論文　PVA-ECC 梁部材のせん断終局耐力評価

清水　克将[*1]・金久保　利之[*2]・閑田　徹志[*3]・永井　覚[*4]

要旨：PVA-ECC（PVA 繊維を使用した Engineered Cementitious Composites）を用いた梁部材のせん断性状を把握するため，繊維混入率と肋筋量を変動因子とした梁試験体の曲げせん断実験および PVA-ECC の一軸引張試験を行った。繊維混入率および肋筋の増加によりせん断強度が増大し，試験体の各部変形から算出した最大荷重時のひび割れ面の平均せん断歪に，繊維混入率による差が認められた。PVA-ECC の一軸引張試験により得られた引張強度を累加したアーチ・トラス式により，梁試験体のせん断強度を評価した。

キーワード：梁，せん断強度，ひび割れ，引張試験，直歪，せん断歪

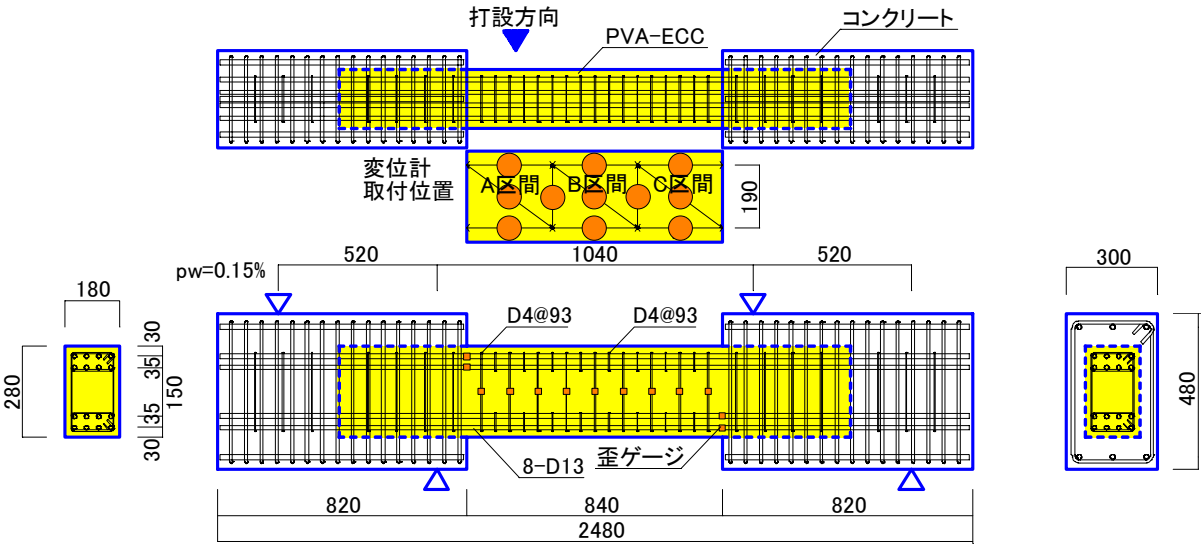
1. はじめに

Engineered Cementitious Composites[1)]（以下，ECC）に代表される高靭性セメント複合材料を構造的要素に使用するために，鉄筋補強された ECC 部材の加力実験が行われている。筆者らも PVA 繊維を使用した ECC（以下，PVA-ECC）に着目し，鉄筋補強された梁の曲げせん断実験を行っている[2)]。この実験では，PVA-ECC による梁部材のせん断補強効果が確認され，せん断強度の実験値は通常の鉄筋コンクリート部材として算定したせん断強度計算値を大きく上回った。本稿では，実験結果の検討をさらに進め，せん断強度の評価法について検討する。特に同時に試験を実施した PVA-ECC の一軸引張試験結果を報告し，梁部材の歪性状との関連性を検討する。

2. 梁部材の曲げせん断実験の概要

2.1 試験体・加力計測方法

梁試験体の形状および配筋を**図－1** に示す。試験体の断面は 180×280mm で，せん断スパン比を 1.5 とした。主筋には降伏強度 719MPa の異形鉄筋（8-D13）を用い，曲げ降伏が先行しないように計画した。実験因子は PVA-ECC の繊維混入率および肋筋量である。また，比較のために普



図－1　梁試験体形状

*1 筑波大学大学院　（正会員）
*2 筑波大学　機能工学系講師　博士（工学）（正会員）
*3 鹿島建設（株）　技術研究所建築生産グループ上席研究員　Ph.D.（正会員）
*4 鹿島建設（株）　技術研究所建築構造グループ主任研究員　工修（正会員）

表－1　梁試験体一覧

試験体名	PVA-ECC				配筋		
	使用繊維	混入率 V_f(%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	主筋	肋筋	
						配筋	p_w (%)
NC-00	（普通コンクリート）		39.0	26.2	8-D13 SD685 p_t=2.43%	－	0.00
NC-15						2-D4@93	0.15
NC-30						2-D4@47	0.30
PVA10-00	PVA	1.0	37.3	17.8		－	0.00
PVA10-15						2-D4@93	0.15
PVA10-30						2-D4@47	0.30
PVA15-00		1.5	35.7	16.3		－	0.00
PVA15-15						2-D4@93	0.15
PVA15-30						2-D4@47	0.30
PVA20-00		2.0	39.1	19.5		－	0.00
PVA20-15						2-D4@93	0.15
PVA20-30						2-D4@47	0.30

通コンクリート試験体も計画した。試験体の一覧を**表－1** に示す。肋筋には降伏強度 295MPa（降伏歪 1530μ）の異形鉄筋 D4 を用い，さらに付着破壊を防止するために，片側主筋を拘束する形で D4 鉄筋を 93mm 間隔で配した。

加力は大野式の曲げせん断一方向単調載荷とし，せん断力，両スタブ間の相対変位とともに，引張側主筋，肋筋の歪，**図－1** に示す梁側面 3 区間（A～C）での試験各部変形を計測した。

PVA-ECC には，繊維長 12mm，繊維径 0.04mm，破断強度 1600MPa の PVA 繊維を用いた。繊維体積混入率は 1.0%（PVA10），1.5%（PVA15），2.0%（PVA20）である。PVA-ECC および普通コンクリートの 100φ－200mm シリンダーによる圧縮試験結果は**表－1** にあわせて示した。梁試験体への打設は，梁側面方向から試験部分の PVA-ECC を打設し，硬化した後スタブのコンクリートを打設した。PVA-ECC 試験部分のスタブ内にはコッターを設けた。なお，普通コンクリートを用いた試験体は一体打ちで製作した。

2.2 結果の概要

全試験体とも主筋の曲げ降伏は確認されず，最終的にせん断ひび割れが開口して耐力低下に至った。PVA-ECC を使用した試験体では，複数ひび割れが観察され，最大荷重以前において最大せん断ひび割れ幅が普通コンクリート試験体に比べて小さい傾向にあり，ひび割れ幅抑制効果が見られた。実験結果の一覧を**表－2** に示す。

表－2　梁実験結果一覧

試験体名	ひび割れ発生荷重 (kN)		主たるせん断ひび割れの角度(度)	最大荷重時		
	曲げ	せん断		せん断力 (kN)	部材角 ($\times 10^{-3}$rad)	肋筋歪(μ)（最大値）
NC-00	43.6	97.5	26.6	116.4	5.05	－
NC-15	36.9	69.4	21.8	104.8	6.93	2082
NC-30	41.9	74.3	29.7	132.3	12.01	1330
PVA10-00	26.1	66.7	31.0	123.9	6.44	－
PVA10-15	20.4	55.3	23.2	144.8	8.07	3278
PVA10-30	18.8	60.5	29.2	171.5	11.75	981
PVA15-00	31.1	66.6	34.5	142.8	9.11	－
PVA15-15	42.4	63.7	23.2	169.7	11.01	5267
PVA15-30	27.9	123.7	32.4	182.9	11.64	8695
PVA20-00	17.0	36.3	33.4	182.7	10.90	－
PVA20-15	20.8	33.0	26.2	205.8	13.82	985
PVA20-30	19.8	90.6	24.2	208.6	12.62	3825

表中，主たるせん断ひび割れの角度とは，**図－1** 中に示す変形測定区間 B における主だったせん断ひび割れの角度を梁側面で直定規にて実測した，試験体軸方向に対する角度である。また，肋筋歪は，最大荷重時における歪測定全位置の中の最大値である。

せん断ひび割れの角度（ϕ_{cr}）は，PVA-ECC 試験体の平均で 28.6 度となり，$\cot\phi_{cr}=2$（$\phi_{cr}=26.6$ 度）に近い値となっている。

PVA-ECC 試験体において，繊維混入率が増すと最大荷重も増大している。その増加量は，PVA10 の各試験体に対して，同一の肋筋を有する試験体間で PVA15 試験体が 18.9kN（p_w=0%），24.9kN（p_w=0.15%），11.4kN（p_w=0.30%），同様に PVA20 試験体が 58.8kN（p_w=0%），61.0kN（p_w=0.15%），37.1kN（p_w=0.30%）である。これらの値を梁幅（180mm）と主筋中心間距離（185mm）で除して応力に換算すると，それぞれ順に PVA15 試験体で 0.57，0.75，0.34MPa，PVA20 試験体で 1.77，1.83，1.11MPa である。

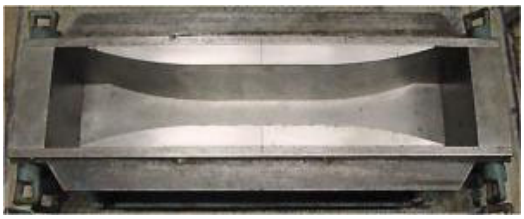
肋筋の歪は，降伏歪（1530μ）より概ね大きな値を示しており，最大荷重時には肋筋は降伏しているものと考えられる。

3. PVA-ECC の一軸引張試験

3.1 試験体・加力計測方法

PVA-ECC の材料特性値として引張性能が重要であると考え，梁試験体作製時に同一バッチの PVA-ECC を用いて一軸引張試験用試験体を作製した。なお，同時に 100×100×400mm 角柱試験体による 3 等分点曲げ載荷試験も行っているが，この結果については機を改めて報告したい。

一軸引張試験の試験体および加力計測方法は，文献 3)に示す「筑波大・鹿島式」引張試験と同一で，100×100×400mm 角柱の中央 100mm 区間に幅 60mm のくびれ部を設け，端部支持条件をピン－固定として引張試験を行うものである。試験体作製に用いた型枠を**図－2** に示す。PVA10，PVA15，PVA20 について，各 6 体の試験体を作製し，加力を行った。

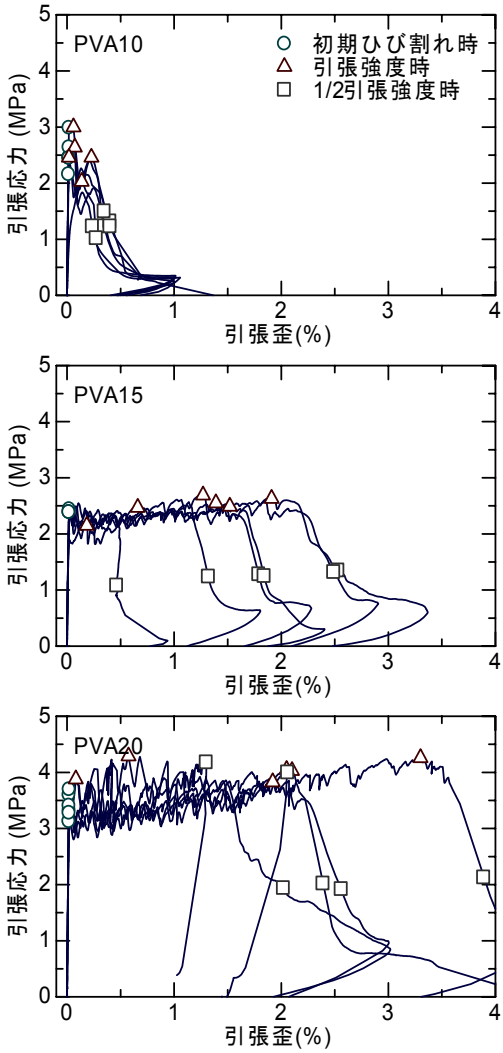


図－2　一軸引張試験体型枠

3.2 実験結果

全試験体の引張応力－引張歪関係を，**図－3** に示す。PVA15，PVA20 試験体では明確な複数ひび割れ（マルチプルクラック）が観察され，初期ひび割れ以降，引張応力が増大する疑似歪硬化性状が見られる。

一軸引張試験結果の一覧を**表－3** に示す。初期ひび割れ時，引張強度時の引張応力と歪，および終局的な変形能を示す意味で引張強度の 1/2 に応力が低下した時点の歪の平均値と変動係数



図－3　一軸引張試験結果

表－3　一軸引張試験結果一覧

試験体名		初期ひび割れ時		引張強度時		1/2 引張強度時	
		引張応力 (MPa)	引張歪 (%)	引張応力 (MPa)	引張歪 (%)	引張応力 (MPa)	引張歪 (%)
PVA10	平均値	2.54	0.017	2.52	0.10	(1.26)	0.33
	変動係数(%)	10.7	8.9	12.5	70.8	－	18.3
PVA15	平均値	2.41	0.018	2.50	1.16	(1.25)	1.74
	変動係数(%)	1.0	8.3	6.9	49.5	－	40.7
PVA20	平均値	3.41	0.018	4.06	1.67	(2.03)	2.37
	変動係数(%)	5.6	3.4	4.3	63.6	－	33.2

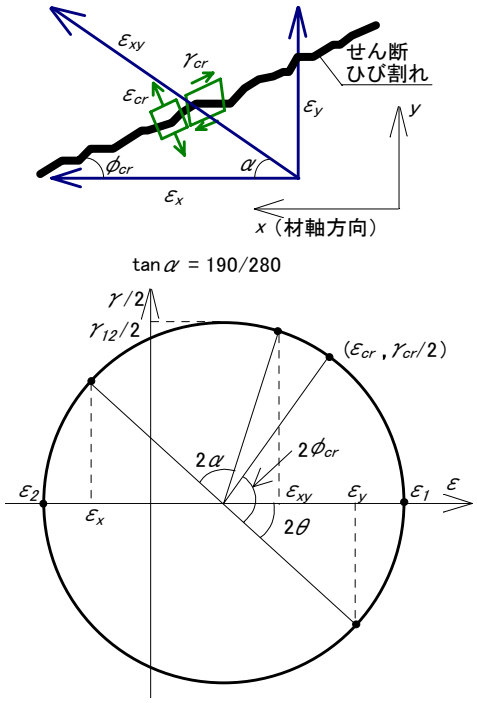
を示した。繊維混入率の違いにより，引張強度時および 1/2 引張強度時の歪に明確な差異が認められる。一方で，引張強度は PVA10 と PVA15 試験体で同等な値となっている。

4. 梁部材のせん断強度評価

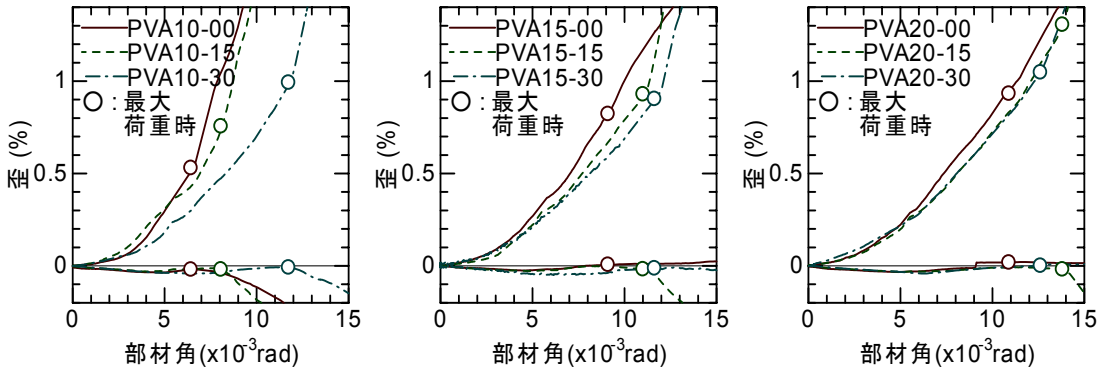
4.1 梁部材の歪性状

梁実験において**図－1** に示す梁側面で計測した各部変形を，変位計の検長で除して平均歪とし，Mohr の歪円を用いて主歪，主せん断歪を求めた。さらに，梁実験においてせん断ひび割れの角度が概ね $\cot\phi_{cr}=2$ であったことから，$\phi_{cr}=26.6$ 度と仮定したひび割れ面における直歪とせん断歪を計算した。これらの平均歪の求め方を**図－4** に示す。図中，ε_x，ε_y，ε_{xy} がそれぞれ材軸方向，材軸直交方向，斜め方向の変形から求めた平均歪であり，ε_1，ε_2 が主歪，γ_{12} が主せん断歪，θ が主歪と材軸直交方向（y 軸）とのなす角である。ε_{cr}，γ_{cr} がひび割れ面における直歪，せん断歪を表す。なお，ε_x，ε_y を算出するにあたっては，区間上下左右両端の変位計の値の平均値を用いた。

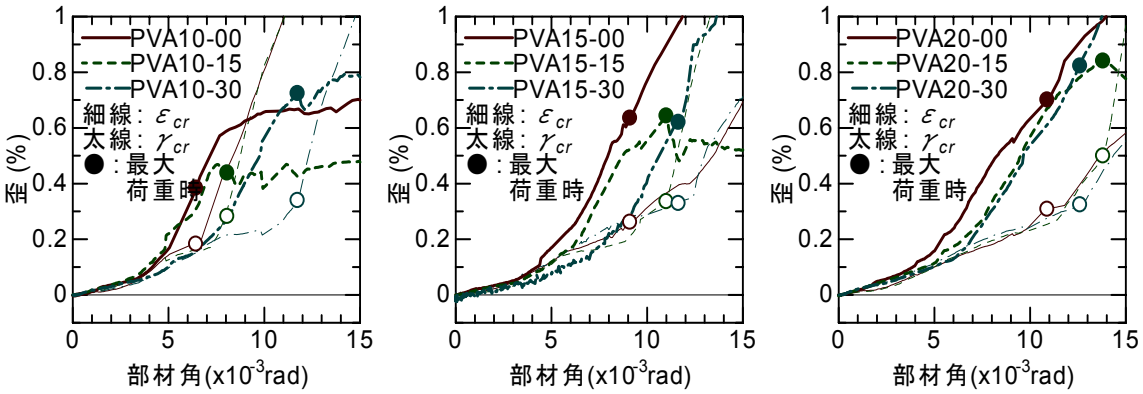
変形測定区間 B における各試験体の主歪と部材角の関係を，**図－5** に示す。圧縮主歪は最大荷重時までほとんど生じておらず，引張主歪は最大荷重時で，PVA10，PVA15，PVA20 試験体でそれぞれ，0.5～0.9%，0.9%程度，1.0～1.3%である。



図－4　主歪の求め方



図－5　主歪（変形測定区間 B）と部材角の関係



図－6　ひび割れ面の歪（変形測定区間 B）と部材角の関係

繊維混入率の違いによるPVA-ECCの引張能力の差異が確認できる。また，PVA15，PVA20 試験体では，肋筋量の違いが主歪に及ぼす影響は明確ではない。しかしながら，PVA-ECC の一軸引張試験結果を見ると，例えば PVA10 では引張歪が 0.5～0.9%の時の引張応力はほとんどなく，また，PVA15，PVA20 では 1%程度の引張歪が引張応力負担の限界値というわけでもない。梁試験体における主歪が，直接的に PVA-ECC の応力負担量を決定する因子ではないと思われる。

変形測定区間 B における各試験体の最大荷重時の主歪の状況を**表－4** に示す。最大主歪と部材軸方向とのなす角は 80～90 度で，せん断ひび割れ面と 60 度程度の角度を有している。肋筋量の違いによる差は見られない。

表－4　最大荷重時の主歪（変形測定区間 B）

試験体名	最大荷重時		
	最大主歪 (%)	最小主歪 (%)	部材軸とのなす角 (度)
PVA10-00	0.510	-0.020	86.6
PVA10-15	0.736	-0.020	84.3
PVA10-30	0.984	-0.009	86.9
PVA15-00	0.890	-0.014	85.1
PVA15-15	0.911	-0.018	85.3
PVA15-30	0.890	-0.014	85.1
PVA20-00	0.951	0.018	87.8
PVA20-15	1.286	-0.019	83.5
PVA20-30	1.048	0.001	89.3

変形測定区間 B における各試験体のひび割れ面の直歪，せん断歪と部材角の関係を，**図－6** に示す。ひび割れ面の直歪に関しては，繊維混入率や肋筋量の違いによる差異が明確ではなく，最大荷重時には 0.3%程度である。一方，せん断歪は繊維混入率による差が比較的顕著で，最大荷重時には PVA10，PVA15，PVA20 試験体でそれぞれ, 0.4～0.7%, 0.6%程度, 0.7～0.8%である。最大荷重時の PVA-ECC の応力負担量は，ひび割れ面でのせん断伝達特性に影響される可能性が伺える。

4.2 梁部材のせん断強度評価法の提案

ECC のひび割れ面でのせん断伝達に関する研究が現在進められているが [4)]，ECC の終局時の応力や歪とその関係（すなわち，多軸応力下の応力や歪に関する破壊曲面）等に関しては不明な点が多い。しかし，例えば文献 4)では，直歪とせん断歪の負担過程（stress path）にも依るが，せん断伝達強度は一軸引張強度程度を有するとしている。

本論では，簡易な部材のせん断設計に資するために，通常の鉄筋コンクリート部材に適用されるアーチ・トラス式の利用を考慮し, PVA-ECC の負担応力を累加した形のせん断強度算定式を考える。PVA-ECC の負担応力はひび割れ面でのせん断応力が支配的であると考え，PVA-ECC の一軸引張強度と同値のせん断応力を累加する。したがって，アーチ・トラス式に日本建築学会終局強度型指針式 A 法を用いると，部材のせん断強度式は以下のように表せる。

$$V_u = b \cdot j_t \left(p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot\phi + \sigma_{max}^{ECC} \right) + \tan\theta (1-\beta) b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B / 2 \quad (1)$$

$$\tan\theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D \quad (2)$$

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

$$\leq 1$$

$$\cot\phi = \min\{2,\ j_t / (D\tan\theta)\} \quad (4)$$

ここで，

b ：部材幅

j_t ：主筋中心間距離

p_w ：肋筋比

σ_{wy} ：肋筋降伏強度

σ_{max}^{ECC} ：PVA-ECC の引張強度

D ：部材せい

ν ：PVA-ECC の圧縮強度の有効係数

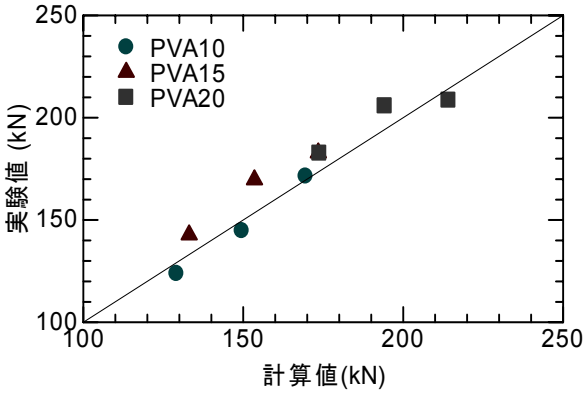
σ_B ：PVA-ECC の圧縮強度

L ：内法長さ

本試験体について，PVA-ECC の引張強度に，**表－3** に示す値を代入し算定したせん断強度計算値と実験値の比較を，**図－7** に示す。ただし，本提案式ではPVA-ECCの負担応力を累加する形を取っているので，PVA-ECC の引張強度時に肋筋が降伏している必要がある。PVA10 では引張強度時の歪が平均 0.10%であるので，引張強度時の応力と歪および 1/2 引張強度時の応力と歪を用いて直線補完し，肋筋の降伏歪 0.153%時の引張応力として 2.23MPa を計算に用いた。また，νには下記の CEB 式を用いた。

$$\nu = 3.68\sigma_B^{-0.333} \ (\sigma_B \text{の単位は kgf/cm}^2) \quad (5)$$

実験値と計算値の比の平均値は 1.03 で，本提案による算定式は概ね実験結果を表現できている。



図－7　実験値と計算値の比較

5. まとめ

(1) 繊維混入率および肋筋量を変動因子とした PVA-ECC の梁実験では，繊維混入率および肋筋の増加によりせん断強度が増大した。

(2) PVA-ECC の一軸引張試験では，繊維混入率の違いにより，引張強度時および 1/2 引張強度時の歪に明確な差異が認められた。

(3) 梁実験における最大荷重時のひび割れ面の直歪は，繊維混入率や肋筋量の違いによる差異は明確ではなく，せん断歪は繊維混入率による差が顕著であった。

(4) アーチ・トラス式に PVA-ECC のせん断応力（引張強度）を累加したせん断強度算定式により，実験結果を概ね評価することができた。

参考文献

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

2) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井　覚：PVA-ECC 梁部材のせん断性能に関する実験研究，日本コンクリート工学協会高靭性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，pp.87～92，2003.12

3) 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，No.1，pp.281～286，2003.7

4) Kabele, P.: New Developments in Analytical Modeling of Mechanical Behavior of ECC, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.3, pp.253-264, 2003