筑波大学大学院博士課程 システム情報工学研究科修士論文

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 (構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保 利之

2010年 3月

ECC の曲げおよび一軸引張性状における寸法効果

論 文 概 要

ECC (Engineered Cementitious Composite) とは、FRCC (Fiber-Reinforced Cementitious Composite) の中でも HPFRCC (High Performance Fiber-Reinforced Cement Composites) と呼ばれる高性能繊維補強セメント複合材料の範疇に含まれる材料であり、複数ひび割れ性状を示しながら曲げ応力下において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。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。その評価方法として、現在は曲げ試験による引張性能評価が行われているが、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。特に ECC の場合、繊維が二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。その影響を適切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。寸法の差異による引張性能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。

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、曲げ試験ならびに一軸引張試験を、試験体寸法を主たる変動因子とした試験体を用いて行った。また曲げ試験では鉄筋を有した試験体を作製し、鉄筋の有無が ECC の性状に与える影響を把握した。さらに、ECC の引張性状はひび割れ面での繊維の架橋能力、すなわちひび割れ性状と深い関係があるため、曲げ試験において試験体を連続的に撮影し、それより得られるデジタル画像の解析を行い、ひび割れ性状を把握して寸法効果に着目した曲げ性状との関連を検討した。

無筋試験体の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、繊維混入率に関わらず大きく、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。断面がもっとも小さい試験体(断面 40mm×40mm)では、繊維混入率、鉄筋の有無に関わらず、他の断面の試験体と異なる性状を示す可能性があることを確認した。また、それが繊維の配向によって生じている可能性を、モンテカルロ法による繊維配向性に関する確率により示した。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把握できた。またその値は、変位計の計測値より算出したひび割れ幅と良い適合性を示した。無筋試験体の場合、最大曲げ応力の 2/3 程度の応力に到達するまでのひび割れ幅の最大値と最小値は、0.1~0.15mm 程度であった。有筋試験体では、最大応力時においてもひび割れ幅は 0.1mm 程度であり、鉄筋を有することで ECC のひび割れ性状が変化することを確認した。評価体積による寸法効果の補正を行った応力ー歪関係を用いた断面解析を行うことで、無筋試験体の曲げ試験結果を表現できた。また、有筋試験体の曲げ試験結果においても、有筋試験体と無筋試験体のひび割れ間隔の比によって ECC の引張側の応力ー歪関係モデルを修正することで表現することができた。

ECC の曲げおよび一軸引張性状における寸法効果

目 次

第1章	序論	
1.1	ECC の概要	1
1.2	ECC の性能評価方法	3
1.3	研究目的	4
第2章	実験概要	5
2.1	はじめに	5
2.2	使用材料	6
2.3	曲げ試験(無筋)	3
2.4	曲げ試験(有筋)	13
2.5	一軸引張試験	15
2.6	ひび割れ解析	19
第3章	実験結果	20
3.1	はじめに	20
3.2	曲げ試験(無筋)	21
3.3	曲げ試験(有筋)	28
3.4	一軸引張試験	33
第4章	ECC の寸法効果の評価	35
4.1	はじめに	35
4.2	評価体積を用いた性能評価	36
4.3	ひび割れ解析	39
4.3.1	無筋試験体	39
4.3.2	2 有筋試験体	42
4.4	断面解析	45
4.4.1	I 無筋試験体	47
4.4.2	2 有筋試験体	48
第 5 章	結論	50

謝辞

参考文献

第1章 序論

1.1 ECC の概要

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、セメント系材料に短繊維を混入させ、補強した複合材料 (Fiber-Reinforced Cementitious Composite: FRCC) が多く研究されてきた。FRCC によって、ひび割れ面において繊維がひび割れを架橋することで靭性能が向上し、急激な応力低下を防ぐことが可能となった。

ECC (Engineered Cementitious Composite¹⁻¹⁾) は、FRCCの中でもHPFRCC (High Performance Fiber-Reinforced Cement Composites) と呼ばれる高性能繊維補強セメント複合材料の範疇に含まれる材料であり、図 1-1 のような複数ひび割れ性状を示しながら曲げ応力下において応力上昇するたわみ硬化性状(図 1-2)や、一軸引張応力下において初期ひび割れ発生以降に応力上昇する歪硬化性状(図 1-2)を示す、極めて高靭性なセメント系複合材料である。

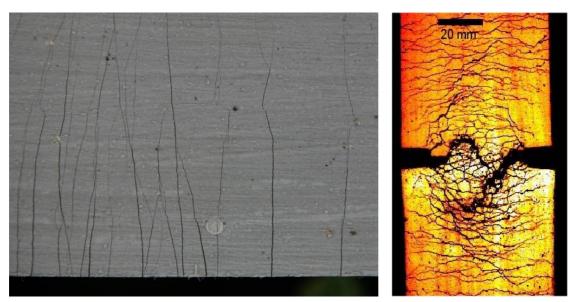


図1-1 複数ひび割れ性状(左:曲げ試験時,右:引張試験時1-2)

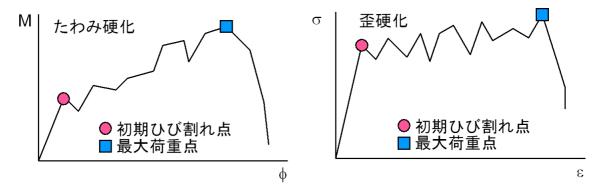
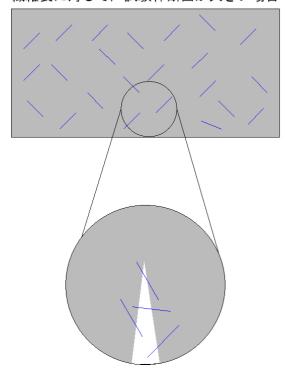


図1-2 たわみ硬化性状および歪硬化性状

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局所的に ひび割れが開口することを防ぎ, 高耐久な部材を実現することが可能となる。実構造物にも, ダ ンパの役割を期待しコア壁の境界梁としての利用が報告されている¹⁻³⁾。

構造物への利用を考える中で、寸法効果の影響を把握する必要性が指摘されている。コンクリートのような不均質材料で考えられるような、マトリクスが原因となる寸法効果が存在するだけでなく、ECCでは繊維補強材料特有の寸法効果も加えて存在する。図 1-3 に示すように、混入させている繊維長に対して部材の断面が十分に大きい場合、繊維はランダムに配向するが、繊維長に対して試験体断面が小さい場合は型枠などによって繊維の配向が二次元状に制限され、ウォールエフェクトと呼ばれる現象が生じる。ひび割れが発生した際にひび割れに対する繊維の架橋応力を比べると、断面寸法によって大きく異なることが考えられる。つまり試験体の断面寸法によって ECC の性状が大きく変わる、これが繊維特有の寸法効果である。研究室レベルの試験体を用いて、構造物レベルの部材を評価する際には、複数の寸法効果による影響を考慮する必要があると判断できる。

繊維長に対して, 試験体断面が大きい場合



繊維長に対して、試験体断面が小さい場合 → ウォールエフェクト

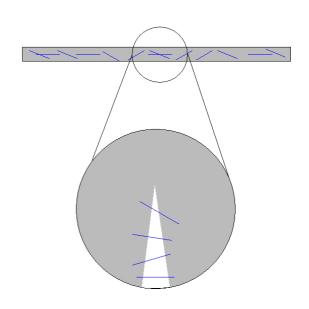


図1-3 試験体断面寸法による繊維配向の違い

1.2 ECC の性能評価方法

ECCの引張性能の評価方法として、曲げ試験と一軸引張試験が考えられる。現在は、曲げ試験における試験体の作製や加力が比較的容易であることから、実務におけるECCの評価には曲げ試験が用いられている¹⁻³⁾。曲げモーメントが卓越すると想定される部材を評価する場合、必要とされる部材の曲げ性状を、試験より得られた曲げ性状から評価することになるため明快である。ただし曲げ試験によって得られる性能は、あくまでも構造性能であり、純粋な材料の性能とは異なる。特に変形性能に関しては、曲げ試験時の断面内に応力勾配が存在することから、ひび割れ発生条件が一軸引張状態より緩和され、より変形能が大きく評価される可能性がある。

そこで材料本来の性能を把握することが可能な、一軸引張試験による性能評価が必要となる。 図 1-4 に示すように、薄板状の平板ダンベル型試験体を用いた直接引張試験¹⁻⁴⁾や、シリンダ型¹⁻⁵⁾、シリンダ形状のくびれ型試験体¹⁻⁶⁾等が提案されている。しかし平板ダンベル型は薄板状であり、繊維の配向が 2 次元状になることから性能を過大に評価する可能性がある。また、シリンダ型やシリンダくびれ型ではシリンダ形状のために打設方向が縦方向に限定され、混入している繊維の挙動が試験体中と部材中とで異なる性状を示すことが懸念される。そこで文献 1-7)に示されるような、ダンベル型試験体の断面を大きくし繊維配向の問題を除去した引張試験方法が開発された。(次章にて詳細を示す)ただしサイズが大きくなったことから、試験を行う手間が多くなるという問題もある。また載荷に必要な冶具も特殊であり、日常的な性能評価に採用するには困難といえる。

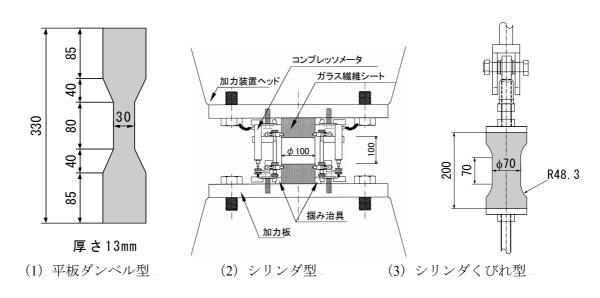


図1-4 一軸引張試験の例

1.3 研究目的

ECC の特長を有効活用し構造物に利用するためには、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、繊維が二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、曲げ試験ならびに一軸引張試験を、試験体寸法を主たる変動因子とした試験体を用いて行う。また曲げ試験では鉄筋を有した試験体を作製し、鉄筋の有無が ECC の性状に与える影響を把握する。さらに、ECC の引張性状はひび割れ面での繊維の架橋能力、すなわちひび割れと深い関係があるため、曲げ試験において試験体を連続的に撮影し、それより得られるデジタル画像の解析を行い、ひび割れ性状を把握して、寸法効果に着目した曲げ性状との関連を検討する。

第2章 実験概要

2.1 はじめに

本研究は、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、曲げ試験ならびに一軸引張試験を、試験体寸法を主たる変動因子とした試験体を用いて行うものである。また、曲げ試験では鉄筋を有した試験体を作製し、鉄筋の有無および鉄筋比が ECC の性状に与える影響も把握する。そして、寸法の差異による ECC の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ことから、曲げ試験時において試験体を連続的に撮影し、それより得られる画像の解析を行い、ひび割れ性状を把握、寸法効果に着目した曲げ性状との関連を検討する。

本章では、使用材料の説明、曲げ試験および一軸引張試験の方法、ひび割れ画像解析の方法について述べる。

2.2 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 2-1 に、ECCのフレッシュ時の空気量、圧縮強度、弾性係数を表 2-2 に示す。また、圧縮試験より得られた応力ー歪関係の一例を図 2-1 に示す。調合計画は文献 2-1)における、「mix3」と同様である。使用した結合材は中庸熱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 2500cm²/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 $1m^3$ の実機ミキサを用い、2シリーズの実験に対して、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に行った。養生方法は、打設後に蒸気養生(最高温度 35 $\mathbb C$ 、8 時間)を施し、その後、気中養生を行った。

表 2-2 より、シリーズおよびバッチによって圧縮強度等が多少異なることがわかるが、同一の 材料と判断した。

表2-1 使用した繊維の形状および力学性能

使用繊維	繊維長(mm)	繊維径(mm)	破断強度(MPa)	弾性係数(GPa)
PVA	12.0	0.04	1690	40.6

表2-2 フレッシュ時の空気量, 圧縮強度, 弾性係数

シリーズ I

種類バッチ	繊維混入率 V _f (%)	空気量(%)	圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)
PVA15-1	4.5	5.4	55.3	18.9
PVA15-2	1.5	5.6	56.9	19.9
PVA20-1	2.0	11.0	45.0	16.0
PVA20-2	2.0	11.0	47.1	16.4

シリーズⅡ

種類バッチ	繊維混入率 V _f (%)	空気量(%)	圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)
PVA15	1.5	6.5	54.8	18.5
PVA20-1	2.0	6.7	52.9	18.9
PVA20-2	2.0	10.5	48.2	16.1

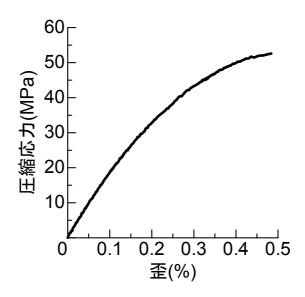


図2-1 圧縮試験より得られた応力-歪関係の一例

2.3 曲げ試験(無筋)

曲げ試験は、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。試験体形状を図 2-2 に、各試験体の試験時の様子を図 2-3 に示す。また、試験体一覧を表 2-3 に示す。実験因子は、繊維混入率および断面寸法である。繊維混入率は 1.5%および 2.0%とした。断面寸法は、シリーズ I では 40×40 mm、 100×100 mm、 200×200 mm、 400×400 mm、シリーズ II では 40×40 mm、 100×100 mm、 240×240 mm、 400×400 mm とした。試験体長さは各試験体ともに、一辺の 4 倍となっている。

加力は 2MN ユニバーサル試験機を使用し、変位制御により行った。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、荷重値および曲率を算出するための純曲げ区間の軸方向変形とした。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。



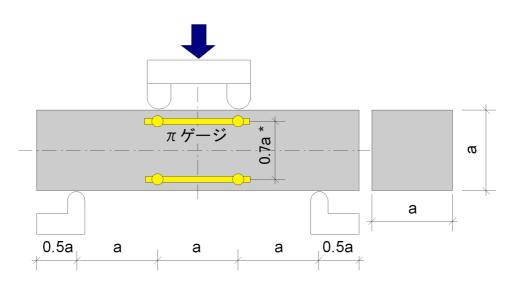


図2-2 曲げ試験体形状



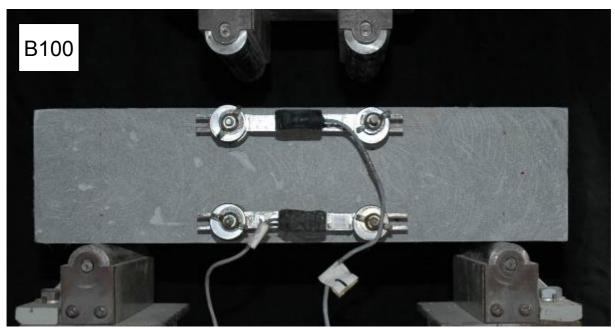


図2-3 各試験体の曲げ試験時の様子 (B40 試験体が有筋のものとなっているが、試験方法は同様のものである)





図 2-3 各試験体の曲げ試験時の様子(続き)



図 2-3 各試験体の曲げ試験時の様子(続き)

表2-3 曲げ試験(無筋)試験体一覧

シリーズ I

試験体名	使用材料	試験体数 (体)	a (mm)	検長 (mm)	
B40-15			40	50	
B100-15	PVA15-1	各 3	100		
B200-15		合う	200		
B400-15	PVA15-2		400		
B40-20			40	50	
B100-20	PVA20-1	各 3	100		
B200-20			200		
B400-20	PVA20-2		400		

シリーズ Ⅱ

試験体名	使用材料	試験体数 (体)	a (mm)	検長 (mm)	
B40-15		各3	40 50		
B100-15	PVA15	合う	100		
B240-15	PVAIS	2	240		
B400-15		1	400		
B40-20	PVA20-1		40	50	
B100-20	F VA20-1	各 3	100		
B240-20	PVA20-2		240		
B400-20	F VA2U-2	1	400		

2.4 曲げ試験(有筋)

曲げ試験は 2.3 節と同様に、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。試験体形状および断面を図 2-4 に、試験体詳細を表 2-4 に示す。実験因子は繊維混入率、断面寸法および鉄筋比である。繊維混入率は 1.5%および 2.0% であり、シリーズ Π のみを用いている。断面寸法は、 40×40 mm、 100×100 mm、 240×240 mm、 400×400 mm とした。試験体長さは各試験体ともに、一辺の 4 倍となっている。鉄筋比は、0.4% および 1.0%とした。使用した鉄筋の力学性状を表 2-5 に示す。鉄筋は SD295 を使用した。D3、D4、D6 の降伏点は、0.2%オフセット法により算出している。

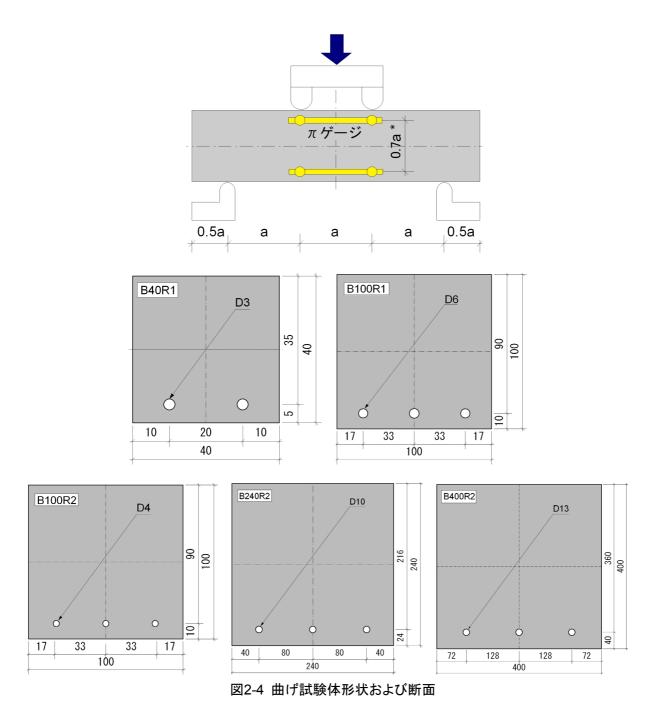


表2-4 曲げ試験(有筋)試験体一覧

シリーズ Ⅱ

試験体名	使用材料	試験体数 (体)	配筋	鉄筋比 (%)	a (mm)	検長 (mm)
B40R1-15			2-D3	1.01	40	50
B100R1-15		各 3	3-D6	1.06	100	
B100R2-15	PVA15	VA15	3-D4	0.42		
B240R2-15		2	3-D10	0.41	2	240
B400R2-15		1	3-D13	0.41	400	
B40R1-20			2-D3	1.01	40	50
B100R1-20	PVA20-1	各 3	3-D6	1.06		00
B100R2-20		合 3	3-D4	0.42	100	
B240R2-20	PVA20-2		3-D10	0.41	2	240
B400R2-20	F V M 2 U - 2	1	3-D13	0.41	4	100

表2-5 鉄筋の力学性能

種類	引張強さ(MPa)	降伏点(MPa)	ヤング率(GPa)	降伏歪(μ)
D3	383	269	219	1239
D4	593	402	205	1963
D6	511	351	189	1864
D10	486	349	192	1819
D13	504	354	194	1829

2.5 一軸引張試験

一軸引張試験に用いた試験体形状を図 2-5 に,各試験体の試験時の様子を図 2-6 に示す。また、試験体一覧を表 2-6 に示す。試験体形状は、矩形くびれ型 $^{2-2}$)である。引張応力伝達の境界条件は初期不正や二次曲げの影響を考慮した、ピンー固定 $^{2-3}$)である。試験体数は各 5 体ずつとした。実験因子は、繊維混入率および断面寸法である。繊維混入率は 1.5%および 2.0%であり、シリーズ I のみを用いた。断面寸法は、中央断面を 20×20 mm、 50×50 mm、 100×100 mm、 200×20 0mm、端部断面では 40×20 mm、 100×50 mm、 200×100 mm、 400×20 0mmとした。試験体には直線部を設けており、その長さは断面寸法と同値である。くびれ部の曲率はR=350、試験体全長はそれぞれ 83mm、110mm、160mm、260mmとした。

試験体端部は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ボルトを介して試験機のヘッドチャックに固定した。ただし図 2-6 に示すように、T50、T100、T200では鋼板を試験体上下面に接着させた後に端部を補強している。ECC表面をケレンした後、T50ではCFRP板を接着樹脂にて接着、T100では炭素繊維シートをプライマー、パテ材を塗布した後に、下塗樹脂を塗布し炭素繊維シートを貼り付け上塗りした。T200ではアンカーボルトにて補強している。ECCにアンカーボルトを埋め込む位置に孔を設け(4箇所)、その中にカプセル状接着樹脂を入れ、アンカーボルトを埋め込み、接着樹脂を硬化させた。用いたCFRP板、炭素繊維シートの物性値を表 2-7 および表 2-8 に示す。CFRP板の幅は 50mmであり、厚さと弾性係数の積を板剛性と称することとした。また、炭素繊維シートの規格目付量は 300 g/m²であり、シート幅は 100 mmとした。アンカーボルトは、M16 の全ネジボルトを用いた。

加力は 2MNユニバーサル試験機を使用し、変位制御により行った。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、荷重値および検長区間の伸びとした。検長区間は、各試験体ともに直線部の上下 30mm $^{1-7}$ とした。

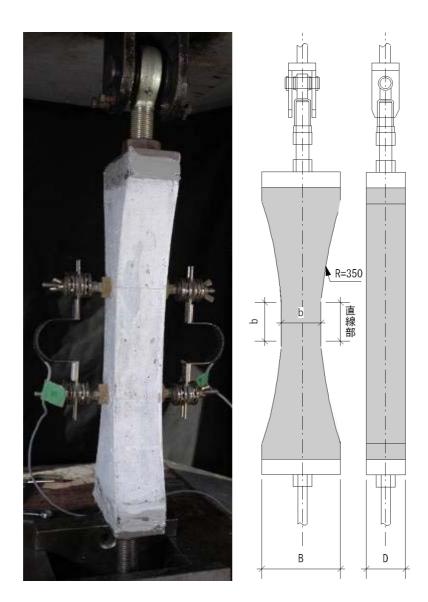


図2-5 一軸引張試験体形状









図2-6 各試験体の一軸引張試験時の様子

表2-6 一軸引張試験試験体

シリーズ I

試験体名	使用材料	試験体数 (体)	端部断面	中央断面	L	検長
武炭 14 石	医用物科	武學(14)	B×D(mm)	<i>b</i> × <i>D</i> (mm)	(mm)	(mm)
T20-15			40×20	20×20	200	83
T50-15	PVA15-1	各 5	100×50	50×50	350	110
T100-15			200×100	100×100	540	160
T200-15			400×200	200×200	850	260
T20-20			40×20	20×20	200	83
T50-20	PVA20-1	各 5	100×50	50×50	350	110
T100-20			200×100	100×100	540	160
T200-20			400×200	200×200	850	260

表2-7 CFRP 板の力学特性

引張強度*	弾性係数*	厚さ	板剛性
(MPa)	$E_{fp}(GPa)$	t_{fp} (mm)	$t_{f_{\mathcal{D}}}$ • $E_{f_{\mathcal{D}}}$ (kN/mm)
2970	175	1.0	175

^{*} 繊維方向の物性値

表2-8 炭素繊維シートの力学特性

引張強度*	規格弾性係数	弾性係数*	設計厚	目付量
(MPa)	(GPa)	(GPa)	(mm)	(g/m ²)
4040	220	220	0.0000	202
(縦横とも)	230	229	0.0833	302

^{*} 繊維方向の物性値

2.6 ひび割れ解析

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。そこで、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う。

図 2-3 に示したように、曲げ試験体の検長区間が撮影されるような位置にデジタルカメラを設置し、荷重値等のデータの計測ステップと同調させ、連続的に撮影を行う。その後、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、図 2-7 に示すように、①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、②二値化、③しきい値処理、④ノイズの除去、⑤エッジの検出、⑥ひび割れ決定、⑦ひび割れ幅計測を行う。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。

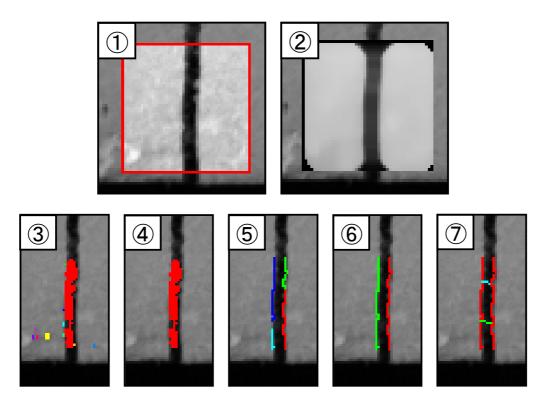


図2-7 ひび割れ幅計測の手順

第3章 実験結果

3.1 はじめに

本章では、曲げ試験 (無筋)、曲げ試験 (有筋)、一軸引張試験より得られた試験結果について 説明する。結果の整理にあたっては、ひび割れ性状、曲げモーメントー曲率関係、引張応力-歪 関係、それらの最大値とともに、各試験体の結果のばらつきも示す。

3.2 曲げ試験(無筋)

曲げ試験 (無筋) より得られた,シリーズ I の試験結果を表 3-1 に,シリーズ I の試験結果を表 3-2 に示す。表中のひび割れ本数は,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本数である。ひび割れ本数を計測した位置は,下側の変位計の位置(=試験体下端より(断面寸法 $a \times 0.15$)mm)とした。ひび割れ間隔とは,純曲げスパンをひび割れ本数で除したものである。曲げモーメントおよび曲率の算出方法は,以下の式を用いた。また,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。

$$M = \frac{P}{2} \times \frac{l}{3} \tag{3.1}$$

$$\phi = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{d_0} \tag{3.2}$$

M : 曲げモーメント(N・mm)P : ロードセルの示す荷重(N)l : スパン(=断面寸法 a×3 mm)

φ : 曲率(1/mm)

検長(=断面寸法 a mm)で除した歪(引張を正とする)

 d_0 : 2 つの変位計間の距離(=断面寸法 $a \times 0.7$ mm)

試験より得られたシリーズ I およびシリーズ I の,代表的な曲げモーメントー曲率関係および破壊経過を図 3-1,図 3-2 に示す。図 3-1 より,両シリーズともに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。また図 3-2,表 3-1 および表 3-2 からわかるように,純曲げスパン内に複数ひび割れの発生が確認できるものの,ひび割れ本数はシリーズ I に比べてシリーズ I では全体的に少ないことがわかる。ただし,ひび割れ間隔はシリーズや繊維混入率に関わらず,断面寸法が大きくなるにつれ増加することがわかり,ECC のひび割れ性状に寸法効果の影響があると考えられる。

各試験体の曲げ応力ー曲げ歪関係を**図 3-3** に示す。シリーズ,繊維混入率,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。また B40 を除き,断面寸法によって最大曲げ応力が大きく異なっており,寸法効果の影響が確認できる。B40 が他の試験体と性能が異なる可能性を示唆している。

表 3-3 および表 3-4 に、最大荷重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 20~60%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、両シリーズともに見られなかった。

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 3-4 およ

び図 3-5 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。式より、曲げ応力、曲げ歪ともに断面寸法と高い相関があることがわかり、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する傾向が示される。

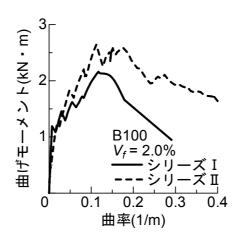


図3-1 代表的な曲げモーメントー曲率関係

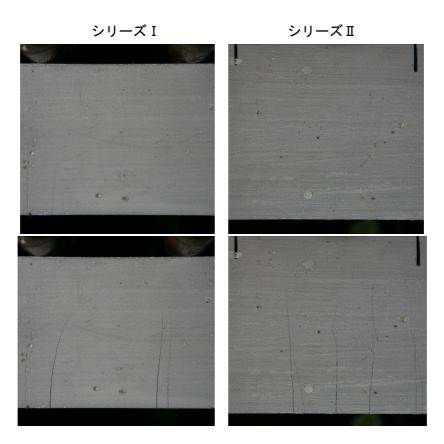


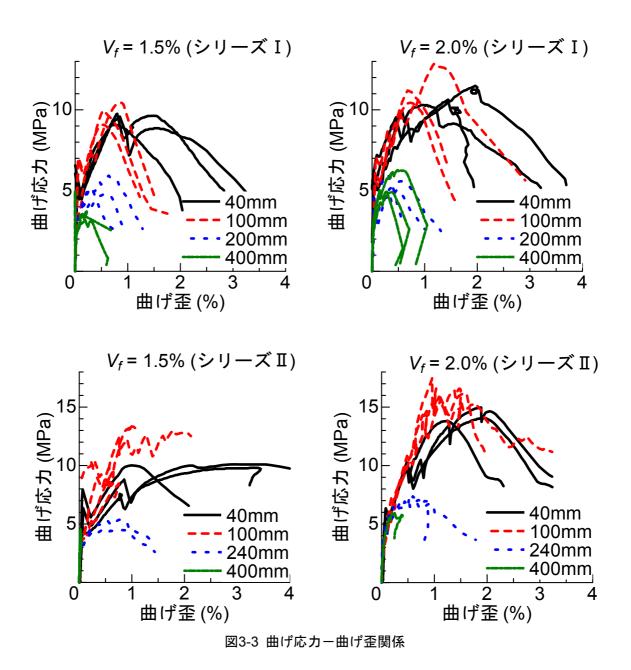
図3-2 破壊経過(上段:ひび割れ発生時,下段:最大荷重時)

表3-1 曲げ試験結果(無筋・シリーズ I)

	断面	ひび割れ本	ひび割れ		最大荷重	時	
試験体名	寸法	数/純曲げ	間隔	曲げモーメント	曲率	曲げ応力	曲げ歪
	(mm)	スパン	(mm)	M _{max} (kNm)	$\phi_{max}(1/m)$	$\sigma_{max}(MPa)$	$arepsilon_{ extit{max}}(\%)$
B40-15-1		2 本/40mm	20	0.100	0.215	9.58	0.85
B40-15-2	40×40	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		1 本/100mm	100	1.525	0.548	9.08	0.55
B100-15-2	100×100	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		7 本/200mm	28.6	7.911	0.032	5.92	0.64
B200-15-2	200×200	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		1 本/400mm	400	52.740	0.005	4.93	0.18
B400-15-2	400×400	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		2 本/40mm	20	0.124	0.487	11.49	1.96
B40-20-2	40×40	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		2 本/100mm	50	1.863	0.677	11.20	0.68
B100-20-2	100×100	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		1 本/200mm	200	7.591	0.027	5.58	0.55
B200-20-2	200×200	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		2 本/400mm	200	67.002	0.012	6.27	0.49
B400-20-2	400×400	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3-2 曲げ試験結果一覧(無筋・シリーズ II)

	断面	ひび割れ本	ひび割れ		最大荷重		
試験体名	寸法	数/純曲げ	間隔	曲げモーメント	曲率	曲げ応力	曲げ歪
	(mm)	スパン	(mm)	<i>M_{max}</i> (kN∙m)	$\phi_{max}(1/\mathrm{m})$	$\sigma_{max}(MPa)$	$\varepsilon_{max}(\%)$
B40-15-1		1 本/40mm	40.0	0.113	0.247	10.0	1.00
B40-15-2	40×40	2 本/40mm	20.0	0.111	0.724	10.1	2.91
B40-15-3		2 本/40mm	20.0	0.106	0.828	9.81	3.31
B100-15-1		8 本/100mm	12.5	1.722	0.023	10.3	0.23
B100-15-2	100×100	6 本/100mm	16.7	2.189	0.178	13.0	1.78
B100-15-3		2 本/100mm	50.0	2.300	0.096	13.3	1.00
B240-15-1	240×240	8 本/240mm	30.0	10.398	0.032	4.50	0.78
B240-15-2	240×240	2 本/240mm	120.0	12.510	0.034	5.39	0.81
B400-15	400×400	1 本/400mm	400.0	49.040	0.001	4.58	0.02
B40-20-1		2 本/40mm	20.0	0.155	0.310	13.8	1.24
B40-20-2	40×40	2 本/40mm	20.0	0.153	0.483	14.1	1.94
B40-20-3]	4 本/40mm	10.0	0.168	0.471	15.0	1.89
B100-20-1		16 本/100mm	6.3	2.643	0.112	15.7	1.13
B100-20-2	100×100	4 本/100mm	25.0	2.716	0.161	16.1	1.61
B100-20-3]	6 本/100mm	16.7	2.829	0.097	17.5	0.96
B240-20-1		16 本/240mm	15.0	16.458	0.031	7.07	0.75
B240-20-2	240×240	9 本/240mm	26.7	17.296	0.025	7.43	0.59
B240-20-3		8 本/240mm	30.0	13.853	0.006	5.98	0.15
B400-20	400×400	23 本/400mm	17.4	63.836	0.006	5.93	0.25



- 25 -

表3-3 最大荷重時の曲げ応力の平均値と変動係数

シリーズ I

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	3.1	B40-20	10.8	4.9
B100-15	9.83	5.8	B100-20	11.5	8.7
B200-15	5.27	8.9	B200-20	5.54	6.7
B400-15	3.94	18.6	B400-20	5.40	11.3

シリーズⅡ

試験体	平均値(MPa)	変動係数(%)	試験体	平均値(MPa)	変動係数(%)
B40-15	9.98	1.2	B40-20	14.28	3.4
B100-15	12.2	11.1	B100-20	16.43	4.7
B240-15	4.94	9.1	B240-20	6.82	9.0
B400-15	4.58		B400-20	5.93	_

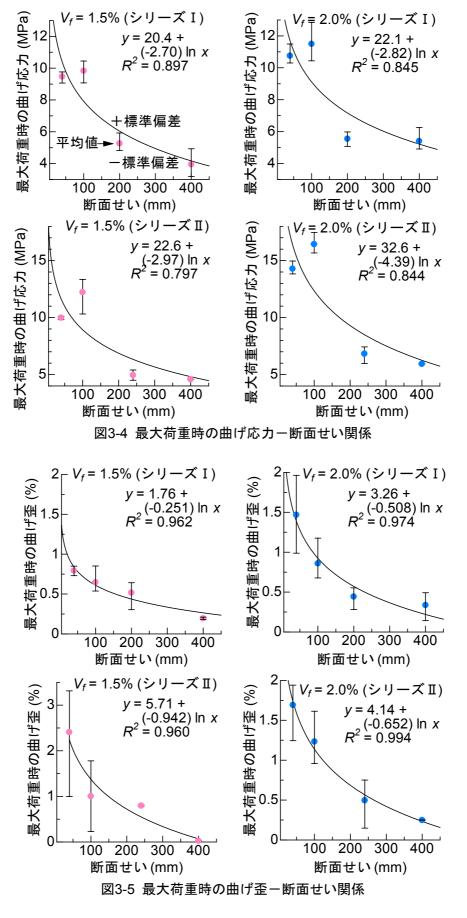
表3-4 最大荷重時の曲げ歪の平均値と変動係数

シリーズ I

試験体	平均值(%)	変動係数(%)	試験体	平均值(%)	変動係数(%)
B40-15	0.79	6.2	B40-20	1.47	27.2
B100-15	0.65	22.5	B100-20	0.86	26.2
B200-15	0.52	29.2	B200-20	0.44	26.5
B400-15	0.19	6.0	B400-20	0.34	43.3

シリーズⅡ

試験体	平均値(%)	変動係数(%)	試験体	平均値(%)	変動係数(%)
B40-15	2.41	42.0	B40-20	1.69	18.7
B100-15	1.00	63.2	B100-20	1.23	22.6
B240-15	0.79	2.3	B240-20	0.50	51.4
B400-15	0.02	_	B400-20	0.25	



3.3 曲げ試験(有筋)

曲げ試験(有筋)より得られた試験結果を表 3-5 に、代表的な試験体の破壊経過および最終的な破壊状況を図 3-6 に示す。B100R1 および B100R2-15 の一部の試験体では、最終的にせん断スパンでのせん断ひび割れが開口し、破壊に至った。しかし最終的にせん断破壊した試験体においても純曲げスパン内では多くの曲げひび割れが発生しており、また本実験では曲率を検討項目としているため、せん断破壊に至った試験体より得られた結果も、他の試験体と同様に検討することとした。

表 3-5 中の各値は、3.2 節と同様の方法によって算出したものである。表より、繊維混入率や断面寸法、鉄筋比に関わらず、ひび割れ間隔がほぼ一定であると判断できる。これより、鉄筋を有することで ECC のひび割れ性状に対する寸法効果の影響が小さくなると考えられる。また表中に示した破壊形式より、鉄筋比 1.0%の試験体における B100 はせん断破壊になっているのに対し、B40 では曲げおよび曲げせん断破壊となっていることがわかることから、B40 は曲げ性状よりもせん断性状に対する寸法効果の影響が大きい可能性が示唆される。

試験より得られた曲げモーメントー曲率関係を図 3-7 に示す。図 3-7 より、B40 を除き、無筋試験体に比べてひび割れ時の荷重低下が顕著に見られず、ひび割れ発生後の引張力を鉄筋が負担していることがわかる。また初期ひび割れ発生後の荷重増加が、繊維混入率によらず同程度であること、断面寸法が増大するにつれ初期ひび割れ発生後の荷重増加が少なくなることがわかる。これらより、繊維の架橋応力に対する寸法効果の影響は大きく、それは繊維混入率に関わらないことがわかる。B40 に限っては、上述と異なる性状を示しており、無筋試験体と同様に B40 は、他の試験体と性能が異なる可能性を示唆している。

表3-5 曲げ試験結果(有筋)

	ᄣᆖᆖᅷ	ひび割れ本	ひび割れ		最大荷重時		
試験体名	断面寸法	数/純曲げ	間隔	破壊形式	曲げモーメント	曲率	
	(mm)	スパン	(mm)		<i>M_{max}</i> (kN⋅m)	$\phi_{max}(1/m)$	
B40R1-15-1		7 本/40mm	5.7	曲げ	0.275	1.704	
B40R1-15-2	40×40	9 本/40mm	4.4	曲げ	0.288	3.089	
B40R1-15-3		8 本/40mm	5.0	曲げ	0.298	2.566	
B100R1-15-1		13 本/100mm	7.7	せん断	5.804	0.282	
B100R1-15-2	100×100	12 本/100mm	8.3	せん断	5.599	0.266	
B100R1-15-3		16 本/100mm	6.3	せん断	6.025	0.267	
B100R2-15-1		18 本/100mm	5.6	曲げ	4.642	0.610	
B100R2-15-2	100×100	17 本/100mm	5.9	せん断	4.451	0.479	
B100R2-15-3		16 本/100mm	6.3	せん断	4.808	0.620	
B240R2-15-1	240×240	35 本/240mm	6.9	曲げ	43.824	0.161	
B240R2-15-2	240×240	28 本/240mm	8.6	曲げ	33.017	0.170	
B400R2-15-1	400×400	38 本/400mm	10.5	曲げ	98.768	0.062	
B40R1-20-1		10 本/40mm	5.0	曲げ	0.316	2.701	
B40R1-20-2	40×40	10 本/40mm	4.0	曲げ	0.369	1.824	
B40R1-20-3		13 本/40mm	3.1	曲げ	0.391	3.070	
B100R1-20-1		24 本/100mm	4.2	せん断	6.417	0.513	
B100R1-20-2	100×100	13 本/100mm	7.7	せん断	6.002	0.254	
B100R1-20-3		16 本/100mm	6.3	せん断	5.719	0.241	
B100R2-20-1		16 本/100mm	6.3	曲げ	4.253	0.316	
B100R2-20-2	100×100	16 本/100mm	6.3	曲げ	3.927	0.364	
B100R2-20-3		24 本/100mm	4.2	曲げ	4.162	0.550	
B240R2-20-1		36 本/240mm	6.7	曲げ	33.305	0.127	
B240R2-20-2	240×240	46 本/240mm	5.2	曲げ	37.642	0.140	
B240R2-20-3		40 本/240mm	6.0	曲げ	31.596	0.078	
B400R2-20-1	400×400	40 本/400mm	10.0	曲げ	102.028	0.031	

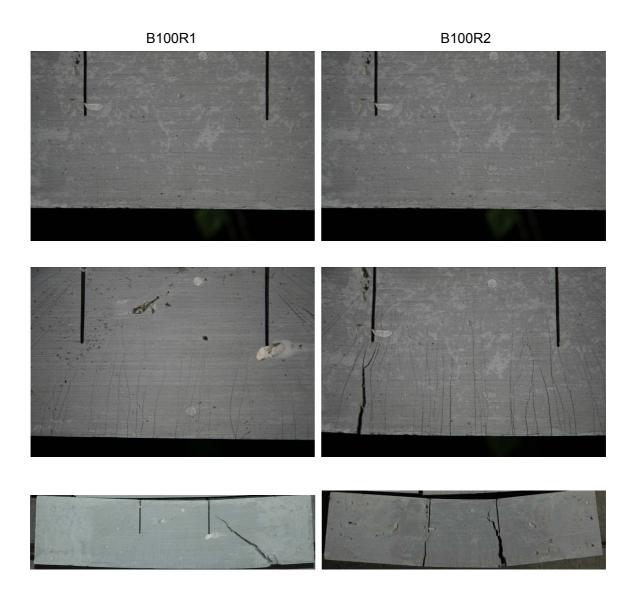
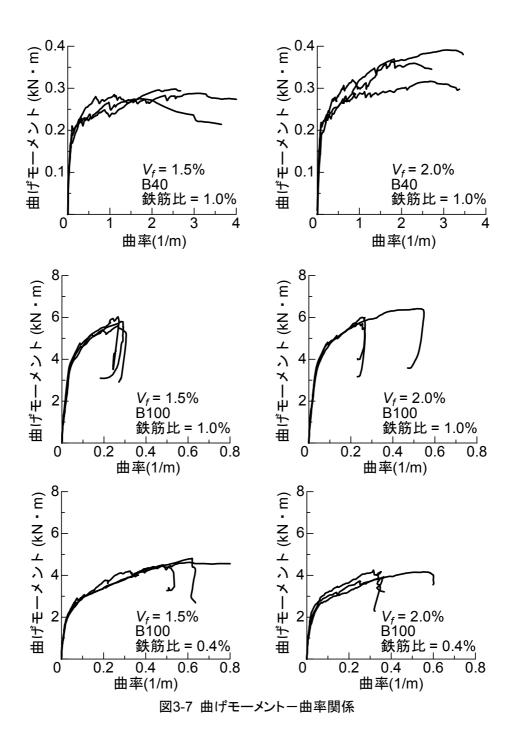


図3-6 代表的な試験体の破壊経過および最終的な破壊状況 (上段:ひび割れ発生時,中段:最大荷重時,下段:破壊状況)



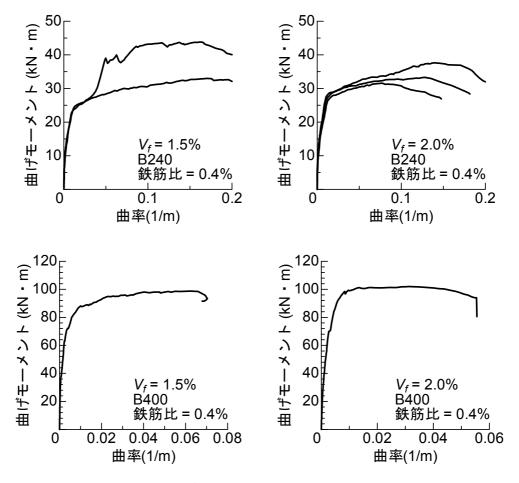


図 3-7 曲げモーメントー曲率関係 (続き)

3.4 一軸引張試験

一軸引張試験の実験結果を表 3-6 に、引張強度と終局歪の平均値と変動係数を表 3-7 および表 3-8 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一引張歪関係を図 3-8 に示す。複数ひび割れの発生が歪硬化性状より確認できるが、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。また、試験区間外である端部での破壊に至った試験体に関しても、同様に検討する。

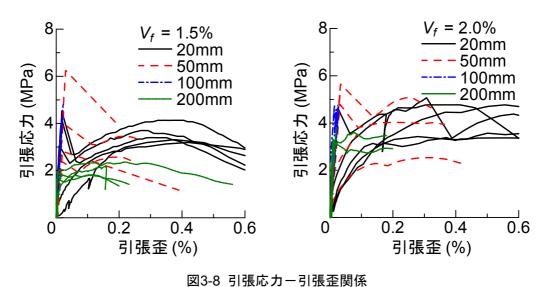
表3-6 一軸引張試験結果

試験体	引張強度	終局歪	試験体	引張強度	終局歪		
□八河大 个	$\sigma_{max}(MPa)$	$arepsilon_{\it u}(\%)$	6八河大 个	$\sigma_{max}(MPa)$	$arepsilon_{\it u}(\%)$		
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		
T200-15-1	2.36	0.29	T200-20-1	3.81	0.02		
T200-15-2	1.88	0.12	T200-20-2	3.59	0.18		
T200-15-3	1.82	0.12	T200-20-3	3.26	0.01		
T200-15-4	2.18	0.16	T200-20-4	3.26	0.18		
T200-15-5**	1.94	0.01	T200-20-5	3.01	0.01		

^{* …}設置時に、ひび割れ

^{** …}端部で破壊

表 3-7 および表 3-8 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、変動係数が 100%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。



試験体 平均値(MPa) 平均値(MPa) 変動係数(%) 変動係数(%) 試験体 T20-15 3.79 13.5 T20-20 4.33 15.4 32.9 T50-15 4.08 T50-20 4.35 26.8 T100-15 4.24 T100-20 4.32 10.0 6.7

10.0

T200-15

2.04

表3-7 引張強度の平均値と変動係数

表3-8 引張歪の平均値と変動係数

T200-20

3.39

8.3

試験体	平均値(%)	変動係数(%)	試験体	平均値(%)	変動係数(%)
T20-15	0.41	26.2	T20-20	0.60	17.5
T50-15	0.10	92.1	T50-20	0.20	61.6
T100-15	0.02	9.0	T100-20	0.02	19.0
T200-15	0.14	63.2	T200-20	0.08	100.3

第4章 ECC の寸法効果の評価

4.1 はじめに

本章では、評価体積を用いた性能評価の提案、ひび割れ解析を用いた ECC のひび割れ性状の評価および断面解析による検討について述べる。最大曲げ応力および最大荷重時の曲げ歪を純曲げ区間の評価体積より検討し、寸法効果に着目した ECC の性能評価を提案する。ひび割れ解析を用いた ECC のひび割れ性状の評価では、画像解析から算出したひび割れ幅を用いて ECC のひび割れ性状の評価を行う。また、変位計より算出した値を用いた平均ひび割れ幅と画像解析によるひび割れ幅を比較、検討する。断面解析では、ECC の無筋および有筋試験体の曲げ性状を表現することを目指す。

4.2 評価体積を用いた性能評価

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されている⁴⁻¹⁾。本検討では、曲げ試験(無筋)における高応力体積は純曲げ区間の体積であるとして、曲げ性能の寸法効果を評価する。

実務において、ECCの性能は 100×100×400mm (=B100 と同サイズ) の試験体から評価しており¹⁻³⁾、実構造物に適用する際には強度低下を定量的に把握する必要がある。そこで、各シリーズのB100 の最大曲げ応力の平均値および最大荷重時の曲げ歪の平均値を基準曲げ応力、基準曲げ歪として、断面寸法の異なる試験体より得られた結果を基準化する。基準化した曲げ応力一評価体積関係を図 4-1 に、基準化した曲げ歪一評価体積関係を図 4-2 に示す。

図 4-1 において、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。なお、B40 ではECCの性能が他の試験体と異なる可能性があるため、回帰計算から除いた。繊維は三次元空間内でランダムに配向すると考えられるが、実際には打設時に型枠や自由境界(打設面)に拘束され、各表面付近では面に沿うように二次元または一次元的に分布すると考えられる(図 4-3)。ひび割れ面と繊維の成す角は一次元が最も小さくなるが、角度が増すほど付着力が大きいということが既往の研究⁴⁻²⁾より明らかとなっている。B40 は繊維長に対し、断面寸法が十分に大きいといえず、一次元的な配向が多いと考えられる。図 4-1 より、基準化された曲げ応力と評価体積には高い相関が見られることがわかり、大きな断面せいをもつ実構造物で強度低下が大きい可能性を示した。

そこで、ビュッフォンの針⁴⁻³⁾の考え方を用いてモンテカルロ法を行い、断面寸法の違いに着目した繊維の配向を考えることとする。ビュッフォンの針とは、制限された平面区域内に、ある長さの針をランダムに分布させ、針が領域の境界に交差する確率を定式的に求めるものである。ここでは三次元に拡張し、制限された空間領域の境界に繊維が交差する確率を求めることとした。 図 4-4 に示すように、空間内に繊維が存在するとき、繊維の長さをL、繊維の図心の座標を (x_0, y_0, z_0) 、繊維がとりうる角度を θ および ϕ とした場合、繊維の端部の座標 (x_1, y_1, z_1) および (x_2, y_2, z_2) は、以下の式のように表される。

$$(x_1, y_1, z_1) = (x_0 + (L/2)\sin\theta\cos\phi, y_0 + (L/2)\cos\theta\cos\phi, z_0 + (L/2)\sin\phi)$$
(4.1)

$$(x_2, y_2, z_2) = (x_0 - (L/2)\sin\theta\cos\phi, y_0 - (L/2)\cos\theta\cos\phi, z_0 - (L/2)\sin\phi)$$
(4.2)

 (x_0, y_0, z_0) および θ , ϕ を乱数から与え, (x_I, y_I, z_I) または (x_2, y_2, z_2) が**図 4-5** に示す空間領域の外部に位置する確率を求めた。なお,繊維長は 12mm,繊維径は無視することとした。結果を**表 4-1** に示す。断面寸法が小さい試験体ほど配向が制限される繊維量の割合が高くなることがわかる。

図 4-2 に示す曲げ歪では、B40 の結果も用いて回帰計算を行った。先に述べた一次元的配向による影響は、ECC の変形能(繊維のマトリクスからの抜出し)に関してはむしろ寸法効果が生じやすくなると考えられる。基準化された曲げ歪と評価体積には高い相関が見られる。

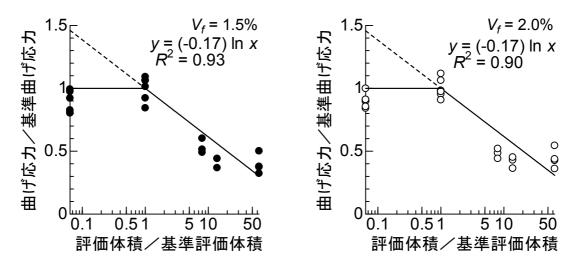


図4-1 基準化した曲げ応カー評価体積関係

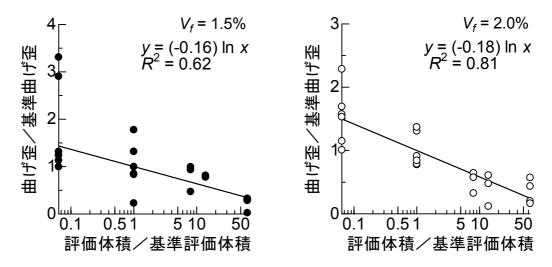


図4-2 基準化した曲げ歪ー評価体積関係

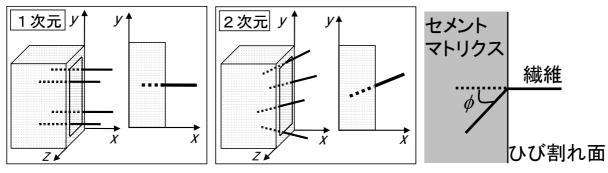


図4-3 繊維の配向

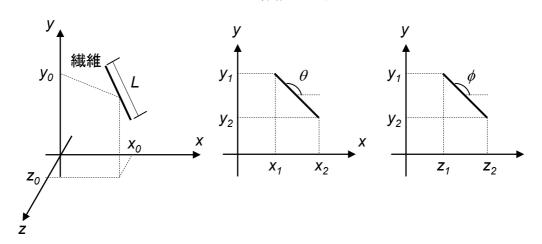


図4-4 ビュッフォンの針を三次元に拡張した際, 空間内に存在する繊維の定義

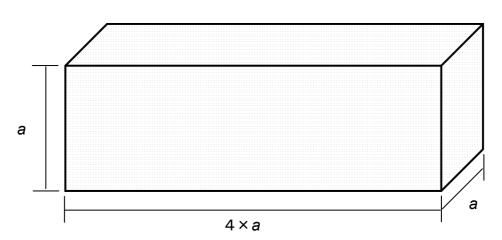


図4-5 モンテカルロ法に用いる曲げ試験を模擬した空間

表4-1 モンテカルロ法によって算出した繊維の配向を制限される割合

a (mm)	配向が制限される繊維の割合(%)			
40	26.8			
100	11.3			
200	5.7			
400	2.9			

4.3 ひび割れ解析

4.3.1 無筋試験体

曲げ試験(無筋)より得られた代表的な試験体の曲げ応力と、画像解析によって得られたひび割れ幅の関係を、図 4-6 に示す。複数発生したひび割れに関して、ひび割れ幅の平均値と最大値、最小値を示した。また、画像解析によって得られた平均ひび割れ幅と、引張側の変位計から得られた値を目視によって確認できたひび割れ本数で除することによって得た平均ひび割れ幅を比較した曲げ応力-ひび割れ幅関係を、図 4-7 に示す。

図 4-6 より、全般的な傾向として最大応力の 2/3 程度の応力に到達するまでのひび割れ幅の最大値と最小値はおおむね 0.1~0.15mm 程度であり、両者の差異は小さいといえる。これは、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。また、最大応力時のひび割れ幅の平均値は、B40 は 0.4mm 程度であるが、他の試験体では 0.15mm 程度であることがわかる。B40 を除き、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。しかしながら、試験体寸法の変化により最大曲げ応力は大きく変化しており、繊維のマクロ的な架橋応力に関しては寸法効果の影響が大きいといえる。これらの結果を総合的に判断すると、最大曲げ応力到達前に試験体引張縁では繊維の架橋応力が軟化域に達しているひび割れが存在し、その軟化領域の範囲と試験区間寸法の関係から最大曲げ応力に関しての寸法効果が現れると思われる。

図 4-7 より、画像解析より得られたひび割れ幅を、変位計から算出したひび割れ幅によって表現できていると判断でき、ECC のひび割れ性状は変位計より算出した値で把握できることがわかる。

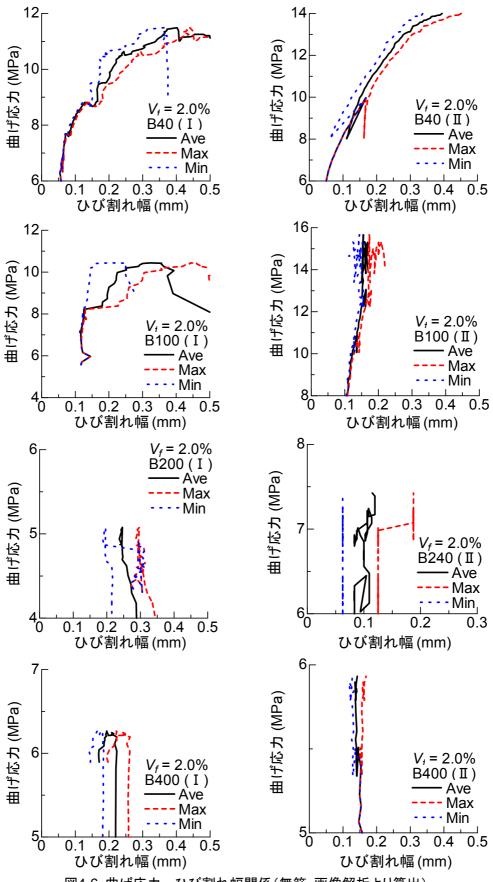


図4-6 曲げ応カーひび割れ幅関係(無筋・画像解析より算出)

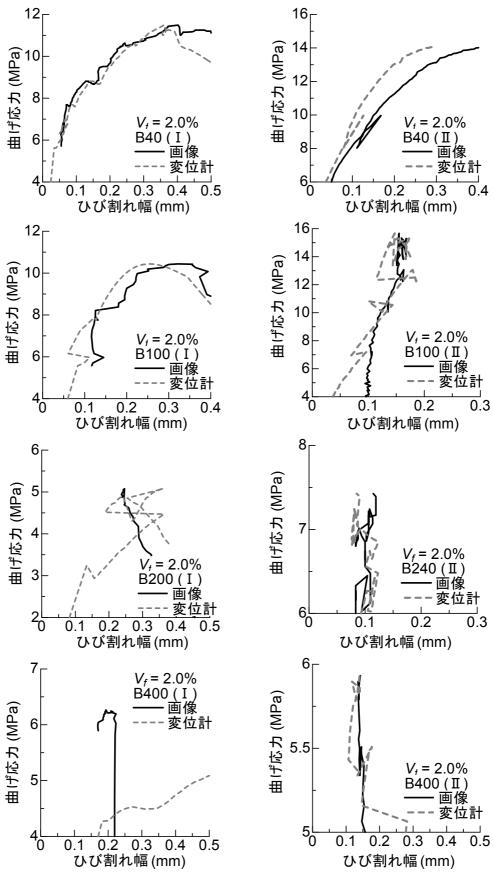


図4-7 曲げ応カーひび割れ幅関係(無筋・画像解析および変位計より算出)

4.3.2 有筋試験体

曲げ試験(有筋)より得られた代表的な試験体の曲げ応力と、画像解析によって得られたひび割れ幅の関係を、図 4-8 に示す。複数発生したひび割れに関して、ひび割れ幅の平均値と最大値、最小値を示した。また、画像解析によって得られた平均ひび割れ幅と、引張側の変位計から得られた値を目視によって確認できたひび割れ本数で除することによって得た平均ひび割れ幅を比較した曲げ応力一ひび割れ幅関係を、図 4-9 に示す。

図4-8より,B40を除き,最大曲げ応力時のひび割れ幅は断面寸法および鉄筋比によらず,0.1mm程度であることがわかる。4.3.1 項で示した最大応力時のひび割れ幅と異なることから,ECCは鉄筋を有することで、ECCのひび割れ性状が変化することを確認した。

図 4-9 より, 有筋試験体においても ECC のひび割れ性状を, 無筋の場合と同様に変位計より算出した平均ひび割れ幅で, 画像解析より得られた場合を表現できていると判断できる。

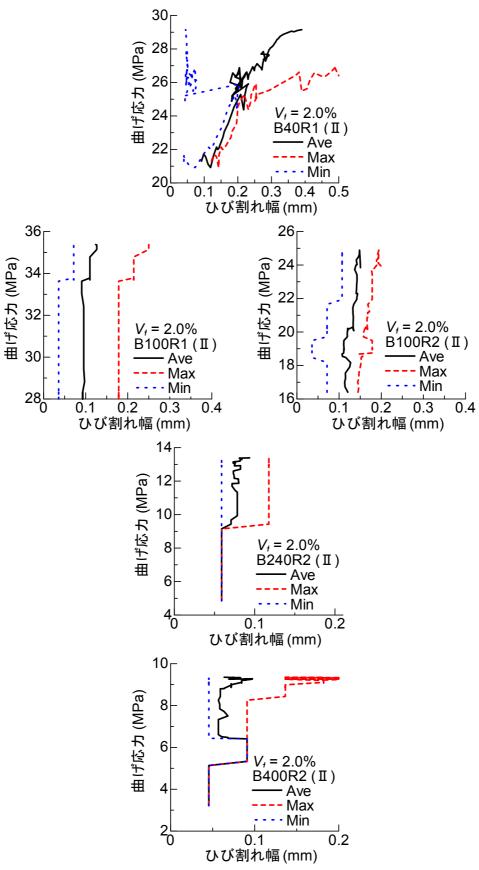


図4-8 曲げ応カーひび割れ幅関係(有筋)

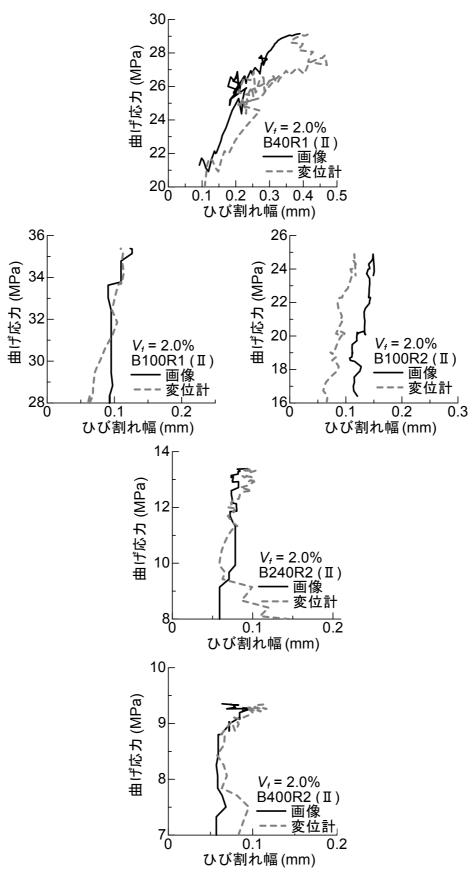


図4-9 曲げ応カーひび割れ幅関係(有筋・画像解析および変位計より算出)

4.4 断面解析

ファイバーモデルによる断面解析を行い、ECCの無筋および有筋試験体の曲げ性状を表現する。 ECCおよび鉄筋の応力ー歪関係のモデルを図 4-10、図 4-11 に示す。また、ECCおよび鉄筋の物性値を表 4-2、表 4-3 に示す。ECCの応力ー歪関係の引張側はトリリニアモデル、圧縮側は放物線モデルとした。引張側は、シリーズ Π のB100 の結果から、ひび割れ発生時の応力 σ_{cr} 、歪 ϵ_{cr} 、引張強度時の応力 σ_{n} 、歪 ϵ_{n} を文献 4-4)に基づき、それぞれ算出した。終局歪 ϵ_{n} は、曲げモーメントー曲率関係が実験結果と対応するように決定し、引張強度時の歪 ϵ_{n} の 2 倍とした。圧縮側は、圧縮強度と圧縮強度時歪より放物線を決定した。鉄筋の応力ー歪関係はバイリニアモデルとした。二次勾配は、鉄筋の引張試験結果に合うように決定した。

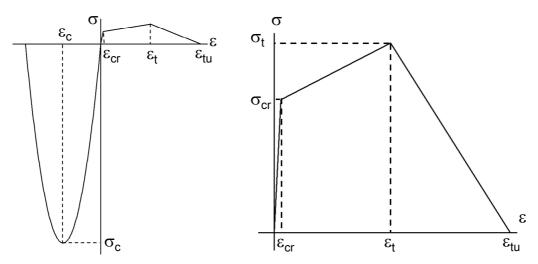


図4-10 ECC の応力ー歪モデル(圧縮側を負, 引張側を正とした)

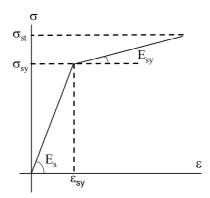


図4-11 鉄筋の応力-歪モデル

表4-2 モデルに用いた ECC の物性値

圧約	宿側	引張側				
圧縮強度	圧縮強度 時歪	ひび割れ 発生時応力	ひび割れ 発生時歪	引張強度	引張強度 時歪	終局歪
$\sigma_{\!c}(MPa)$	$\mathcal{E}_{\mathcal{C}}(\%)$	$\sigma_{\!cr}(MPa)$	$\mathcal{E}_{\mathit{cr}}(\%)$	$\sigma_t(MPa)$	$\varepsilon_t(\%)$	$\mathcal{E}_{tu}(\%)$
52.9	0.47	2.44	0.01	8.79	1.00	2.00

表4-3 モデルに用いた鉄筋の物性値

鉄筋	引張強さ(MPa)	降伏点(MPa)	ヤング率(GPa)	降伏歪(μ)	二次勾配(GPa)
D3	383	269	219	1239	0.22
D4	593	402	205	1963	4.52
D6	511	351	189	1864	4.40
D10	486	349	192	1819	0.19
D13	504	354	194	1829	0.19

4.4.1 無筋試験体

無筋試験体(シリーズⅡ)の実験値および断面解析より得られた解析値を,**図 4-12** に示す。 B100 の物性値を用いたことから,B100 を除く試験体では寸法効果の影響を受け,表現できていないことがわかる。

4.2 節で提案した評価体積による最大曲げ応力および最大荷重時の曲げ歪の評価と同一の関係式を用いて ECC の応力-歪関係を修正した断面解析の結果を図 4-13 に示す。解析値が実験値をよく表現できており、評価体積による寸法効果の補正を行った応力-歪関係を用いて無筋試験体の曲げ性状を表現できるとわかる。

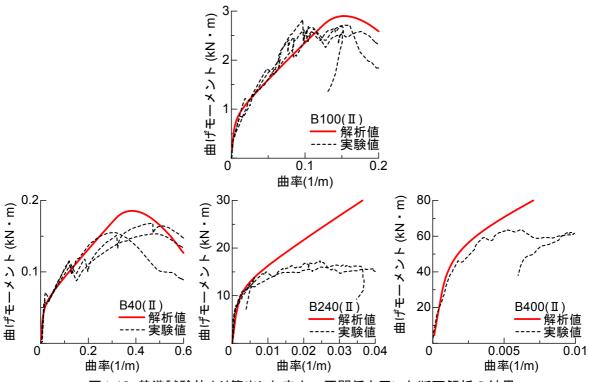


図4-12 基準試験体より算出した応力ー歪関係を用いた断面解析の結果

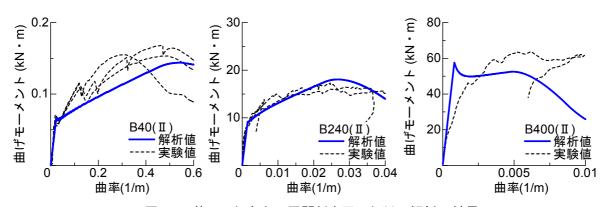
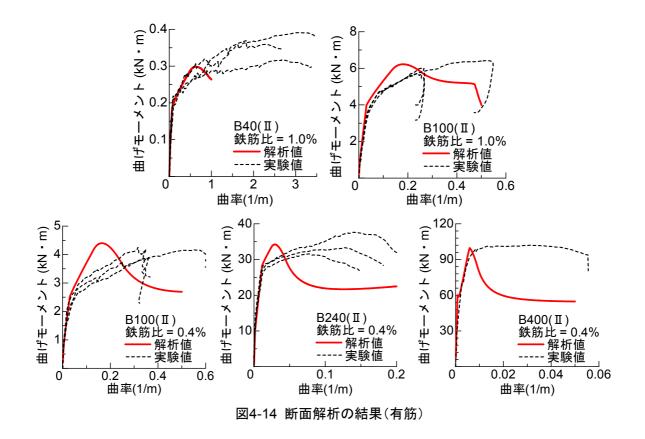


図4-13 修正した応力ー歪関係を用いた断面解析の結果

4.4.2 有筋試験体

評価体積による寸法効果の補正を行った、応力-歪関係を用いた断面解析を行うことで、ECC の無筋試験体の曲げ性状を表現できるとわかった。そこで同様の方法により有筋試験体の断面解析による曲げ性状の表現を目指す。実験結果と、無筋試験体と同一のモデルを用いて行った解析より得られた結果を図 4-14 に示す。実験結果に対して解析結果は、最大曲げモーメントは表現できているものの、最大曲げモーメント時の曲率が表現できていないとわかる。

第3章の表3-2 および表3-5 に示したひび割れ間隔より,ECCのひび割れ性能が鉄筋を有することで変化すると判断できる。そこで,有筋試験体と無筋試験体のひび割れ間隔の比を用いて,ECCの引張側のモデルを修正することとした。表4-4 に,無筋および有筋試験体の曲げ試験より得られたひび割れ間隔を示す。表に示した比を用いて,図4-15 に示すように引張強度時の歪 \mathfrak{a} をひび割れ間隔の比率を用いて増加させ, \mathfrak{a} 'とする。終局歪 \mathfrak{a} "は,図4-10 と同様に,修正した引張強度時の歪 \mathfrak{a} "の2倍とした。ECCの引張側のモデルを修正して解析した結果と実験結果を図4-16に示す。図より,実験値を解析値が表現できていると判断でき,ひび割れ間隔の比率を用いて,ECCの有筋試験体の曲げ性状を表現できることがわかる。



- 48 -

表4-4 鉄筋の有無によるひび割れ間隔の違いとその比率

無筋	断面寸法	ひび割れ	有筋	断面寸法	ひび割れ	ひび割れ間隔の比
試験体	(mm)	間隔(mm)	試験体	(mm)	間隔(mm)	無筋/有筋
B40-20	40×40	16.7	B40R1-20	40×40	4.0	4.1
B100-20	100×100	16.0	B100R1-20	100×100	6.0	2.6
			B100R2-20		5.6	2.9
B240-20	240×240	23.9	B240R2-20	240×240	6.0	4.0
B400-20	400×400	17.4	B400R2-20	400×400	10.0	1.7

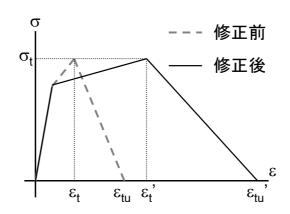


図4-15 ECC の引張側のモデルの修正方法

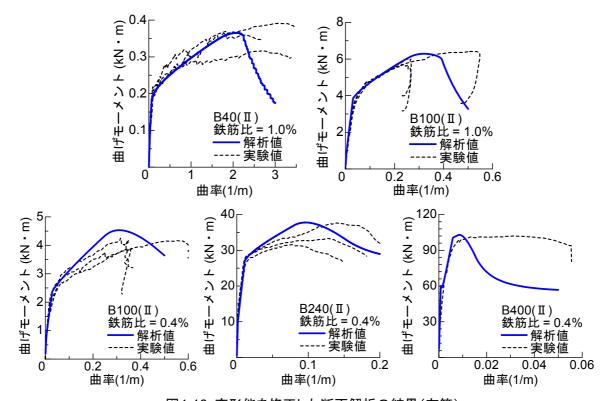


図4-16 変形能を修正した断面解析の結果(有筋)

第5章 結論

本研究は、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、繊維混入率および 断面寸法、また曲げ試験において鉄筋の有無を実験因子として曲げ試験ならびに一軸引張試験を 行い、ECC の引張性能を評価することを目的とした。以下に、本研究で得られた結論を述べる。

- (1) 無筋試験体の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、繊維混入率に関わらず大きく、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) B40 では、繊維混入率、鉄筋の有無に関わらず、断面寸法の違う他の試験体と異なる性 状を示す可能性があることを確認した。また、それが繊維の配向によって生じている可 能性をモンテカルロ法による繊維配向性に関する確率より示した。
- (3) 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把握できた。またその値は、変位計の計測値より算出したひび割れ幅と良い適合性を示した。
- (4) 無筋試験体の場合,最大曲げ応力の 2/3 程度の応力に到達するまでのひび割れ幅の最大値と最小値は, 0.1~0.15mm 程度であった。有筋試験体では,最大応力時においてもひび割れ幅は 0.1mm 程度であり,鉄筋を有することで ECC のひび割れ性状が変化することを確認した。
- (5) 評価体積による寸法効果の補正を行った,応力-歪関係を用いた断面解析を行うことで, 無筋試験体の曲げ試験結果を表現できた。また,有筋試験体の曲げ試験結果においても, 有筋試験体と無筋試験体のひび割れ間隔の比によって ECC の引張側の応力-歪関係モ デルを修正することで表現することができた。

今後の課題として、B40 の性状を正確に把握することが挙げられる。そのためには、試験体内の繊維の配向を把握する必要があり、それを明確にすることで寸法効果の影響の把握に繋がると考えられる。また、一軸引張試験における寸法効果を定量的に把握することも上げられ、曲げ性状との関係を明確にすることで、さらなる ECC の引張性状の把握ができ、設計への寄与ができる。

本論文は,筆者が筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科の大学院生として,在学中の2年間に行った研究の成果をまとめたものです。

この論文を作成するにあたり、多くの方々の御指導、御協力をいただきました。筑波大学准教授 金久保利之先生には、研究に着手する際から論文を校了するに至るまで、終始懇切丁寧な御指導、御鞭撻を賜りました。心より深謝の意を表します。

筑波大学准教授 境有紀先生,筑波大学准教授 庄司学先生には,論文を作成する上で,貴重な意見を頂きました。厚く感謝致します。

筑波大学助教 八十島章先生には、実験や研究を行う上で、親身に相談にのっていただきました。筑波大学技官 小島篤志氏には、実験時に試験体の設置や補助、特殊な冶具の製作等、多大なる便宜を図っていただきました。多謝の意を表します。

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) の助成を受けたものです。また試験体製作にあたり、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ました。御礼申し上げます。

本研究に関する一連の実験は、筑波大学 金久保研究室の多くの学生の協力の下に行われました。特に、浅野浩平君には、2年間に亘る実験に御尽力いただきました。厚く感謝致します。中山裕司君、保坂剛君、鬼塚由佳さんには、多くの時間を共有し合う中で切磋琢磨し合った仲間として心から感謝するとともに、これから先も変わらぬお付き合いして頂きたく思います。研究室の卒業生である福原哲夫氏、松永健太郎氏、大和伸行氏には、研究以外の学生生活においても頼れる先輩として様々な場面でご助力賜りました。また、後輩である麻生高行君、重水法弘君、田中慎治君、張偉君、池村清志君、矢野正剛君、岩見綾花さん、張軍雷君、方民航君は、共に過ごすことができ、とても有意義な研究室生活でした。皆様に、心より感謝申し上げます。

他の研究室ではありますが亀山裕樹君には、つくばでの2年間の生活において、数多く助けられたと感じており、大変感謝しております。本当に有難うございます。

最後に、私事で誠に恐縮でありますが、多くの苦労をかけた小生を応援し、支えて下さった両親、また愛すべき妹と弟に改めて深く感謝すると共に、今後の成長を見守っていただきたく存じます。

2010 年 1 月吉日 平野 雄大

参考文献

第1章

- 1-1) Li, V. C.: From Micromechanics to Structural Engineering, The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 10, No. 2, pp. 37-48, 1993
- 1-2) Li, V. C., Mohamed Maalej: Toughening in Cement Based Composites, Part II: Fiber Reinforced Cementitious Composites, Journal of Cement and Concrete Composites. Vol. 18, No. 4, pp. 239 - 249, 1996
- 1-3) 丸田 誠, 閑田徹志, 永井 覚, 山本幸正: プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構, コンクリート工学, Vol.43, No.11, pp.18-26, 2005.11
- 1-4) 関田徹志, Li, V.C.: 疑似ひずみ硬化性引張挙動を有する短繊維補強セメント複合材料の 設計ガイドラインーその 1 マイクロメカニクス理論に基づく初期ひび割れ強度の推定 法, 日本建築学会構造系論文集, No.539, pp.13~21, 2001.1
- 1-5) 佐藤幸博,福山洋,諏訪田晴彦:高靭性型セメント系複合材料の一軸引張-圧縮繰り返し試験方法の提案,日本建築学会構造系論文集,第539号,pp.7-12,2001.1
- 1-6) 古田昌弘,金久保利之:セメント系材料の材料実験に用いるくびれ型供試体の提案,日本建築学会大会学術講演梗概集,A材料施行,pp.101-102,2001.9
- 1-7) 清水克将,金久保利之,閑田徹志,永井 覚:HPFRCCの一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.25,pp.281-286,2003.7

第2章

- 2-1) 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
- 2-2) 清水克将:高靭性補強セメント複合材料の引張性能評価と部材の構造性能に関する研究, 筑波大学大学院博士論文,2007.3
- 2-3) 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

第4章

- 4-1) 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
- 4-2) Li, V. C., Wang, Y. and Backer, S.: Effect of Inclining Angle, Bundling, and Surface Treatment on Synthetic Fiber Pull-out from a Cement Matrix, Composites, Vol. 21, No.2, pp. 132-140, 1990.3
- 4-3) ユー・ア・ロザノフ:確率論・モンテカルロ法,総合科学出版,1976
- 4-4) 日本コンクリート協会:高靭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