

平成 22 年 5 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2009

課題番号：18206058

研究課題名（和文）ひび割れ幅制御型新材料によるコンクリート構造物の長寿命化

研究課題名（英文）Elongation of Life Time of Concrete Structures by Controlling Crack Width with New Materials

研究代表者

三橋 博三（MIHASHI HIROZO）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90091751

研究成果の概要（和文）：

コンクリートのひび割れ抵抗性能を大きく改善することによって、コンクリート構造物の長寿命化を実現する方法の開発に取り組んだ。その結果、スチールコードとポリエチレンを混合利用したハイブリッド型繊維補強セメント複合材の適切な調合により、強地震時に柱や壁部材に発生するひび割れ幅をかなりの程度小さく抑えられ、そのことが部材の靱性向上並びに透水性や鉄筋腐食速度の抑制に顕著に貢献できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This research project tried to develop a methodology for realizing a long life of concrete structures by increasing greatly the capability to resist cracking in concrete. As a result, it was clarified that a proper mix-designing of hybrid fiber reinforced cement-based composites (HFRCC) leads to reduce remarkably the crack width in columns and shear-walls under severe earthquakes and that such a high toughness of HFRCC can contribute a lot to increase the toughness of structural members and to reduce permeability through the members for controlling the rate of corrosion of reinforcing steel bars.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	19,400,000	5,820,000	25,220,000
2007 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2008 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2009 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
総計	38,200,000	11,460,000	49,660,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築

キーワード：ひび割れ，ハイブリッド型繊維補強，セメント複合材料，耐久性，耐震性能，損傷度，高靱性，自己修復

1. 研究開始当初の背景

我が国が近い将来に直面する国家財政問題並びに少子高齢化問題に対処するために、これまでのスクラップ・アンド・ビルド型社会からストック循環指向型社会への転換が

求められている。そのために、例えばスケルトン・インフィル型住宅に代表されるような、100 年は主体構造の大規模改修を必要としない長寿命型鉄筋コンクリート構造物の建設が求められているが、コンクリートの微細組

織を緻密にして圧縮強度を高強度化する以外にコンクリートを長寿命化する技術の開発は必ずしも成功しているとは言い難い。しかしながら、圧縮に強いからと言って自己収縮や地震時の曲げあるいはせん断力に起因するひび割れの発生を避けられるとは限らない。また、フランスのラファージュ社等3社共同開発によるダクタルは極めて高強度なセメント複合材で、20%以下の水結合材比と特殊な鋼繊維の混入によって実現された。しかしながら、養生条件などが特殊であることに加えて、強度が極めて高すぎるために他の建設材料との整合性を取ることが難しいために建築材料としての汎用性に欠けており、特殊な用途に限定されている。

一方引張応力下ではあっても、マルチプルクラッキングによる擬似ひずみ硬化特性を示すセメント複合材 (ECC と略称される) が米国・ミシガン大学の Li らによって開発されたが、ポリエチレンやビニロンなどの合成繊維による複合材料であるために、強度に限界があると共に、圧縮応力下では十分な靱性を発揮できず、耐震的な構造材料としては有効ではない。

2. 研究の目的

緊急の社会的要求となっている、長寿命型鉄筋コンクリート構造物の建設に資するために、本研究は、異なる性質の繊維を混合した新しいハイブリッド型繊維補強複合材を用いて、ひび割れ抵抗性能を大きく改善し、コンクリート構造物を長寿命化する方法を開発する。そのために、収縮ひずみの低減法を検討する一方で、地震力の作用による HFRCC 構造部材のひび割れ性状を把握すると共に、耐久性の向上にこの新素材がいかに有効かを定量的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

圧縮応力下では所要の強度を満足しながらも、引張やせん断応力の下では複数の微細

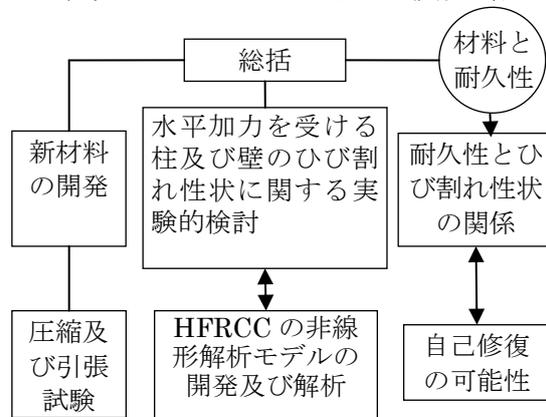


図1. 研究全体の連関図

なひび割れを生起させることのできるもので、しかも施工性さえも満足できる材料を実現する。それを受けて、柱および壁の水平加力実験を実施することにより、部材の挙動とひび割れ性状の関係を明らかにする。また、耐久性試験を実施して、鉄筋の腐食速度に及ぼす材料の影響について明らかにする。

これらの課題に取り組む上で必要な、材料の引張試験や収縮ひび割れ試験法及び非線形解析のモデル化並びに材料に生じたひび割れの自己修復についても検討を重ねる。研究全体の連関図を図1に示す。

4. 研究成果

(1) 高強度型新材料 HFRCC の材料開発

高強度でありながら高い靱性を確保するために幅の小さな多数のひび割れ、即ちマルチプルクラッキングを生起させることのできる材料の設計が課題であり、施工性も考慮する必要がある。そのためにこれまでの知見を参考に適切な材料の組み合わせを選び、パラメトリックスタディを行った。また、一軸引張挙動を実験によって確認するための試験法の検討を行った。具体的には、例えば従来のシリカフェームに代わってフライアッシュを混和材として用い、セメントの約30%分置換すると共に、水-結合材比 (W/B) を従来の0.45から0.33に下げた調査による施工性と水和熱の発生状況、自己収縮ひずみ特性ならびに力学的特性の変化について、実験により確認した。

その結果、テーブルフロー値は従来調査の約170mmに対して、約200mm程度まで増大させることができた。さらに、自己収縮ひずみを従来の約 800×10^{-6} に対して約 400×10^{-6} に低減することができた。しかしながらその一方で、フロー値の増大と共に圧縮強度が低くなる傾向を示すので、空気量の調整に留意するなどの注意点が指摘された。また、最終年度には余剰ペースト膜厚理論の適用により、HFRCCのフレッシュ性状並びに靱性特性に与える材料構成要素の影響を定量化することに成功した。余剰ペースト膜厚の考え方を図2に示すが、余剰ペースト膜厚 t_e は、式(1)から求めた。

$$t_e = (V_{total} - V_{solid} \cdot 100/G)/S \quad (1)$$

ここで、 t_e : 余剰ペースト膜厚[mm], V_{total} :

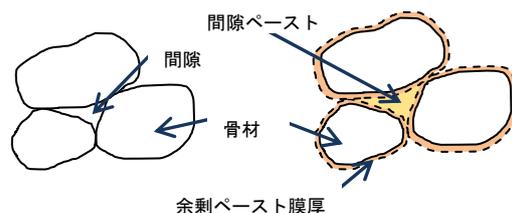
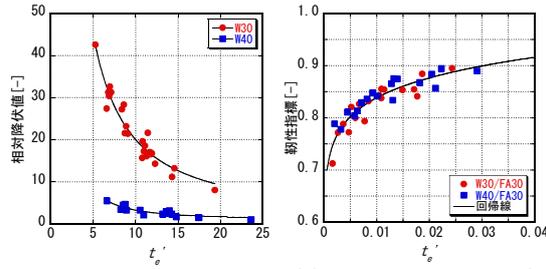


図2 余剰ペースト膜厚の概念

総体積[mm³], V_{solid}: 固体 (繊維+骨材) 体積[mm³], G: 固体実績率 [-], S: 固体表面積[mm²]である。

本研究では、HFRCC のフレッシュ性状を降伏値と塑性粘度で表すこととした。この降伏値は HFRCC の流動性を、塑性粘度は流動速度を表わしている。これら HFRCC のレオロジー定数を測定するために、J 型フロー試験を行った。これらの試験から求めた HFRCC のフレッシュ特性、及び切欠き梁の曲げ試験から求めた靱性特性と余剰ペース



(a) 相対降伏値関係に及ぼす影響 (b) 靱性指標に及ぼす影響

図3 HFRCC のレオロジー特性及び靱性指標に及ぼす水結合材比の影響

ト膜厚の関係を図3に示す。但し、HFRCC の場合、繊維を含むので式(1)の余剰ペースト膜厚をそのまま用いることはできず、式(2)で定義するその補正値 t_e' を用いた。

$$t_e' = t_e \times \alpha \quad (2)$$

$$\text{但し、} \alpha = V_{sn} \times V_p n^2 \times (L_s/d_s) n^3 \quad (3)$$

図3に結果の一例を示すように、補正余剰ペースト膜厚 t_e' が増大するにつれて、相対降伏値と相対塑性粘度は減少する一方、靱性指標は増大傾向を示す。しかし、横軸の変数に直接 W/B を選んでも、このような関係を求めることはできない。尚、図中の例えば W30/FA30 は、W/B=30%でフライアッシュの置換率 30%を表す。W/B を極端に小さくすることで超高強度高靱性 HFRCC の開発も試みた。その一例を図4に示す。W/B=0.16 とし、2種類の混和材を用いた結果、一方は初期剛性と強度の増大に寄与し、他方は靱性の増大に寄与することが分かったものの、双方を同時に混合しても材料特性の改善には寄与せず、課題を残した。

(2) 柱及び壁の水平繰返し加力による力学特性と損傷度の関係

柱と壁に対する地震入力時の力学的特性とひび割れ幅の関係、並びに損傷度への影響因子の効き方を明らかにする目的で、水平加力実験を重ね、柱のせん断補強筋量と変動軸力、並びに壁の鉄筋量と配筋方向などの影響を把握すると共に、より有効な構造設計法を確立するためのデータを蓄積した。

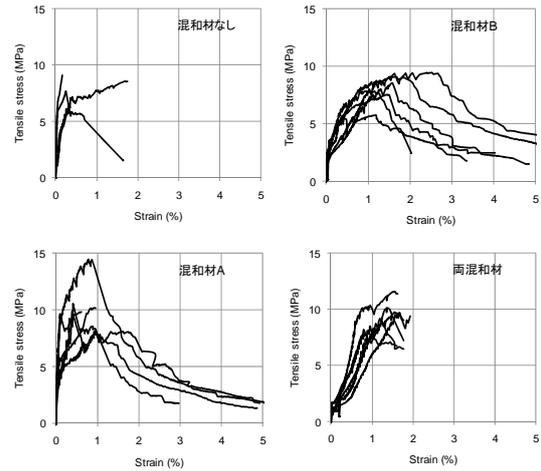


図4 引張応力-ひずみ関係

図5に荷重装置及び実験条件を示す。また、図6に柱の残留ひび割れ幅と経験変形角の関係を示す。各試験体に付された記号の意味は以下の通りである。V: Varying Axial Load (変動軸力); HF: コンクリートの種類; 3.65: 補強筋量。

具体的には、普通コンクリートと HFRCC を用いた RC 柱と架構付 RC 耐震壁の水平加力実験を行い、以下の結果を得た。HFRCC を用いた部材は、材料自体に引張変形に対する靱性があるために、材料の引張強度を用いて部材の変形能力を評価すると安全側の推定結果となること、せん断ひび割れや縦ひび割れを抑制し、かぶりコンクリートの剥落を防止するなどの損傷低減効果を確認できた。また、部材変形角と残留ひび割れ幅の関係を

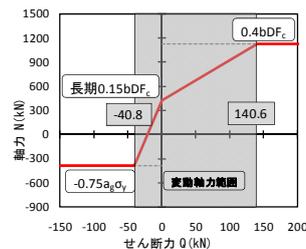
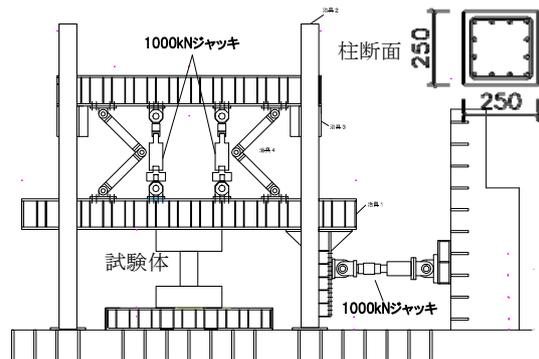
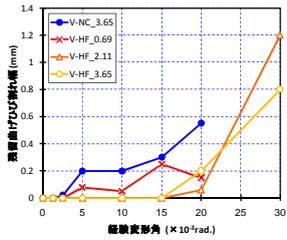
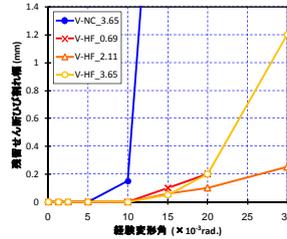


図5 荷重装置詳細及び実験条件



(a) 残留曲げひび割れ幅—経験変形角関係



(b) 残留せん断ひび割れ幅—経験変形角関係

図6 柱の残留ひび割れ幅と経験変形角詳細に測定・記録することにより、例えば普通コンクリート NC シリーズ柱では部材角 $1/10\text{rad.}$ で既に 0.2mm のひび割れが残留しているのに対して、HFRCC の柱試験体では、 $1/50\text{rad.}$ (即ち $20 \times 10^{-3}\text{rad.}$) の変形時でも残留ひび割れ幅は 0.2mm 以下に抑えられているために、補修不要であることを明らかにした。

一方の壁試験体は、試設計建物の連層耐震壁最下層を $1/4$ スケールにしたもので、 1.5 層 1 スパン、壁厚 $t_w = 80\text{mm}$ 、内法壁長さ $l_w = 1750\text{mm}$ とした。材料及び補強筋の影響を比較するため、普通コンクリート 1 体と壁板に HFRCC を用いたものを 3 体とした。普通コンクリートを用いた N-W 試験体は、全面普通コンクリート一体打ちとし壁筋を 50mm ピッチで配筋した試験体である。HF-W 試験体と HF-W0.89 試験体、HF-W0.89d 試験体は壁板部分に HFRCC を用いており、HF-W 試験体では壁筋を 200mm ピッチに、HF-W0.89 試験体では壁筋を 100mm ピッチに、HF-W0.89d 試験体では壁筋を 100mm ピッチで斜め配筋にし、N-W 試験体と比べ HFRCC の効果を考慮し壁筋量を減らしている。また、HF-W 試験体は 2 階壁板も HFRCC を用いた。

耐震壁試験体は、柱脚の曲げ降伏先行の試験体とし、HFRCC 試験体は周辺フレームとの定着のため $40d$ の長さの定着筋を設けており、HF-W0.89 試験体と HF-W0.89d 試験体には壁板周辺にコッターを設けている。

$15 \times 10^{-3}\text{rad.}$ までの壁板部分の除荷時の最大せん断ひび割れ幅と部材角の関係を図 7 に示す。N-W 試験体は、 $2.5 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で除荷時のひび割れ幅が 0.2mm (ひび割れ幅で判断される損傷度 I \rightarrow II) であるのに対し、HFRCC を用いた試験体は 0.1mm 以下に抑えられ、耐震壁の設計で想定されるような変形では

損傷を低減できていることがわかる。また、 $5 \sim 10 \times 10^{-3}\text{rad.}$ 程度では、HF-W 試験体でスリップの兆候が見られはじめ、ひび割れ幅は 0.4mm (損傷度 II) まで開くが、HF-W0.89 試験体や HF-W0.89d 試験体では 0.2mm 程度 (損傷度 I \rightarrow II) のひび割れに抑えられている。このことから 0.2mm 程度のひび割れが発生すると、その部分にひび割れが集中する傾向がある。 $15 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で N-W 試験体のひび割れは 1.5mm となり、HF-W 試験体ではスリップが完全に生じ、 4mm 程度のひび割れが発生したのに対し、HF-W0.89 試験体や HF-W0.89d 試験体では 0.5mm (損傷度 II) と損傷を抑えることができています。

このことより、HFRCC を壁板に用いることにより、小変形時にはひび割れ幅を抑えることができ、損傷が集中しないような設計をすることで、変形が大きくなった場合にも、ひび割れ幅を抑えることができることが明らかにされた。また、前述の柱型要素を並べることにより、例えば下階壁抜け部補強にスリット壁として利用することも可能である。

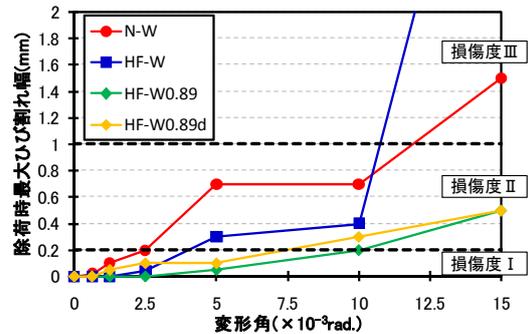


図 7 壁の残留最大ひび割れ幅と経験変形角

(3) 高靱性材料の非線形解析モデルの開発及び解析的検討

高靱性材料の一軸圧縮および引張応力下での力学挙動を、ポストピークも含めて表現可能なモデル化に取り組んだ。具体的には、アンカーボルトの引抜け挙動の解析を通して、非線形解析モデルの改良につとめ、より実験現象に近いひび割れ挙動をシュミレートできるモデル化を実現した。

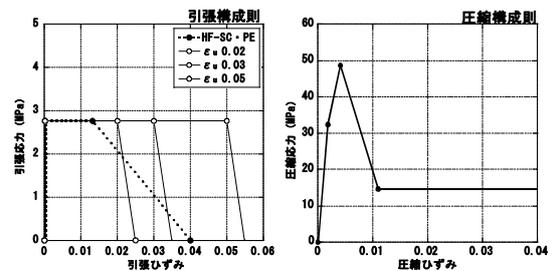


図 8 引張・圧縮側構成則

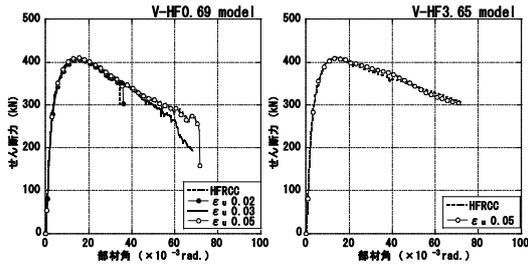


図9 せん断力-部材角関係

その作成した解析モデルを用いて、引張終局ひずみの値が部材挙動に与える影響について検討した。使用した構成則モデルは、図8に示す通りである。解析対象とした柱部材は、実験で破壊性状として曲げ圧縮破壊を示した V-HF3.65 モデルとせん断破壊を示した V-HF0.69 の試験体である。解析結果を図9に示す。

解析結果より、引張構成則における軟化域の影響としては、HF-SC・PE モデルより軟化域を考慮しなかった $\epsilon_u 0.02$ 、 $\epsilon_u 0.03$ の方が、より大きい変形時までせん断破壊に至っていないことから、引張終局ひずみのレベルが部材の靱性値に直接影響するせん断補強効果として期待できるものと思われる。また、引張終局ひずみに着目した引張側の靱性は、部材の初期剛性や最大耐力、軟化挙動における勾配には影響せず、せん断補強効果として機能することが確認できた。

また、耐震壁の力学的挙動に及ぼす材料構成則の影響を検討する目的で、図10に示す構成則モデルを用いて、壁試験体を解析した。その結果から、図11に示すように、引張強度が高いと部材耐力も上昇し、また引張終局ひずみが大きいと、部材の最大耐力時の変形角も大きくなる傾向が確認できる。しかし、2.0ft-0.5eu では、最大耐力後の耐力低下が顕著となっており、ひび割れが局所化した箇所での鉄筋の塑性化が卓越する結果となっている。一方、圧縮構成則に HF-PVA を使用したモデルでは、いずれのモデルも $3.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 付近で最大耐力となり、それ以降は耐力低下の傾向を示している。これは、圧縮側壁板において圧壊が生じたために耐力が上昇しなくなった結果である。このように、引張側の材料特性はそのまま部材性能へ影響するが、その特性を十分に機能させるためには、十分な材料の圧縮強度と靱性が必要となることが確認された。

(4) 耐久性とひび割れ性状の関係

高靱性セメント複合材料に埋設された鉄筋の腐食速度に関して、実験的に検討した(図12)。用いた材料の調合を表1に示す。

腐食試験に先立って4点曲げ試験により所定の最大ひび割れ幅となるように載荷試

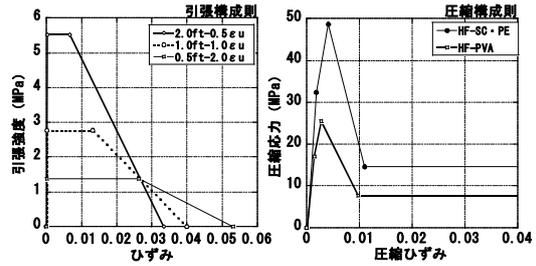


図10 引張・圧縮側構成則

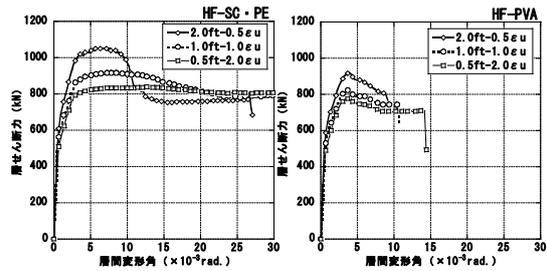


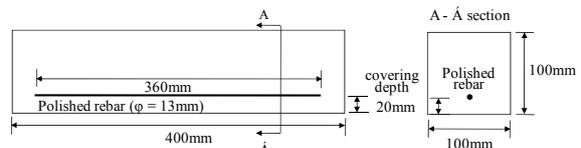
図11 層せん断力-部材角関係

験を実施した。導入ひび割れ幅と鉄筋の腐食量及び引張強度の関係を図13に示す。モルタルでは腐食量の結果に大きなばらつきが見られるものの、FRCC及びHFRCCでは双方共に導入ひび割れ幅が大きくなる程鉄筋腐食量が増大した。但し、鉄筋腐食量は曲げひび割れを導入しない試験体に対しては Mortar>FRCC>HFRCC の順で大きな差異を示したのに対して、導入ひび割れ幅の増大

表1 用いられた材料の調合

試験体	W/B (wt.%)	S/B (wt.%)	SF/B (wt.%)	SP/B (wt.%)	PE 繊維 (Vol.%)	SC 繊維 (Vol.%)
Mortar					-	-
FRCC	0.45	0.45	0.15	0.009	1.5	-
HFRCC					0.75	0.75

Binder=Cement+Silicafume, SP=Superplasticizer



(a) 腐食促進試験体の概要

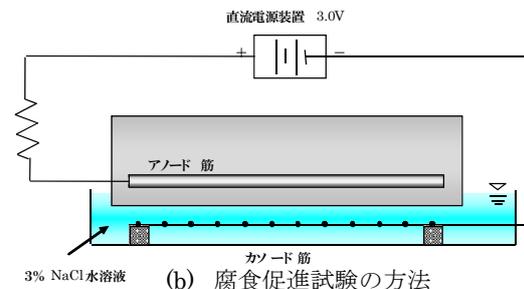
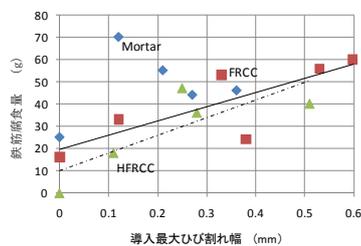


図12 HFRCCに埋設された鉄筋の腐食試験

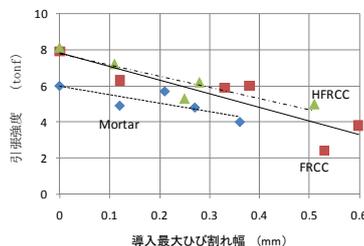
に伴う腐食量の増加傾向はほぼ同程度と見なすことができる。従って、ひび割れ幅と鉄筋腐食の関係は、ひび割れ発生段階での材料による抵抗性能が最も支配的であると考えられる。また、腐食した鉄筋の引張強度の低下傾向は、最も低下の激しかったモルタルの場合も含めて、導入最大ひび割れ幅の増大と共に減少傾向を示している。特に 0.5mm 程度のひび割れに対しては HFRCC と比べて FRCC の低下が顕著となっている。

(5) 自己修復の可能性

コンクリート構造物の耐久性向上に及ぼす高靱性材料の特性の影響を定量的に評価するためにまず、高靱性材料で作製した板状試験体に引張応力を作用してひび割れを導入した後透水試験を行い、ひび割れ性状の違いが透水性にどのような影響を及ぼすかを検討した。その過程で試験体を水中に保持している経過時間が長くなる程透水性が低下



(a) 鉄筋腐食量への影響



(b) 鉄筋の引張強度への影響

図 13 導入最大ひび割れ幅の影響

すること、更には繊維の混入によってその特性が変化することが明らかになった。そこで、時間経過と共に変化するひび割れ内の水和生成物の観察と分析、並びに透水性の経時変化と再載荷試験により、自己修復特性を調査した。その結果、高靱性セメント系複合材料のひび割れの自己修復は、未水和セメント粒子の再水和によるというよりはむしろ水中に溶け込んだ二酸化炭素と反応してできる炭酸カルシウムの結晶によること、ひび割れを架橋する極細い合成繊維の密度、即ち単位体積当たりの合成繊維混入本数が最も大きな影響を及ぼすこと、スチールコードを含むハイブリッド型高靱性セメント系複合材は、ひび割れの自己修復が単に遮水性能の向上につながるのみならず力学的特性の回復にも一定程度つながることを明らかにした。

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 22 件)

- (1) D. Homma, H. Mihashi and T. Nishiwaki : Self-Healing Capability of Fiber Reinforced Cementitious Composites, J. of Advanced Concrete Technology, Vol.7, No.2, pp.217-228, 2009, 査読あり
- (2) A. Kobayakawa, D. Homma, H. Mihashi and K. Shimozawa: Corrosion Durability of Fiber Reinforced Cementitious Composites, Concrete Durability and Service Life Planning, No. 2, RILEM, pp.311-318, 2009, 査読あり
- (3) 鶴飼和也, 迫田丈志, 前田匡樹, 三橋博三: 変動軸力を受ける HFRCC 柱の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第 31 巻, 第 2 号, pp.1279-1284, 2009, 査読あり
- (4) 菊池俊文, 三橋博三, 秋田宏, 菊田貴恒: 高靱性繊維補強セメント系複合材料に埋め込まれた異形鉄筋の付着挙動に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.450-455, 2007, 査読あり

[学会発表] (計 36 件)

- (1) H. Mihashi: Toughening Mechanism of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites, FRAMCOS-6, 2007.6.18, Catania, Italy

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三橋 博三 (MIHASHI HIROZO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90091751

(2) 研究分担者

前田 匡樹 (MAEDA MASAKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30262413

(3) 連携研究者

金子 佳生 (KANEKO YOSHIO)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60312617

西脇 智哉 (NISHIWAKI TOMOYA)

山形大学・地域教育文化学部・准教授

研究者番号: 60400529