

論文 高靱性型セメント系複合材料の基本的力学特性

佐藤 幸博^{*1}・福山 洋^{*2}・金久保 利之^{*3}

要旨:本研究の目的は、ひび割れ発生以降も強度が低下せず、引張および圧縮において非常に高い靱性を示すセメント系複合材料を開発し、これらの構造物への有効利用により、耐震性能を向上させることである。このような研究の一環として、ビニロン短繊維を体積比で 1.5%混入した短繊維補強モルタルについて、一軸の引張、圧縮、およびそれらの繰返し性状、さらに平板における二軸性状を把握するための基礎実験を行い、基本的力学特性について調べた。

キーワード:靱性、力学特性、短繊維、ビニロン、繊維補強モルタル

1. はじめに

セメント系材料の靱性を向上させる手段として、コンクリート中あるいはモルタル中に短繊維を混入する方法があり、このような短繊維補強コンクリート(またはモルタル)に関しては、これまでも多くの研究が行われてきた。しかし、これらの研究は、主に引張強度の向上やひずみ軟化特性の定量的評価を目的としたものが多く、ひび割れ以降も強度を維持するような高い靱性を示すセメント系材料の開発やその構造部材への適用を目的とした研究は、国内ではほとんど行われていない。

一方、海外では、構造部材への利用を目的とした研究が盛んに行われており、最近、米国において、ひび割れ発生以降、引張ひずみ度約 6%まで応力が上昇する(疑似ひずみ硬化挙動)ような非常に高い引張靱性を示すセメント系複合材料が開発された。その繊維混入率は 2%程度であり、試験体表面には無数の細かなひび割れを生じることが特徴である。この材料はマイクロメカニクスに基づき、破壊力学パラメータを決定することで理論的かつ合理的な調合設計が可能であるとされており、Engineered Cementitious Composite (ECC)と呼ばれている¹⁾。

このような非常に高い靱性と良好なひび割れ分散性を示すようなセメント系材料は、その材料自体

に靱性が期待できることから、これまでのセメント系材料とは異なる構造利用方法が考えられる。例えば応力状態の厳しい短スパン梁や、大変形が要求される部材のヒンジ部などへの適用により、地震時における構造物の損傷制御が期待でき、また、ひび割れ幅の制御が可能であることから、鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐久性向上なども期待できる。さらに、RC 造建物に適した、地震時の応答を制御するためのエネルギー吸収要素としての用途なども考えられる。

このような背景の基、本研究は、引張および圧縮応力下において高い靱性を示すセメント系複合材料を開発し、これらの構造物への有効利用による構造物の性能向上を最終的な目的としている。今回は、まずこのような可能性を有する材料に関して一軸の引張、圧縮およびそれらの繰返し性状と平板における二軸性状を把握するための基礎実験を行い、構造利用を主眼とした材料の基本的力学特性を調べた。

2. 使用したセメント材料

本実験に使用した高靱性型セメント系複合材料は、ビニロン短繊維を 1.5%(体積比)混入した短繊維補強モルタル(PVA-ECC)である。使用したビニロン繊維の力学特性(引張)を表 1 に、調合条件を

*1 ㈱フジタ技術研究所構造研究部主任 工修 (正会員)

*2 建設省建築研究所国際地震工学部第一耐震工学室主任研究員 工博 (正会員)

*3 筑波大学講師 構造工学系 博士(工学) (正会員)

表 2 にそれぞれ示す。セメントには普通ポルトランドセメント(比重=3.14)、細骨材には 7 号珪砂(表乾比重=2.61)、混和剤には高性能 AE 減水剤をそれぞれ使用した。この他に、繊維の分散性向上を図るための増粘剤、および空気量調整のための消泡剤を用いた。調合は、閑田、Li 等により提案されているマイクロメカニクスに基づく調合設計²⁾を基本として決定した。練り混ぜは、槽内にスクリーおよびスクレーパを搭載した高性能ミキサを用いた。練り混ぜ手順を図 1 に示す。この PVA-ECC の 15 打フロー値は 150mm 程度であり、比較的ワーカビリティは良好であった。また、材齢 4 週時の圧縮強度は約 55MPa である。 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体(封緘養生)を用いた材齢 4 週における圧縮強度試験の結果を表 3 に示す。なお、空気量はフレッシュ時に質量法により計測した値である。

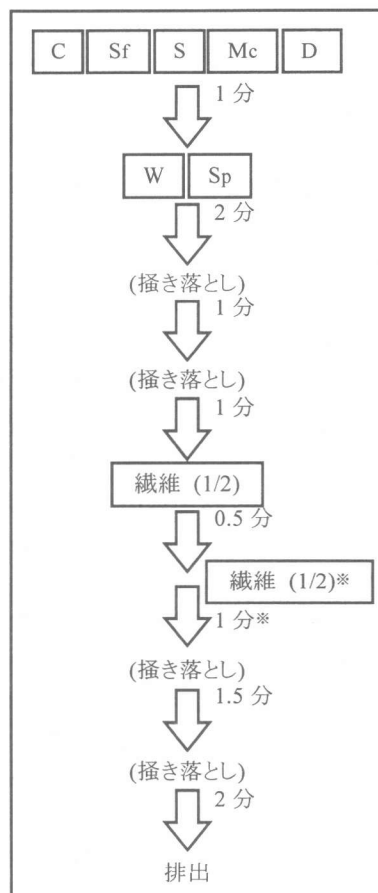
3. 一軸実験

3.1 実験概要

本実験は、PVA-ECC に関して一軸の引張、圧縮および引張・圧縮繰り返しの応力度-ひずみ度関係など材料における一軸の基本的力学特性を得るために行ったものである。

加力装置を図 2 に示す。試験体は、通常圧縮強度試験に用いるものと同一形状の $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体である。加力は、引張載荷時にはこの円柱供試体の上下端部を掴み、圧縮載荷時には供試体の上下面全面で圧縮力が増えられるように工夫した治具(チャック)を用い、引張加力と圧縮加力とを連続して行った。ひずみ度は、試験体中

央 100mm 区間にコンプレッソメータを設置して計測した。掴み部補強のためおよび引張によるひび割れをコンプレッソメータ計測区間内のみ発生させるために、試験体の上下約 50mm 区間にはガラス繊維シートを 1 層、繊維が材長方向に配される



※残りの繊維を低速回転 1 分間中に投入

図 1 練り混ぜ手順および混練時

表 1 使用したビニロン繊維の力学特性

径 (μm)	長さ (mm)	密度 (g/cm^3)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	破断伸び (%)
40.8	15.0	1.30	1850	43.9	7.0

表 3 圧縮強度試験結果(材齢:4 週)

最大圧縮強度 (MPa)	最大圧縮強度時 ひずみ度(%)	ヤング係数※ (GPa)	材齢 (日)	空気量 (%)
55.1	0.374	17.8	28	6.16

※ヤング係数は、1/3最大圧縮応力度の割線剛性

表 2 調合表

水結合材比 W/B (wt.%)	繊維混入率 Vf (vol.%)	シリカフェウム 置換率 Sf/(C+Sf) (wt.%)	砂結合材比 S/B (wt.%)	単位量※ (kg/m^3)					
				水 W	結合材 セメント C	結合材 シリカフェウム Sf	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Sp
45	1.5	20	40	424	789	197	394	—	19.7

※これらの他、増粘剤(Mc)および消泡剤(D)を質量比でそれぞれ0.2%(対水比)および10%(対増粘剤比)添加した。

ように巻き付け、エポキシ樹脂を含浸させて接着した。加力は、まず引張側に加力し、その後圧縮側にて破壊させるもの(以後単調载荷と呼ぶ)および引張と圧縮両振りのひずみ度漸増载荷(以後漸増载荷と呼ぶ)の2通り行った。漸増载荷は、引張側加力から開始し、ひずみ度 ± 0.1 , ± 0.2 , ± 0.3 , ± 0.5 , ± 1.0 および $\pm 2.0\%$ でそれぞれ1回ずつ繰り返した。なお、試験体の養生は封緘養生とし、実験時の材齢は45日および70日である。また、実験は、結果のばらつきを考慮し、各载荷方法について3体ずつ実施した。

3.2 一軸特性

単調载荷により得られた一軸の応力度-ひずみ度関係を図3に、漸増载荷により得られた応力度-ひずみ度関係の一例を図4にそれぞれ示す。両図とも、(a)は応力度-ひずみ度関係全体を、(b)は引張側を拡大してそれぞれ表示したものである。

単調载荷における引張加力では、最初のひび割れ発生以降も顕著な強度低下を起こさず、ひび割れの増加を伴いながら応力度は、ひずみ度1.4%程度まで緩やかに上昇した。最大引張応力度を示すまでに、比較的幅の大きいひび割れが試験区間内に数本発生し、さらにそれらのひび割れ付近にはかなり幅の狭いひび割れが多数発生した。引張加力後の圧縮側加力では、圧縮ひずみ度約-0.4%で最大圧縮強度に達した後、最大圧縮応力度約-55MPaから、その半分程度まで急激に応力

度が低下し、その後は、緩やかに応力度が低下するような性状を示した。圧縮側における最大応力度以降の脆性的な性状は、最大応力度時に発生した縦割れのようなひび割れが影響していると思われるが、このような性状の改善は今後の課題である。

漸増载荷においても、引張側では約1.0%まで比較的な大きな履歴ループを描く高靱性な性状を

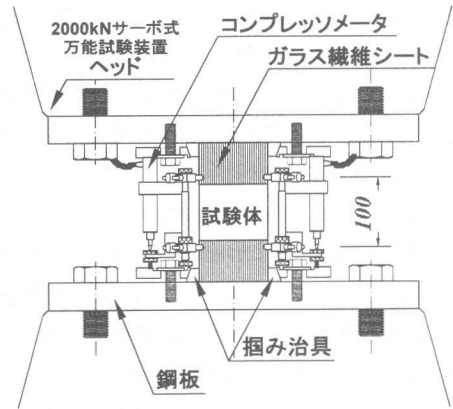


図2 一軸実験加力装置

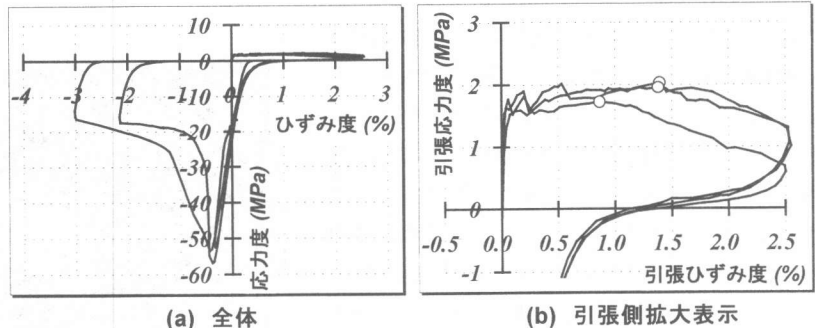


図3 一軸の応力度-ひずみ度関係(単調载荷)

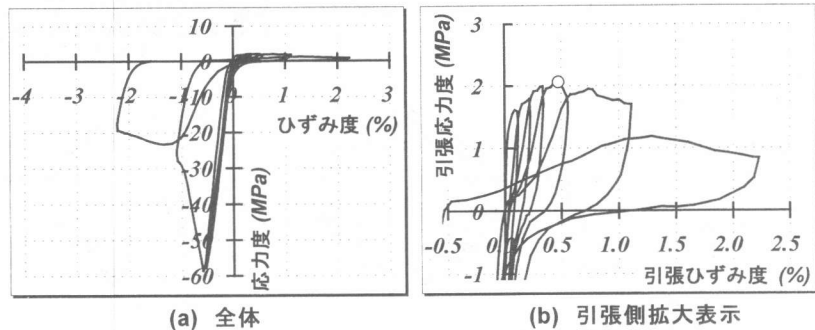


図4 一軸の応力度-ひずみ度関係(漸増载荷)

表 4 一軸特性一覧(3 体平均)

載荷方法	引 張						圧 縮		
	ひび割れ発生時		最大時		80%強度時	ヤング係数 (GPa)	最大時		80%強度時
	応力度 (MPa)	ひずみ度 (%)	応力度 (MPa)	ひずみ度 (%)	ひずみ度 (%)		応力度 (MPa)	ひずみ度 (%)	ひずみ度 (%)
単調	1.62	0.053	1.90	1.215	1.93	8.63	-54.22	-0.39	-0.62
漸増	1.63	0.087	2.00	0.248	1.25	9.06	-55.29	-0.54	-0.91

示したが、圧縮側では脆性的な性状を示した。引張側から圧縮側へ、あるいはその逆へと応力度が反転する付近では、繊維の抜け出しに起因すると思われる顕著なスリップ現象が見られた。

漸増載荷の包絡線は、圧縮側では単調載荷の曲線とほぼ同じ形状であるが、引張加力時における最大引張強度時のひずみ度は、単調載荷に比べて小さく、引張ひずみ度+1.0%に向かう加力サイクルでは、前回サイクルのピーク時引張応力度を上回らなかった。これは直前の圧縮側への加力(圧縮ひずみ度-0.5%までの加力)時にほぼ最大圧縮強度に達したためであると思われる。

本実験で得られた、最大強度、ヤング係数、剛性変化点など、一軸の力学特性一覧(それぞれ 3 体の平均値)を表 4 に示す。ここで、引張側のヤング係数は、最大引張強度の 1/3 応力度時における割線剛性である。この表からも、引張側において高靱性な結果であったのに対し、圧縮側の靱性が良好でないことが判る。即ち、引張加力によるひび割れ発生時ひずみ度に対する最大引張応力度時ひずみ度の比は、単調載荷で約 23、漸増載荷で約 2.9、ひび割れ発生時ひずみ度に対する最大強度後にその 80%まで応力度が低下した時点のひずみ度(80%強度時ひずみ度)の比は、単調載荷で約 36、漸増載荷で約 14 であるのに対し、圧縮側

では最大強度時ひずみ度に対する 80%強度時ひずみ度の比は、単調載荷で約 1.6、漸増載荷では約 1.7 である。引張側のヤング係数は、4 週圧縮強度試験により得られたヤング係数(表 3)に比べ小さい値となった。

4. 二軸実験

4.1 実験概要

本実験は、有限要素法などの解析に必要な破壊条件など、PVA-ECC の二軸性状を把握することを目的とした基礎実験であるが、今回は、これらの内の純せん断性状および引張力が卓越する部分の破壊条件を得ることを主な目的とした。

加力装置を写真 1 に示す。試験体は 300×300×25mm の平板で、加力装置固定用穴を 24 ヶ所、

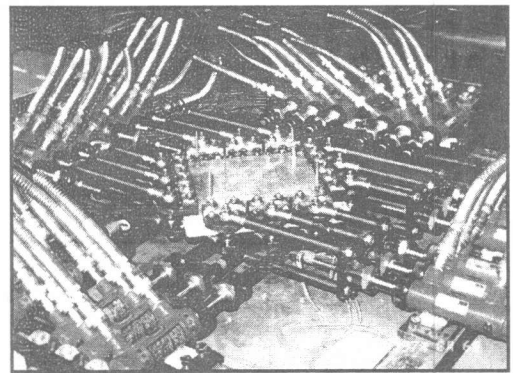


写真 1 二軸実験加力装置

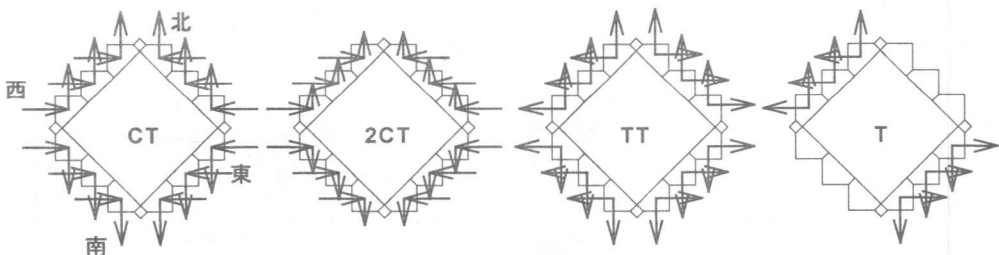


図 5 加力方法

変位計固定用のボルトを 4 ヶ所に設けた。変動因子は、加力方法 4 種類(純せん断、一軸引張、二軸引張、圧縮力:引張力=2:1)とし、同一加力方法で 3 体ずつ、計 12 体の加力を行った。加力には 24 本のオイルジャッキを使用し、直交する二方向(南北方向および東西方向)の力を試験体に加える方法³⁾とした。試験体端部は金具で試験体を挟み込み、直径 10mm のボルトで締結した。加力はオイルポンプの油圧系統を南北方向と東西方向の 2 系統に分け、2 台の手動ポンプを使用した。純せん断(CT)では引張力と圧縮力を同一に、圧縮力:引張力=2:1(2CT)では圧縮力を引張力の 2 倍に、二軸引張(TT)では両方向の引張力を同一に、一軸引張(T)では一方向のみに引張力が作用するように、それぞれ手動ポンプを制御した。加力方法の概要を図 5 に示す。計測項目は、荷重、変位、試験体表面のひずみ度で、試験体の表面には試験体四辺に平行して 4 本、および対角方向に 1 本、計 5 本の変位計を設置し、試験体の表裏それぞれ中央には三軸ゲージを貼付した。

4.2 二軸特性

純せん断加力(CT)における主せん断応力度—主せん断ひずみ度(ひずみゲージ計測による)関係を図 6 に、最終破壊状況の一例を写真 2 にそれぞれ示す。二軸実験の場合も一軸実験の場合と同様、最初のひび割れ発生とともに急激な破壊に到ることはなく、ひび割れの増加に伴い降伏棚を

有するような性状を示した。最大強度時までのひび割れの発生も一軸実験と類似しており、数本の比較的幅の大きいひび割れのすぐそばに、かなり幅の狭いひび割れが多数発生した。

二軸実験により得られた PVA-ECC の力学特性(3 体ずつの平均値)を表 5 に示す。ここで、縦弾性係数は主応力度—主ひずみ度(ひずみゲージ計測)関係の初期直線部を回帰した近似直線の勾配であり、横弾性係数は主せん断応力度—主せん断ひずみ度(ひずみゲージ計測)関係から同一の手法により求めた値である。またポアソン比は、一軸引張(T)から得られた測定値である。同表には実験時に $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ 円柱供試体を用いて行った圧縮強度試験の結果も合わせて示したが、このヤング係数は最大圧縮強度の 1/3 応力度時における割線剛性である。一軸引張(T)の縦弾性係数(引張)は、その他の加力(TT, CT, 2CT)および $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ 円柱供試体による圧縮強度試験のヤング係数に比べて小さく、一軸実験と同様の結果(引張側ヤング係数が圧縮強度試験のヤング係数に比べて小さくなったこと)となった。純せん断(CT)および圧縮力:引張力=2:1(2CT)では、引張および圧縮の縦弾性係数は同等であり、圧縮強度試験で得られたヤング係数の値よりやや大きい値となった。

加力形式を変えたことにより得られた PVA-ECC の降伏条件の一部を図 7 に示す。ここで、降伏条件は、試験体に最初のひび割れが生じ、主応力度

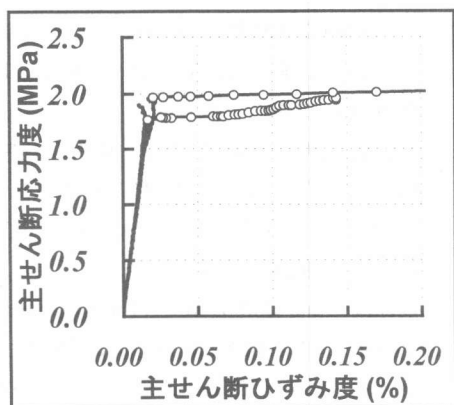


図 6 主せん断応力度—主せん断ひずみ度関係(CT)

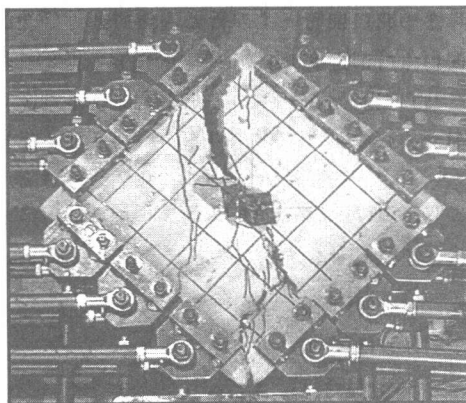


写真 2 最終ひび割れ状況

(σ_1 , σ_2)—主ひずみ
度関係上で剛性が明
らかに変化した点を
プロットしたものである。
全試験体とも剛性変
化後も降伏棚を生じ
るような性状を示した
ため、ここでは降伏条
件と呼ぶこととした。ま

た、図中の一点鎖線は圧縮強度試験により得られ
た最大圧縮強度の平均値と一軸引張(T)により得
られた平均ひび割れ発生強度の点とを結んだ直
線である。PVA-ECC の引張—圧縮域の降伏曲線
は、一軸ひび割れ強度と一軸圧縮強度とを結ぶ直
線と概ね一致した。

5. まとめ

高靱性型セメント系複合材料としてビニロン短繊維を1.5%混入したモルタルに関して、一軸の引張、
圧縮繰返し特性および平板における二軸特性を
調べるための基礎実験を行い、それらの基本的力
学特性を明らかにした。これらの基礎実験により、
今回用いた高靱性型セメント系複合材料の引張性
能として、引張強度 1.5MPa、塑性変形能力(引張
ひずみ度)1.5%が得られた。このことは、材料を部
材全面に使用し、すべてがせん断抵抗に有効であ
ると仮定すれば、せん断補強量($\equiv p_w \cdot \sigma_{wy}$)1.5MPa
相当の強度と変形能が期待できることを示している。
また、幅の小さいひび割れが分散することから損傷
集中の防止および損傷制御の可能性も示唆して
いる。ただし、圧縮側の性状は脆性的であり、改善
していく必要があることも判明した。

今後、さらなる高靱性化の検討と降伏条件、ひ
び割れ後の圧縮強度低減など、解析用基礎デー
タの収集を行い、解析的、実験的に最適な構造利
用方法を検討する予定である。

謝辞

本研究は、「高引張強度・高靱性コンクリートの
ハイブリッド構造への利用研究委員会(委員長:松

表 5 二軸実験から得られた PVA-ECC の力学特性(3 体平均)

加力 形式	主応力度最大値 (MPa)			弾性係数 (GPa)			ポアソン 比	φ50x100mm圧縮 強度試験結果	材齢 (日)
	最大 σ ₁	最小 σ ₂	せん断	縦(引張)	縦(圧縮)	横			
T	1.64	0.00	0.82	13.8	—	5.3	0.310	圧縮強度= 53.5(MPa) ヤング係数= 18.6(GPa)	53
TT	1.34	1.34	0.00	23.8	—	—	—		
CT	1.97	-1.97	1.97	21.1	22.8	10.9			
2CT	1.62	-3.24	2.44	21.1	20.2	10.3			

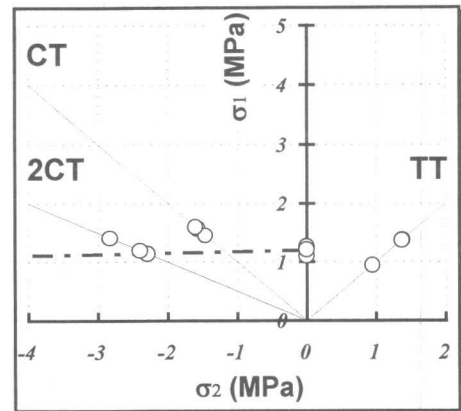


図 7 PVA-ECC の降伏条件

崎育弘東京理科大学教授)」の活動の一環として
行ったものである。また、練り混ぜの際には(株)カジ
マメカトロエンジニアリングの協力を得た。関係各位
に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Edited by Naaman A. E. and Reinhardt H. W.:
High Performance Fiber Reinforced Cement
Composites 2 (HPRCC2), Proceedings of 2nd
International RILEM Workshop, E & FN
SPON, Jun. 1995
- 2) 関田 徹志, Li Victor C., 浜田 敏裕: ビニロン
繊維を用いた高靱性FRCの材料設計と開発,
コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20,
No.2, pp.229-234, 1998.7
- 3) Vecchio F. and Collins M. P.: The Response of
Reinforced Concrete to In-plane Shear and
Normal Stresses, Dept. of Civil Engineering
Report, Univ. of Toronto, Mar. 1982