論文　ECC の曲げおよび一軸引張性状における寸法効果

平野　雄大[*1]・浅野　浩平[*2]・金久保　利之[*3]

要旨：高性能繊維補強セメント複合材料の一つである ECC を有効に活用するためには，引張性能の評価を適切に行う必要がある。本研究では，ECC の曲げ性状および一軸引張性状における寸法効果の定量的把握を目的に，試験体寸法を主たる因子とした曲げ試験，一軸引張試験およびそれに伴う画像解析によるひび割れ計測を行った。曲げ試験によって得られた最大応力に対する寸法効果は大きく，試験体寸法が大きくなるほど最大応力が低下し，その程度を純曲げ区間の評価体積を用いて定量化した。曲げ試験における最大応力時のひび割れ幅の平均値は，試験体の寸法に依らず同程度で，0.3～0.4mm であった。

キーワード：ECC，寸法効果，曲げ性状，一軸引張性状，曲げ試験，一軸引張試験

1. はじめに

ECC（Engineered Cementitious Composite[1)]）とは，高性能繊維補強セメント複合材料（High Performance Fiber Reinforced Cement Composites：HPFRCC）の範疇に含まれる材料で，曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示しながら応力上昇するたわみ硬化性状や，一軸引張応力下において複数ひび割れを伴いながら初期ひび割れ発生以降に応力上昇する歪硬化性状を示す，極めて高靭性なセメント系複合材料である。ECC を構造部材に適用した場合，ひび割れ発生後も繊維がひび割れを架橋することで，ひび割れの開口を防ぎ，高耐久な部材を実現することが可能となる。脆性的な破壊を示す従来のコンクリートの性能を大幅に改善する新材料として，構造物へ利用するための研究が活発に行われている。

ECC の特長を有効に活用するには，引張性能を適切に評価し，構造設計に反映させることが重要となる。その評価方法に関しては数々検討されており，その中でも一軸引張試験は直接，引張性能を得ることができるため，有用である。しかし，一軸引張試験は試験体の形状，寸法，境界条件などが試験結果に大きな影響を与えるため，標準的な方法として日常的に実施される試験としては不向きである。そのため現在は，曲げ試験による引張性能評価が行われている [2)]が，曲げ試験より得られる特性値は構造性能であり，純粋な材料の性能とは異なる。したがって，引張性状と曲げ性状のそれぞれの性状を把握するとともに，これらの関係を明確にする必要がある。

また，通常，試験体と実構造物のサイズは大きく異なるため，そこには寸法効果による影響が存在する。さらに ECC の場合，繊維が 2 次元状に配向することによって特性の変化が起こる，ウォールエフェクトといった繊維補強特有の寸法効果も加わると考えられる。その影響を定量的に把握できていない場合，実部材中での ECC の性能を過大評価する可能性がある。そこで，寸法の差異による引張性能を適切に評価，つまりはひび割れ発生挙動を定量的に評価することができれば，今後の実構造物の設計に大きく寄与することができる。

そこで本研究では，ECC の曲げ性状および一軸引張性状における寸法効果に着目し，試験体寸法を主たる変動因子とした試験体を用いて実験および検討を行う。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した PVA（ポリビニルアルコール）繊維の形状および力学性能を**表－1** に，フレッシュ時の空気量，圧縮強度，弾性係数を**表－2** に示す。調合計画は文献 3)における，「mix3」と同様である。使用した結合材は中庸熱

表－1　PVA 繊維の形状および力学性能

繊維種類	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	破断強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
PVA 繊維	12.0	0.04	1690	40.6

表－2　使用材料のフレッシュ，圧縮性能

種類 バッチ	体積繊維 混入率(%)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
PVA15-1	1.5	5.4	55.3	18.9
PVA15-2		5.6	56.9	19.9
PVA20-1	2.0	11.0	45.0	16.0
PVA20-2			47.1	16.4

*1 筑波大学大学院　システム情報工学研究科（正会員）
*2 筑波大学　第三学群工学システム学類
*3 筑波大学大学院　システム情報工学研究科准教授　博士（工学）（正会員）

ポルトランドセメントおよびフライアッシュ（JIS A 6201 に規定する II 種）である。細骨材は，比表面積が 2500cm^2/g の石灰石砕砂を用いた。PVA 繊維の体積混入率は，1.5%（PVA15）および 2.0%（PVA20）とした。容量 1m^3 の実機ミキサーを用い，PVA15 および PVA20 それぞれについて 2 バッチずつ行った。試験体の打設は，均一かつ連続的に行い，打継ぎによる繊維の不連続性を排除するよう行った。養生方法は，練り上がり後に蒸気養生（最高温度 35℃，8 時間）を施し，その後，気中養生を行った。

2.2 試験体

曲げ試験に用いた試験体形状を**図－1** に，試験体一覧を**表－3** に示す。試験は JIS A 1106 に規定されているコンクリートの曲げ強度試験方法に準じて，三等分点加力曲げ試験を行った。試験体数は各 3 体ずつとした。

一軸引張試験に用いた試験体形状を**図－2** に，試験体一覧を**表－4** に示す。M24 ナットを溶接した鋼板をエポキシ樹脂系接着剤で試験体上下面に接着させ，ロッドエンドおよび M24 ボルトを介して試験機のヘッドチャックに固定した。引張応力伝達の境界条件はピン－固定 [3] である。試験体数は各 5 体ずつとした。

2.3 加力・計測方法

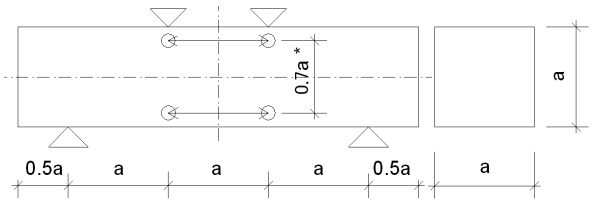
加力には，曲げ試験，一軸引張試験とも，変位制御により加力を行う 2MN ユニバーサル試験機を使用した。試験機のヘッド間速度は毎分 0.5mm に設定した。

計測項目は，荷重値および曲げ試験では曲率を算出するための純曲げ区間の軸方向変形，一軸引張試験では検長区間の伸びとした。変位計の位置は寸法比が同等になるようにしたが，B40 に関しては，計測装置の制約上，変位計間隔を 25mm とした。

2.4 ひび割れ計測

ECC の引張性能を決定づける要因は繊維の架橋能力であり，繊維の架橋性能は試験体のひび割れ性状となって表現される。本試験では，曲げ試験において，荷重値等のデータの計測ステップと同調させ，連続的にデジタルカメラにより画像撮影を行い，その後，画像処理を行って，ひび割れ幅の計測を行った。

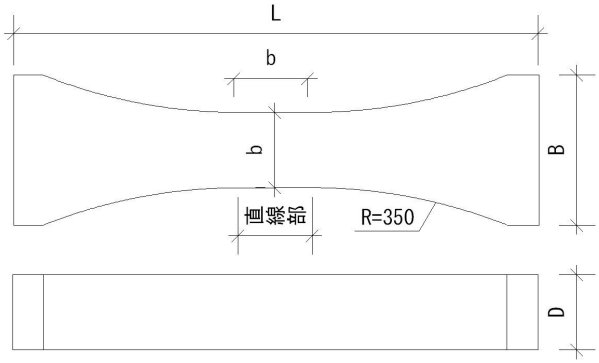
処理方法として，まず画像処理ソフト HALCON のカメラキャリブレーション機能を利用してレンズによるデジタル画像の歪曲収差を除去，また同時にピクセル単位の画像座標系をメートル単位の世界座標系に変換する。その後，ひび割れ幅を算出したい範囲をデジタル画像内で決定し，カラー画像をグレースケール変換，二値化，しきい値処理，エッジの検出等を行い，ひび割れ幅を得る。使用したデジタルカメラの画素数は約 1200 万ピクセルで，ひび割れ幅の計測精度は撮影対象範囲の大きさに依るが，最大寸法の試験体においても最低 0.05mm の精度を確保できるように配慮した。



図－1　曲げ試験体概要　*: B40 のみ 25mm

表－3　曲げ試験体一覧

試験体名	使用材料	*a* (mm)	検長 (mm)
B40-15	PVA15-1	40	50
B100-15		100	100
B200-15		200	200
B400-15	PVA15-2	400	400
B40-20	PVA20-1	40	50
B100-20		100	100
B200-20		200	200
B400-20	PVA20-2	400	400



図－2　一軸引張試験体概要

表－4　一軸引張試験体一覧

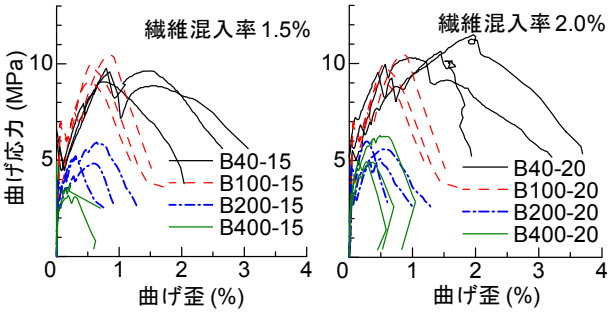
試験体名	使用材料	端部断面 *B*×*D*(mm)	中央断面 *b*×*D*(mm)	*L* (mm)	検長 (mm)
T20-15	PVA 15-1	40×20	20×20	200	83
T50-15		100×50	50×50	350	110
T100-15		200×100	100×100	540	160
T20-20	PVA 20-1	40×20	20×20	200	83
T50-20		100×50	50×50	350	110
T100-20		200×100	100×100	540	160

3. 実験結果

3.1 曲げ試験

曲げ試験の実験結果一覧を**表－5** に示す。ひび割れ本数は，純曲げスパン内に最終的に目視にて確認できたひび割れの本数である。ひび割れ本数は全体的に少なく，

ECC の性能として期待される，複数ひび割れの発生は満たされなかったと判断できる。試験体寸法の差異を考慮した実験値として，曲げ応力（＝曲げモーメント／断面係数）および曲げ歪（＝曲率×断面せい）を定義し，同表中に示した。また，各試験体の曲げ応力－曲げ歪関係を**図－3** に示す。繊維の体積含有率，断面寸法の差異によらず，初期ひび割れ発生後に荷重が増大するたわみ硬化性状が認められた。**表－6** および**表－7** に，最大荷重



図－3　曲げ応力－曲げ歪関係

表－5　曲げ試験結果一覧

試験体名	断面寸法 (mm)	ひび割れ本数／純曲げスパン	ひび割れ間隔 (mm)	最大荷重時			
				曲げモーメント M_{max}(kNm)	曲率 φ_{max}(1/m)	曲げ応力 σ_{max}(MPa)	曲げ歪 ε_{max}(%)
B40-15-1	40×40	2 本/40mm	20	0.100	0.215	9.58	0.85
B40-15-2		1 本/40mm	40	0.095	0.185	9.06	0.73
B40-15-3		2 本/40mm	20	0.105	0.201	9.76	0.80
B100-15-1	100×100	1 本/100mm	100	1.525	0.548	9.08	0.55
B100-15-2		1 本/100mm	100	1.670	0.539	9.97	0.54
B100-15-3		2 本/100mm	50	1.780	0.847	10.45	0.85
B200-15-1	200×200	7 本/200mm	28.6	7.911	0.032	5.92	0.64
B200-15-2		3 本/200mm	66.7	6.465	0.030	4.82	0.60
B200-15-3		1 本/200mm	200	6.803	0.015	5.06	0.30
B400-15-1	400×400	1 本/400mm	400	52.740	0.005	4.93	0.18
B400-15-2		2 本/400mm	200	40.276	0.005	3.72	0.21
B400-15-3		3 本/400mm	133.3	34.168	0.005	3.18	0.19
B40-20-1	40×40	2 本/40mm	20	0.124	0.487	11.49	1.96
B40-20-2		2 本/40mm	20	0.110	0.247	10.30	0.99
B40-20-3		4 本/40mm	10	0.109	0.367	10.47	1.45
B100-20-1	100×100	2 本/100mm	50	1.863	0.677	11.20	0.68
B100-20-2		1 本/100mm	100	1.728	0.726	10.44	0.72
B100-20-3		3 本/100mm	33.3	2.160	1.170	12.85	1.18
B200-20-1	200×200	1 本/200mm	200	7.591	0.027	5.58	0.55
B200-20-2		1 本/200mm	200	8.048	0.014	5.98	0.28
B200-20-3		3 本/200mm	66.7	6.763	0.025	5.08	0.49
B400-20-1	400×400	2 本/400mm	200	67.002	0.012	6.27	0.49
B400-20-2		1 本/400mm	400	52.358	0.009	4.91	0.38
B400-20-3		1 本/400mm	400	54.202	0.004	5.03	0.14

表－6　最大荷重時の曲げ応力と変動係数

試験体	平均値 (MPa)	変動係数 (%)	試験体	平均値 (MPa)	変動係数 (%)
B40-15	9.47	3.13	B40-20	10.75	4.89
B100-15	9.83	5.78	B100-20	11.50	8.74
B200-15	5.27	8.94	B200-20	5.54	6.65
B400-15	3.94	18.58	B400-20	5.40	11.35

表－7　最大荷重時の曲げ歪と変動係数

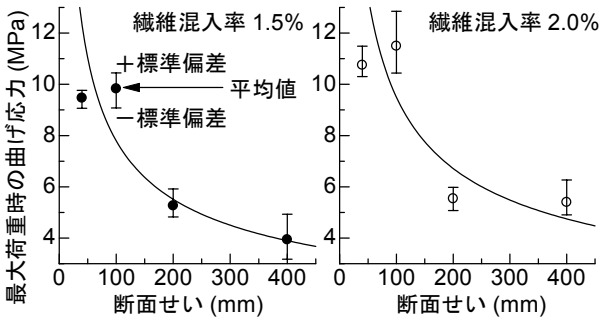
試験体	平均値 (%)	変動係数 (%)	試験体	平均値 (%)	変動係数 (%)
B40-15	0.79	6.19	B40-20	1.47	27.15
B100-15	0.65	22.47	B100-20	0.86	26.20
B200-15	0.52	29.21	B200-20	0.44	26.50
B400-15	0.19	6.00	B400-20	0.34	43.29

時の曲げ応力と曲げ歪の平均値と変動係数を示す。実験結果のばらつきは，最大荷重時の曲げ応力の場合，変動係数で 10%以下の試験体が多いが，曲げ歪では変動係数 20～30%とばらつきが大きい。試験体寸法とばらつきの程度の間に明確な関係は見られなかった。各試験体の断面せい寸法と最大荷重時の曲げ応力および曲げ歪の関係を，それぞれ**図－4** および**図－5** に示す。断面寸法の増加とともに最大荷重時の曲げ応力，曲げ歪ともに顕著に低下している。

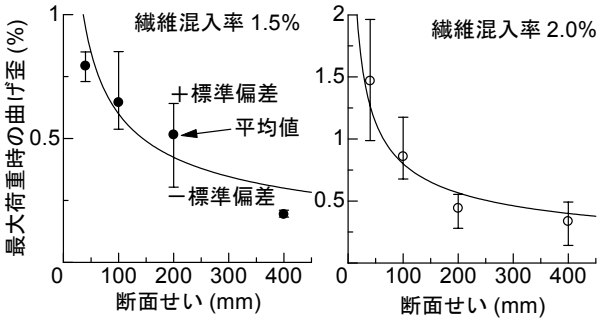
3.2 一軸引張試験

一軸引張試験の実験結果を**表－8** に，引張強度と終局歪の平均値と変動係数を**表－9** および**表－10** に示す。なお，終局歪は，連続的に応力が低下する際の歪とした。また，各試験体の引張応力－引張歪関係を**図－6** に示す。複数ひび割れの発生が，**図－6** に示す歪硬化性状より確認できるが，曲げ試験と同様に，ECC として期待される性能を満たすとは言いがたい。なお，断面寸法の小さい T20 試験体では，試験体の設置時にひび割れが発生したものがあり，初期勾配および初期ひび割れ発生点が不明瞭な試験体がある。ただし，その他の T20 試験体では初期ひび割れ発生後応力が低下した後も再び荷重が増加しており，設置時にひび割れが発生した試験体の引張強度および終局歪の実験値も同様に検討する。

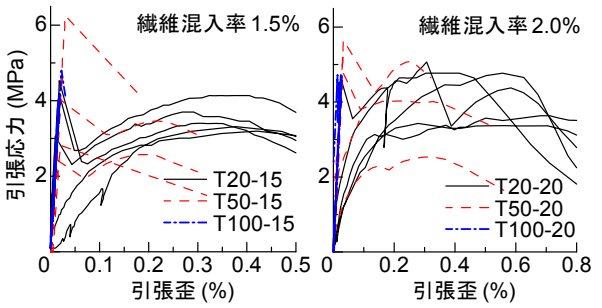
表－9 および**表－10** より，曲げ試験と同様に，寸法効果の影響による終局歪の低下がみられるが，引張強度では，その影響は顕著ではなかった。本実験では，ほぼすべての試験体で引張強度は初期ひび割れ強度となっており，ひび割れ発生強度に関しては寸法効果の影響は大



図－4　最大荷重時の曲げ応力－断面せい関係



図－5　最大荷重時の曲げ歪－断面せい関係



図－6　引張応力－引張歪関係

表－8　一軸引張試験結果一覧

試験体	引張強度 σ_{max} (MPa)	終局歪 ε_u (%)	試験体	引張強度 σ_{max} (MPa)	終局歪 ε_u (%)
T20-15-1	4.19	0.39	T20-20-1	4.77	0.58
T20-15-2	4.53	0.30	T20-20-2	3.64	0.71
T20-15-3	3.20	0.56	T20-20-3	4.77	0.42
T20-15-4	3.31	0.52	T20-20-4	3.43	0.69
T20-15-5	3.70	0.29	T20-20-5	5.07	0.58
T50-15-1	2.57	0.21	T50-20-1	4.79	0.33
T50-15-2	6.25	0.03	T50-20-2	2.53	0.33
T50-15-3	2.82	0.02	T50-20-3	5.65	0.26
T50-15-4	4.73	0.03	T50-20-4	5.31	0.03
T50-15-5	4.01	0.22	T50-20-5	3.50	0.08
T100-15-1	4.02	0.02	T100-20-1	4.09	0.02
T100-15-2	4.18	0.02	T100-20-2	3.59	0.02
T100-15-3	4.80	0.02	T100-20-3	4.72	0.01
T100-15-4	4.15	0.02	T100-20-4	4.75	0.03
T100-15-5	4.07	0.02	T100-20-5	4.44	0.02

表－9　引張強度の平均値と変動係数

試験体	平均値 (MPa)	変動係数 (%)	試験体	平均値 (MPa)	変動係数 (%)
T20-15	3.79	13.45	T20-20	4.33	15.40
T50-15	4.08	32.88	T50-20	4.35	26.84
T100-15	4.24	6.71	T100-20	4.32	10.04

表－10　終局歪の平均値と変動係数

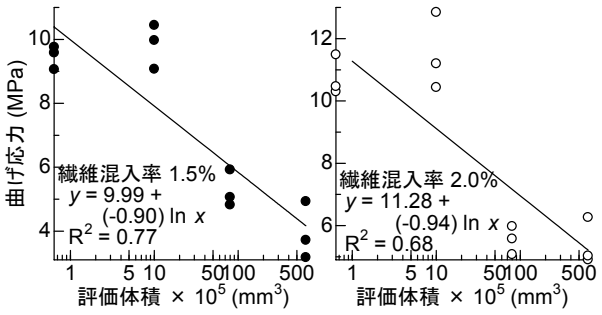
試験体	平均値 (%)	変動係数 (%)	試験体	平均値 (%)	変動係数 (%)
T20-15	0.41	26.23	T20-20	0.60	17.47
T50-15	0.27	92.12	T50-20	0.20	61.60
T100-15	0.02	9.04	T100-20	0.04	18.96

きくないと考えられる。また，終局歪のばらつきは非常に大きく，90%に達する試験体もあった。現時点では，引張試験結果による寸法効果の定量的な評価は難しいといわざるを得ない。

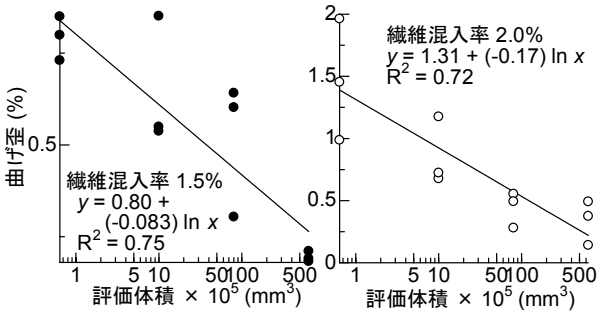
4. 実験結果の検討

4.1 評価体積による曲げ応力・曲げ歪の評価

これまでに，繊維補強セメント複合材料の引張性能の寸法効果が高応力体積の累乗で表現されるとの研究がなされている [4)]。本検討では，曲げ試験における高応力体積は純曲げ区間の体積であるとして，引張性能の評価に準じて，曲げ性能の寸法効果を評価する。最大荷重時における曲げ応力，曲げ歪と評価体積との関係を**図－7** および**図－8** に示す。最小二乗法による回帰計算によって図中に示す関係式を得た。最大荷重時の曲げ応力，曲げ歪ともに，体積との相関が見られることがわかる。



図－7　評価体積－曲げ応力関係

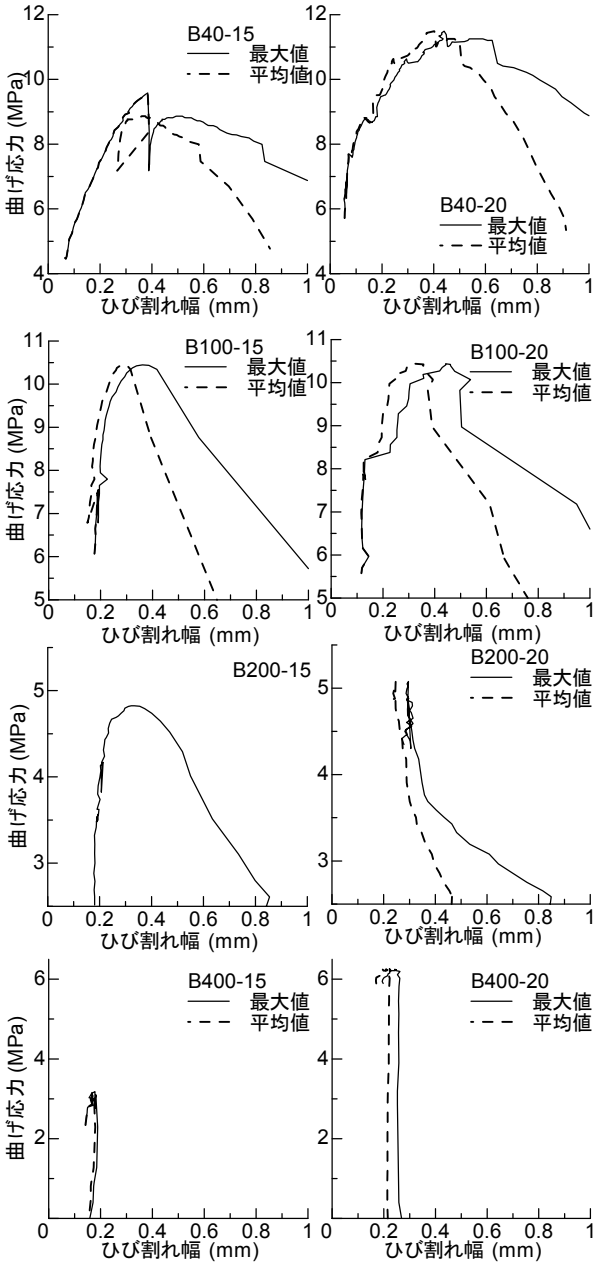


図－8　評価体積－曲げ歪関係

4.2 ひび割れ幅の検討

代表的な試験体の曲げ応力とひび割れ幅の関係を，**図－9** に示す。ひび割れが複数発生した試験体に関しては，ひび割れ幅の平均値と最大値を示した。

全般的な傾向として，最大応力に到達するまでのひび割れ幅の最大値と平均値の差異は小さく，応力の軟化域においてひび割れ幅の平均値と最大値の差が大きくなり，終局時にひび割れ開口が局所化する実験結果と対応している。この傾向は，B400 試験体を除いて同様に確認できる。B400 試験体では，ひび割れ幅計測の解像度も他の試験体と比較して十分ではなく（ただし，0.05mm は



図－9　曲げ応力－ひび割れ幅関係

確保している），最大応力以降非常に脆性的な破壊を示したので，検討できる十分なデータを計測できなかった。

最大応力時のひび割れ幅の平均値は，試験体の寸法に依らず 0.3～0.4mm 程度である。すなわち，繊維の架橋性能における変形能（繊維の抜出し量）に関しては，寸法効果の影響は大きくないと考えることができる。一方，最大曲げ応力に関して試験体寸法の影響は大きいため，繊維の架橋応力は寸法効果の影響が大きく，型枠に沿って繊維が 2 次元状に配向するウォールエフェクトがあると思われる。なお，最大荷重時の曲げ歪に関しては，本実験の試験体では ECC におけるいわゆる飽和ひび割れ状態には達しておらず，歪算出時の検長区間の差異の影響が小さくないと思われる。

なお，今回の実験で用いた試験体では，ECC に期待される複数ひび割れの発生は確認できなかったが，ECC として開発されたものと同様の調合を用いており，材料性能のばらつきも少なくないと考えている。

5. まとめ

ECC の曲げ性状および一軸引張性状における寸法効果の定量的把握を目的に，試験体寸法を主たる因子とした曲げ試験，一軸引張試験およびそれに伴う画像解析によるひび割れ計測を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

(1) 曲げ試験によって得られた最大応力に対する寸法効果は大きく，試験体寸法が大きくなるほど最大応力が低下した。その程度を，純曲げ区間の評価体積を用いて定量化した。

(2) デジタル画像を用いた連続的なひび割れ幅の計測により，ひび割れ幅の進展を計測できた。

(3) 曲げ試験における最大応力時のひび割れ幅の平均値は，試験体の寸法に依らず同程度で，0.3～0.4mm であった。

謝辞

本研究は，科学研究費補助金基盤研究(B)課題番号 20360247（ECC の寸法効果と構造性能の評価に関する研究）の助成を受けた。試験体の製作にあたり，鹿島建設株式会社技術研究所，興建産業株式会社のご協力を得た。

参考文献

1) Li, V.C.: From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Eng., JSCE, Vol.10, No.2, pp.37-48, 1993

2) 閑田徹志，金久保利之，永井　覚，丸田　誠：曲げ試験を用いた高靭性複合材料 ECC の引張力学性能管理に関する実験的検討，鹿島技術研究所年報，第 52 号，pp.131-138，2004

3) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井　覚：曲げ試験による PVA-ECC の引張性能評価，日本建築学会構造系論文集，第 604 号，pp.31-36，2006.6

4) 古田昌弘，金久保利之，閑田徹志，永井　覚：高靭性セメント系複合材料の一軸引張モデル評価法（その 1：初期ひび割れ点の簡易実験評価法），日本建築学会構造系論文集，第 568 号，pp.115-121，2003.6

5) 山田寛次，三橋博三，板垣直行，石山智：短繊維強化セメント系複合材料の引張強度の寸法効果に関する確率論的検討，日本建築学会構造系論文集，第 540 号，pp.7-12，2001.2