

論文 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

石山 智*1・山田 寛次*2

要旨：本研究では、主にコンクリート補強用として開発された耐アルカリガラス繊維を使用して作成した押出成形セメント系複合材料の成形性と、曲げ挙動、引張軟化特性の力学特性について検討した。繊維混入量を3水準、養生方法を160 オートクレーブ養生と80 蒸気養生の2種類により試験体を作成して実験を行ったところ、押出成形課程における繊維の破断が認められたものの、繊維量に比例して曲げ強度が増すことが確認できた。また、引張軟化において初期の急激な結合応力の低下が緩和することが明らかになった。

キーワード：耐アルカリガラス繊維，押出成形，引張軟化

1. はじめに

押出成形セメント材料は、主に外壁パネルなどに広く用いられているが、ほかのセメント系製品よりも高強度・高耐久性を有し、工場生産性にも優れることから、近年では打ち込み型枠や表面保護材料としての利用にも注目されている。このような高強度・高耐久性を有する理由としては、通常の流し込み成型に比べて水セメント比を非常に小さくできること、押出成形過程において真空脱気を行うことにより連行空気量を低減でき、マトリクスを緻密にできること、ワーカビリティ確保などの問題により通常2vol%程度しか混入できない短繊維などの繊維質添加物を、5vol%以上の多量調合が可能であること等が挙げられる。この中でも特に繊維質添加物を多量調合できることは、近年盛んに研究が行われている高靱性セメント系材料に対して一つの解決策となり得る特徴といえるであろう。

一方、セメント系材料に混入される繊維質添加物に関しても新素材開発が盛んである。近年、クリソタイル系繊維質添加物代替品として登場した耐アルカリガラス繊維（以下 ARG 繊維）は曲げ強度に優れ、ジルコニアを多量に含有させることによって耐アルカリ性を高めたコンク

リートへの適用を考慮したガラス繊維として注目されている材料であり、多量調合の際は吹き付け法を使用した成形が行われている。しかし材料のまき散らしなどで作業環境があまり良くないこと、成形に時間がかかり工場生産性に不向きである等の問題があった。

本研究では、ARG 繊維を混入したセメント材料を工場生産性に優れた押出成形することにより繊維に対してどのような影響があるかを実験により確認し、成形体の曲げ強度および引張軟化特性について把握することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 材料および調合

使用した ARG 繊維の性能を表-1 に、調合を表-2 に示す。使用材料は、セメントには普通ポルトランドセメント（比重 3.16）、粉末珪石（比重 2.67）、押出成型時の可塑性を確保するための増粘剤としてメチルセルロース（比重 1.28）と、6mm にカットされた ARG 繊維である。

表-1 ARG 繊維性能

密度 g/cm ³	繊維径 μm	引張強度 MPa	ヤング率 GPa	含水率 %
2.8	18	1500	74	0.68

*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-2 調合表

単位(g)	セメント	粉末珪石	ARG	MC	水
A0	898.74	856.04	0.00	18.26	380.71
A2	881.96	840.06	52.28	17.92	373.60
A5	893.83	851.35	158.97	19.20	326.51

調合に関しては、繊維混入量にかかわらず MC (メチルセルロース) 量を 1wt.%、粉末珪石とセメントの調合割合を 0.95 で統一した。なお、水粉体比は使用材料のうちセメント・粉末珪石・MC の合計質量に対する質量比であり、成形性を考慮して 18.5%~21.5%とした。ARG 繊維添加量は、A0 シリーズが 0vol%、A2 シリーズを 1.87vol%、A5 シリーズを 5.68vol%の 3 水準とし、これら 3 種の調合により比較を行った。

2.2 試験体製作

(1) 練混ぜ

練混ぜには 20L のホバートミキサを用いた。材料を秤量した後、粉体のみの空練りを 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。なお、ホバートミキサの攪拌用の羽根は、繊維混入前は平型を使用した。繊維混入後は粘性が強くなり均一な練混ぜが難しくなるためフック型に変更して練混ぜを行った。

(2) 押出

実験には上部パグスクリュー (直径 50mm) と下部オーガスクリュー (直径 75mm) の間に真空脱気室を備えたスクリー式押出成形機を使用した。押出成形機の概略を図-1 に示す。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

通常、押出成形によって作成されるセメント系製品は高強度化・工期短縮等のためオートクレーブ養生される場合が多い。しかし、高温・高圧養生による ARG 繊維の劣化については未知の部分がある。従って本実験では、各試験体シリーズについて平均室温 20℃、湿度 90%以

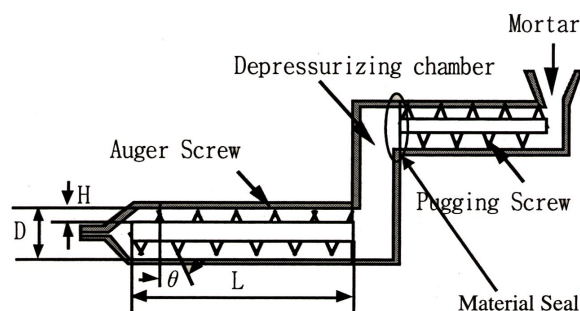


図-1 スクリュー式押出成形機

上の養生室に 24 時間静置した後、160℃ 8 時間のオートクレーブ養生と、80℃ 20 時間の蒸気養生をおこなって比較した。

(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。

2.3 試験方法

(1) 曲げ試験

15×40mm の金型を使用して作成した平板状の試験体に対し、スパン 150mm、載荷速度 0.002mm/sec の中央集中載荷によって実施した。なお、試験体は 3 体準備し、試験 2 時間前まで養生室に静置し、表乾状態で試験を行った。

(2) 破壊靱性試験

40×40mm の金型を使用して作成した角柱状の試験体の中央部に、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、スパン 150mm、載荷速度 0.002mm/sec の中央集中載荷を行った。なお、試験体は曲げ試験体と同じく 3 体準備し、表乾状態とした。

3. 実験結果および考察

3.1 繊維の状態

練混ぜおよび押出成形過程が ARG 繊維に対してどのように影響するかを確認するため、練混ぜ終了後と押出終了後に繊維の洗い出しを行った。練混ぜ後の繊維の状態を図-2 に、押出後の繊維の状態を図-3 に示す。練混ぜ終了時の繊維は集束がまだ完全には解けていない状態であ

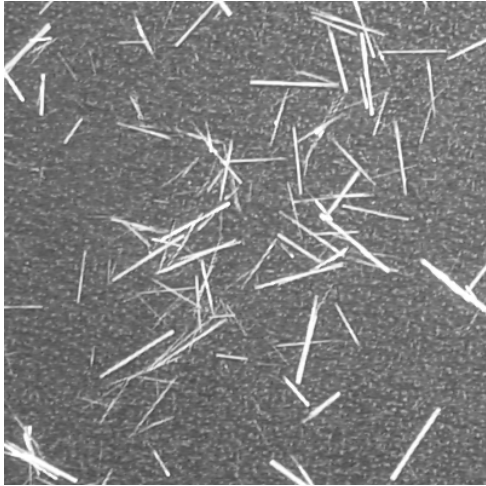


図-2 練混ぜ終了時の繊維の状態

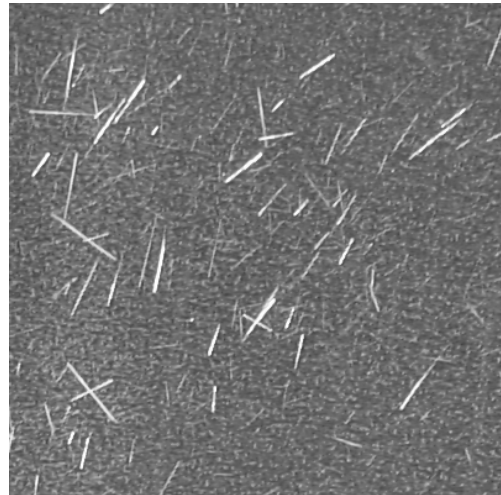


図-3 押出終了時の繊維の状態

るが、繊維の折れ、破断はわずかである。一方、押出終了後の繊維は解繊こそされているものの、繊維のほとんどは 6mm 以下に破断していることがわかる。これは、押出機内で材料が送られる際にスクリーンの回転によって剪断が作用するためである。ただし、このような押出成形時に材料に作用する剪断力は、使用する押出成形機や成形速度等に依存する¹⁾²⁾ため、改善は可能であると思われる。

3.2 養生方法に関する考察

養生法の違いによる曲げ挙動の差を表すものとして、A0 シリーズ (ARG 繊維無添加) の曲げ試験結果を図-4 に示す。160 オートクレーブ養生と 80 蒸気養生の曲げ挙動について比較した場合、その差は曲げ強度にではなく曲げヤング率に顕著に現れていることがわかる。このときの両者の曲げヤング率は、オートクレーブ養生試験体で 31GPa、蒸気養生で 22GPa であり、43%の上昇となった。

このような曲げヤング率の違いを示す理由として、マトリクス内の水和鉱物の違いが挙げられる。水和鉱物の内でゲルとしての網状組織を構成しない $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を A2, A5 シリーズ試験体について測定し、試験体の水和反応状況を検討した。このときの測定結果を表-3 に示す。なお、測定は示差熱分析法を用いた。

この中で、VF-120day は 120 日の 20 水中養

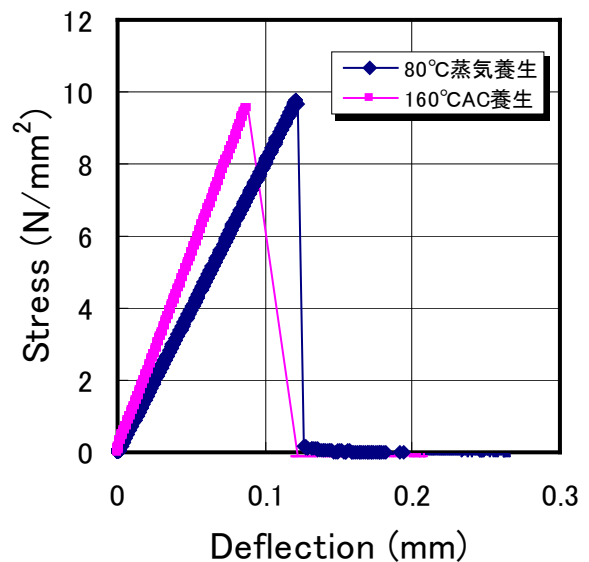


図-4 養生法による曲げ挙動の差

表-3 示差熱分析結果

	A2-160°C	A2-80°C	A5-160°C	A5-80°C	VF-120day
Ca(OH) ₂	0.00%	4.65%	0.00%	4.58%	6.34%
wt. %					

生により作成した試験体であり、繊維系添加物としてビニロンを 1.73% 混入したものである。なお、調合水量が今回の ARG 混入試験体とは若干異なっているので、参考用として掲載した。

表-3 からわかるように、160 オートクレーブ養生を行った試験体は A2, A5 シリーズ共に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がまったく存在しないことがわかる。通常、オートクレーブ養生されるセメント系材料には粉末珪石等のシリカ系混合材が混入され、

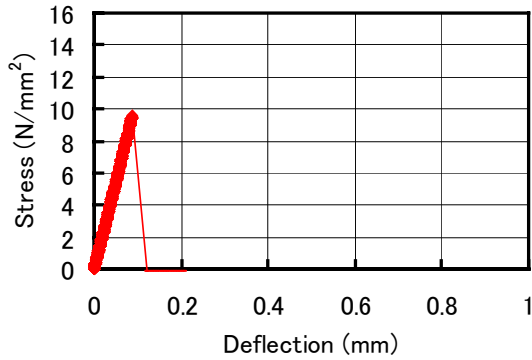


図-5 曲げ試験結果 (A0-160 養生)

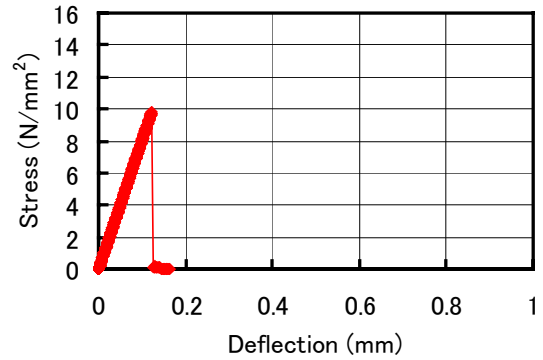


図-8 曲げ試験結果 (A0-80 養生)

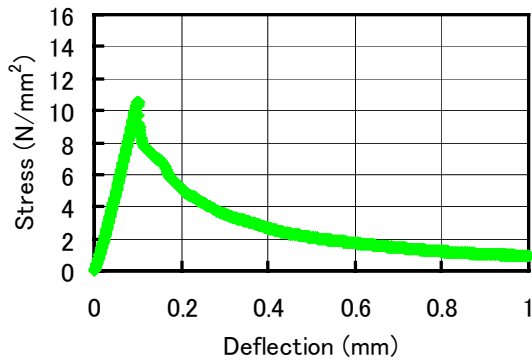


図-6 曲げ試験結果 (A2-160 養生)

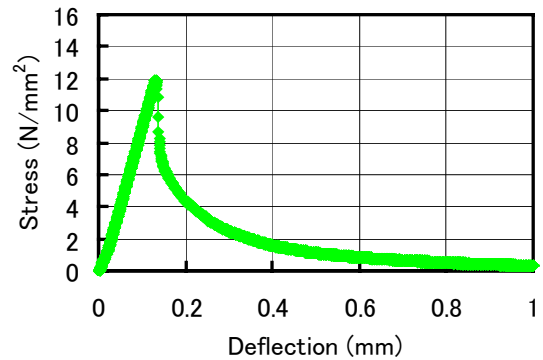


図-9 曲げ試験結果 (A2-80 養生)

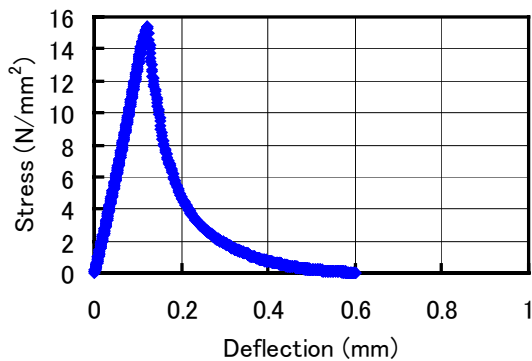


図-7 曲げ試験結果 (A5-160 養生)

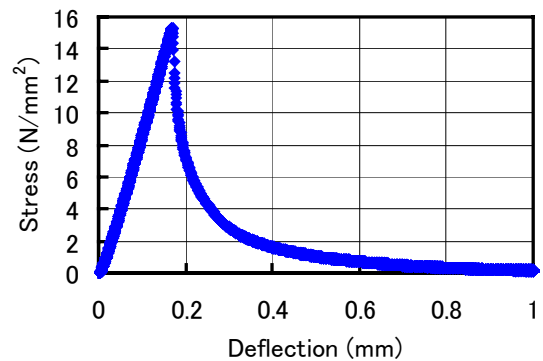


図-10 曲げ試験結果 (A5-80 養生)

遊離の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は水熱合成により反応して、C-S-H ゲルとなる。今回の実験における 160 8 時間養生ではこの効果が十分に得られたといえる。一方、80 蒸気養生では A2, A5 シリーズ共に遊離の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が 4.6wt.% 前後残っており、120 日の水中養生を行った試験体と比較しても 30% 程度の減少に過ぎないのがわかる。このような水和鉱物の違いが、曲げヤング率の差として現れたものと思われる。また、オートクレーブ養生によってアルカリ性の主因である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がなくなることは、ARG の養生後のアルカリによる劣化に対して有利であると言える。

3.3 曲げ試験結果

図-5 から図-10 に曲げ試験時の応力-変位曲線を、表-4 には図に示した試験体の最大曲げ応力、曲げヤング係数を表す。なお、図には中間的な性状を示した試験結果のみ表示した。曲げ強度は、A0 シリーズが $10\text{N}/\text{mm}^2$ 、A2 シリーズが $11.5\text{N}/\text{mm}^2$ 、A5 シリーズが $16\text{N}/\text{mm}^2$ であり、

表-4 最大曲げ応力・曲げヤング一覧

	単位	160°C AC養生			80°C蒸気養生		
		A0	A2	A5	A0	A2	A5
曲げ応力	N/mm^2	9.56	10.58	15.42	9.77	11.92	15.26
曲げヤング率	GPa	30.8	27.3	32.5	21.5	22.4	22

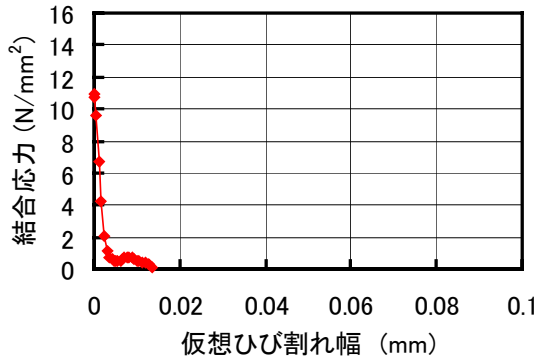


図-11 引張軟化解析結果 (A0-160 養生)

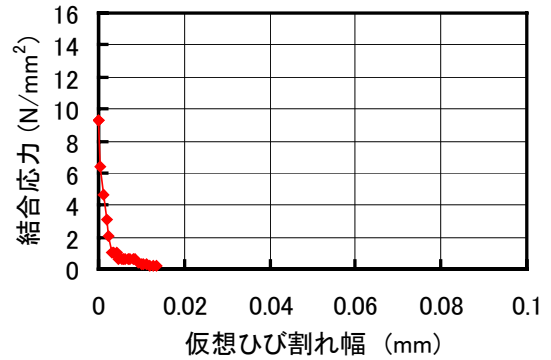


図-14 引張軟化解析結果 (A0-80 養生)

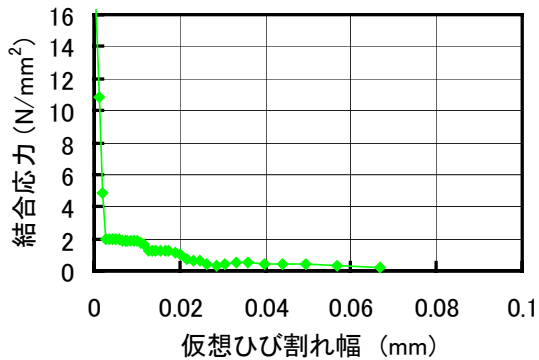


図-12 引張軟化解析結果 (A2-160 養生)

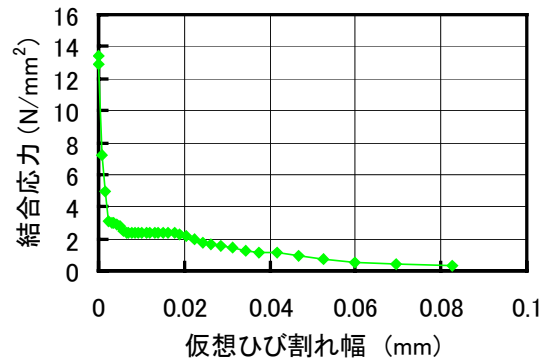


図-15 引張軟化解析結果 (A2-80 養生)

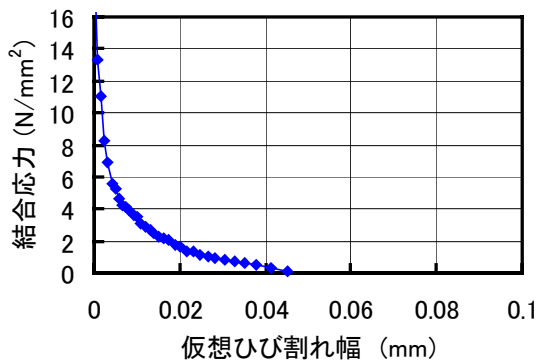


図-13 引張軟化解析結果 (A5-160 養生)

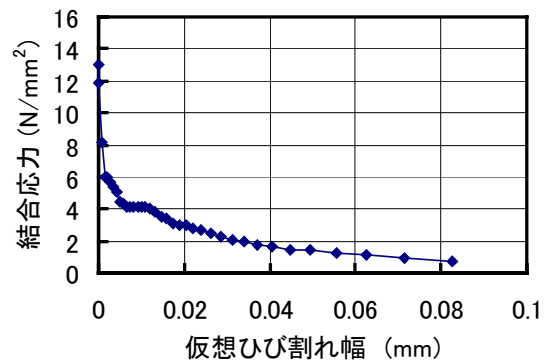


図-16 引張軟化解析結果 (A5-80 養生)

前述の通り養生方法による差はみられなかった。また、曲げヤング率は 160 オートクレープ養生を行った試験体で平均 30.2GPa, 80 蒸気養生を行った試験体で平均 22.0GPa となった。また今回試験を行った試験体全シリーズに共通していることとして、曲げ応力ピーク後の荷重低下が著しく、有機繊維等を混入した押出成形セメント系材料と比べて、靱性能はあまり高くないことがわかった。なお、曲げ応力ピーク後の靱性能は 160 のオートクレープ養生と 80 蒸気養生の間に大きな差は無かったことから ARG 繊維の劣化も同程度であると考えられる。

4. 引張軟化試験結果

多直線近似解析法³⁾による引張軟化解析結果を、図-11 から図-16 に示す。なお、図には曲げ試験結果と同様に中間的な性状を示した解析結果のみ表示した。

4.1 80 蒸気養生試験体結果

軟化開始点応力は A2, A5 シリーズともに 12 ~ 16N/mm² の範囲内となった。これら軟化挙動の特徴として、繊維混入量に比例して軟化開始後の結合応力の低下がゆるやかになっていくことである。通常、有機繊維系の押出成形セメント材料ではひび割れの発生によって一度極端に

結合応力が低下し、その後繊維が引き抜けはじめ結合応力が上昇するが、今回行った ARG 試験体の解析ではそのような性状は現れなかった。このような引張軟化特性は、コンクリートに使用される 2 直線近似モデル⁴⁾にモデル化できる。図-17 における w_1 点を 0.01mm とすると、 w_1 点における結合応力(表-5 参照)は、A0 シリーズと比較して A2 シリーズで約 7.5 倍、A5 シリーズで約 13 倍の結合応力を保持していることがわかった。

4.2 160 オートクレーブ養生試験体結果

軟化開始点応力は、A2、A5 シリーズ共に 20 ~ 24N/mm² の範囲であり、80 蒸気養生のそれより 1.6 倍程度の値を示した。また図からわかるように、仮想ひび割れ幅が 0.02mm 以降の靱性能について 80 蒸気養生のものと若干の差があった。

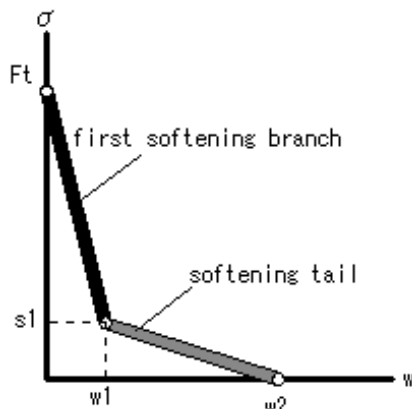


図-17 引張軟化則の 2 直線近似モデル

表-5 w_1 点における結合応力

単位 N/mm ²	160°C AC養生			80°C蒸気養生		
	A0	A2	A5	A0	A2	A5
w_1 点における結合応力	0.3	1.85	3.49	0.31	2.35	4.14

5. まとめ

耐アルカリガラス (ARG) 繊維補強セメント系複合材料を押出成型法により作成し、押出成形が ARG 繊維に及ぼす影響と、作成された試験体の曲げ挙動および引張軟化挙動を、養生方

法と繊維混入量をパラメータとして解析した結果、以下のような結果が得られた。

- (1) ARG 繊維を混入したセメント材料をスクリー式押出成形機により作成したところ、押出後の繊維に多数の破断がみられたが、ARG 繊維混入による明らかな効果が現れた。
- (2) 160 オートクレーブ養生と 80 蒸気養生による差は、曲げ強度、引張軟化解析結果では若干であり、曲げヤング率の差から考えて 160 オートクレーブ養生の方が 80 蒸気養生よりも有効であると言える。
- (3) 曲げ強度は、繊維混入量に比例して増加することがわかった。また、曲げ強度がピークに達するまでの間に、ひび割れによる曲げ応力の変動があまりみられなかった。
- (4) 引張軟化挙動は、繊維混入量に比例して結合応力も高まることが確認できた。

謝辞

本実験を行うに当たり、日本電気硝子(株)から ARG 繊維を提供いただいた。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 馬場明生, 守 明子: 新素材繊維を混入したセメント系材料の押出成形による緻密化と曲げ強度, 日本建築学会構造系論文集, 第 486 号, pp.1-8, 1996.8
- 3) 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
- 4) 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