

論文 高靱性セメント複合材料を用いたはり部材のせん断耐力に関する研究

一宮 利通*1・藤代 勝*2・須田 久美子*3・内田 裕市*4

要旨：高靱性セメント複合材料（ECC）は高い変形性能を有しており，引張応力を安定して保持することができる。ECC を部材に適用した場合せん断耐力が向上することが確認されているが，既往の実験はせん断スパン比が比較的小さい試験体を用いて行われており，せん断耐力評価式は確立されているとはいえない。そこで，せん断スパン比をパラメータとして ECC を用いた部材のせん断実験を行い，せん断耐力評価式を提案し，その適用性を検討した。

キーワード：高靱性セメント複合材料，繊維補強，せん断耐力

1. はじめに

高靱性セメント複合材料（以下，ECC）は，繊維の架橋効果により引張応力下において微細なひび割れが無数に生じ，鋼材に匹敵する変形性能を有するとともにひび割れ発生後も引張応力を安定して伝達できる材料である¹⁾（図-1）。ECC を構造部材に適用することによって構造性能の向上が期待されるが，既往の研究の多くは部材の曲げに対する補強効果に着目したものであり²⁾，せん断補強効果に着目した研究は少ない。

せん断に着目した研究として，清水らにより ECC の繊維混入量およびせん断補強筋比をパラメータとした部材のせん断実験が行われており，ECC のせん断耐力補強効果が確認されている³⁾。清水らの実験は建築構造物の短柱やはりが想定され，せん断スパン比（以下， a/d ）が 1.8 と小さい試験体を用いて行われている。一般的な土木構造物における部材への適用を考えた場合， a/d が 2 を超える領域においてもせん断耐力を確認する必要があると考えられる。

本研究では，ECC を用いた部材について a/d を 2.5 および 3 としたせん断実験を行い， a/d がせん断耐力に与える影響を検討するとともに，せん断耐力評価式を提案してその適用性について検討する。

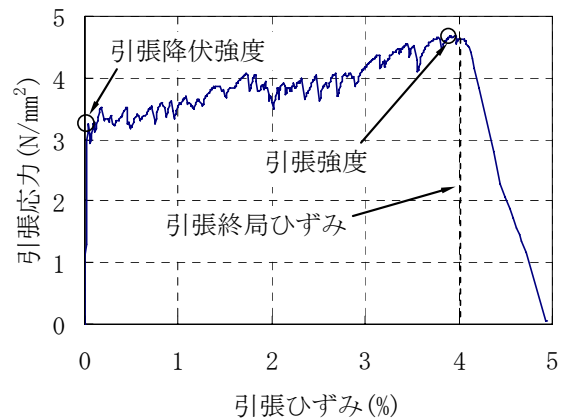


図-1 引張応力-ひずみ曲線の測定例

2. せん断耐力評価式

通常の鉄筋コンクリート（以下，RC）部材のせん断耐力の評価式として，式(1)に示す土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾の式（以下，示方書式）が挙げられる。

$$\begin{aligned}
 V &= V_c + V_s \\
 V_c &= 0.20 f'_c{}^{1/3} (d/1000)^{-1/4} p_w{}^{1/3} b_w d \\
 V_s &= (A_w f_{wy} / s_s) d / 1.15
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここに， V_c ：コンクリートが分担するせん断耐力， V_s ：せん断補強筋が分担するせん断耐力， f'_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)， p_w ：引張鉄筋比， b_w ：腹部の幅(mm)， d ：有効高さ(mm)， A_w ：せん断補強筋の断面積(mm²)， f_{wy} ：せん断補強筋の降伏強度(N/mm²)， s_s ：せん断補強筋の配置間

*1 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 上席研究員 工修（正会員）
 *2 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員 工修（正会員）
 *3 鹿島建設（株） 土木設計本部 プロジェクト設計部 設計長 工博（正会員）
 *4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 工博（正会員）

隔(mm)であり，部材係数は無視している。

示方書式は，コンクリートの分担分とトラス理論から算定されるせん断補強筋の分担分との和で表される。コンクリートの分担分は式(2)に示す二羽らが提案した式⁵⁾（以下，二羽式）をもとに安全側の評価となるように簡略化されたものである。

$$V_c = 0.20f'_c{}^{1/3} (d/1000)^{-1/4} p_w{}^{1/3} [0.75 + 1.4/(a/d)] b_w d \quad (2)$$

ここに， a ：せん断スパン長(mm)である。二羽式は主として 40N/mm²以下のコンクリートを用いた 265 体のせん断実験結果から回帰されたせん断耐力評価式である。

引張強度を設計に考慮できるセメント系材料として，鋼繊維で補強され，150N/mm²以上の圧縮強度および 5N/mm²以上の引張強度を有する超高強度繊維補強コンクリート（以下，UFC）が挙げられる。土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」⁶⁾が発表されており，式(3)に示すせん断耐力評価式（以下，UFC 指針式）が規定されている。

$$\begin{aligned} V &= V_{rpc} + V_{fd} \\ V_{rpc} &= 0.18f'_c{}^{1/2} b_w d \\ V_f &= (f_v / \tan \beta_u) b_w d / 1.15 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに， V_{rpc} ：マトリクスが分担するせん断耐力， V_f ：補強用繊維が分担するせん断耐力， f_v ：UFC の平均引張強度， β_u ：軸方向と斜めひび割れ面のなす角度（軸力がない場合は 40°）であり，部材係数は無視している。

UFC 指針式は，マトリクスの分担分 V_{rpc} と補強用繊維の分担分 V_f との和で表されている。UFC は鉄筋を用いないことが前提とされ，せん断補強筋が分担するせん断耐力は式に含まれておらず，マトリクスが分担するせん断耐力では主鉄筋比の影響が考慮されていない。

ECC は引張強度を設計に考慮できる材料であるが，通常の RC と同様に鉄筋で補強して使用することを想定しているため，せん断耐力評価式では V_c ， V_s および V_f 全てを考慮する必要がある。本研究では，これらの評価式を ECC 部材に適用

できるように修正した式(4)および式(5)に示す評価式の適用性を検討する。

$$V = 0.7V_c + V_s + V_f \quad (4)$$

$$V = V_{rpc} + V_f + V_s \quad (5)$$

式(4)は示方書式に UFC 指針式の補強用繊維が分担するせん断耐力 V_{fd} を加算したもの（以下，修正示方書式）である。ただし，ECC では粗骨材を使用していないことから，コンクリート標準示方書における軽量骨材コンクリートと同様にコンクリートが分担するせん断耐力を 70%に低減することとした。また，せん断スパン比の影響を検討するために，コンクリートの分担分 V_c として二羽式を用いた評価式（以下，修正二羽式）についても検討した。式(5)は UFC 指針式に示方書式のせん断補強筋が分担するせん断耐力を加算したもの（以下，修正 UFC 式）である。なお，補強用繊維が分担するせん断耐力 V_f の算定にあたっては，平均引張強度として引張降伏強度を用いることとした。

3. 実験概要

本実験に用いた ECC の配合を表-1 に示す。補強用繊維として長さ 12mm，直径 0.04mm のポリビニルアルコール(PVA)繊維を体積率で 2%混入した。

現場封緘養生した試験体を用いた載荷実験時における ECC の力学特性を表-2 に示す。圧縮試験は直径 100mm，長さ 200mm の円柱供試体を

表-1 ECC の配合

W/(C+FA) (%)	単位水量 (kg/m ³)	S/(C+FA) (%)	繊維混入率 (%)	混和剤
42.2	350	70	2.0	適宜

W:水, C:セメント, FA:フライアッシュ, S:細骨材

表-2 ECC の力学特性

試験項目		単位	試験結果
圧縮試験	圧縮強度	(N/mm ²)	29.3
	ヤング係数	(kN/mm ²)	14.3
直接引張試験	引張降伏強度	(N/mm ²)	2.9
	引張強度	(N/mm ²)	4.4
	引張終局ひずみ	(%)	4.2

用いて JIS A 1108-1999 に基づいて行った。引張試験は厚さ 13mm のダンベル型試験体を用いた直接引張試験とし⁷⁾、5本の試験のうち最大と最小を除く 3本の平均として評価した。なお、ここでは図-1 で示すように引張試験で得られた応力ひずみ曲線において応力が増加から減少に変化する変曲点のうち、最小の応力度を引張降伏強度、最大の応力度を引張強度、最後の変曲点に対応するひずみを引張終局ひずみと定義した。

試験体の概要を図-2 に示す。実験は a/d を 3 とした試験体 S30 および a/d を 2.5 とした試験体 S25 をそれぞれ 2 体ずつ用いて行った。試験体の諸元は試験体 S30 および S25 と同じとし、せん断スパン長をそれぞれ 460mm および 380mm とした。試験体は幅 150mm、高さ 200mm の矩形断面とし、せん断補強筋は配置しないものとした。曲げ破壊が先行しないように引張鋼材として降伏強度 1136N/mm² で公称直径 23mm の異形 PC 鋼棒を 2 本配置して補強した。また、圧縮側の鉄筋として D16 異形鉄筋を配置した。

荷重は試験体を単純支持して等曲げ区間を 200mm とした 2 点荷重とし、単調に荷重を増加させた。荷重開始から終了まで、荷重荷重をロードセルにより、荷重点直下および支点直上の試験体変位を変位計により計測した。また、等曲げ区間中央において引張鋼材および ECC 上縁のひずみをひずみゲージを用いて計測した。

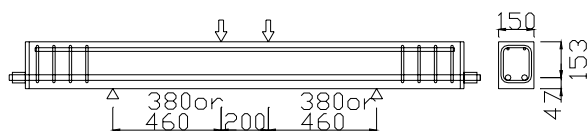
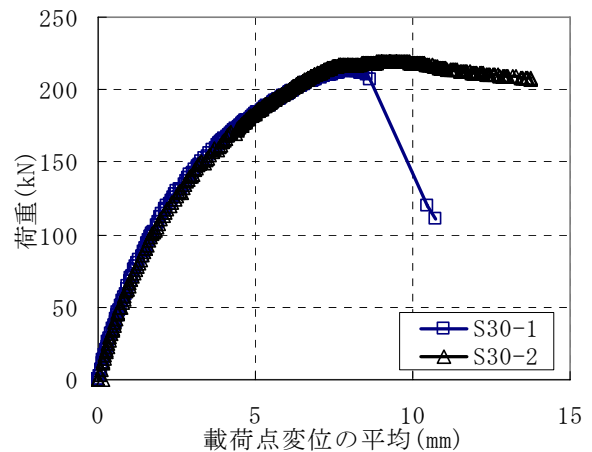


図-2 試験体の概要

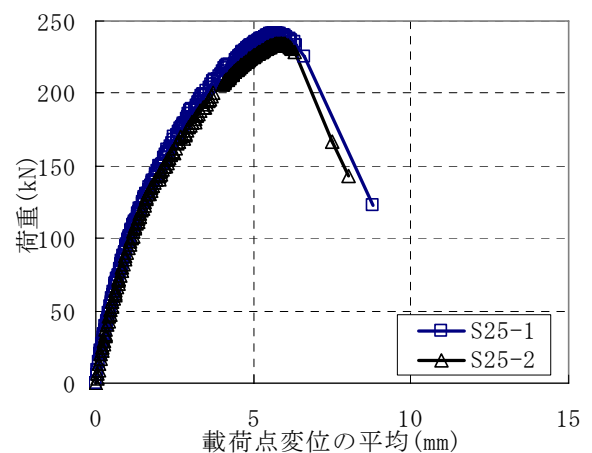
4. 実験結果と考察

4.1 実験結果

試験体 S30 および S25 の荷重と荷重点変位の関係を図-3 に、破壊状況を写真-1 に示す。荷重点変位は両荷重点の平均値で、支点の変位を差し引いたものである。



(a) 試験体 S30



(b) 試験体 S25

図-3 荷重と荷重点変位の関係



(a) 試験体 S30-1



(b) 試験体 S30-2



(c) 試験体 S25-1



(d) 試験体 S25-2

写真-1 試験体の破壊状況

試験体 S30 では荷重約 130kN において目視で斜めひび割れが確認され、荷重の増加とともに斜めひび割れ本数が増加した。その後、試験体 S30-1 では最大荷重 213kN に達したときに 1 本の斜めひび割れが拡大して荷重が急激に低下した。断面高さ中央における斜めひび割れの角度は部材軸に対して約 28 度であった。一方、試験体 S30-2 では ECC の圧縮縁ひずみの計測値が約 0.37% に達したときに最大荷重 220kN に達し、かぶり部分の ECC が圧縮破壊してはく離するとともに荷重が緩やかに低下した。引張鋼材ひずみの計測値は最大で約 0.23% であり、降伏ひずみには至らなかった。

試験体 S25 では 2 体とも試験体 S30-1 と同様

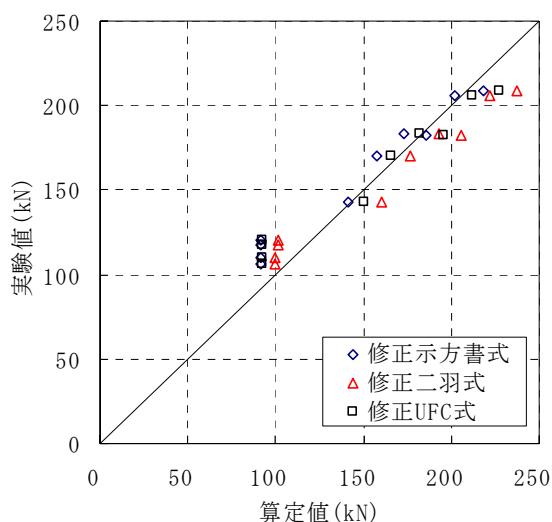


図-4 せん断耐力の比較

な破壊形態となり、目視で斜めひび割れが確認されたのは両試験体とも荷重約 130kN であった。また、最大荷重はそれぞれ 241kN および 235kN と試験体 S30 よりも大きかった。断面高さ中央における斜めひび割れの角度は部材軸に対してそれぞれ約 37 度および約 42 度と、S30-1 と比較して大きい傾向であった。

全ての試験体でせん断補強筋を配置していないが、斜めひび割れ発生後も補強用繊維がせん断力を分担することによって脆性的な破壊を生じていないことから、補強用繊維の補強効果によりせん断補強筋を配置したと同様な効果が得られたといえる。

4.2 せん断耐力評価式の検討

表-3 および図-4 に、修正示方書式、修正二羽式および修正 UFC 式を用いたせん断耐力の計算値と実験値との比較を示す。試験体 S30-2 では曲げ破壊したが、試験体 S30-1 よりも耐力が大きかったため、図-4 にもそのままプロットした。実験結果として、本研究で行った実験に加え、清水らが行った実験のうち補強用繊維が 1.5% および 2.0% 混入された ECC を用いた実験結果も示す。ただし、引張降伏強度としては初期ひび割れ時の引張応力の値を用いて評価した。

本研究で行った実験では、全てのケースで計算値よりも実験値の方が大きくなっていったが、3 種類の評価式いずれも概ね実験値を評価できて

表-3 せん断耐力の比較

試験体	本研究の実験				清水らの実験 ³⁾										
	S30-1	S30-2	S25-1	S25-2	PVA15-00	PVA15-15	PVA15-30	PVA20-00	PVA20-15	PVA20-30					
ECCの圧縮強度(N/mm ²)	29.3	29.3	29.3	29.3	35.7	35.7	35.7	39.1	39.1	39.1					
ECCの引張降伏強度(N/mm ²)	2.9	2.9	2.9	2.9	2.41	2.41	2.41	3.41	3.41	3.41					
試験体幅(mm)	150	150	150	150	180	180	180	180	180	180					
有効高さ(mm)	154	154	154	154	233	233	233	233	233	233					
主鉄筋比(%)	3.62	3.62	3.62	3.62	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25					
せん断補強筋比(%)	0	0	0	0	0	0.15	0.30	0	0.15	0.30					
せん断スパン比	3.0	3.0	2.5	2.5	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8					
せん断耐力	実験結果(kN)				106.4	109.8	120.8	117.4	142.8	169.7	182.9	182.7	205.8	208.6	
	修正示方書式	計算値(kN)				91.9	91.9	91.9	91.9	141.3	157.4	173.3	185.9	202.1	217.9
		実験/計算				1.16	1.19	1.31	1.28	1.01	1.08	1.06	0.98	1.02	0.96
	修正二羽式	計算値(kN)				99.2	99.2	101.5	101.5	160.5	176.7	192.5	205.7	221.9	237.7
		実験/計算				1.07	1.11	1.19	1.16	0.89	0.96	0.95	0.89	0.93	0.88
	修正UFC式	計算値(kN)				92.0	92.0	92.0	92.0	149.9	166.1	181.9	195.5	211.7	227.5
実験/計算				1.16	1.19	1.31	1.28	0.95	1.02	1.01	0.93	0.97	0.92		

いるといえる。a/d の影響を考慮できる修正二羽式を用いた計算値に対する実験値の比は試験体 S30 で 1.07~1.11, 試験体 S25 で 1.16~1.19 であり, 試験体 S25 で実験値の方が大きい傾向であった。これは, 後述するようにコンクリートが分担するせん断耐力が相対的に小さかったため, 試験体 S30 と S25 のせん断耐力の計算値にはあまり差がなかったためである。このことから, 補強用繊維のせん断補強効果により, a/d がせん断耐力に与える影響が通常の RC よりも大きくなっている可能性があると考えられる。ただし, データが少ないため, 定量的に評価するためには, 詳細に検討する必要がある。

清水らによる実験では, やはり 3 種類の評価式いずれも概ね実験値を評価できているといえるが, 本研究で行った実験と比べて計算値の方が大きくなる傾向があった。この理由としては加力方法による違いによる影響や ECC の引張降伏強度の評価誤差等が考えられる。

いずれの評価式とも精度に大きな差は見られなかったが, 修正示方書式が最も安全側の評価となっていた。また, ECC 部材では鉄筋を使用することを想定しているため, 鉄筋比の影響を適切に評価できる方が望ましいことから, ECC を用いた部材のせん断耐力評価式としては修正示方書式が適していると考えられる。

修正示方書式を用いた場合について, コンク

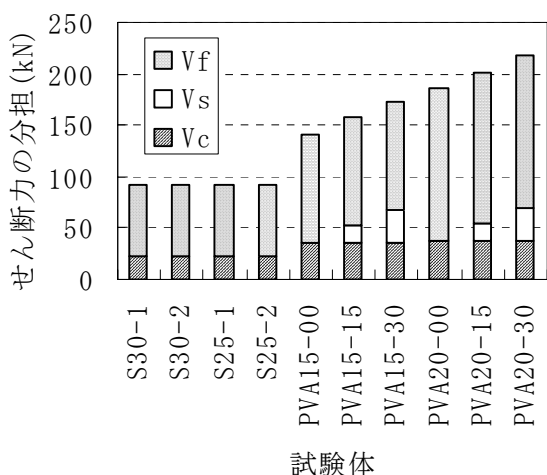


図-5 せん断耐力の分担 (修正示方書式)

リートの分担分, せん断補強筋の分担分および補強用繊維の分担分の計算値をそれぞれの試験体について図-5 に示す。いずれの試験体も補強用繊維の分担分が最も大きくなっている。繊維混入率 2.0%でせん断補強筋比 0.3%の試験体 PVA20-30 では, 補強用繊維の分担分はせん断補強筋の分担分の約 5 倍になっており, 補強用繊維のせん断補強効果が高いことがわかる。

4.3 曲げ耐力の検討

曲げ破壊した試験体 S30-2 の曲げ耐力の算定について若干の考察を行う。

ECC の引張側応力ひずみ曲線は引張降伏強度を折れ点とした完全弾塑性モデルとした (図-6)。また, 圧縮側応力ひずみ曲線は二次曲線でモデル化し, 最大応力度を圧縮強度の 0.85 倍, 圧縮終局ひずみを材料試験における圧縮強度時

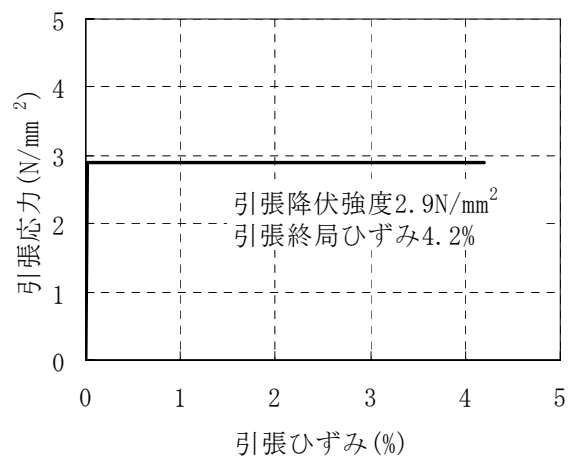


図-6 引張応力ひずみ曲線モデル

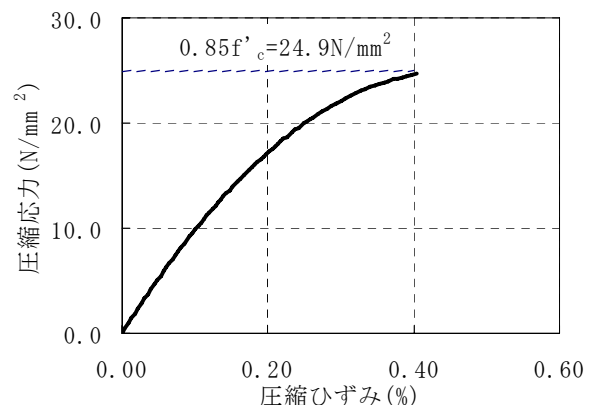


図-7 圧縮応力ひずみ曲線モデル

ひずみを参考として 0.4%とした (図-7)。解析は、断面をファイバー要素に分割し、平面保持を仮定した断面内の力の釣り合いにより求め、ECCの圧縮縁ひずみが 0.4%となった時点で解析を終了してこれを曲げ耐力とした。

実験結果と解析結果の比較を図-8に示す。実験における最大荷重は 220kN であったのに対し、解析による曲げ耐力は 203kN であり、上記応力ひずみ曲線モデルを用いることにより曲げ耐力を安全側に評価できるといえる。変形については、荷重が 150kN を超えた領域において解析値のほうが若干大きくなっているが、変形を評価するためには応力ひずみ曲線やせん断ひび割れの影響を適切に評価する必要があると考えられる。

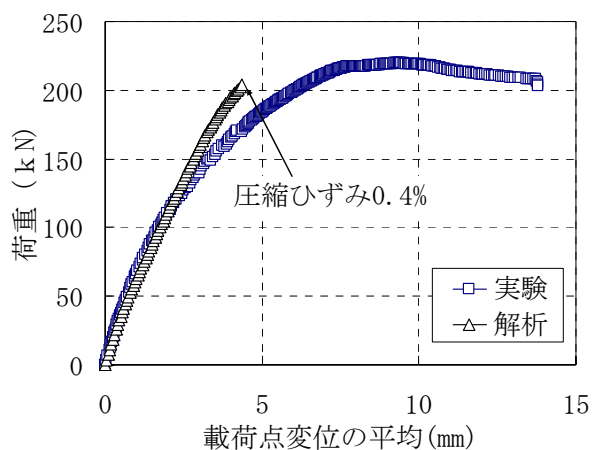


図-8 荷重変位曲線の比較

5. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) ECC を用いた部材では斜めひび割れ発生後も補強用繊維がせん断力を分担することによって脆性的な破壊を生じないことから、補強用繊維の補強効果によりせん断補強筋と同様な補強効果が得られるといえる。
- 2) 補強用繊維のせん断補強効果により、 a/d がせん断耐力に与える影響が通常の RC よりも大きくなっている可能性がある。
- 3) 示方書式に UFC 指針式の補強用繊維の分担

分を加えた評価式および UFC 指針式にせん断補強筋の分担分を加えた評価式で概ねせん断耐力を評価できるといえる。ただし、ECC 部材では鉄筋を使用することを想定しているため、鉄筋比の影響を適切に評価できる示方書式を用いた評価式が適していると考えられる。

- 4) ECC の引張側応力ひずみ曲線を完全弾塑性で、圧縮側応力ひずみ曲線を二次曲線でモデル化し、圧縮強度時ひずみを圧縮終局ひずみとすることにより、曲げ耐力を安全側に評価できる。

本研究は、土木学会「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料指針作成小委員会」(委員長：岐阜大学六郷教授)の活動の一環として行われたものである。ご指導頂いた方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料に関する技術の現状と将来，2002.1
- 2) 例えば，福田一郎ほか：高靱性セメント複合材料の引張力を考慮した曲げ部材の設計法，補強アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.3，pp.65-72，2003
- 3) 清水克将ほか：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.1537-1542，2001
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [2002 年制定] 構造性能照査編，2002
- 5) 二羽淳一郎：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第 372 号，V-5，pp.167-176，1986
- 6) 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)，2004
- 7) Kanda, T. and V. C. Li: A New Micromechanics Design Theory for Pseudo Strain Hardening Cementitious Composite, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 125, No. 4, pp.373-381, 1999