

論文 高韌性繊維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

清水 克将^{*1}・工藤 健平^{*2}・金久保 利之^{*3}

要旨:セメント系材料に短繊維を混入させた複合材料である高韌性繊維補強セメント複合材料(DFRCC)の寸法効果を確認するため、実験因子を使用 DFRCC、断面サイズ、鉄筋比および加力形式(4点曲げ加力、逆対称曲げせん断加力)とした実験を行った。その結果、断面形状が強度および変形能に与える影響は大きく、また、既往の耐力式による部材強度と実験値を比較した結果、曲げ性状に与える寸法効果の影響がせん断性状に与える寸法効果に比べ大きいことを示した。

キーワード:DFRCC、曲げ、せん断、寸法効果

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の強度および韌性が断面寸法に依存すること(寸法効果)は一般的に知られており、寸法効果が適切に把握できれば、縮小モデルによる実験の実施が可能となる。近年、ECC(Engineered Cementitious Composites¹⁾)に代表されるセメントに短繊維を混入させた高韌性繊維補強セメント複合材料(以下 DFRCC: Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites)に関する研究が活発に行われており、柱や梁部材等に用いることでひび割れ面で繊維が架橋して応力伝達し、部材にせん断補強効果を付加できることが報告されている^{例えば2)}。DFRCCはコンクリートと同様の寸法効果(骨材寸法など)に加え、繊維補強による寸法効果が存在すると考えられ、いわゆるウォールエフェクトの影響による繊維の配向の違いが引張性能に与える影響は大きいことが知られている。

これまで、DFRCCの寸法効果の中でも、特にDFRCCの特長である引張性能の寸法効果については、山田らによる確率論的研究が報告されており、引張強度は試験体体積の累乗で表現されるとしている³⁾。また、Liは各研究機関により

実施されている引張試験の特長をまとめるとともに、試験体断面寸法と繊維径との比が引張性状に大きく影響を与えることを指摘している⁴⁾。これまで行われてきた DFRCC の寸法効果に関する研究は材料レベルが中心であり、部材レベルでの寸法効果に関する研究の報告はない。そこで本研究では、DFRCC 部材の寸法効果の把握を目的とし、断面サイズ、鉄筋比および使用 DFRCC をパラメータとした部材の 4 点曲げおよび逆対称曲げせん断加力をを行う。

2. 使用材料および試験体

2.1 試験体

実験因子は加力形式により大きく 2 つに分けられ、3 等分点一方向曲げ加力(曲げ型試験体)および大野式による逆対称一方向曲げせん断加力(せん断型試験体)である。曲げ型試験体一覧を表-1 に、せん断型試験体一覧を表-2 に、曲げ型およびせん断型試験体の形状と加力方法を図-1 および図-2 に示す。いずれも断面サイズが 3 レベル(S, M, L)あり、鉄筋比(曲げ型は主筋の有無、せん断型は肋筋の有無)、使用 DFRCC(4 材料)を変動因子として実験を行う。

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 博士(工学)(元筑波大学大学院生)(正会員)

*2 筑波大学 第三学群工学システム学類(元筑波大学学生)

*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)

表-1 曲げ型試験体一覧

試験体名 (試験体数)	使用 繊維	混入率 V_f (%)	断面 $b \times D$ (mm)	主筋	
				配筋	強度
PVA10-F-S (3)	PVA 繊維	1.0	40×40	—	降伏強度 222MPa
PVA10-FR-S (3)			2-D3 $p_t=1.04\%$		
PVA10-F-M (3)			100×100	—	SD295
PVA10-FR-M (3)			3-D6 $p_t=1.04\%$	—	
PVA10-F-L (1)			280×280	—	
PVA10-FR-L (1)			5-D13 $p_t=1.04\%$	—	SD295
PVA15-F-S (3)		1.5	40×40	—	
PVA15-FR-S (3)			2-D3 $p_t=1.04\%$	—	
PVA15-F-M (3)			100×100	—	
PVA15-FR-M (3)			3-D6 $p_t=1.04\%$	—	
PVA15-F-L (1)			280×280	—	
PVA15-FR-L (1)			5-D13 $p_t=1.04\%$	—	SD295
PVA20-F-S (3)	2.0	2.0	40×40	—	降伏強度 222MPa
PVA20-FR-S (3)			2-D3 $p_t=1.04\%$	—	
PVA20-F-M (3)			100×100	—	SD295
PVA20-FR-M (3)			3-D6 $p_t=1.04\%$	—	
PVA20-F-L (1)			280×280	—	SD295
PVA20-FR-L (1)			5-D13 $p_t=1.04\%$	—	
DCT-F-S (3)	鋼繊維	2.0	40×40	—	降伏強度 222MPa
DCT-FR-S (3)			2-D3 $p_t=1.04\%$	—	
DCT-F-M (3)			100×100	—	SD295
DCT-FR-M (3)			3-D6 $p_t=1.04\%$	—	
DCT-F-L (1)			280×280	—	SD295
DCT-FR-L (1)			5-D13 $p_t=1.04\%$	—	

表-2 せん断型試験体一覧

試験体名 (試験体数)	使用 繊維	混入率 V_f (%)	せん断 スパン 比	断面 $b \times D$ (mm)	主筋	肋筋	
						配筋	p_w (%)
PVA10-00-S (3)	PVA 繊維	1.0	32×50	1-D6 $p_t=2.41\%$	—	—	0.00
PVA10-00-M (1)			64×100	4-D6 $p_t=2.43\%$		2-D3@25	0.89
PVA10-89-M (1)			180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	2-D6@40	0.89	0.89
PVA10-89-L (1)		1.5	32×50	1-D6 $p_t=2.41\%$	—	—	0.00
PVA15-00-S (3)			64×100	4-D6 $p_t=2.43\%$		2-D3@25	0.89
PVA15-00-M (1)			180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	2-D6@40	0.89	0.89
PVA15-89-M (1)		1.25	32×50	1-D6 $p_t=2.41\%$	—	—	0.00
PVA15-89-L (1)			64×100	4-D6 $p_t=2.43\%$		2-D3@25	0.89
PVA20-00-S (3)			180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	2-D6@40	0.89	0.89
PVA20-00-M (1)	鋼繊維	2.0	32×50	1-D6 $p_t=2.41\%$	—	—	0.00
PVA20-89-M (1)			64×100	4-D6 $p_t=2.43\%$		2-D3@25	0.89
PVA20-89-L (1)			180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	2-D6@40	0.89	0.89
DCT-00-S (3)			28×50	1-D6 $p_t=2.76\%$	—	—	0.00
DCT-00-M (1)			56×100	4-D6 $p_t=2.81\%$		2-D3@84	0.30
DCT-30-M (1)			156×280	8-D13 $p_t=2.80\%$	—	—	0.00
DCT-00-L (1)			156×280	8-D13 $p_t=2.80\%$		2-D4@108	0.30
DCT-30-L (1)			156×280	8-D13 $p_t=2.80\%$		—	0.00

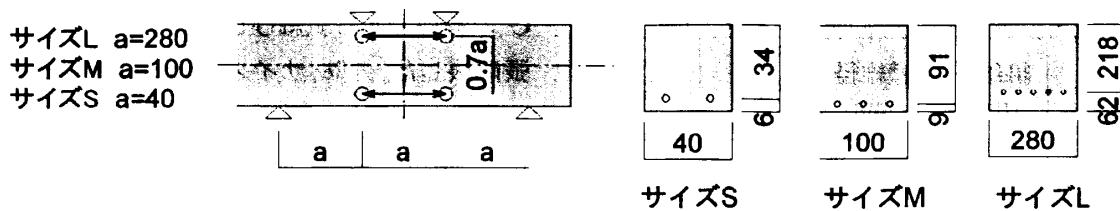


図-1 曲げ型試験体形状 (unit : mm)

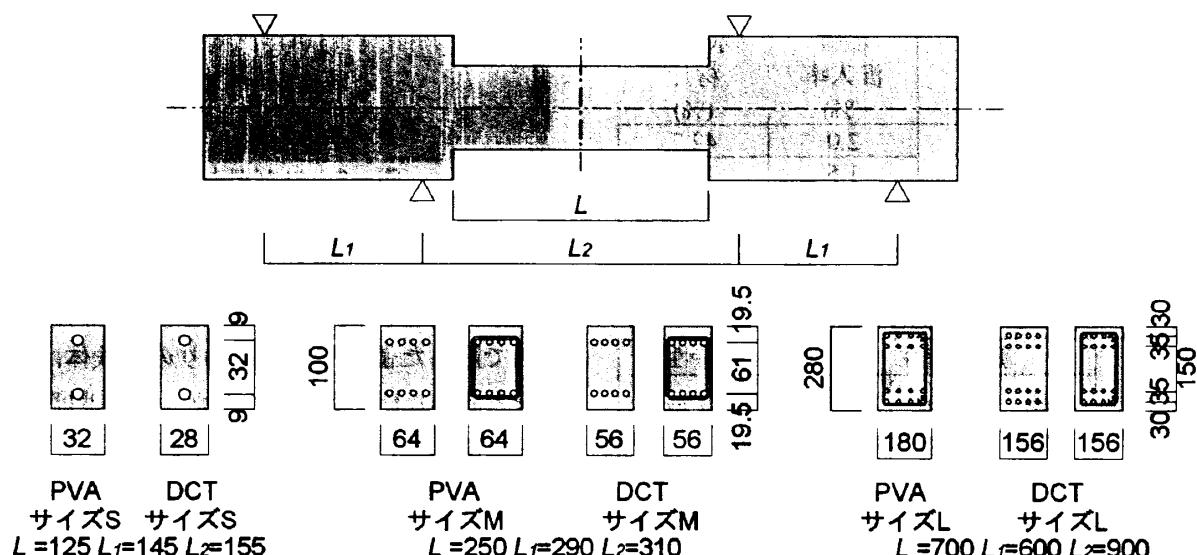


図-2 せん断型試験体形状 (unit : mm)

なお、各断面サイズで引張鉄筋比 p_t が同一となるように配筋し、また、せん断型試験体はせん断スパン比を 1.25 とした。試験体は、曲げ型のサイズ S およびサイズ M 試験体とせん断型のサイズ S 試験体が 3 体ずつ、それ以外の試験体は 1 体ずつ作製した。

曲げ型の変位計測は JCI 規準 繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法 (JCI-S-003-2005) に準じ、純曲げ区間上下に取り付けた変位計により軸方向変位を計測して曲率を算出することとした。せん断型はスタブ間の相対変位を計測した。

2.2 使用材料

使用したDFRCCは、PVA 繊維を体積繊維混入率 $V_f=2.0\%$ 混入させたPVA-ECC(PVA20), PVA20 の調合を基に繊維量のみを減じた PVA15 ($V_f=1.5\%$) および PVA10 ($V_f=1.0\%$), 反応性粉体コンクリート (RPC) に鋼繊維を $V_f=2.0\%$ 混入させたDCT⁵⁾の4材料である。繊維の力学特性 (メー

カ一値)を表-3に、調合計画を表-4に、DFRCC の力学特性を表-5に示す。なお、DFRCC の引張特性は、主筋のない曲げ型サイズ M 試験体 (100×100×400mm の角柱試験体) を用いた 4 点曲げ加力による引張性能評価法により得られた結果に、既報⁶⁾により得られた低減係数 (引張強度が 0.82, 終局歪が 0.85) を乗じたものである。

PVA は圧縮強度が 40MPa 程度、引張強度は PVA20 が 4MPa 程度、PVA15 および PVA10 が 2MPa 程度であり繊維混入による差が認められた。また DCT は圧縮強度 190MPa、引張強度 9MPa であった。

鉄筋の引張試験結果を表-6に示す。せん断型試験体の主筋には降伏強度 700MPa 程度の高強度鉄筋を用い、せん断破壊させるように計画した。曲げ型試験体の主筋である D3 は降伏強度 200MPa 程度、D4, D6 および D13 は 400MPa 程度であった。

表-3 繊維の力学特性（メーカー値）

使用 繊維	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	破断 強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
PVA 繊維	12	0.040	1600	40
鋼繊維	15	0.2	2500	210

表-4 調合計画

材料名	使用 繊維	繊維 混入率 (%)	水結合 材比 (%)
PVA20	PVA 繊維	2.0	42.7
PVA15		1.5	42.7
PVA10		1.0	42.7
DCT	鋼繊維	2.0	22

表-5 DFRCC の力学特性

材料名	圧縮特性			引張特性*	
	割線 剛性 (GPa)	圧縮 強度 (MPa)	圧縮 強度 時歪 (%)	引張 強度 (MPa)	終局 歪 (%)
PVA20	16.7	42.5	0.53	3.90	0.91
PVA15	17.4	42.0	0.42	1.96	0.36
PVA10	18.1	40.2	0.40	2.32	0.49
DCT	57.5	190	0.37	9.36	0.71

* 引張性能評価法により得られた結果に低減係数を乗じたもの。低減係数は既報^⑨により引張強度が 0.82、終局歪は 0.85 である。

表-6 鉄筋の引張試験結果

呼び 名	ヤング 係数 (GPa)	降伏 応力 (MPa)	降伏 歪 (μ)	備考
D6	188	729	3876	せん断型 主筋
D13		722	4086	
D3	225	222	999	曲げ型 主筋
D4		406	1989	
D6	186	382	2051	せん断型 肋筋
D13		193	1883	

3. 試験結果

3.1 曲げ型試験体

PVA20 のサイズ M 試験体のひび割れ状況例を図-3 に示す。主筋ありの試験体では曲げひび割れが複数発生し、最終的に曲げ圧縮破壊により耐力が決定した。主筋なしの試験体では主筋ありに比べてひび割れ本数は少ないものの、DFRC

C の特長である微細ひび割れが発生し、曲げ引張破壊した。部材サイズによる破壊形式の違いは認められなかった。



図-3 ひび割れ状況

曲げ応力-歪の関係を図-4 および図-5 に示す。ここで曲げ応力は、曲げモーメントを断面係数で除した値とし、主筋ありの試験体は鉄筋分を考慮した断面係数で除した。また曲げ歪は、曲率に部材せいの半分を乗じた値とした。

試験体サイズに依らずほぼ同等の初期剛性で応力が上昇し、初期ひび割れ発生により剛性が低下し、変形（ひび割れ）を伴いながら応力上昇するたわみ硬化性状が認められた。主筋無し試験体では、最大曲げ応力および最大曲げ応力時歪は S > M > L の関係となり、断面寸法が小さい試験体ほど強度および韌性に富む結果となった。これは小さい断面の場合に繊維が材軸方向に配向し易いことに起因すると考えられる。一方、主筋あり試験体では、最大曲げ応力が S = M

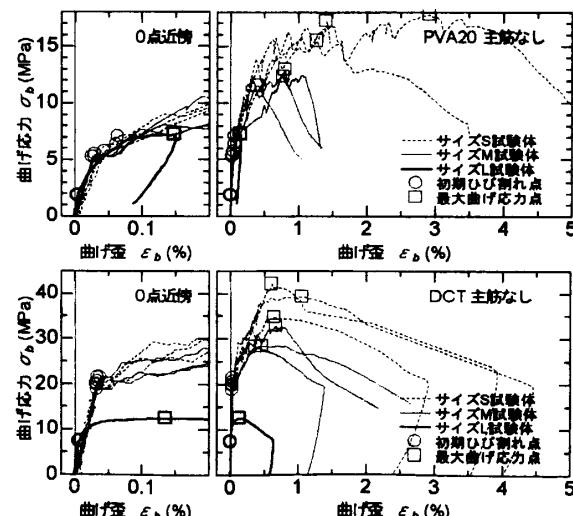


図-4 曲げ応力-歪関係（主筋なし）

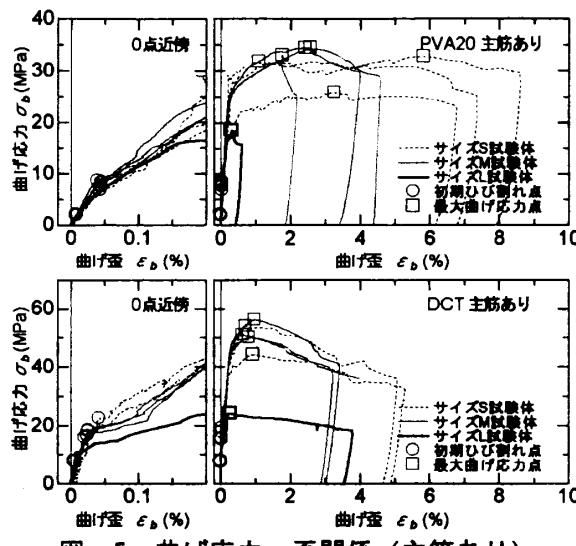


図-5 曲げ応力-歪関係（主筋あり）

$>L$ の関係となっている。これは全試験体の引張鉄筋比を 2.4% 程度に統一しているものの、S 試験体の主筋 (D3) の降伏強度が 222 MPa であるのに対し、M 試験体の主筋 (D6) が 382 MPa と高いため、M 試験体の強度が高くなったものと考えられる。

3.2 せん断型試験体

PVA20 のひび割れ状況を図-6 に示す。筋筋比が小さい試験体では圧縮縁を結ぶひび割れによる破壊（斜張力破壊）した。試験体サイズによる最終ひび割れ状況の差は認められないが、

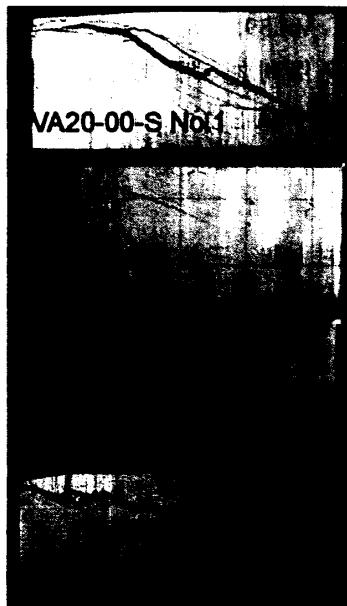


図-6 ひび割れ状況

小さい試験体では曲げひび割れは生じず、せん断ひび割れが発生して耐力低下を引き起こした。

せん断応力一部材角関係を図-7 に示す。ただしせん断応力はせん断力を部材幅 × 主筋中心間距離で除した値である。筋筋比が 0.00% の試験体では強度および韌性が $S > M > L$ の関係にあり、寸法効果が認められた。一方、筋筋を有する試験体では、逆の性状を示している。これは、前述の曲げ型試験体と同様に使用した筋筋の強度によるものと考えられる。

4. 部材強度の実験値と計算値の比較

繊維補強セメント複合材料の寸法効果については、高応力体積により表現できることが既往の研究により示されている（例えば⁷⁾）。本研究では、筋筋補強された部材強度の評価の可能性を検討するため、表-5 に示す DFRCC の引張性能を用い、曲げ強度およびせん断強度を検討する。曲げ強度 σ_{mu} は式(1)による略算式により算出し、せん断強度 Q_{su} は DFRCC のせん断抵抗分として引張強度の 1/2 を日本建築学会終局強度型指針 A 法のトラス機構に累加した式(2)～式(5)⁸⁾により求めた。

$$\sigma_{mu} = 0.9 \left\{ \sum a_i \sigma_i d + \frac{bD^2}{2} \sigma_i \right\} / (L/2) \quad (1)$$

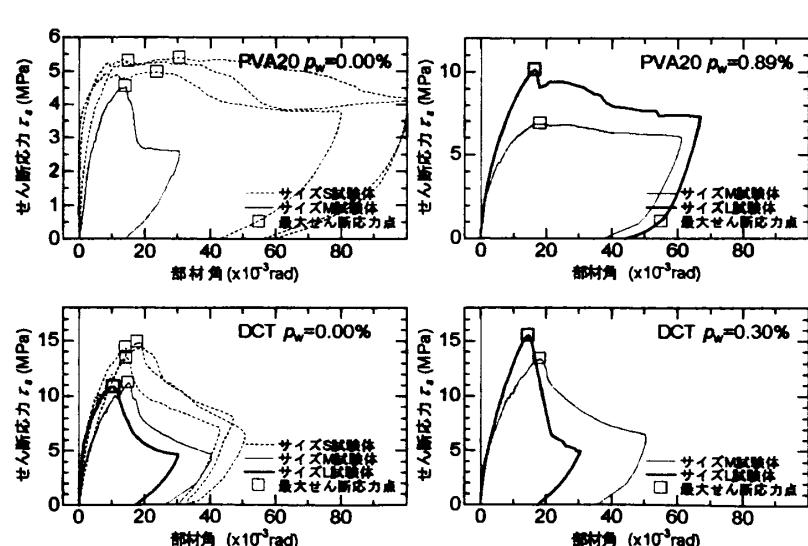


図-7 せん断応力-部材角関係

$$\begin{aligned} Q_{su} &= b j_t (p_w \sigma_{wy} + 0.5 \sigma_t) \cot \phi \\ &\quad + \tan \theta (1 - \beta) \nu \sigma_B b D / 2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\beta = \left\{ (1 + \cot^2 \phi) p_w \sigma_{wy} + \cot^2 \phi \cdot 0.5 \sigma_t \right\} / \nu \sigma_B \quad (3)$$

$$\tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + L/D} \quad (4)$$

$$\cot \phi = 1.0 \quad (5)$$

ただし、 a_t ：引張鉄筋断面積、 σ_y ：引張鉄筋の降伏強度、 d ：圧縮縁から引張鉄筋までの距離、 b ：梁幅、 D ：梁せい、 σ_t ：DFRCC の引張強度、 L ：内法スパン、 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 ：DFRCC の圧縮強度、 ν ：DFRCC の圧縮強度有効係数 $\nu = 1.7 \sigma_B^{-0.333}$

曲げ強度およびせん断強度の比較を図-8に示す。曲げ強度の比較値は S>M>L の傾向が強く、寸法効果が曲げ性状に与える影響が大きい。一方、せん断強度は比較値が 0.9~1.4 度で曲げ強度に比べて低い。

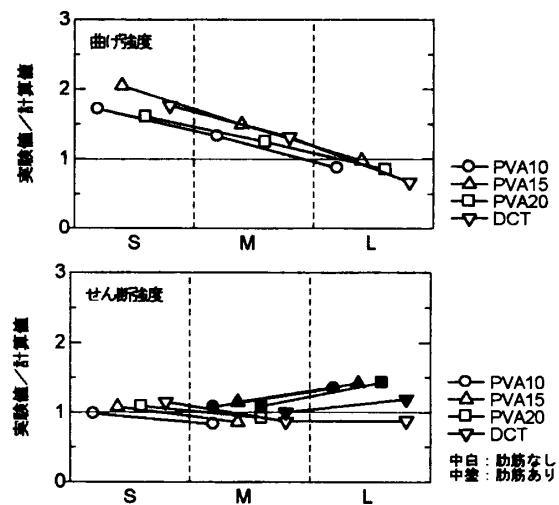


図-8 部材強度の計算値との比較

5. まとめ

鉄筋補強された DFRCC の曲げ性状およびせん断性状を把握するため、断面サイズ、鉄筋比および使用 DFRCC をパラメータとした4点曲げ加力および曲げせん断加力を行った。その結果、用いる鉄筋の強度による影響はあるが、強度および韌性は S>M>L の関係であった。また、既往の強度式による計算値と本実験結果を比較した結果、曲げ性状がせん断性状に比べて寸法効

果が大きいことを示した。

謝辞

試験体の製作にあたっては、太平洋セメント（株）、興建産業（株）のご協力を得た。

参考文献

- 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
- 清水克将, 金久保利之, 関田徹志, 永井覚: PVA-ECC 梁部材のせん断終局体力評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1537-1542, 2004.7
- 山田寛次, 三橋博三, 板垣直行, 石山智: 短纖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, No.540, pp.7-12, 2001.2
- Victor C. Li, Shunxin Wang : On High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, 高韌性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.13-23, 2003.12
- 鵜澤正美, 山田一夫: RPC を用いた超高強度・高じん性コンクリートの開発動向, コンクリート工学, Vol.39, No.2, pp.53-56, 2001
- 清水克将, 金久保利之, 関田徹志, 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
- 浦野登志雄, 村上聖, 三井宜之, 志垣隆浩: 鋼纖維補強コンクリートの引張軟化則とその寸法効果の曲げ解析への適用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 463 号, pp.1-7, 1994.9
- 永井覚, 金子貴司, 関田徹志, 丸田誠: 高韌性纖維補強セメント複合材料を用いたダンパ部材の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1513-1517, 2004