

論文 引張軟化解析による短繊維補強セメント系複合材料のハイブリッド効果考察

石山 智^{*1}・山田 寛次^{*2}

要旨：耐アルカリガラス繊維とポリプロピレン繊維により補強された押出成形セメント系複合材料のハイブリッド効果を明らかにするため、引張軟化解析を用いて検討した。ハイブリッド補強、耐アルカリガラス繊維補強、ポリプロピレン繊維補強の各試験体について解析を行ったところ、ハイブリッド試験体の軟化曲線は各繊維単体の軟化曲線を足し合わせることで、おおむね推定できることが確認できた。

キーワード：引張軟化、ハイブリッド効果、短繊維補強、耐アルカリガラス繊維、ポリプロピレン繊維

1. はじめに

繊維補強セメント系複合材料の研究は近年特に進んでおり、ひび割れ防止や靱性の向上等を目的とした新素材繊維の開発や調合・練り混ぜ方法の改良などさまざまな試みがなされている。複数の種類の繊維を混合することによって性能を向上させようというハイブリッド化の研究も、多く試みられるようになってきている。

セメント材料の高靱性化を可能にする繊維質材料としては、鋼繊維、ポリビニルアルコール（PVA）繊維が注目されているが、主に外壁パネルなどに広く用いられている押出成形セメント材料は、押出成形機内を繊維を混入した硬化前の材料がせん断力を受けながら通過するため、鋼繊維を使用することが難しく、また粉末珪石などの反応性骨材を使用することからオートクレーブ養生を行うのが一般的であり、熱に弱いPVA繊維は不向きであることなどから、現状では高靱性化することが難しい状況にある。したがって、現行の繊維を用いて押出成形セメント材料の機械的特性を向上させるには、複数の繊維を混入し、それぞれの効果でもって機械的特性を向上、もしくは相乗効果を期待できるハイブリッド化の考え方が重要となってくる。ここで繊維をハイブリッド化することの問題点は、

無限に組み合わせの存在する混合比の中から、目的の比率を得るために多数の試行錯誤を繰り返さなければならないという点である。しかしながら、ハイブリッド後の挙動や力学的特性を予測することは難しく、これに関する研究はあまり行われていないのが現状である。

以上のような背景を踏まえて、本研究では押出成形された短繊維補強セメント系複合材料のハイブリッド化について、その力学的特性を考察した。特に引張軟化特性に着目し、検討を行った。

2. 実験概要

押出成形されたセメント系材料は、成形中に真空脱気されるため組織が蜜実であり、また反応性骨材を使用するため粒径の大きい骨材などが混入せずマトリクスが均質化しやすい。このような優位点を踏まえて本報では試験体作成に押出成形を使用した。また、筆者らは既報³⁾において、耐アルカリガラス繊維の押出成形材料に対する適用を検討した。その結果、曲げ強度および曲げ弾性値への寄与が著しいことが確認できた。本報では、上記試験体の靱性能向上を目的としてポリプロピレン短繊維を混合し、ハイブリッド化を行って検討した。

*1 秋田県立大学 助手 システム科学技術学部 工修 (正会員)

*2 秋田県立大学 教授 システム科学技術学部 工博 (正会員)

表-1 繊維の諸特性

	繊維の状態	密度 (g/cm ³)	繊維長 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	試験時含水率 (%)
ARG	200本集束	2.80	6.00	1500	74	0.68
PP	50本集束	0.91	3.00	490	12	0.94

表-2 調合表

	セメント (g/L)	粉末珪石 (g/L)	ARG繊維 (g/L)	PP繊維 (g/L)	メチルセルロース (g/L)	水 (g/L)
A2	831	792	50.00	9.05	17.01	368
A3	806	768	97.34	8.99	17.00	343
A5	782	745	141.83	8.98	16.99	364

2.1 繊維

使用した繊維の諸特性を表-1に示す。ARG 繊維は繊維長 6mm，繊維径 18 μm のもので，通常状態は集束剤により 200 本単位で集束されているものを使用した。また PP 繊維は繊維長 3mm の長方形断面を持つものであり，ARG 繊維と同様に 50 本程度の単位で集束された状態のものを使用した。

2.2 調合

各試験体の調合を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(比重 3.16)，骨材には粉末珪石(比重 2.67)を使用した。セメントと粉末珪石を重量比で 0.95 の割合で混合したものを基本調合として，増粘剤 メチルセルロース，(比重 1.28)と各繊維を添加した。繊維混入量は A2 を 1.87vol%，A3 を 3.80vol%，A5 を 5.68vol% の 3 水準とし，これら 3 種にそれぞれ 1.00vol% の PP 短繊維を添加してハイブリッドとした。

2.3 練り混ぜおよび成形

(1) 練り混ぜ

練り混ぜには 20L のホバートミキサーを使用した。粉体だけの空練りを 1 分，水を添加し材料全体が一つにまとまる直前(水添加後約 2~3 分)で繊維を投入し，さらに 3 分間練混ぜを行って粘土状に仕上げた。

(2) 押出成形

実験には上部バグスクリュー(直径 50mm)と下部オーガースクリュー(直径 75mm)の間に真空脱気室を備えたスクリュー式押出成形機

を使用した。使用した金型は，断面形状が 15 × 40mm のものと 40 × 40mm の 2 種類を用い，それぞれ曲げ試験用，破壊靱性試験用の試験体を作製した。

(3) 養生

押し出された試験体は平均温度 20℃，平均湿度 95%の養生室で 24 時間静置し，その後 160 ± 8 時間保持のオートクレーブ養生を行った。なおオートクレーブ養生を行うことによる繊維への影響は，既報^{3),4)}において確認しており，本報では問題がないものとして取り扱う。

(4) 試験体

養生後，成形体をダイヤモンドソーにより切断し，平面研削盤を用いて表面を研磨した。各シリーズについて曲げ・破壊靱性試験体を作成し，試験を行った。

3. 曲げ試験結果および考察

3.1 試験条件

断面形状が 15 × 40mm の金型により成形された試験体を長さ 160mm で切り出して平板状の試験体を作成し，スパン 150mm，載荷速度 0.002mm/sec の中央集中載荷によって 3 点曲げ試験を行った。

3.2 曲げ試験におけるハイブリッド効果

実験結果を図-1 から図-3 に示す。また，比較用として同じ調合で PP 繊維を混入しなかった ARG 短繊維補強試験体の曲げ試験結果を，図-4 から図-6 に示す。図のように，PP 短繊維混入

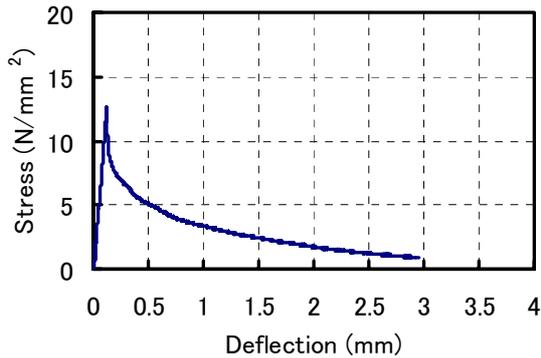


図-1 A2 試験体の曲げ挙動

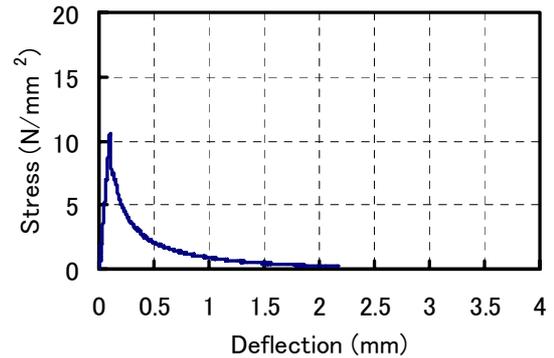


図-4 ARG2vol%補強試験体

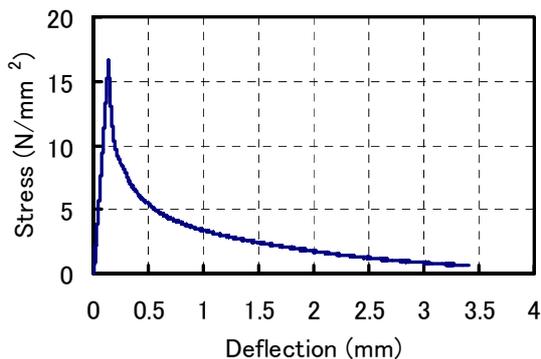


図-2 A3 試験体の曲げ挙動

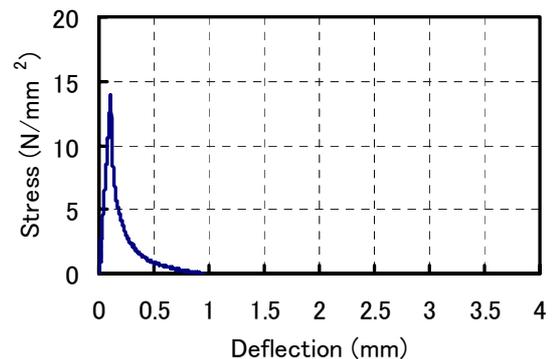


図-5 ARG3vol%補強試験体

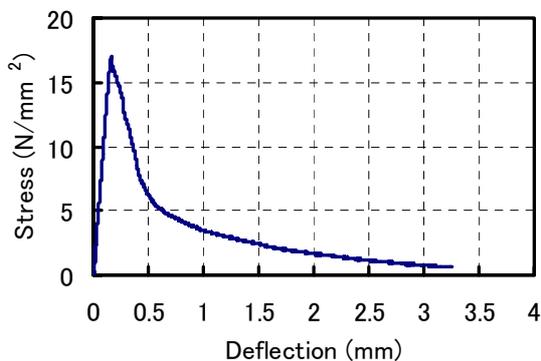


図-3 A5 試験体の曲げ挙動

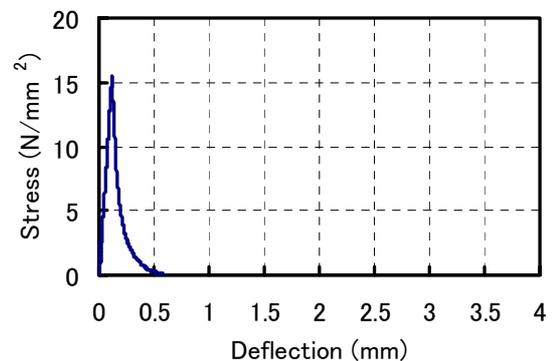


図-6 ARG5vol%補強試験体

による明らかな靱性能の向上が確認できる。特にたわみが 0.5mm 付近の応力では、ARG 短繊維補強試験体はすべて 5N/mm^2 を下回るのに対し、ハイブリッド試験体はほぼ 5N/mm^2 で一定値を示しており、その後の挙動もほぼ同じであることがわかる。ARG 繊維混入量に関係なくこのような挙動がみられることから、ハイブリッド化による PP 短繊維の影響は主に曲げ応力ピーク以降の挙動に現れるといえる。反対に ARG 繊維の影響は主に最大曲げ応力に対して現れており、既報³⁾において ARG 短繊維補強材料について確認された曲げ応力への影響が、ハイブリ

ッド試験体にも適用できることが確認された。このときの曲げ弾性値はハイブリッド試験体で約 28GPa 程度であったが、ARG 補強試験体は平均 30GPa 程度の値であり、ハイブリッド試験体の方がやや低めの値となった。

4. 引張軟化挙動の評価

4.1 試験および解析条件

断面形状が $40 \times 40\text{mm}$ の金型より成形された試験体を長さ 160mm に切り出して角柱試験体を作成した。この試験体にダイヤモンドソーで梁せいの 1/2、幅 1mm の切り欠きを入れ、スバ

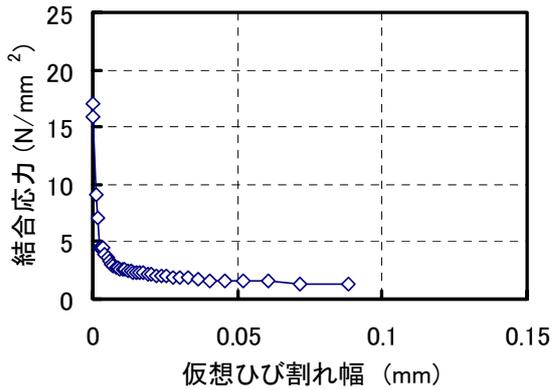


図-7 A2 試験体の引張軟化挙動

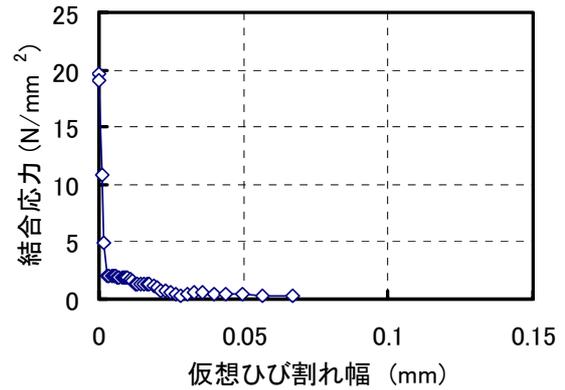


図-10 ARG2vol%補強試験体

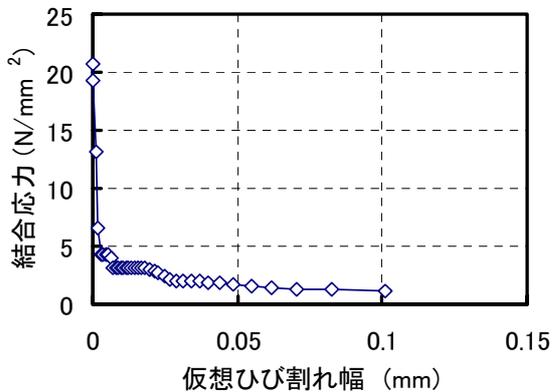


図-8 A3 試験体の引張軟化挙動

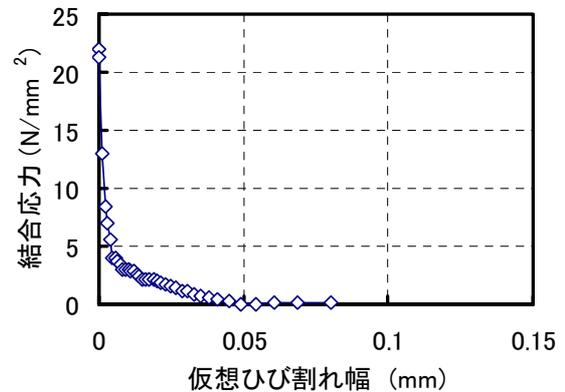


図-11 ARG3vol%補強試験体

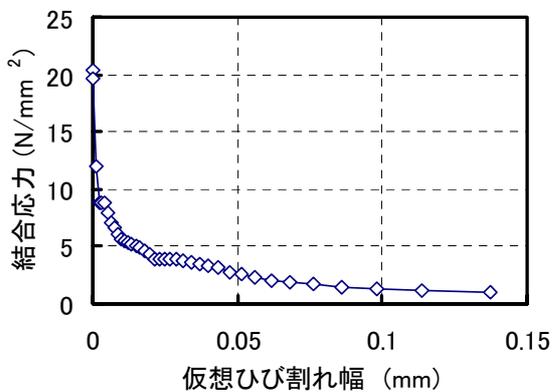


図-9 A5 試験体の引張軟化挙動

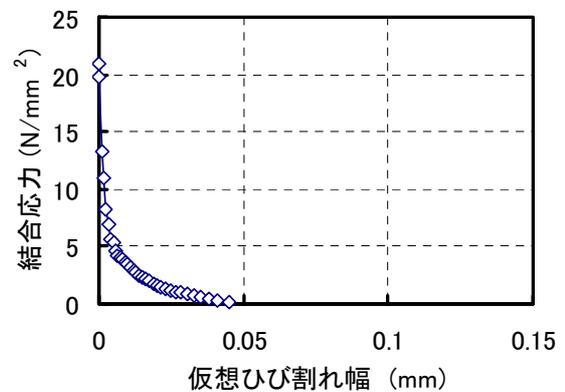


図-12 ARG5vol%補強試験体

ン 150mm , 載荷速度 0.002mm/sec の破壊靱性試験を行った。ここから得られた荷重 - CMOD 関係を JCI 推奨の多直線近似法による引張軟化曲線推定プログラムを用いて解析を行った。

4.2 解析結果および考察

ハイブリッド試験体の引張軟化解析結果を図-7から図-9に、曲げ試験結果と同様に比較用としてARG短繊維補強試験体の解析結果を図-10から図-12に示す。軟化開始応力は、ハイブリ

ッド, ARG のみの両試験体で 20N/mm^2 前後とほぼ一致しているが, それ以降の挙動に関して曲げ試験結果と同様に PP 短繊維混入による明らかな効果が確認できる。このことを仮想ひび割れ幅が 0.05mm までの有効破壊エネルギー G_F^U を用いて評価する(図-13)と, ARG 短繊維補強試験体と比較して 1.5 ~ 2.0 倍の値を示しており, PP 短繊維を混入することにより, 靱性能が向上したことがわかる。なお, A5 試験体につ

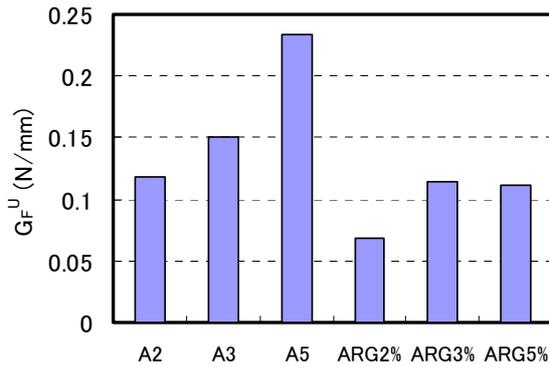


図-13 有効破壊エネルギー G_F^U

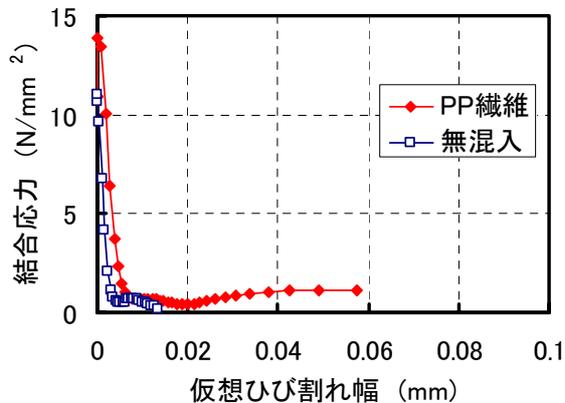


図-14 PP 繊維(1vol%)補強及び無混入試験体

いては A2, A3 試験体と比べて、特に仮想ひび割れ幅が 0.01~0.05mm のところで顕著に効果が現れており、0.05mm 以降になると、結合応力が他の試験体と同程度になった。

4.3 軟化曲線に対する繊維の影響

繊維補強材料の引張軟化特性には、マトリクスの微細ひび割れ累積領域とともに繊維による架橋応力の影響が非常に重要となる。ハイブリッド試験体中に存在する各繊維の効果と繊維架橋応力を明らかにするため、調査をあわせたハイブリッド試験体, ARG 短繊維補強試験体, PP 短繊維補強試験体から求められた引張軟化曲線について各々差し引きを行って検討した。

(1) マトリクスの影響

図-14 に同一の調合で繊維長 3mm の PP 繊維を 1vol% 混入した試験体と、やはり同一の調合で繊維を混入しなかった繊維無混入試験体の引張軟化解析結果を示す。また、図-15 にハイブリッ

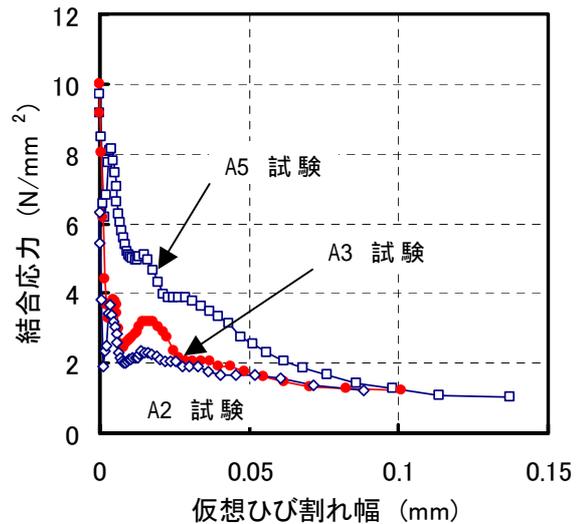


図-15 引張軟化曲線 (マトリクス考慮)

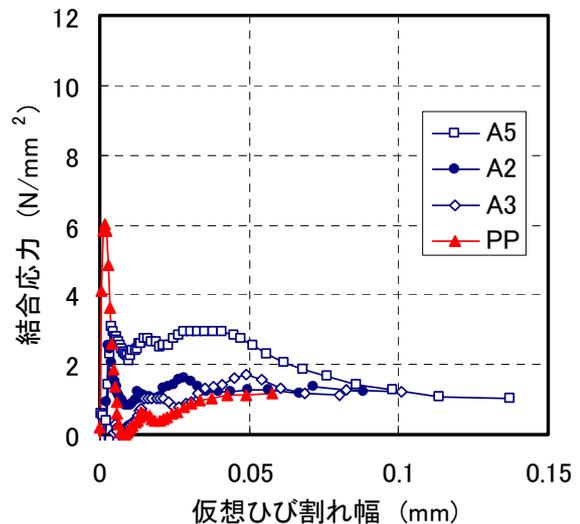


図-16 引張軟化曲線 (PP 繊維抽出)

ド試験体の軟化曲線から図-14 の繊維無混入試験体の軟化曲線を減じたものを示す。マトリクスの影響を省いた形となるため各試験体共に軟化開始応力が 10N/mm^2 程度まで低下する形となった。A2, A3 試験体は仮想ひび割れ幅が 0.03mm 以降はほぼ同じ挙動を示しており、微小ひび割れの領域で ARG 繊維が効果を発揮していることがわかる。

(2) 軟化曲線の重ね合わせに関する考察

図-16 はハイブリッド試験体の引張軟化曲線から ARG 短繊維補強試験体の引張軟化曲線を減じたものであり、ハイブリッド試験体中の PP 繊維の架橋応力を表したものである。図-15 と

同様に，A2，A3 試験体は非常に似通った挙動を示しており，仮想ひび割れ幅が 0.01mm 付近から徐々に効果を発揮しだし，0.05mm 付近で結合応力の上昇が頭打ちになる様子がわかる。ここで，図中に PP としているのは，図-14 における PP 繊維補強試験体の軟化曲線から繊維無混入試験体の軟化曲線を減じたものである。これと A2，A3 試験体を比較すると，仮想ひび割れ幅が 0.01mm までの挙動にはばらつきがあるが，それ以降の挙動はほぼ一致しており，本実験におけるハイブリッド試験体中の PP 繊維の引張軟化挙動は，同調合のマトリクスを持つ PP 短繊維補強試験体の引張軟化挙動でおおむね表現できることが明らかになった。

5. まとめ

耐アルカリガラス短繊維とポリプロピレン短繊維によるハイブリッド繊維補強押出成型セメント材料を作成し，曲げ挙動および引張軟化挙動におけるハイブリッド効果と，各繊維の引張軟化挙動に及ぼす影響について考察した結果，以下のような知見を得た。

- (1) 最大曲げ応力は，ARG 繊維混入量が増加するに伴って上昇する傾向が見られた。
- (2) 曲げ挙動に関して，たわみが 0.5mm 以降の挙動に関しては ARG 繊維の混入量にかかわらず A2，A3，A5 試験体ともほぼ同じ挙動を示した。
- (3) ハイブリッド試験体の引張軟化挙動と ARG 短繊維補強試験体の引張軟化挙動を比較したところ，PP 繊維混入による靱性能の向上が確認できた。
- (4) 仮想ひび割れ幅が 0.05mm までの有効破壊エネルギー G_F^U を評価したところ，ARG 短繊維補強試験体と比較して 1.5～2 倍の値を示した。
- (5) A2，A3 試験体の引張軟化挙動は，同調合のマトリクスを持つ ARG，PP 短繊維補強試験体の引張軟化挙動を重ね合わせることで示すことができた。

なお，A5 試験体においては，曲げ挙動，引張軟化挙動において他の試験体と異なる特性を示した。これについては今後の検討課題としたい。

謝辞

本実験を行うに当たり，日本電気硝子（株）から ARG 繊維を，株式会社テザックより PP 繊維を提供いただいた。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，2001.5
- 2) 守 明子，馬場明生：新素材を混入したセメント系材料の押出成形性，日本建築学会構造系論文集，第 484 号，pp.1-6，1996.6
- 3) 石山 智，山田寛次：耐アルカリガラス繊維を混入した押出成形セメント材料の引張軟化挙動，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp.243-248，2002.6
- 4) 山本基由，山田寛次：オートクレーブ養生温度を変えた PP 短繊維補強セメント材料の曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp.231-236，2002.6
- 5) 馬場明生，守 明子ほか：セメント系押出成形材料の曲げ強度に及ぼす増粘剤種類の影響，日本建築学会構造系論文集，第 559 号，pp.9-13，2002.9
- 6) 三橋博三，野村希晶，桐越一紀：破壊力学手法に基づく繊維補強セメント系複合材料の力学的特性に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，第 449 号，pp.1-8，1993.7