割れ幅評価法の再整理や環境負荷低減について検討を行った。短繊維の効果が陽な形で評価され利用されることで、益々の利用拡大が期待できる。利用法の模索にあたり、一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：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，2004
- 2) 金子佳生，前田信之，山野辺宏治：建築構造物の長期性能設計の将来像，コンクリート工学，Vol. 49, No. 5, 2011
- 3) 三桶達夫，堀口賢一，福浦尚之，丸屋剛，服部佳文：繊維補強コンクリートを用いたシールドセグメントの設計手法，コンクリート工学，Vol.48, No.10, pp.18-26, 2010
- 4) 金子佳生，前田信之，山野辺宏治：長期性能設計の将来像，2009年度日本建築学会大会（東北），構造部門（RC造）パネルディスカッション「鉄筋コンクリート構造の常時荷重下の課題と長期性能」資料，pp.39-43, 2009
- 5) 閑田徹志：高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状，コンクリート工学，第38巻，第6号，pp.9-16, 2000
- 6) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113, 2004
- 7) A. Kamal, M. Kunieda, N. Ueda, H. Nakamura: Assessment of crack elongation performance in RC beams repaired by UHP-SHCC, Proceedings of 9th International Summer Symposium, JSCE, Yokohama University, Japan, pp 5-8, September 2007
- 8) 小沢国大，国枝稔，閑田徹志，中村光：超高強度マトリクスに埋め込まれた有機系繊維の付着特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp.231-236, 2008
- 9) 小倉大季，国枝稔，上田尚史，中村光：メゾスケール解析による短繊維補強セメント系複合材料の力学特性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp.309-314, 2007
- 10) 河合正則，稲熊唯史，内田裕市，六郷恵哲：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材の応力-ひずみ関係の逆解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.305-310, 2006
- 11) 江口輝行，国枝稔，長嶋宏哉，中村光：アスファルト敷設時の熱影響を受けた超高強度ひずみ硬化型モルタルの性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.281-286, 2011
- 12) 崔智宣，山口浩平，日野伸一，梶原秀夫：各種短繊維で補強した軽量2種コンクリートの引張軟化特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.1243-1248, 2011
- 13) 鈴木幸憲，下村匠，田中泰司：繊維補強鉄筋コンクリートはり部材の曲げひび割れ幅，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.2, pp.1369-1374, 2006
- 14) B. Barragan, R. Gettu, L. Agullo, and R. Zerbino: Shear Failure of Steel Fiber-Reinforced Concrete Based on Push-Off Tests, ACI Material Journal, Vol. 103, No. 4, pp.251-257, 2006
- 15) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井寛：PVA-ECCのひび割れ面でのせん断伝達機構と部材のせん断耐力評価，日本建築学会構造系論文集，Vol.619, pp.133-139, Sep., 2007
- 16) B. Suryanto, K. Nagai, K. Maekawa: Modeling and Analysis of Shear-critical ECC Members with Anisotropic Stress and Strain Fields, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.2, pp.239-258, 2010
- 17) C. Redon, V. C. Li, C. Wu, H. Hoshiro, T. Saito, and A. Ogawa: Measuring and Modifying Interface Properties of PVA fibers in ECC matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, pp.399-406, November 2001
- 18) 浅野浩平，金久保利之：高性能繊維補強セメント複合材料における短繊維の付着性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），2012