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

DFRCC 梁部材の せん断性能評価に関する研究

並木 啓恭

修士(工学)

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保 利之

2020年 3月

DFRCC 梁部材のせん断性能評価に関する研究

論文概要

近年、建築構造物に対する要求は多様化、高度化しており、それに伴って RC 構造物に対して 要求される性能も高まってきている。また地球環境問題改善のための構造物の長寿命化、ライフ サイクルコストを見込んだ設計の重要性が、今後、更に高まっていくものと考えられる。高靭性 繊維補強セメント複合材料(DFRCC: Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites)は、曲げ 応力下において複数ひび割れ特性を示し、初期ひび割れ発生後に応力上昇するたわみ硬化性状を 発現する靭性の高い材料であり、このような社会的要求に対して非常に有用であるが、構造部材 への適用例は少ない。その要因として、部材実験のバックデータが不足しており、DFRCC の引 張性能が部材性能へ与える影響について未解明な点が多く、特長である引張性能が定量的な評価 に至っていないことが挙げられる。そのため、部材実験のバックデータを蓄積し、性能評価手法 を統一することは極めて重要である。

本論文では、DFRCC 梁部材のせん断応力下における構造性能を確認することを目的とし、繊維種類、繊維混入率および肋筋比を実験因子とした梁部材の曲げせん断実験を行い、既往の評価 方法を用いて、4 点曲げ試験の結果から DFRCC の引張強度を算出し、終局強度型指針式 A 法に DFRCC の引張寄与分を累加して梁のせん断耐力を算出した。

DFRCC 梁の曲げせん断実験では、繊維混入の影響により被りの剥落防止、ひび割れ抑制およびせん断耐力上昇の効果が確認できた。一部の試験体では、局所的な変形が起こり、せん断耐力が上昇せず、荷重が低下した。また、肋筋歪、局部変形およびひび割れ性状に着目し、DFRCC 梁部材のせん断応力下における構造性能を確認した。

既往の研究で提案されている評価方法により、DFRCCの4点曲げ試験の試験結果からDFRCCの引張強度を算出した。得られた引張強度を用いて終局強度型指針式A法に累加することで求まるせん断耐力計算値は実験結果とおおむね対応した。また、その評価方法では引張強度低減係数が提案されており、改めて本実験の実験結果から実験値と計算値が一致するように逆算し得られた係数数は、提案されている値と比較して小さくなった。

目次

第1章	序論	1
1.1	高靭性繊維補強セメント複合材料	1
1.2	繊維の種類と特性	3
1.3	研究目的	4
第2章	DFRCC 梁部材のせん断性能	5
2.1	はじめに	5
2.2	実験概要	6
2.2.1	試験体概要	6
2.2.2	使用材料	8
2.2.3	加力方法	10
2.2.4	計測方法	12
2.3	実験結果	15
2.3.1	破壊状況およびせん断力―部材角関係	15
2.3.2	鉄筋の歪	21
2.3.3	局部せん断変形	23
2.3.4	ひび割れ性状	25
2.4	まとめ	25
第3章	DFRCC の引張性能評価	
3.1	はじめに	
3.2	引張性能の評価方法	
3.3	DFRCC の曲げ試験	
3.3.1	実験概要	
3.3.2	実験結果	
3.4	DFRCC 梁のせん断耐力評価	
3.4.1	せん断耐力の評価方法	
3.4.2	最大耐力の比較	
3.5	まとめ	40
第4章	結論	41
謝辞		
参考文献	<u></u>	43

図表目次

表	1.2.1	繊維の特性
表	2.2.1	試験体一覧7
表	2.2.2	使用繊維の形状および力学特性8
表	2.2.3	DFRCC の調合計画
表	2.2.4	フレッシュ性状および圧縮試験結果9
表	2.2.5	鉄筋の材料特性9
表	2.3.1	実験結果一覧
表	3.3.1	曲げ試験試験結果一覧
表	3.4.1	せん断強度実験値と計算値の比較(μ=0.41)38
表	3.4.2	引張強度低減係数一覧
义	1.1.1	繊維補強セメント複合材料の分類2
义	2.2.1	試験体配筋図
义	2.2.2	断面詳細
义	2.2.3	加力時の様子10
义	2.2.4	大野式加力における曲げモーメント図10
义	2.2.5	加力治具11
义	2.2.6	加力治具の取付け方法11
义	2.2.7	全体変形用変位計設置位置
义	2.2.8	局部変形用変位計設置位置13
义	2.2.9	・ 金ゲージ貼付位置および名称
义	2.2.10	全体変形算出の概念図14
义	2.2.11	局部変形算出の概念図14
义	2.2.12	ひび割れ撮影箇所14
义	2.3.1	最終破壞状況16
义	2.3.2	せん断力—部材角関係18
义	2.3.3	肋筋歪—部材角関係21
义	2.3.4	せん断力—局部せん断変形関係23
义	2.3.5	ひび割れ幅算出方法
义	2.3.6	せん断力最大ひび割れ幅関係
义	2.3.7	最大荷重時のひび割れ状況
义	3.3.1	4 点曲げ試験の概要
义	3.3.2	曲げモーメント―曲率関係および最終破壊状況
义	3.4.1	最大せん断力/曲げ強度計算値—せん断余裕度関係(v=0.41)

第1章 序論

1.1 高靭性繊維補強セメント複合材料

コンクリートの引張強度は圧縮強度と比較して極めて小さく、引張応力下において非常に脆 性的な性質を示す。そのため鉄筋コンクリート(以下 RC)構造物では、圧縮力をコンクリートが 負担し、引張力は鉄筋が負担するとし、コンクリートの引張力は通常無視して設計されている。 RC 部材のせん断破壊は非常に脆性的であり、特に避けるべき破壊であるが、コンクリートの引 張破壊に起因することが多い。このようなコンクリートの引張性能の改善を目的として、長さ が数 mm~数+ mmの短繊維をモルタルやコンクリート等のセメント系材料に体積混入率数%混 入した繊維補強セメント複合材料(FRCC: Fiber-Reinforced Cementitious Composites)について古く から現在に至るまで研究が行われている。使用される繊維は鋼繊維やガラス繊維等の無機繊維、 ポリビニルアルコール(以下 PVA)繊維、ポリプロピレン(以下 PP)繊維、アラミド繊維等の合成繊 維等多岐にわたる。図 1.1.1 に繊維補強セメント複合材料の分類を示す¹⁾。それぞれの繊維は力 学特性やコスト、耐久性、耐腐食性等に特長があり、それらを生かし適用されてきている。

FRCC の引張性能をさらに向上させた材料として、高靭性繊維補強セメント複合材料 (DFRCC: Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites) がある²⁾。曲げ応力下において複数 ひび割れ特性を示し、初期ひび割れ発生後に応力上昇するたわみ硬化性状を発現する靭性の高 い材料である。DFRCCの適用は、構造物の損傷低減やひび割れ抑制だけでなく、軽量化や耐久 性の向上、複雑な構造形態を有する構造設計の実現等、従来の RC 構造物に対してより高い性 能や新たな種類の価値を付与できる可能性を有している¹⁾。

DFRCC の範疇に含まれる高性能セメント複合材料 HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites) は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材料であり、RC 造高層集合住宅にも適用例がある³⁾。しかしながら、DFRCC を構造部材に利用した例は少ない。DFRCC の Ductile は破壊靭性のみならず構造部材に適用された際の靭性・延性の向上を含んだ意味を持つ²⁾が、ひび割れ抑制効果やひび割れ発生後のコンクリートの剥落防止などに期待したものが多く、非構造部材への適用が主であるのが現状である¹⁾。その要因として、部材実験のバックデータが不足しており、DFRCC の引張性能が部材性能へ与える影響について未解明な点が多く、特長である引張性能が定量的な評価に至っていないことが挙げられる。



1.2 繊維の種類と特性

コンクリート・モルタル用補強繊維の特徴として引張弾性係数、引張強度が大きいことが挙げ られるが、マトリックスの補強を主目的とする場合、繊維径、繊維長およびマトリックスへの付 着性能も重要なファクターである。カットすることでコントロールできる繊維長と比較して、繊 維径は製造法に深く関係するためコントロールが難しい。一般的に、数µmから数+µm 程度が製 造しやすく、高強度の実現が可能である。また、繊維およびマトリックスの表面摩擦による抵抗 力だけでなく化学的な付着性能を示す繊維も存在するため、マトリックスへの付着性能は特に重 要である¹⁾。

現在、DFRCC として、PVA 繊維、高強度ポリエチレン繊維、鋼繊維、アラミド繊維等が用いられている研究開発が見られる。代表的なコンクリート、モルタル用補強繊維を表 1.2.1 に示す⁴⁾。

外井 外仁 千舌 中川	引張強度	引張弾性率	破断伸度	密度
祁 以下庄 个里 力!	(MPa)	(GPa)	(%)	(g/cm ³)
PVA 繊維	900~1600	23~41	6~13	1.30
ポリプロピレン繊維	60	5	25	0.91
超高分子量	2700	120	5	0.08
ポリエチレン繊維	2700	120	5	0.90
アラミド繊維	3000	100	4	1.40
炭素繊維	3500	250	~2	1.70
ガラス繊維	2200	80	~4	2.50
鋼繊維	1200	200	3~4	7~8

表 1.2.1 繊維の特性 4)

1.3 研究目的

近年、建築構造物に対する要求は多様化、高度化しておりそれに伴って RC 構造物に対して要 求される性能も高まってきている。また地球環境問題改善のための構造物の長寿命化、ライフサ イクルコストを見込んだ設計の重要性が、今後、更に高まっていくものと考えられる。このよう な社会的要求に対して、DFRCC の引張性能は非常に有用であり、構造部材に適用することで様々 な課題をクリアする可能性を有する。そのため部材実験のバックデータを蓄積し、性能評価手法 を統一することは極めて重要である。

本研究では、PVA 繊維とアラミド繊維を対象に DFRCC 梁部材のせん断応力下における構造性 能を確認することを目的とする。

第2章では、27µm径のPVA繊維、12µm径のアラミド繊維および既往の研究で広く用いられている100µm径のPVA繊維を対象としたDFRCC梁部材の曲げせん断実験を行い、DFRCC部材の構造性能を実験的に検討する。肋筋にはD4、D6を用い、一方向単調載荷による大野式逆対称曲げせん断加力を行った。

第3章では、第2章と同バッチのDFRCCを対象として4点曲げ試験を行い、既往の研究で用いられている引張性能評価方法を用いてDFRCCの引張強度を評価した。また、得られた引張強度を用いて梁部材のせん断耐力を評価し、第3章の実験結果との比較を行った。

第2章 DFRCC 梁部材のせん断性能

2.1 はじめに

DFRCC を耐震壁や境界梁等の高応力部材に適用しようとする研究は今までにも行われている が、DFRCC そのものの開発や実験にも時間を要するため、実験に用いられた繊維の種類は限ら れている。繊維種類に起因する DFRCC の特性の差異が部材性能に及ぼす影響に着目した研究は 少なく、特に DFRCC 部材のせん断抵抗に関するバックデータは不足しており、未解明な部分が 多い。バックデータを蓄積することで統一された評価方法が構築されれば、実部材への適用例も 増加すると考えられる。

本章では、逆対称曲げモーメント作用下の DFRCC 部材のせん断性能に着目して、繊維種類、 繊維径、繊維混入率および肋筋比を実験因子とした梁部材の曲げせん断実験を行い、せん断応力 下における DFRCC 梁部材の構造性能を確認する。

2.2 実験概要

2.2.1 試験体概要

試験体配筋および断面詳細を、それぞれ図 2.2.1 および図 2.2.2 に示す。表 2.2.1 試験体一覧 に試験体一覧を示す。断面は矩形断面で 160×220mm、せん断スパン比は 1.5 とした。せん断破 壊型とするため、主筋には SD490 を用いて、肋筋は試験区間外では 100mm ピッチで D6 を、試 験区間内では 120mm ピッチで D4、D6 の 2 種類を配筋した(D4 試験体の肋筋比: 0.15%、D6 試験 体の肋筋比: 0.33%)。パラメータは肋筋比、繊維種類および体積混入率とした。27µm 径の PVA 繊維およびアラミド繊維の使用時はワーカビリティを考慮し、繊維の体積混入率を 0.5%とした。 比較のため、繊維を混入していないモルタルのみの試験体も作製した。打設の際は、型枠を勾配 約 1/33 で傾斜させ、試験体の片側のみから流し込むこととした。なお、筆者による既往研究⁵⁾の 試験体も同一断面配筋試験体で、加力方法も同一であり、一部の試験体を本研究で実施した試験 体と同様に含めて報告、検討する。



			繊維		
試験体名	共通事項	せん断補強筋性	種類 径	体積混入率 V _f	
MT-D4*		D4, <i>p</i> _w =0.15%	-		
MT-D6		D6, <i>p</i> _w =0.33%	(モルタル)	-	
REC100-10-D4*	断面:160×220 mm せん断スパン比:1.5 主筋:3-D16(SD490) <i>p</i> _ℓ =2.01% 肋筋:120mm ピッチ (SD295)	D4, <i>p</i> _w =0.15%		1.09/	
REC100-10-D6		D6, <i>p</i> _w =0.33%	PVA	1.0%	
REC100-20-D4*		D4, <i>p</i> _w =0.15%	100µm	2.0%	
REC100-20-D6		D6, <i>p</i> _w =0.33%		2.0%	
RMS702-05-D4		D4, <i>p</i> _w =0.15%	PVA	0.5%	
RMS702-05-D6		D6, <i>p</i> _w =0.33%	27µm	0.5%	
T320-05-D4		D4, <i>p</i> _w =0.15%	アラミド	0.5%	
T320-05-D6		D6, <i>p</i> _w =0.33%	12µm	0.5%	

表 2.2.1 試験体一覧

*文献 ⁵⁾の試験体(MT-D4 が No.1、REC100-10-D4 が No.2、REC100-20-D4 が No.3 に対応)

2.2.2 使用材料

使用した繊維の形状および力学特性を表 2.2.2 に示す。DFRCC の調合計画を表 2.2.3 に、フレ ッシュ性状および (100-200mm シリンダーによる圧縮試験結果を表 2.2.4 に、使用した鉄筋の引張 試験結果を表 2.2.5 に示す。降伏強度および弾性係数は鉄筋の引張試験より得られた値であり、 D4 および D6 は 0.2% オフセット耐力を降伏強度とした。降伏歪は降伏強度を弾性係数で除すこ とで算出した。

繊維名称	REC100	RMS702	T320					
	PVA 繊維	PVA 繊維	アラミド繊維					
繊維種類	A A A A A A A A A A A A A A A A A A A		- A A A A A A A A A A A A A A A A A A A					
繊維径(μm)	100	27	12					
繊維長(mm)	12	6	12					
引張強度(MPa)	1200	1800	3300					
弾性係数(GPa)	28	45	72					

表 2.2.2 使用繊維の形状および力学特性

表 2.2.3 DFRCC の調合計画

		単位量(kg/m ³)							
武騻1本名 	繊維	水	セメント	7号珪砂	フライアッシュ	高性能減水剤	増粘剤		
MT-D4									
MT-D6	-								
REC100-10-D4	10								
REC100-10-D6	13		678	484	291	6	2		
REC100-20-D4	20 20	26 380							
REC100-20-D6	20								
RMS702-05-D4	0.5								
RMS702-05-D6	0.5								
T320-05-D4	7.0								
T320-05-D6									

及 2.2.4 グレブグエ 住代のる の上相码映相未						
计除休夕	練り上がり温度	空気量	圧縮強度	弾性係数		
武殿体石	(°C)	(%)	(MPa)	(GPa)		
MT-D4	14.2	0.85	47.2	16.3		
MT-D6	15.2	0.91	43.0	15.1		
REC100-10-D4	17.0	3.6	45.3	16.8		
REC100-10-D6	25.1	2.0	49.1	16.6		
REC100-20-D4	17.4	2.5	43.1	15.7		
REC100-20-D6	25.7	2.3	50.6	15.7		
RMS702-05-D4	17.2	3.3	48.8	16.7		
RMS702-05-D6	26.9	3.5	51.9	17.1		
T320-05-D4	25.9	6.1	47.3	16.3		
T320-05-D6	26.5	5.5	48.1	16.6		

表 2.2.4 フレッシュ性状および圧縮試験結果

表 2.2.5 鉄筋の材料特性

呼び名	鋼種	使用箇所	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏歪
D16	SD490	主筋	520	195	2667
D6	SD205	205 助族	393 [*]	204	1926
D4	30295	לא ווא	380*	183	2077

*0.2%オフセット耐力

2.2.3 加力方法

加力時の様子を図 2.2.3 に示す。大野式逆対称曲げせん断加力を採用し、2MN ユニバーサル試 験機を用い、試験機に加力梁を取り付け、変位を制御しながら、一方向単調加力を行った。大野 式加力における曲げモーメント分布図を図 2.2.4 に示す。試験区間外では、図 2.2.5 に示す加力治 具を図 2.2.6 のように試験体を挟み込み固定している。

試験体に作用するせん断力 Q は試験機による荷重 P を用いて次式により与えられる。

$$Q = \frac{450}{1310} P = 0.344 P$$

(2.2.1)



図 2.2.3 加力時の様子



(単位:mm)

図 2.2.4 大野式加力における曲げモーメント図





図 2.2.6 加力治具の取付け方法

2.2.4 計測方法

計測項目は、試験機による荷重、全体変形、局部変形および主筋、肋筋歪である。全体変形用 変位計設置位置を図 2.2.7 に、局部変形用変位計設置位置を図 2.2.8 に示す。また、主筋および肋 筋の歪ゲージの貼付位置および名称を図 2.2.9 に示す。

全体変形は、図 2.2.10 に示すように、試験体側面に試験体全長に渡って通したアングルを支点 位置で固定し、加力点位置に変位計を取り付け、梁両端部の加力冶具で挟まれた区間を剛体と仮 定し、変位計より得られた計測値からその区間の回転角を算出し、両端部の相対たわみとして次 式より求める。

$$\theta_1 = \mathsf{D}1/L_1 \tag{2.2.2}$$

$$\theta_2 = \mathsf{D}2/L_1 \tag{2.2.3}$$

$$\delta_1 = \theta_1 \times \left(L_1 + L_2 / 2 \right) \tag{2.2.4}$$

$$\delta_2 = \theta_2 \times L_2/2 \tag{2.2.5}$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \tag{2.2.6}$$

また部材角 R は

$$R = \delta / L_2 \tag{2.2.7}$$

で与えられる。

局部変形は、図 2.2.11 に示すように、各区間の標点距離および変形測定位置を、それぞれ L_1 =130mm、 L_2 =220mm および δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 、 δ_2 とし、曲げ変形、軸方向変形およびせん断変形を 算出した。

$$\delta_1 = -\frac{L_1}{2} \cdot L_2 \phi + L_2 \varepsilon_2 \tag{2.2.8}$$

$$\delta_2 = \mathcal{L}_{\mathsf{I}} \mathcal{E}_{\mathsf{I}} \tag{2.2.9}$$

$$\delta_3 = \frac{L_1}{2} \cdot L_2 \phi + L_2 \varepsilon_2 \tag{2.2.10}$$

$$\delta_4 = \mathcal{L}_1 \mathcal{E}_1 \tag{2.2.11}$$

$$\delta_5 = L_1 \varepsilon_1 \sin \alpha + L_2 \varepsilon_2 \cos \alpha + L_2 \gamma \sin \alpha \tag{2.2.12}$$

ただし、
$$\alpha = \arctan \frac{L_2}{L_1}$$
 (2.2.13)

(2.2.9)、(2.2.11)式、(2.2.8)、(2.2.10)式より、平均歪は、

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta_2 + \delta_4}{2L_1}, \qquad \varepsilon_2 = \frac{\delta_1 + \delta_3}{2L_2}$$
(2.2.14)

(2.2.12)式より、せん断歪パは、

$$\gamma = \frac{1}{L_2 \sin \alpha} \left(\delta_5 - L_1 \varepsilon_2 \sin \alpha - L_2 \varepsilon_2 \cos \alpha \right)$$
$$= \frac{1}{L_2 \sin \alpha} \left(\delta_5 - \frac{\delta_2 + \delta_4}{2} \sin \alpha - \frac{\delta_1 + \delta_3}{2} \cos \alpha \right)$$
(2.2.15)

で与えられる。

せん断歪yを用いて、各区間の軸直交方向のせん断変形 Layを求める。



(単位:mm)

図 2.2.7 全体変形用変位計設置位置



(単位:mm)

図 2.2.8 局部変形用変位計設置位置



図 2.2.9 歪ゲージ貼付位置および名称



(単位:mm)

図 2.2.10 全体変形算出の概念図



ひび割れ性状を確認するため、既往の研究 ⁶を参考に図 2.2.12 に示す試験区間中の 2 領域にお いて、2 台の定点カメラを用いて、ひび割れ観測面を 10 秒毎で撮影した。撮影する 2 領域には、 予め 10×10mm のメッシュを 120×80mm 領域に書き入れており、1pixel が 0.02mm に相当す る。



(単位:mm)

図 2.2.12 ひび割れ撮影箇所

2.3 実験結果

2.3.1 破壊状況およびせん断力—部材角関係

各試験体の最終破壊状況を図 2.3.2 に示す。なお、ひび割れは加力後にペンでトレースした。 すべての試験体で端部に曲げひび割れが生じた後、中央部にせん断ひび割れが生じ、最大荷重を 迎えた。MT-D4 および MT-D6 では、せん断ひび割れが一気に開口した後、直ちに肋筋が降伏し、 最大荷重を迎えた。最大荷重後は、被りの剥落が見られた。PVA 繊維を用いた 6 試験体において は、いずれの試験体も全体に微細なひび割れが生じた後、徐々にひび割れが局所化していき最大 荷重を迎えた。特に、REC100-20-D4 および REC100-20-D6 では、全体に無数の微細なひび割れが 生じ、ひび割れの分散性やひび割れ幅の抑制される様子が目視で確認できた。また、T320-05-D4 および T320-05-D6 では、全体に微細なひび割れが広がり、急激にひび割れが局所化し、直ちに最 大荷重を迎えた。



(a) MT-D4



(b) MT-D6



(c) REC100-10-D4 図 2.3.1 最終破壊状況



(e) REC100-20-D4



(f) REC100-20-D6

(g) RMS702-05-D4



(h) RMS702-05-D6 図 2.3.2 最終破壊状況(続き)



(i) T320-05-D4



(j) T320-05-D6 図 2.3.2 最終破壊状況(続き)

繊維種類および繊維混入率が同一の試験体ごとのせん断力一部材角関係を図 2.3.3 に、肋筋降 伏時および最大荷重時の部材角、せん断力を表 2.3.1 に示す。図 2.3.3 の各グラフには DFRCC 試 験体を 2 体(肋筋に D4 および D6 を用いた試験体)、比較のための MT-D4 および MT-D6、計4 体 の実験結果を掲載する。

(a) REC100-10

部材角 0.005rad 以下の領域において REC100-10-D4 および REC100-10-D6 は MT-D4 および MT-D6 と比較して勾配が大きい。しかし、部材角約 0.01rad 時、REC100-10-D4 の勾配が小さくな り、MT-D4 と同等の耐力となった。REC100-10-D6 は部材角約 0.016rad 時まで荷重が上昇し、MT-D6 と比較して、繊維混入の影響により、約 20kN の耐力上昇が見られた。REC100-10-D6 では、部材 角 0.017rad 時、急激な荷重低下が見られた。REC100-10-D4 では、最大荷重を迎えた後、おおむ ね緩やかに荷重が低下した。

(b) REC100-20

同一部材角で比較すると、加力開始から最大荷重を迎える直前まで REC100-20-D4 および REC100-20-D6 は MT-D4 および MT-D6 よりせん断力が大きい。REC100-20-D4 と MT-D4、 REC100-20-D6 と MT-D6 の最大せん断力の差は約 30kN で同等であった。REC100-20-D4 および REC100-20-D6 では、最大荷重後、緩やかに荷重低下した。

(c) RMS702-05

0.01rad 以下の領域における RMS702-05-D4 の勾配は、他の 3 試験体と比較して大きい。 RMS702-05-D4 では MT-D4 と比較して最大せん断力が約 25kN 上昇しているが、RMS702-05-D6 では MT-D6 と比較して最大せん断力は同程度である。RMS702-05-D4 では最大せん断力を迎えた 後、せん断力は急激に低下したが、RMS702-05-D6 ではせん断力は緩やかに低下した。

(d) T320-05

同一部材角で比較すると、加力開始から最大荷重まで T320-05-D4 および T320-05-D6 は MT-D4

および MT-D6 よりせん断力が大きい。T320-05-D4 と MT-D4、T320-05-D6 と MT-D6 の最大せん 断力の差は約 35kN で同等であった。T320-05-D4 および T320-05-D6 では、最大荷重を迎えた後、 急激に荷重が低下した。





	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						
	肋筋	降伏時	最大	荷重時			
	せん断力	部材角	せん断力	部材角			
	(KN)	(×10 ⁻ °rad)	(KN)	(×10 ^{-s} rad)			
MT-D4	30.04	2.37	76.13	12.2			
MT-D6	68.98	7.47	97.65	13.0			
REC100-10-D4	51.90	4.04	75.10	11.1			
REC100-10-D6	77.47*	7.71*	119.3	16.0			
REC100-20-D4	55.82	4.95	110.9	17.0			
REC100-20-D6	90.71	9.11	131.2	21.3			
RMS702-05-D4	51.46	4.04	102.8	14.9			
RMS702-05-D6	84.02	10.2	96.9	15.2			
T320-05-D4	79.55	8.23	113.7	13.6			
T320-05-D6	123.5	12.6	134.4	14.4			

表 2.3.1 実験結果一覧

*歪ゲージ不良のため s4 肋筋歪計測不能

2.3.2 鉄筋の歪

最大荷重を迎えるまでの肋筋歪と部材角の関係を図 2.3.4 に示す。なお、REC100-10-D6 では、 S4 が歪ゲージの不良により、測定できなかった。部材角 0.005rad 時、MT-D4、REC100-10-D4、 REC100-20-D4 および RMS702-05-D4 において肋筋が降伏しており、部材角 0.01rad 時には、 RMS702-05-D4 および T320-05-D6 以外のすべての試験体の肋筋に降伏が見られた。D4 鉄筋を用 いた試験体では、部材角が 0.01rad 以下の領域で 1 本ずつ順に降伏し、最大荷重時には、MT-D4 の S3 以外のすべての肋筋が降伏した。D6 鉄筋を用いた試験体では、5 本の肋筋の歪が一様に上 昇し、複数本の肋筋の降伏または急激な歪上昇に伴い、荷重が低下した。MT-D4 および MT-D6 では、試験体中央部の S3 は降伏せず、試験区間端の肋筋の降伏に伴い、荷重が低下した。他の 試験体では、S3 は降伏し、REC100 および RMS702 を用いた試験体では、試験区間内のすべての 肋筋が降伏した。これは繊維混入の影響により試験区間端の肋筋が降伏してからも荷重が上昇し たためと考えられる。また、T320-05-D6 では、最大荷重時点で降伏していない肋筋が複数みられ た。これは繊維混入の影響により、肋筋歪が抑制されたためと考えられる。



なお、主筋については、いずれの試験体においても降伏はみられなかった。





2.3.3 局部せん断変形

最大荷重を迎えるまでのせん断力と局部せん断変形の関係を図 2.3.5 に示す。MT-D4、MT-D6、 REC100-10-D4 および REC100-20-D4 では、最大荷重を迎える直前まで、各区間における変形の差 異は少ない。REC100-10-D4 および RMS702-05-D6 では、最大荷重を迎える直前に、区間1、区間 2 の変形が急激に増大し、最大荷重を迎えた。REC100-20-D4 および REC100-20-D6 では、せん断 力が 50kN を超えてから、区間 2 の変形が増大しているが、区間1 と区間 3 の変形の差は少ない。 RMS702-05-D4 では、区間1、区間2 の変形が増大し、その後、さらに区間 2 に変形が集中した。 T320-05-D4 および T320-05-D6 では、一様に変形が進んだ後、それぞれせん断力が約 75kN、90kN を超えた後、区間 2 の変形が増大した。REC100-10-D4、T320-05-D4 および T320-05-D6 の最大荷 重時の区間 2 の変形は、MT-D4 および MT-D6 と同等であったが、他の DFRCC 試験体は、MT-D4 および MT-D6 の約 1.5 倍であった。





2.3.4 ひび割れ性状

実験において発生したせん断ひび割れのひび割れ幅の算出方法を図 2.3.6 に示す。ひび割れと メッシュの交点間の距離である主歪方向の変位をひび割れ幅とした。ひび割れとメッシュの交点 間の距離を pixel 単位で計測し、隣り合うメッシュ間の距離(10mm)に対応する pixel 数との比率よ り算出した。撮影区間内で、最も大きく開口したひび割れの幅を最大ひび割れ幅と定義した。繊 維種類および繊維混入率が同一の試験体ごとの最大荷重を迎えるまでのせん断力と最大ひび割れ 幅の関係を図 2.3.7 に示す。また、最大荷重時に、最大となったひび割れ幅を含む領域の写真を 図 2.3.8 に示す。なお、T320-05-D6 では、最大荷重時を迎えた直後、大きく開口したひび割れが あったため、図 2.3.7 には、開口後のデータもプロットし、図 2.3.8 には、開口後の写真を掲載し た。

図 2.3.7 より DFRCC 試験体とモルタル試験体を比較すると、繊維混入の影響によりひび割れ 幅が抑制されていることが分かる。REC100 試験体ではモルタル試験体と比較して、最大荷重時 のひび割れ幅が小さく、ひび割れが大きく開口する前に最大荷重を迎えた。RMS702 試験体では モルタル試験体と比較して、最大荷重時のひび割れ幅が大きく、ひび割れが大きく開口するまで 荷重が上昇した。T320 試験体では、最大荷重を迎える直前まで、ひび割れ幅は微小であり、最大 荷重を迎えると同時に、急激にひび割れが開口した。REC100 および RMS702 を用いた試験体で は、同一の肋筋を用いたモルタル試験体と勾配が概ね一致した。RMS702-05-D6 では、せん断力 が 90kN を超えた時点で、ひび割れが大きく開口し、勾配が急激に小さくなった。

図 2.3.8 より、REC100 試験体では、他の DFRCC 試験体と比較し、微細なひび割れが撮影区間 全体に広がっていることが分かる。



図 2.3.6 ひび割れ幅算出方法









*ひび割れ開口後の写真



2.4 まとめ

本章では、DFRCCを用いた梁の曲げせん断実験を行い、せん断応力下における DFRCC 梁部材の構造性能を確認した。以下に本実験で得られた結果を示す。

- 1) 繊維混入の影響により、被りの剥落防止およびひび割れ抑制効果が確認できた。
- 2) REC100 および RMS702 を用いた試験体では、すべての肋筋が降伏したが、T320 試験体では、 一部の肋筋が降伏する前に荷重が低下した。
- 3) REC100-10-D4 および RMS702-05-D6 では、一方の梁端の区間1および中央部の区間2の局部 変形が増大し、荷重が低下した。
- 4) モルタル試験体と比較して、REC100 試験体では最大荷重時のひび割れ幅が小さく、RMS702 試験体では最大荷重時のひび割れ幅が大きい。また、T320 試験体では、最大荷重を迎える直前までひび割れは微細であり、最大荷重を迎えると同時にひび割れが急激に開口した。
- 5) REC100-10-D4および RMS702-05-D6以外の DFRCC 試験体では、モルタル試験体と比較して、 耐力が上昇したが、REC100-10-D4 および RMS702-05-D6 では、変形の急激な局所化の影響に より、耐力は上昇しなかった。

第3章 DFRCC の引張性能評価

3.1 はじめに

現在までに、一軸引張試験により直接的に DFRCC の引張性能を評価する方法は数々検討され ている。しかし、一軸引張試験は特殊な型枠、治具を必要とするため実施が困難である。そのた め、日常的に確認試験を行う必要がある実際の工事案件への適用は難しい。また、このような要 因は、DFRCC が広く利用されることの足かせとなってしまうと考えられる。

既往の研究ⁿでは、試験体作製および加力が容易である100×100×400mm 試験体の4点曲げ試験の結果から引張強度を算出し、一軸引張応力下において微細で高密度の複数ひび割れを生じさせながら、最大引張歪が8%に達するという極めて高靭性な材料である ECC(Engineered Cementitious Composite)を用いた曲げせん断実験の結果より逆算した係数を用いて、せん断耐力の評価を行っている。

本章ではその評価方法を説明し、本研究で対象としている DFRCC の 4 点曲げ試験を行い、 DFRCC の引張強度を算出する。さらに得られた引張強度を用いて、せん断耐力を算出し、第 2 章の実験結果を検討する。

3.2 引張性能の評価方法

既往の研究ⁿでは、試験体作製および加力が容易である 100×100×400mm 試験体の 4 点曲げ試 験の結果から DFRCC の引張強度を算出する方法を提案している。曲げ応力下の最大モーメント 時の断面内歪分布および応力分布を、曲率、圧縮縁から中立軸までの距離および引張終局歪を用 いて図 3.2.1 のように仮定している。平面保持仮定の下で、圧縮側応力を直線分布、引張側応力を 引張強度の一様分布とし、引張縁が終局歪に達し、圧縮縁では圧縮強度に達していない状態を仮 定している。

力とモーメントのつり合いから、引張終局歪 ε_{u} と引張強度 σ_{max} が次式により求められる。

$$\varepsilon_{\mu} = \phi_{\mu} \cdot \left(D - x_{n} \right) \tag{3.2.5}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{E \cdot \phi_u \cdot x_n^2}{2(D - x_n)}$$
(3.2.6)

ここで、

$$x_n = D \cdot \left(-1 + 2\cos\frac{\theta}{3} \right) \tag{3.2.3}$$

$$\theta = \arccos\left(-1 + 6\frac{M_{\max}}{b \cdot E \cdot \phi_u \cdot D^3}\right)$$
(3.2.4)

E:弾性係数、 $\phi_u:$ 最大モーメント時の曲率、 $\sigma_{max}:$ 引張強度、D:試験体全せい、 b:試験体幅、 $M_{max}:$ 最大モーメント



引張縁 図 3.2.1 最大モーメント時の断面応力分布の仮定⁷⁾

3.3 DFRCC の曲げ試験

3.3.1 実験概要

本研究で対象としている DFRCC の 4 点曲げ試験を行い、前節の評価方法を用いて、DFRCC の引張強度を算出する。4 点曲げ試験の概要を図 3.3.1 に示す。試験区間は試験体中央の純曲げ区 間とする。試験体作製には第2章の試験体と同バッチの DFRCC を使用し、3 体ずつを計24 体作 製した。打設の際は、第2章同様、型枠を勾配約1/33 で傾斜させ、試験体の片側のみから流し込 むこととした。計測項目は、荷重、圧縮側および引張側変形である。曲げモーメントおよび曲率 は次式で算出する。

$$M = \frac{P}{2} \times 100 \tag{3.3.1}$$

$$\phi = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{70} \tag{3.3.2}$$

ここで、M:曲げモーメント、P:荷重、 ϕ :曲率、 ϵ_1 :圧縮側変形、 ϵ_2 :引張側変形



図 3.3.1 4 点曲げ試験の概要

3.3.2 実験結果

曲げ試験結果一覧を表 3.3.1 に、曲げモーメント―曲率関係および最終破壊状況を図 3.3.2 に示 す。なお、第2章における DFRCC 試験体それぞれと同バッチの試験体 3 体ずつ順に No.1~No.24 と称する。また、3 体の中の代表的な試験体 1 体の試験結果を図 3.3.2 に掲載した。また、No.6、 10、13、14、15、16、21 は試験区間外にひび割れが発生したため、最大荷重時の曲率が測定でき なかった。また、No.23、24 では試験機の不良により荷重が測定できず、曲げモーメントが得ら れなかった。

繊維径の大きい REC100 試験体では、繊維径の小さい RMS702 および T320 を用いた試験体と 比較し、最大モーメント時曲率が大きかった。REC100 を体積混入率 2.0%で用いた試験体の最大 モーメントは、体積混入率 1.0%で用いた試験体の約 1.7 倍であった。

試験体名称 (繊維種類と繊維混入率)		最大モーメ ント時曲率 (1/m)	最大 モーメント (kNm)	終局歪 (%)	引張 強度 (MPa)	引張強度 の平均値 (MPa)
	No.1	0.172	0.562	1.58	1.18	
REC100-10-D4	No.2	0.093	0.528	0.82	1.16	1.05
	No.3	0.066	0.413	0.66	0.82	
	No.4	0.172	0.553	1.58	1.16	
REC100-10-D6	No.5	0.106	0.481	0.96	1.02	1.07
	No.6	0.091	0.485	0.81	1.03	
	No.7	0.162	0.869	1.44	1.88	
REC100-20-D4	No.8	0.088	0.866	0.74	1.93	1.90
	No.9*	-	0.737	-	-	
	No.10*	-	0.882	-	-	
REC100-20-D6	No.11	0.259	0.872	2.37	1.83	1.84
	No.12	0.280	0.882	2.57	1.84	
	No.13*	-	0.590	-	-	
RMS702-05-D4	No.14*	-	0.543	-	-	-
	No.15*	-	0.470	-	-	
	No.16*	-	0.464	-	-	
RMS702-05-D6	No.17	0.004	0.402	0.02	1.32	1.24
	No.18	0.006	0.404	0.04	1.15	
T320-05-D4	No.19	0.114	0.419	1.04	0.91	
	No.20	0.011	0.607	0.07	1.70	1.31
	No.21*	-	0.606	-	-	
	No.22	0.038	0.797	0.30	1.90	
T320-05-D6	No.23**	0.048	-	0.44	-	1.90
	No.24**	0.035	-	0.32	-	

表 3.3.1 曲げ試験結果一覧

*No.9、10、13、14、15、16、21 は試験区間外にひび割れが発生したため曲率測定不可 **試験機不良により荷重計測不可







3.4 DFRCC 梁のせん断耐力評価

3.4.1 せん断耐力の評価方法

前節で得られた引張強度を用いて、第2章の梁試験体のせん断耐力を、既往の研究⁷に基づいて、以下に示す建築学会終局強度型指針式A法⁸(以下、A法)にDFRCCの引張寄与分を累加して求める。

$$V = V_t + V_a \tag{3.4.1}$$

$$V_t = \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{j}_t \cdot \boldsymbol{\rho}_w \cdot \boldsymbol{\sigma}_{wv} \cdot \cot \theta \tag{3.4.2}$$

$$V_{a} = \tan\theta \cdot (1 - \beta) \cdot \nu \cdot \sigma_{B} \cdot b \cdot D/2$$
(3.4.3)

$$\tan \theta = \sqrt{\left(L/D\right)^2 + 1} - \left(L/D\right) \tag{3.4.4}$$

$$\beta = \left(1 + \cot^2 \phi\right) \cdot \rho_{w} \cdot \sigma_{wy} / v \cdot \sigma_{B}$$
(3.4.5)

$$\cot \theta = \min \begin{pmatrix} 2.0, \frac{j_t}{(D \cdot \tan \theta)}, \\ \sqrt{\nu \cdot \sigma_B / (\rho_w \cdot \sigma_{wy}) - 1} \end{pmatrix}$$
(3.4.6)

$$V_{DFRCC} = b \cdot j_t \cdot v_t \cdot \sigma_t \cdot \cot \theta \tag{3.4.7}$$

ここで、V: せん断耐力、 V_t : トラス機構の負担するせん断力、 V_a : アーチ機構の負担するせん 断力、 b: 部材幅、 j_t : 主筋中心間距離、 p_w : せん断補強筋比、 σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度、 σ_B : コンクリートの圧縮強度、 ϕ : 圧縮束の材軸に対する角度、 θ : アーチ機構の材軸に対する角 度、v: コンクリートの圧縮強度の有効係数、D: 部材せい、L: 内法スパン、 V_{DFRCC} : FRCC の負 担するせん断力、 v_t : 引張強度低減係数、 σ_t : 3.3.2 節で得られた引張強度

コンクリートの圧縮強度の有効係数uは以下の式で求める。

$$\nu = 1.70\sigma_{B}^{-0.333} \tag{3.4.8}$$

また、曲げ強度を、既往の研究⁹において提案された繊維負担分を加味した曲げ強度略算式により算出する。

$$Q_{mu,F} = 0.9 \left(\sum a_t \sigma_y d + \frac{bD^2}{2} \sigma_t \right) / (L/2)$$
(3.4.9)

ここで、 $Q_{mu,F}$:繊維負担分を加味した曲げ強度、 a_t :引張鉄筋断面積、 σ_y :引張鉄筋の降伏強度、d:有効せい、b:部材幅、D:部材せい、L:内法スパン、 σ_t : 3.3.2 節で得られた引張強度

3.4.2 最大耐力の比較

既往の研究[¬]では、引張強度低減係数 v=0.41 が提案されている。引張強度低減係数 v=0.41 を用 いたせん断耐力計算値と最大せん断力実験値の比較を表 3.4.1 および図 3.4.1 に示す。図 3.4.1 で は、最大せん断力実験値とせん断耐力計算値を、(3.4.9)式で得られた曲げ強度計算値で除して(横 軸は、すなわちせん断余裕度)表している。なお、RMS702-05-D4 では、曲げ試験において作製 したすべての試験体に区間外ひび割れが生じたため、同一の配合である RMS702-05-D6 の引張強 度を用いてせん断耐力を計算した。

表 3.4.1 より、繊維の混入による耐力上昇がみられなかった REC100-10-D4 および RMS702-05-D6 では、計算値が実験値を大幅に過大評価した。他の試験体では、実験値と計算値 が同等であったが、D6 を用いた試験体では、D4 と比較してせん断耐力を過大評価する傾向にあった。

=+ ₽~ /+	引張強度	せん断強度(kN)		
言八 <i>局</i> 央1 个	(kN)	実験値	計算値	
MT-D4	-	76.1	82.3	
MT-D6	-	97.7	103.4	
REC100-10-D4	1.05	75.1	101.2	
REC100-10-D6	1.07	119.3	130.0	
REC100-20-D4	1.90	110.9	115.9	
REC100-20-D6	1.84	131.2	146.4	
RMS702-05-D4	(1.24)	102.8	(108.1)	
RMS702-05-D6	1.24	96.9	135.8	
T320-05-D4	1.31	113.7	108.1	
T320-05-D6	1.90	134.4	145.4	

表 3.4.1 せん断強度実験値と計算値の比較(μ=0.41)



図 3.4.1 最大せん断力/曲げ強度計算値—せん断余裕度関係(ル=0.41)

本実験の結果より、実験値と計算値が一致するように逆算した引張強度低減係数一覧を表 3.4.2 に示す。繊維混入の影響によるせん断耐力の上昇がみられなかった REC100-10-D4 および RMS702-05-D6 以外の試験体で平均すると、引張強度低減係数 v=0.32 が得られ、既往の研究 ⁷で ECC を用いた実験結果から得られた v=0.41 と比較して小さい。

試験体	引張強度低減係数 ^μ
REC100-10-D6	0.20
REC100-20-D4	0.36
REC100-20-D6	0.24
RMS702-05-D4	0.32
T320-05-D4	0.50
T320-05-D6	0.29
平均	0.32

表 3.4.2 実験結果より算定した引張強度低減係数一覧

3.5 まとめ

本章では、DFRCC の 4 点曲げ試験を行い、その結果より得られた引張強度を用いて、曲げ試験と同バッチの DFRCC を用いた第2章の試験体のせん断耐力を算出し、実験結果と比較した。 以下に本章で得られた結果を示す。

- 4 点曲げ試験において、繊維径の大きい REC100 試験体は、繊維径の小さい RMS702 および T320 試験体と比較して、最大モーメント時の曲率が大きかった。また、繊維混入率 2.0%の REC100 試験体の最大モーメントは、混入率 1.0%試験体の約 1.7 倍であった。
- 2) 繊維混入の影響によるせん断耐力の上昇が見られなかった REC100-10-D4 および RMS702-05-D6 以外の試験体では、既往の提案方法による計算値でせん断耐力をおおむね評価 できた。
- 3) D6 を用いた試験体では、D4 と比較してせん断耐力を過大評価する傾向にあった。
- 4) 本実験の実験結果より逆算した引張強度低減係数は、既往研究の結果と比較して小さかった。

第4章 結論

本研究では、PVA 繊維とアラミド繊維を対象に DFRCC 梁部材のせん断応力下における構造性 能を確認することを目的として、繊維種類、繊維径、繊維混入率および肋筋比を実験因子とした 梁部材の曲げせん断実験を行った。さらに、4 点曲げ試験により引張強度およびせん断耐力を算 出し、実験結果を検討した。

DFRCC 梁の曲げせん断実験では、すべての DFRCC 試験体において、繊維混入の影響により被 りの剥落防止およびひび割れ抑制効果が確認できた。REC100-10-D4 および RMS702-05-D6 以外 の試験体では、モルタル試験体と比較して、せん断耐力の上昇がみられた。REC100-10-D4 およ び RMS702-05-D6 では、一方の梁端の区間 1 および中央部の区間 2 の局部変形が増大したことに より荷重が低下し、せん断耐力の上昇がみられなかった。肋筋歪に着目すると、D4 鉄筋を用いた 試験体では、部材角が 0.01rad 以下の領域で 1 本ずつ順に降伏し、最大荷重時には、MT-D4 の S3 以外のすべての肋筋が降伏した。D6 鉄筋を用いた試験体では、5 本の肋筋の歪が一様に上昇し、 複数本の肋筋の降伏または急激な歪上昇に伴い、荷重が低下した。また、REC100 および RMS702 試験体では、最大荷重時点ですべての肋筋の降伏がみられたが、T320 試験体では、一部の肋筋が 降伏する前に荷重が低下した。ひび割れ性状に着目すると、モルタル試験体と比較して、REC100 試験体では最大荷重時のひび割れ幅が小さく、RMS702 試験体では最大荷重時のひび割れ幅が大 きくなった。また、T320 試験体では、最大荷重を迎える直前までひび割れは微細であり、最大荷 重を迎えると同時にひび割れが急激に開口した。

DFRCC の4点曲げ試験では、繊維径の大きい REC100試験体は、繊維径の小さい RMS702 お よび T320試験体と比較して、最大モーメント時の曲率が大きくなった。また、繊維混入率 2.0% の REC100試験体の最大モーメントは、混入率 1.0%試験体の約 1.7 倍であった。また、既往の研 究で提案されている DFRCC 梁のせん断耐力評価方法により、繊維混入の影響によるせん断耐力 の上昇が見られなかった試験体以外のせん断耐力を評価できた。また、本実験の実験結果より実 験値と計算値が一致するように逆算した引張強度低減係数は、既往の研究で提案されている値と 比較して、小さくなった。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々のご指導、ご協力をいただきました。指導教員であり ます筑波大学教授 金久保利之先生には、研究テーマ設定から実験準備および論文作成に至るま で、終始懇切丁寧にご指導ご鞭撻を賜りました。また、研究活動だけでなく大学院進学、その後 の進路等多大な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

副指導教員であります筑波大学准教授 八十島章先生には、研究活動全般において的確かつ丁 寧なご助言をいただきました。同じく副指導教員であります筑波大学教授 松島亘志先生には、 研究に対する有益な助言をいただきました。筑波大学技術職員小島篤志氏には実験準備の段階か ら多くの場面で助言およびご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

最後に、大学生活および研究活動を温かく見守り支えてくださった家族、大学生活をともに過ごした友人に改めて深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会:繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法研究委員会報告書、 2012.9
- 2) 日本コンクリート工学会:高靱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、 高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う、2002.1
- 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
- 4) 株式会社クラレ製品情報ビニロン繊維素材情報 http://www.kuraray.co.jp/pvaf/pro_07.html (2020.1 閲覧)
- 5) 並木啓恭:繊維補強セメント複合材料を用いた梁部材のせん断耐力評価に関する研究、筑波 大学理工学群工学システム学類卒業論文、2018.2
- 6) 佐野直哉、八十島章、山田大、金久保利之: 接合部に DFRCC を用いた PCa 柱梁接合部の構 造性能、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No.2、pp.1105-1110、2015.7
- 7) 清水 克将:高靭性繊維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
- 8) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990
- 9) 清水 克将、工藤脩平、金久保利之:高靭性補強セメント複合材料の曲げおよびせん断性状に おける寸法効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.3、pp.1429~1434、2007.7