

平成21年 4月30日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760302  
 研究課題名（和文） 力学・耐久性能のトレードオフに着目した超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発  
 研究課題名（英文） Development of Ultra High Performance Strain Hardening Cementitious Composites Subjected to Tradeoff between Mechanical and Durability Performance  
 研究代表者  
 國枝 稔 (KUNIEDA MINORU)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：60303509

## 研究成果の概要：

優れた力学性能（強度，変形能）および耐久性を併せ持つ，超高強度ひずみ硬化型セメント系材料（UHP-SHCC）の開発に成功した．具体的には，引張強度で8～10MPa，引張強度時ひずみが2%以上，透気係数が普通コンクリートの100倍程度以上の材料である．これらの材料の材料設計を行うにあたり，3次元メソスケール解析手法を開発し，引張破壊解析を可能とした．また，UHP-SHCCの自己治癒機能を発掘した．

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	0	2,200,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,300,000	330,000	3,630,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：繊維補強コンクリート，超高強度，耐久性，透気係数，メソスケール解析，自己治癒，ひずみ硬化

## 1. 研究開始当初の背景

近年，短繊維補強セメント系複合材料では，超高強度化および超高靱性化の流れがある．このような状況の中，力学性能および耐久性を併せ持った材料を開発することで，第1に，補修等も含めた構造利用の範囲が広がり，セメント系材料分野のブレークスルーとなることが期待できる．第2

に，いわゆる超高靱性材料と超高強度材料との中間的な特性を持つ材料のメリット等を示しながら，材料設計，あるいは構造利用時の部材設計に関して，力学性能，耐久性の観点から合理的な設計方法について議論することができる．

超高靱性材料および超高強度材料の中間材料としての超高強度ひずみ硬化型セメント系材料（Ultra High Performance-Strain

Hardening Cementitious Composites, UHP-SHCC)を開発するにあたり、特に以下の点に着目した。

- ①高性能(超高強度, 高耐久性)な材料の可能性の模索する必要がある。
- ②破壊までもを予測できる材料設計方法方法が確立されていない。
- ③その他の付加価値を発掘する。

## 2. 研究の目的

本研究では、先述の背景に基づき、力学性能・耐久性能を有する超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発を試みるとともに、数値解析的に材料設計を行う手法を開発する。さらに、当該材料の付加価値として、自己治癒に着目し、その可能性について実験的に検討することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の3点に着目して実験的、解析的な検討を行った。

### ①耐久性と靱性に着目した超高強度ひずみ硬化型材料(UHP-SHCC)の開発

目標性能として、引張強度8~10MPa程度、最大応力時の引張ひずみが1.0~2.0%程度を設定し、性能改善を行った。また、耐久性を間接的に評価する指標として、Torrent透気試験方法による透気係数、電気泳動試験による実効拡散係数、透水試験による透水係数をそれぞれ実験的に求めた。

### ②力学性能に着目した3次元メゾスケール解析手法の構築

3次元剛体-ばねモデル(RBSM)を用いて、メゾスケール解析を行った。短繊維を離散化させた3次元解析は現実的には不可能であり、世界的にみても実現された例はない。ここでのポイントは、3次元解析の効率化を目的に、准離散化する点にある。この手法により、自由度を増やすことなく、計算時間が大幅に短縮できる。繊維の混入率や、繊維長を変化させた実験結果を用いて、この解析の妥当性を検証した。また、超高強度マトリックスを対象とした繊維の引き抜き試験に関するデータが皆無であることから、実験的にこれらを求めた。

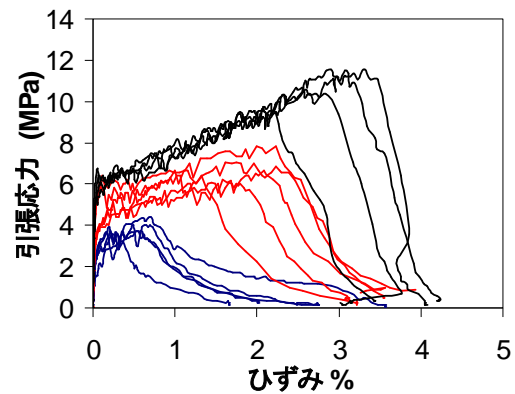
### ③UHP-SHCCの自己治癒機能の発掘

UHP-SHCCの複数微細ひび割れを利用して、ひび割れ発生後にひび割れ部が自己治癒する機能を発掘する。ひび割れの違いや養生条件の違いによって、マイクロスコープによるひび割れの閉塞を確認する。また、透気試験や透水試験を実施し、ひび割れ部の物質移動抵抗性を通して治癒効果を確認した。

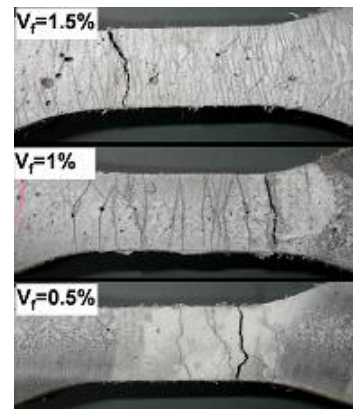
## 4. 研究成果

### ①耐久性と靱性に着目した超高強度ひずみ硬化型材料(UHP-SHCC)の開発

優れた力学性能(強度, 変形能)および耐久性を併せ持つ、超高強度ひずみ硬化型セメント系材料(UHP-SHCC)の開発に成功した。具体的には、引張強度で10MPa、引張強度時ひずみが2%以上、透気係数が普通コンクリートの100倍程度以上の材料の開発であり、世界でも珍しい材料が開発された(図-1, 図-2参照)。



(a) 応力-ひずみ関係



(b) ひび割れ性状

図-1 開発されたUHP-SHCCの力学特性

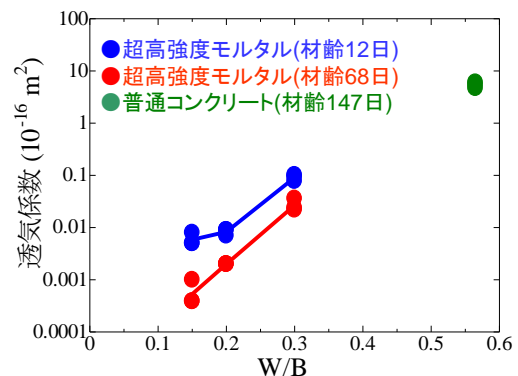


図-2 得られた透気係数

当該材料の実際の補修・補強への適用を想定し、塩化物イオンの拡散係数（実効拡散係数）を電気泳動試験により測定した。その結果、 $0.04\sim 0.05\text{cm}^2/\text{年}$ 程度となり、普通コンクリートの約50分の1程度の拡散係数であり、その緻密さが確認された。この材料を用いて補強し、かつ電食によりRCはりの鉄筋を腐食させた補強RCはりの曲げ荷重試験を実施し、UHP-SHCCによる補強効果やかぶりコンクリートのはく落防止などの効果が期待できることを実験的に明らかにした。

### ②力学性能に着目した3次元メソスケール解析手法の構築

3次元メソスケールによる材料設計方法を開発し、ひずみ硬化型材料の破壊性状を解析できることを明らかにした。図-3に示すように、ランダムに配置された短繊維について、数値解析の自由度数を増大させることなく、すべての繊維の挙動を考慮できるモデル化を考案した。すなわち、図-4に示すように、マトリクスを表わす剛体および2つの剛体の界面（ひび割れに相当）を跨ぐ繊維位置を算定し、この繊維の架橋力（引抜きに対する抵抗力）を数値解析の内力として考慮する方法である。このような解析手法は、世界的にも先端をいく成果である。

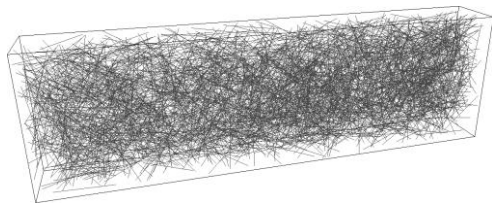


図-3 ランダムに配置された短繊維の例

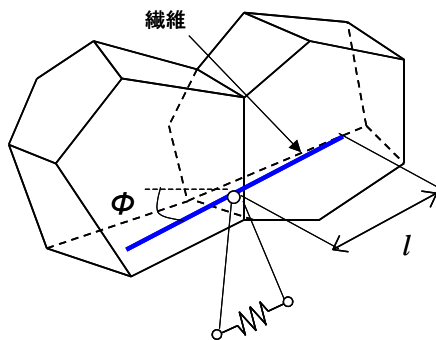
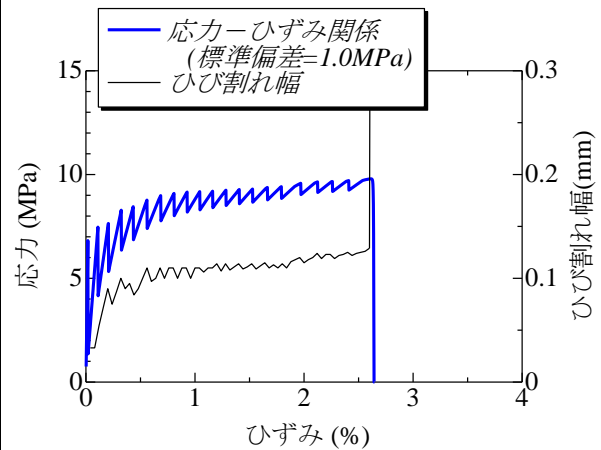


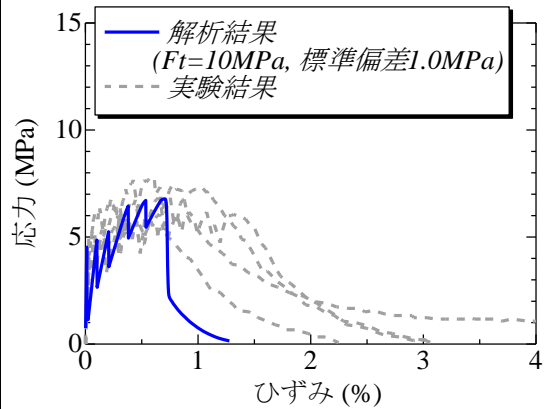
図-4 開発したメソスケール解析

この方法により、マトリクスの力学特性、繊維の力学特性ならびに両者の界面の力学特性（付着特性）を適切に考慮することで、材料の種類の違いによらず、図-5に示すような引張試験時の応力-ひずみ曲線ならび

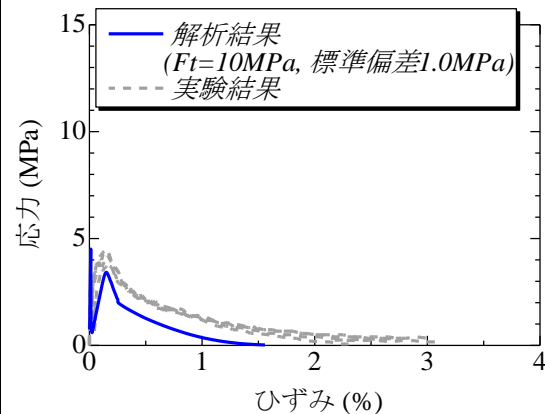
に図-6に示すようなひび割れ性状を推定することが可能となった。



(a) 繊維混入率 1.5%



(b) 繊維混入率 1.0%



(c) 繊維混入率 0.5%

図-5 解析結果の例

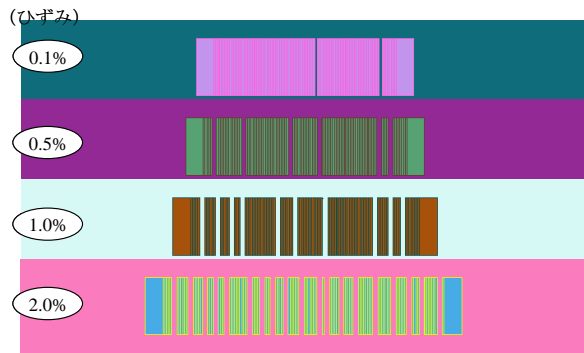


図-6 ひび割れ性状の例(繊維混入率 1.5%)

③UHP-SHCC の自己治癒機能の発掘

UHP-SHCC の自己治癒機能を発掘するため、ひび割れを導入した材料を種々の条件下で再養生し、ひび割れの閉塞状況をマイクロスコープによる観察および透気係数の変化により確認した(図-7 参照)。その結果、ひび割れ導入直後には透気係数が大幅に大きくなるものの、再養生の条件にもよるが、約1ヶ月程度で大幅に透気係数が低減することが確認された。また、マイクロスコープによる観察でも、ひび割れ部の閉塞が確認された(図-8 参照)。

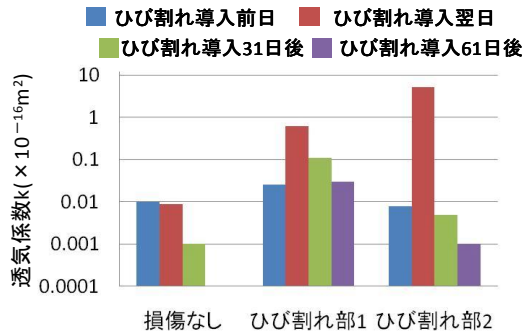
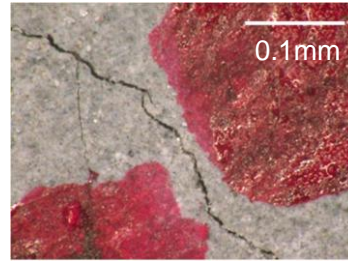
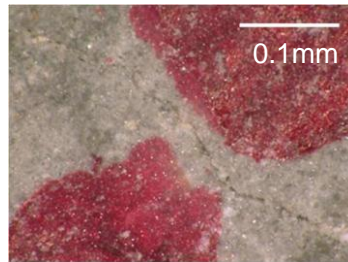


図-7 ひび割れ導入および養生による透気係数の変化



(a) 治癒前



(b) 治癒後

図-8 ひび割れ治癒の例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

森本拓也, 國枝稔, 上田尚史, 中村光: 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料で表面被覆した RC はりの鉄筋腐食に対する補強効果, コンクリート工学年次論文, 査読有, 2009 (印刷中)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

國枝 稔 (KUNIEDA MINORU)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60303509