

論文 超高強度繊維補強コンクリートを用いた梁部材の曲げせん断性状

氏家 隆博^{*1}・清水 克将^{*2}・金久保 利之^{*3}・片桐 誠^{*4}

要旨：鋼繊維補強された超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を用いた部材の曲げせん断性状を把握することを目的として、大野式加力による梁部材の曲げせん断実験を行った。試験体のせん断スパン比は 1.5 とし、筋量を変動因子とした。実験の結果、最大荷重時までは微細なせん断ひび割れが多数発生し、そのひび割れ幅は、筋比が 0.3%以上であれば部材角 1/50rad まで 0.1mm 以下であった。材料の曲げ試験より得られた引張側特性値を用いて算出した曲げ強度およびせん断強度は、最大荷重実験値とおおむね適合した。

キーワード：鋼繊維，RPC，曲げ強度，せん断強度，ひび割れ幅，画像計測

1. はじめに

近年、圧縮強度が 150MPa 以上、引張強度が 5MPa 以上で、繊維補強された超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC と称する）が注目されている^{1),2)}。UFC は反応性微粉末からなる緻密質なセメント質複合材料（RPC）であり、超高強度であるとともに、高耐久、高靱性、自己充填性等の特長を併せ持つ。UFC を用いた構造物は、橋梁を中心として実用化されてきているが³⁾、建築構造においても、梁、柱、壁部材をはじめとして、制震部材、ピロティ部の補強部材等に用いることによって、高性能な構造を実現できる可能性を有している。

UFC を用いた部材の曲げせん断性状は今までにいくつか報告されているが^{4),5)}、部材強度や変形能の評価法に不明な点も多く、さらなる資料の蓄積が望まれている。本報では、せん断スパン比を 1.5 とした梁部材を対象として曲げせん断加力を行い、せん断破壊から曲げ破壊への移行領域での部材挙動を確認すると共に、曲げ強度、せん断強度評価法の一提案を行う。また、繊維の架橋によるひび割れ抑制効果について、画像計測によるひび割れ性状の把握を行ったので、あわせて報告する。

2. 実験概要

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、断面 156mm×280mm、内法スパン 840mm の矩形梁部材で、せん断スパン比は 1.5 である。引張鉄筋に SHD685 の異形鉄筋を用い、配筋を 8-D13（引張鉄筋比 $p_r=2.80\%$ ）とした。変動因子は筋量で、筋比 $p_w=0.00\%$ （筋なし）～0.89%の 5 レベルを設定した。試験体一覧を表 1 に示す。使用した UFC は全試験体で同一で、

表 1 試験体一覧

試験体名	使用繊維	混入率 $V_f(\%)$	断面 $b \times D$ (mm)	主筋		肋筋	
				配筋	強度	配筋	$p_w(\%)$
DCT-00	鋼繊維	2.0	156×280	8-D13 $p_r=2.80\%$	SHD685	—	0.00
DCT-15						2-D4@108	0.15
DCT-30						2-D4@54	0.30
DCT-60						2-D6@68	0.60
DCT-89						2-D6@46	0.89

*1 太平ホーム（株）（元筑波大学学生）（正会員）

*2 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 修士（工学）（正会員）

*3 筑波大学 大学院システム情報工学研究科助教授 博士（工学）（正会員）

*4 太平洋セメント（株） 中央研究所 RPC 設計技術チームリーダー 博士（工学）（正会員）

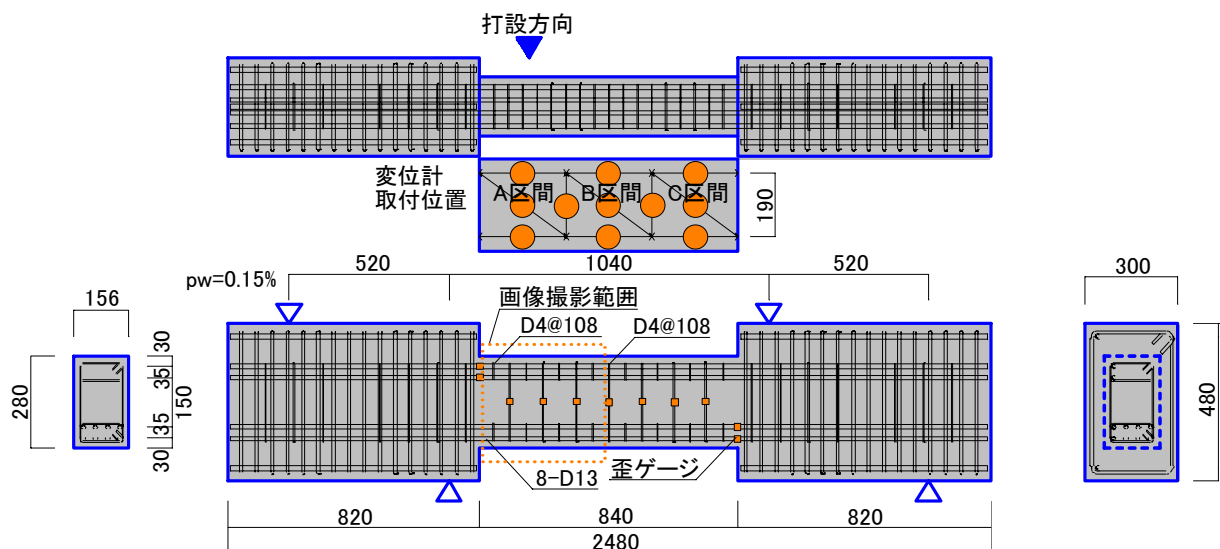


図-1 試験体配筋例 (DCT-15)

標準配合粉体¹⁾に体積混入率を2%とした鋼繊維 (引張強度 2700MPa, 繊維径 0.2mm, 繊維長 15mm) を混入した UFC である。UFC の配合計画を表-2 に示す。

試験体配筋例を、図-1 に示す。すべての試験体において、付着破壊を防止する目的で主筋拘束筋を 90~140mm 間隔で配筋した。また、UFC の打設方向は、図に示すように梁側面から行った。

表-2 UFC の配合計画

V_f (%)	水セメント比	水 (kg/m ³)	RPC プレミックス (kg/m ³)
2.0	0.22	173	2297

2.2 加力方法

加力は大野式の逆対称曲げモーメント下での曲げせん断加力⁹⁾とし、変位制御で加力を行う機械式万能試験機を用いて、一方向単調載荷を行った。

2.3 計測方法

計測項目は、荷重値、両スタブ間のたわみおよび軸方向変形、図-1 中に示す測定区間での各部変形量、危険断面位置での主筋歪と主たる位置での肋筋歪、梁側面での図-1 中に示す領域での画像撮影である。

画像撮影にあたっては、試験体梁部半区間に

おいて 10mm 間隔に標点マーキングを施し、600 万画素 (約 3000×2000 ピクセル) のデジタルカメラを 2 台用いて行った。標点マーキングの様子を図-2 に示す。デジタルカメラ 1 台の撮影範囲を 30cm×20cm にセットし、1 ピクセルあたり 0.1mm の解像度を持つように設定した。撮影はたわみ 0.5mm 毎に行うことを標準とした。なお、残りの試験体半区間においては、目視によるひび割れスケッチを行った。

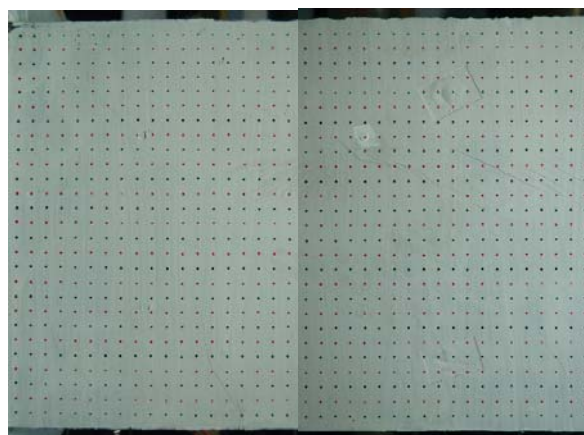


図-2 標点マーキング

3. 使用材料の力学的特性

3.1 鉄筋

使用鉄筋の引張試験結果による力学的特性を、表-3 に示す。

表-3 鉄筋の力学的特性

種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	備考
D13	712	938	178	主筋
D6	334*	498	173	肋筋
D4	358*	570	193	肋筋

* 0.2% オフセット耐力

3.2 UFC

UFC に関する材料試験として、圧縮試験および曲げ試験を行った。圧縮試験はφ100×200mm シリンダーを使用し、標点間距離 100mm のコンプレッソメータにより歪を計測した。

現在、UFC の引張側特性値を求めるための定められた試験方法はない。本報では、文献7)の4点曲げ載荷試験法を採用し、引張側特性値として引張強度と引張終局歪を求めることとした。本法は、4点曲げ載荷における純曲げ区間 100mm の曲率を求めることにより、曲げ引張側応力分布を完全剛塑性として最大モーメント時の釣合式を求め、引張応力と引張歪の代表点 (図-3) を求めるものである。また、本実験で用いた UFC は、基本的にマルチプルクラック性状が発生しないので、求められた歪は標点距離を 100mm とした場合の等価歪である。

圧縮試験結果を表-4 に、曲げ試験結果を表-5 に示す。圧縮強度は 211.4MPa、引張側特性値代表点である引張強度および引張終局歪は、それぞれ 11.2MPa、0.65% であった。

曲げ試験による曲げモーメント-曲率関係を図-4 に、破壊後のひび割れ例を図-5 に示す。目視上確認できるひび割れは 1 本であった。

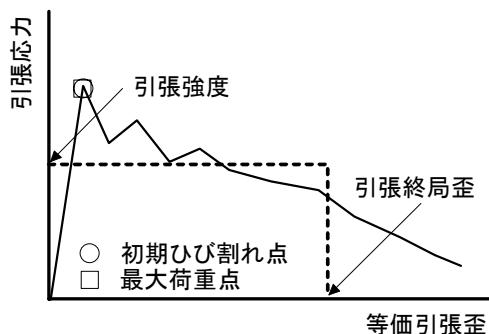


図-3 UFC の引張側特性値

表-4 UFC の圧縮試験結果 (平均)

圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時歪 (%)	1/3 割線弾性係数 (GPa)
211.4	0.42	54.7

表-5 UFC の曲げ試験結果 (平均)

最大モーメント (kN・m)	最大モーメント時曲率 ($\times 10^{-6}/\text{mm}$)	引張強度 (MPa)	引張終局歪 (%)
4.33	91.1	11.2	0.65

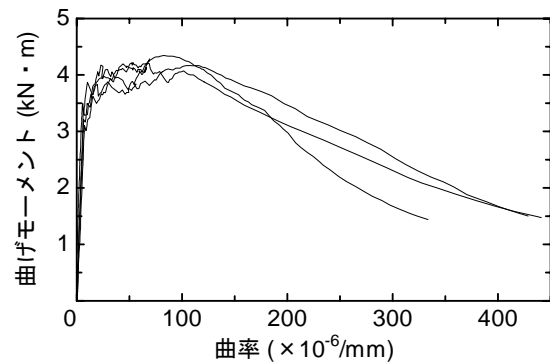


図-4 曲げモーメント-曲率関係

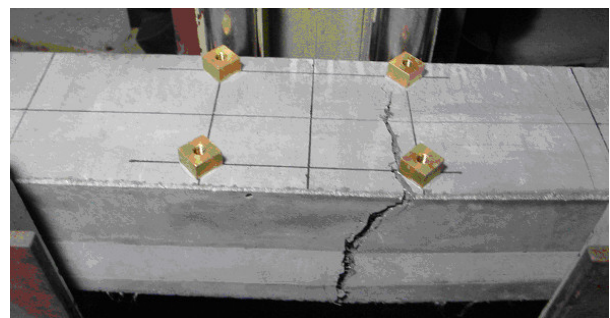


図-5 曲げ試験の最終破壊状況例

4. 実験結果および検討

4.1 破壊性状と荷重-変形関係

すべての試験体において、順次曲げひび割れおよびせん断ひび割れが発生した。その後荷重が増大するにしたがって微細なひび割れが多数発生するものの局所開口することはなく、DCT-00を除く試験体で主筋の曲げ降伏が見られた。DCT-00は、部材角 1/70rad でせん断ひび割れが拡大し、部材軸方向にひび割れが拡大して、若干すべり破壊のような性状を示してせん断破壊し、荷重が低下した。DCT-15、DCT-30はいずれも部材角 1/40rad 程度で最大荷重を示し、その後せん断ひび割れの拡大が局所化して急激に耐

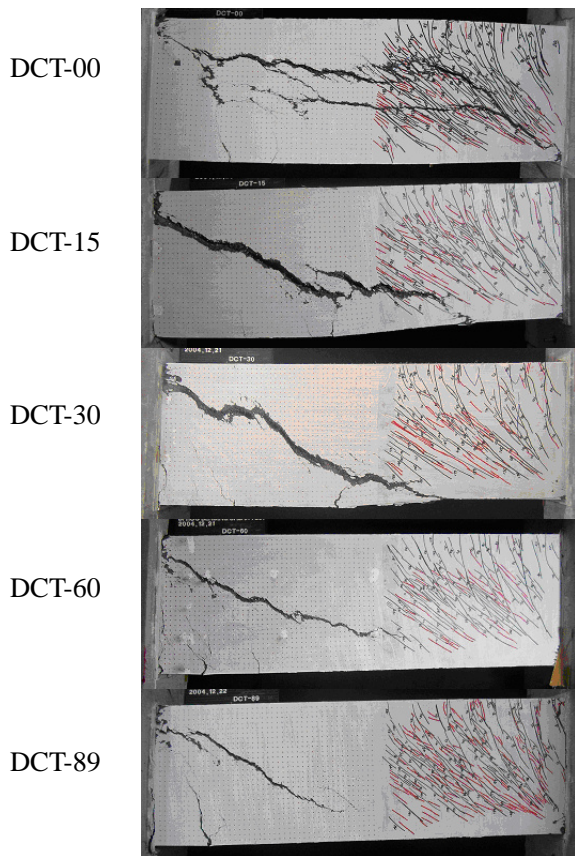


図-6 最終破壊状況

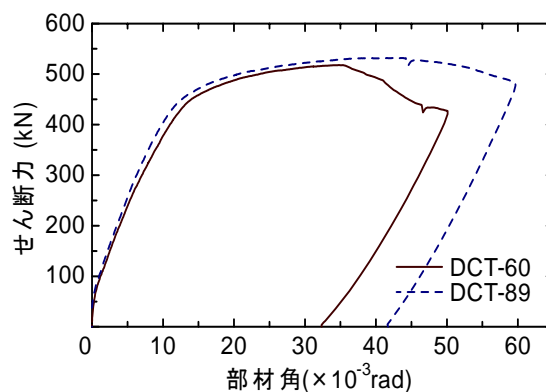
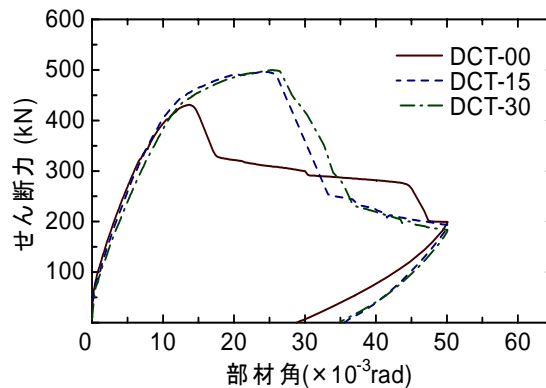


図-7 せん断力一部材角関係

表-6 実験結果一覧

試験体	曲げひび割れ荷重 (kN)	せん断ひび割れ荷重 (kN)	最大荷重時		限界変形角*1 (rad)	主たるせん断ひび割れの角度(°)	破壊形式*2	曲げ強度計算値*3 (kN)	せん断強度計算値*4 (kN)	最大荷重 / 計算値*5
			せん断力 (kN)	部材角 (rad)						
DCT-00	84.8	265.6	430.9	1/73	1/59	39.5	485.6	438.0	0.98	
DCT-15	84.3	308.2	496.7	1/41	1/35	32.9		459.3	1.08	
DCT-30	78.6	237.3	499.8	1/39	1/33	34.3		480.7	1.04	
DCT-60	74.3	252.9	517.7	1/29	>1/20	37.7		518.6	1.07	
DCT-89	62.2	236.9	531.9	1/23	>1/17	36.9		557.1	1.10	

*1: せん断力が最大荷重の80%に低下したときの部材角 *2: F=曲げ降伏, S=せん断破壊 *3: UFCの引張側構成則を完全弾塑性と仮定した断面解析による値 *4: UFCの引張強度寄与分を累加したAIJ終局強度型指針式A法による値 *5: 曲げ強度計算値とせん断強度計算値の小さい方の値との比較値

力低下を起こした。DCT-60, DCT-89は、それぞれ部材角 1/29rad, 1/23rad で最大荷重を示し、せん断ひび割れが拡大しながら徐々に耐力低下した。最終破壊形式は、DCT-00はせん断破壊、その他の試験体は曲げ降伏後のせん断破壊である。

各試験体の最終破壊状況を図-6に、せん断力一部材角関係を図-7に示す。ひび割れ状況は、各試験体とも1本のひび割れに開口が集中するまでは、微細なひび割れが多数発生した(図-6の各試験体の右側のひび割れ状況参照)。材料試験(曲げ試験)ではひび割れが1本しか発生しない場合でも、曲げせん断荷重下の部材中では

マルチプルクラックに近い状態になることが分かる。

4.2 最大荷重

各試験体の曲げ強度およびせん断強度を次のように求め、最大荷重実験値と比較した。

(1) 曲げ強度

UFCの圧縮側応力-歪関係を表-4に示す圧縮強度および圧縮強度時歪を頂点とする放物線、引張側応力-歪関係を表-5に示す引張強度および引張終局歪で表される完全弾塑性で表現し、平面保持に基づく断面解析により求めた。なお、鉄筋の応力-歪関係は完全弾塑性とした。

(2) せん断強度

著者らが ECC 梁部材に対して提案した、日本建築学会終局強度型指針式 A 法に UFC のせん断強度 (=引張強度) を累加する方法⁸⁾により求めた。本法では、繊維補強材料がせん断ひび割れ面全域で引張強度に等しいせん断応力を保持し、せん断破壊時に筋筋が降伏していることを仮定している。UFC の引張強度は、表-5 に示す値を用いた。なお、本試験体では計算上圧縮ストラットの角度は、全試験体で $\cot \phi = 2$ となった。

曲げ強度およびせん断強度の計算値、および実験結果との比較は、表-6 にあわせて示した。また、それらの比較を示したものを、図-8 に示す。本実験の範囲では、前述の方法で実験結果を比較的良好に表わせることがわかる。

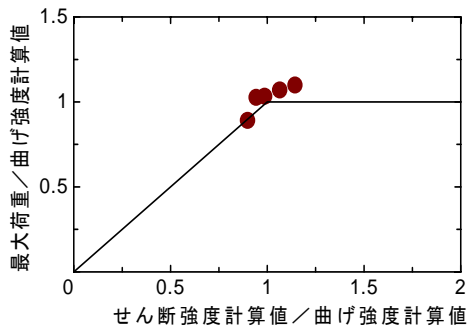


図-8 最大荷重の実験値と計算値の比較

4.3 ひび割れ角度とひび割れ幅

画像計測により得られた標点マーキングの変位情報より、各測定ステップにおけるせん断ひび割れの角度とひび割れ変位を検討した。ひび割れ変位の算出法を図-9 に示す。各測定画像毎に着目したせん断ひび割れに対して、そのひび割れを挟む部材軸直交方向の 2 点の標点マーキングの座標を求め、加力前の同位置での標点マーキングの座標との差から標点の変位 (Δx , Δy) を導出して、以下の式によりひび割れ面 (角度 θ_{cr}) に対するひび割れ幅 ($w_{cr,u}$) とひび割れずれ ($w_{cr,v}$) を求めた。

$$w_{cr} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (1)$$

$$w_{cr,u} = w_{cr} \cdot \cos \theta_{cr} \quad (2)$$

$$w_{cr,v} = w_{cr} \cdot \sin \theta_{cr} \quad (3)$$

各試験体の部材角 1/200, 1/100, 1/50rad (DCT-89 では、加えて 1/25rad) および最大荷重時の、最大せん断ひび割れにおけるひび割れ角度、ひび割れ幅、ひび割れずれを表-7 に示す。なお、各部材角時でそれぞれ最大のせん断ひび割れに着目したので、必ずしも同一のひび割れに対する経時変化とはなっていない。また、着目した標点間 (10mm) に複数のひび割れが含まれる場合もあるので、参考として標点間のひび

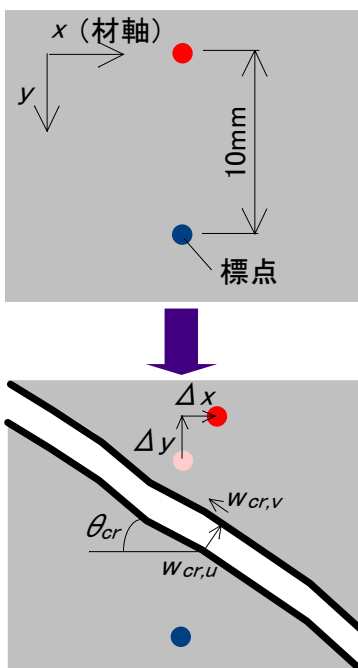


図-9 ひび割れ変位算出法

表-7 画像計測によるひび割れ角度とひび割れ幅

試験体	部材角	ひび割れ角度 θ_{cr} (°)	ひび割れ幅 $w_{cr,u}$ (mm)	ひび割れずれ $w_{cr,v}$ (mm)	ひび割れ本数
DCT-00	1/200	50.4	0.0	0.0	1
	1/100	24.1	0.4	0.2	3
	最大荷重時	27.0	0.6	0.3	3
	1/50	27.1	3.9	2.0	1
DCT-15	1/200	52.2	0.1	0.2	1
	1/100	34.3	0.3	0.2	1
	1/50	33.9	0.6	0.4	1
	最大荷重時	37.6	0.8	0.6	1
DCT-30	1/200	48.9	0.0	0.0	1
	1/100	49.9	0.0	0.0	1
	1/50	48.1	0.0	0.0	2
	最大荷重時	48.5	0.1	0.1	3
DCT-60	1/200	53.9	0.0	0.0	1
	1/100	53.7	0.0	0.0	1
	1/50	47.0	0.0	0.0	3
	最大荷重時	47.8	0.2	0.3	2
DCT-89	1/200	39.6	0.1	0.1	1
	1/100	40.2	0.1	0.1	2
	1/50	34.5	0.1	0.1	2
	1/25	32.2	0.6	0.4	2
	最大荷重時	42.6	0.6	0.5	1

割れ本数も記載した。

同表より、概してひび割れ幅は小さく、肋筋比が 0.3% 以上であれば部材角 1/50rad まで 0.1mm 以下である。ひび割れずれ量はおおむねひび割れ幅の半分程度で、ひび割れ角度を考慮すると、肋筋が配されていれば基本的にはひび割れは材軸直交方向に開口すると考えられる。最大荷重時には、ひび割れ幅が 0.6~0.8mm の試験体が見られる。この時点でひび割れ幅がある一つのひび割れに集中していることが観測されており、このひび割れ幅は、標点距離を 100mm とした場合の等価歪で 0.6~0.8% となり、UFC の曲げ試験結果から得られた引張終局歪と整合するとも考えられる。

5. まとめ

鋼繊維で補強された超高強度繊維補強コンクリートを用いた部材の曲げせん断性状を把握することを目的として、梁部材の加力実験を行った。本実験により得られた結論を以下に示す。

- 1) 最大荷重時までは微細なせん断ひび割れが多数発生し、そのひび割れ幅は、肋筋比が 0.3% 以上であれば部材角 1/50rad まで 0.1mm 以下であった。
- 2) 材料の曲げ試験より得られた引張側特性値（引張強度および引張終局歪）を用いて算出した曲げ強度およびせん断強度は、最大荷重実験値とおおむね適合した。

謝辞

試験体の作製にあたっては、太平洋セメント中央研究所諸氏のご協力を得た。実験の実施に

あたっては、筑波大学大学院八十島章氏の協力を得た。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，2004.9
- 2) 日本コンクリート工学協会：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（Ⅱ），2004.5
- 3) 武者浩透ほか：無機系複合材料（RPC）を用いた酒田みらい橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.36，No.11，pp.2-11，2002
- 4) 棚野博之ほか：超高強度繊維補強コンクリートを用いたはり部材の曲げせん断性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.37-40，2003.9
- 5) 上甲尚典，菅野俊介，木村秀樹，下山善秀：RPC を用いた柱の復元力特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.799-804，2004.7
- 6) 大野和雄，横山和雄，久保田吉彦：新載荷法による鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗について，日本建築学会研究報告，第 30 号，pp.1-4，1955
- 7) 日本コンクリート工学協会：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（Ⅱ）3.4 節，pp.77-85，2004.5
- 8) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井 覚：PVA-ECC 梁部材のせん断終局耐力評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1537-1542，2004.7