

論文 ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の破壊特性に及ぼす水セメント比の影響に関する研究

石原 誠一郎^{*1}・三橋 博三^{*2}・福山 洋^{*3}・諏訪田 晴彦^{*4}

要旨:本研究は、高強度鋼繊維（スチールコード）と高強度ポリエチレン繊維を各々0.75vol.%混入したハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の水セメント比を45～25%に変化させることで、その力学性状がどのように変わるかを調べた。その結果、水セメント比が45～35%であれば、補強繊維の拘束による圧縮靱性の確保が可能であること、さらに水セメント比45%では引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を付与できるが、水セメント比35%以下の高強度な高靱性セメント複合材料に擬似ひずみ硬化特性を付与することは困難であり、繊維混入量を増やす必要があることが確認された。

キーワード: 繊維補強, 鋼繊維, 合成繊維, ハイブリッド, 水セメント比

1. はじめに

近年、セメント材料を繊維で補強した複合材料で、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する高靱性セメント複合材料の研究が積極的に行われ、使用される繊維の種類も多様化している¹⁾²⁾。さらに、補強機能の異なる2種類の繊維でマトリックスを補強したハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の研究も行われている³⁾⁴⁾⁵⁾。

三橋らは、特殊加工された高強度鋼繊維（スチールコード）と合成繊維を混入することで、スチールコードのみを混入した場合に比べ、スチールコード付近のマトリックスが靱性的になり、スナッピング（ひび割れ面に対して繊維が傾斜して介在している時に、ひび割れ面付近において繊維とマトリックスが引っかかること）によるマトリックスの破壊が抑制され、材料の靱性が大きく向上することを報告している。さらに、合成繊維長および水セメント比W/Cを40～50%に変化させて、材料の靱性がどのように変化するかを調べている³⁾⁴⁾。

本研究では、スチールコードとポリエチレン繊維を混入したハイブリッド型繊維補強セメント複合材料について、水セメント比を45%～25%と小さくすることで、曲げ、引張、圧縮の力学性状がどのように変化するかを調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料およびその物性を表-1に示す。セメントは低熱系シリカフェームセメントを使用した。混和剤はW/C=45, 35, 30%の調合には、ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤（SP1）を使用し、W/C=25%には、ポリカルボン酸エーテル系の超高強度用高性能減水剤（SP2）を使用した。なお、空気量を調節するために、ポリアルキレングリコール誘導体を主成分とする空気量調整剤を適時使用した。

使用繊維は高強度鋼繊維をより合わせたスチールコード（SC）と高強度ポリエチレン繊維（PE）を使用した。使用繊維の物性を表-2に示す。

2.2 調合

調合を表-3に示す。調合は、W/C=45, 35,

*1 (株) 浅沼組 技術研究所 建築研究グループ 博士 (工学) (正会員)

*2 東北大学大学院教授 工学研究科都市・建築学専攻 工博 (正会員)

*3 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ上席研究員 工博 (正会員)

*4 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ研究員 (正会員)

表-1 使用材料

材料	記号	種類	物性
セメント	C	低熱系シリカフェームセメント	密度 3.08g/cm ³ , 比表面積 5,600 cm ² /g
骨材	S	珪砂 5号	三重県志摩郡磯部産, 比重 2.62g/cm ³
混和剤	SP1	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
混和剤	SP2	超高強度用高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物

30, 25%の4種類である。繊維混入量はスチールコードおよび合成繊維とも各々0.75vol.%とした。既往の研究^{3) 4)}ではハイブリッド型繊維補強セメント複合材料にはスチールコードと合成繊維が各々1.0 vol.%以上混入されている。しかし、本研究でめざすハイブリッド型繊維補強セメント複合材料は、鉄筋を配した構造部材に打設できるワーカビリティを確保する事を目標としているため繊維混入量を既往研究よりも小さくして、その力学性状を確認した。

2.3 供試体作製方法

練混ぜには100%の強制2軸ミキサーを用いた。セメント、珪砂およびスチールコードの一部を30秒間空練りし、その後、水および高性能減水剤を加え1分間練り混ぜた。次に、ポリエチレン繊維およびスチールコードを投入し、2分間練り混ぜた。なお、練上がり後、空気量調整剤で空気量の調整を行った。

練上がり後、供試体の型枠に木槌で振動を加えながら流し込み、突き棒で突き固めた。打設後、恒温恒湿室(温度20℃, 相対湿度60%)で養生した後、脱型した。その後、各供試体を標準水中養生(20℃)した。

2.4 試験方法

(1) フロー試験

フロー試験は、JIS R 5201 に準じた。フローテーブルを用い、15回の落下運動後のフロー値を計測した。

(2) 圧縮試験

圧縮試験は、JIS A 1108 に準じて行った。供試体はφ100×200mm 円柱供試体とした。2000kN コンピュータ制御・油圧サーボ式圧縮試験装置により0.5mm/分の一定の荷重速度で加力した。試験は材齢1, 4, 8, 13週で行った。圧縮ひず

表-2 使用繊維の物性

種類	記号	繊維長 (mm)	繊維径 (μm)	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (kN/mm ²)
鋼	SC	32	415	2650	160
ポリエチレン	PE	6	12	2770	88

表-3 調合およびフレッシュ性状

W/C (%)	S/C (%)	SP/C (%)	繊維混入率 (vol.%)		フレッシュ性状	
			SC	PE	フロー値 (mm)	空気量 (%)
45	45	0.3	0.75	0.75	178	0.9
35	40	0.8			200	1.6
30	40	1.1			198	1.7
25	40	1.1			184	2.5



写真-1 曲げ試験状況

み(2.5%程度まで)を計測するために材齢1, 4, 8週では、コンプレッソメータおよび加力板の変位を変位計で計測した。材齢13週では、ピーク荷重後の変形をコンプレッソメータが拘束する恐れがあるため、コンプレッソメータを用いず加力板の変位のみ計測した。

(3) 曲げ試験

曲げ試験は、「繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法」(JCI-S-003-2005)に準じて、三等分点荷重を行った。文献^{1) 6)}を参考に、供試体の表面には曲

率計測用として純曲げ区間の上下 2 点間の軸方向変位をパイ型変位計により計測し、供試体の裏面では純曲げ区間 3 点のたわみを計測した。曲げモーメントおよび表面の軸方向変位から算出する曲率を JCI-S-003-2005 に準拠して求めた。裏面のたわみから算出する曲率は、文献¹⁾の「構造利用のための引張性能評価法試案」解説から求めた。試験は材齢 13 週に行った。試験状況を写真-1 に示す。

(4) 引張試験

引張試験は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体の両端固定型直接試験⁷⁾によって行った。ひずみは供試体中央 100mm 区間にコンプレッソメータを設置して計測した。供試体の上下面から各約 50mm 区間にガラス繊維シートを巻きつけ補強した掴み部を掴み治具で引張った。試験は材齢 13 週に行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料のフレッシュ性状を表-3 に示す。各調合ともフロー値が 175mm 以上となり、構造部材への打設可能な程度のワーカビリティを確保できた。ただ、セメントに比表面積の大きい低熱系シリカフュームセメントを使用したため、W/C=45%では若干分離ぎみであった。

空気量は、練上がり時に 5~8.5%と多かったため、練上がり後、空気調整剤により空気量を低減した。コンクリート温度は 24~27°Cであった。

3.2 圧縮試験結果

圧縮強度と材齢の関係を図-1 に示す。低熱系シリカフュームセメントを使用したため、材齢 1 週での強度発現は比較的小さく、材齢 13 週まで強度の増大が見られた。水セメント比の低減の程度に比例して圧縮強度は増大した。

材齢 13 週時の圧縮応力と圧縮ひずみの関係を図-2 に示す。文献²⁾では、高靱性セメント複合材料の強度時のひずみは一般的なコンクリートの値である 0.2%よりも大きく、0.4%程度であ

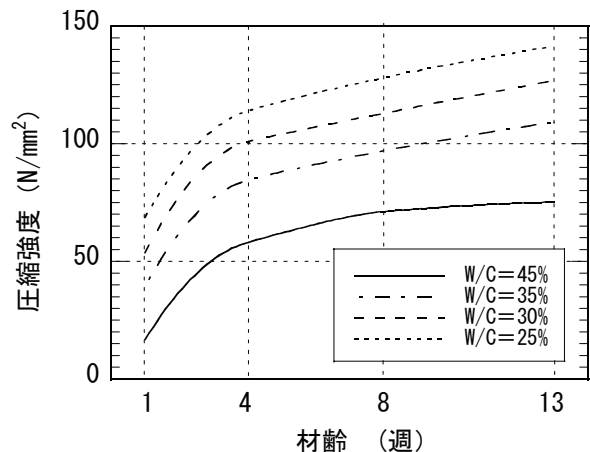


図-1 圧縮強度と材齢の関係

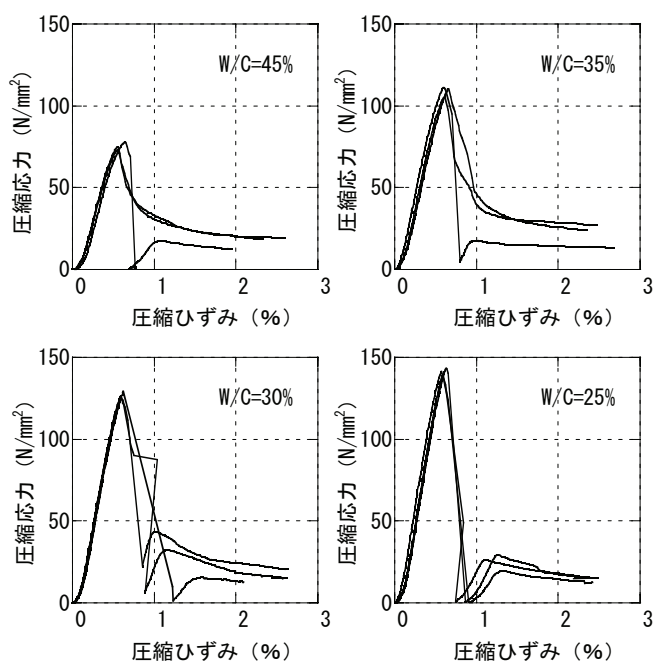


図-2 圧縮応力と圧縮ひずみの関係

るとされている。コンプレッソメータによる拘束の影響を防ぐため、コンプレッソメータを用いず加力板の変位のみ計測し、その変位を供試体高さで除した値を圧縮ひずみとした。そのため、最初の圧縮応力の立上りが緩慢となっているが、それを考慮すると、強度時のひずみは各調合とも 0.4~0.5%程度となっている。

W/C=45%および W/C=35%では、圧縮強度が 75~110N/mm² と高強度であるにも拘わらず、強度点以降のひずみ増加にともなう応力の低下が通常のコンクリートに比べ緩慢であり、補強繊維の拘束によって圧縮靱性が大幅に改善され

ている。ただ、各調合の供試体の一本が急激な応力低下を示しているのは、繊維混入量が少ないため、繊維の分散のバラツキにより、繊維補強が十分でない部分が局部的に生じたためと考えられる。このような現象を防ぐには、もう少し繊維混入量を増やす必要があると考えられる。

W/C=30%および W/C=25%では、圧縮強度が 125~140N/mm² と超高強度となったが、補強繊維の拘束によって通常の超高強度コンクリートに見られるような急激な破壊現象はみられなかった。しかし、図にも見られるように各供試体とも、強度点以降のひずみ増加にともない応力が一旦零近くまで低下し、その後ひずみ増加にともない再び応力の増大が見られた。以上から、水セメント比が 45~35%であれば、補強繊維の拘束による圧縮靱性の確保が可能であることが明らかになった。

3.3 曲げ試験結果

(1) 荷重とたわみの関係

荷重とたわみの関係を図-3に示す。各調合の供試体とも、初期ひび割れ発生後、純曲げ区間およびその近傍に複数の微細なひび割れが多数観察され、荷重も増加し、擬似ひずみ硬化挙動を示した。その後、複数ひび割れは荷重の増加とともに徐々に開口したが、次第に複数ひび割れのうちの一つに破壊が局所化し、その主ひび割れのみが拡大し、それにつれて荷重も低下した。水セメント比が 45%から 25%に減少するにともない、最大荷重が約 45 kN から約 65 kN に増大し、最大荷重点以降の荷重の低下の程度も大きくなる傾向が見られた。特に W/C=25%の

最大荷重点以降の荷重の低下が激しくなった。なお、W/C=35%の最大荷重は W/C=45%に比べ、若干小さくなっている。この原因は W/C=45%の供試体ではすべて純曲げ区間に主ひび割れが生じ破壊したが、W/C=35%の供試体では3体のうち2体が純曲げ区間の外に主ひび割れが発生し最終破壊したためと考えられる。

(2) 曲げモーメントと曲率の関係

曲げモーメントと曲率の関係を図-4に示す。曲率のうち、Cax は軸方向変位から算出した曲率、Cdf はたわみから算出した曲率を示す。

曲げモーメントと曲率 Cax の関係を見ると、W/C=35%および W/C=25%の供試体の中で最大曲げモーメント付近から曲率が減少している供試体は、純曲げ区間の外に主ひび割れが発生し最終破壊した。純曲げ区間内に主ひび割れが発生し最終破壊した試験体ではそのような現象は見られなかった。なお、曲げモーメントと曲率 Cdf の関係からは、純曲げ区間の外に主ひび割れが発生し最終破壊した供試体と純曲げ区間で主ひび割れが発生した供試体との明確な差は見られなかった。

純曲げ区間で主ひび割れが発生した供試体では曲げモーメントと曲率 Cax の関係と曲げモーメントと曲率 Cdf の関係における最大曲げモーメント時の曲率がほぼ同程度であった。しかし、最大曲げモーメント点以降の曲げモーメントと曲率 Cax および Cdf の関係については、W/C=45%および W/C=25%の供試体で異なるものが見られた。この原因は、今回の実験では軸方向変位およびたわみの計測を、供試体の表面と

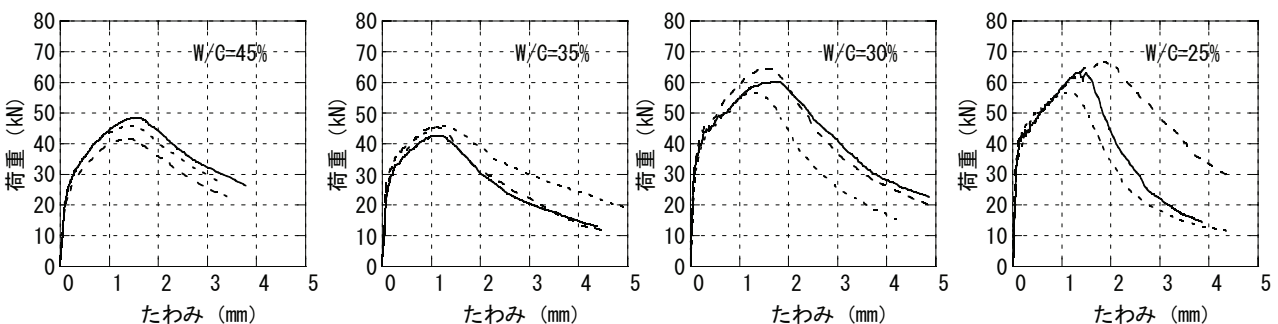


図-3 荷重とたわみの関係

裏面で各々行ったため、純曲げ区間内で主ひび割れが発生した場合でも、主ひび割れの位置が表面と裏面で異なる場合、計測される曲率 Cax と曲率 Cdf に差が出たためと考えられる。

今回の実験で純曲げ区間の外に主ひび割れが発生し最終破壊した供試体が多く見られたが、この原因は、繊維混入量が少ないため繊維の分散のバラツキにより、繊維補強が十分でない部分が生じ、純曲げ区間の外に主ひび割れが発生しやすくなったと考えられる。

3.4 引張試験結果

引張応力と引張ひずみの関係を図-5 に示す。 $W/C=45\%$ の供試体では、既往の研究^{3) 4)}よりも繊維混入量が少ないにも拘わらず、引張応力 $3N/mm^2$ 程度で初期ひび割れ発生後、引張ひずみ

でほぼ1%程度まで引張応力が低下せず、擬似ひずみ硬化を示す供試体も見られた。しかし、 $W/C=35\%$ の供試体では、初期ひび割れ発生後の引張応力の上昇や維持がわずかで、引張ひずみの増加にともない引張応力は徐々に低下した。 $W/C=30\%$ および $W/C=25\%$ では、初期ひび割れ強度は $4\sim 5N/mm^2$ 程度に上昇したが、初期ひび割れ発生後の引張応力の上昇や維持はほとんど見られず、引張ひずみの増加にともない引張応力は大きく低下した。さらに、 $W/C=35\%$ および $W/C=30\%$ では、初期ひび割れ強度がかなり低い供試体も見られた。以上の結果から、本実験のスチールコードおよびポリエチレン繊維の繊維混入量では、水セメント比35%以下の高強度な高靱性セメント複合材料に、引張応力下におい

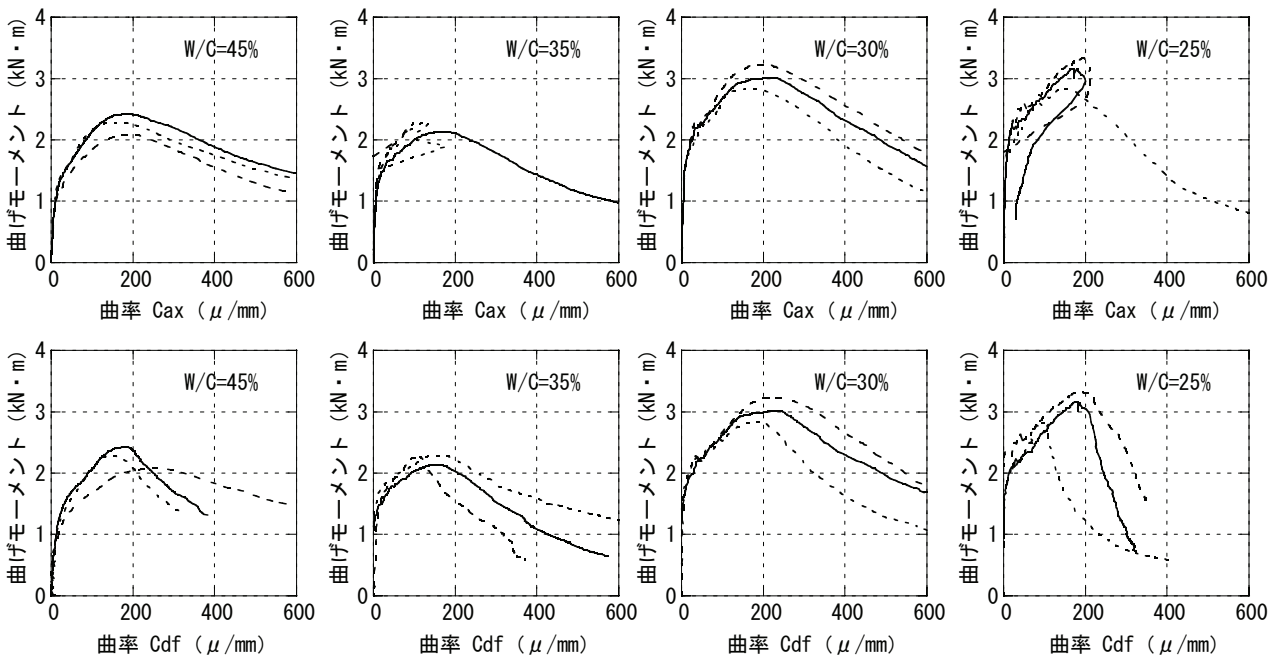


図-4 曲げモーメントと曲率の関係

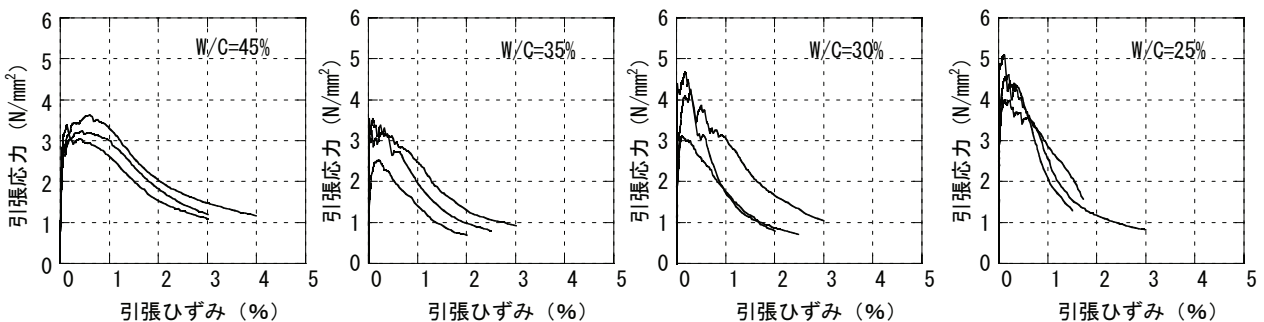


図-5 引張応力と引張ひずみの関係

て擬似ひずみ硬化特性を付与することは困難であることが確認された。

文献³⁾よれば、スチールコードと合成繊維を混入したハイブリッド型繊維補強セメント複合材料は、スチールコードの曲げ剛性が高く、スナッピングによる応力集中によりマトリックスの方が脆性的に破損し十分な靱性能を確保できない恐れがあるため、合成繊維によってマトリックスを補強し、スナッピングによる脆性的な破砕を改善し、スチールコードの性能を十分発揮させるメカニズムで材料の靱性能を確保している。本実験では、水セメント比を低下させ、さらに文献³⁾より繊維混入量を低くしたため、マトリックスが高強度化し破壊挙動が脆性的になった上に合成繊維によるマトリックスの補強効果が低下したため、スナッピングによるマトリックスの脆性的な破損が顕在化し、引張応力下の靱性能が大幅に低下したと考えられる。

本実験での繊維混入量では、W/C=45%では引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を付与できるが、水セメント比 35%以下の高強度な高靱性セメント複合材料に擬似ひずみ硬化特性を付与するには繊維混入量を増やす必要があると考えられる。

4. まとめ

高強度鋼繊維と高強度ポリエチレン繊維を各々0.75vol.%混入したハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の水セメント比を 45~25%に変化させ、その力学性状がどのように変化するかを調べ、以下のことが明らかになった。

- (1) ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料では、繊維混入量を小さくすることで、構造部材への打設可能な程度のワーカビリティを確保できる。
- (2) 本実験の繊維混入量でも水セメント比が 45~35%であれば、補強繊維の拘束により圧縮靱性の確保が可能である。
- (3) 本実験での繊維混入量では、W/C=45%では引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を

付与できるが、水セメント比 35%以下の高強度な高靱性セメント複合材料に擬似ひずみ硬化特性を付与することは困難であり、繊維混入量を増やす必要がある。

謝辞

本研究は、(社)建築研究振興協会に設置された「高靱性セメント複合材料・部材の製造システムと損傷制御要素の設計法に関する共同研究委員会」(委員長：三橋博三 東北大学大学院教授)の研究の一環として行われたものであり、委員各位に謝意を表します。

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(Ⅱ)，2004.5
- 2) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，2005.7
- 3) 川又 篤，三橋博三，金子佳生，福山 洋：ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の靱性能に関する研究，コンクリート工学，Vol.23，No.2，pp.235-240，2001
- 4) 川又 篤，三橋博三，福山 洋：ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料における水結合材比及び繊維長の影響に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 材料施工，pp.501-502，2002.8
- 5) 松沢晃一，橘高義典，田村雅紀：ハイブリッド型短繊維補強コンクリートの破壊特性に及ぼす繊維種類の影響，コンクリート工学，Vol.26，No.1，pp.333-338，2004
- 6) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井 寛：HPFRCC の曲げ性状におけるたわみと曲率の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 材料施工，pp.773-774，2003.9
- 7) 佐藤幸博，福山 洋，諏訪田晴彦：高靱性型セメント系複合材料の一軸引張一圧縮繰返し試験方法の提案，日本建築学会構造系論文集，No.539，pp.7-12，2001.1