

論文 PVA-ECC 梁部材のせん断性状評価

清水 克将^{*1}・氏家 隆博^{*2}・金久保 利之^{*3}・閑田 徹志^{*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, 繊維混入率と筋量を変動因子とした梁試験体の曲げせん断実験及び PVA-ECC の一軸引張試験を行った。その結果, 著者らが提案した PVA-ECC 部材のせん断強度算定式の妥当性が認められた。また, 予亀裂を与えた PVA-ECC の一面せん断実験を行い, せん断強度と引張強度との比較検討を行った。

キーワード : 梁, 曲げ, せん断, 一面せん断

1. はじめに

近年, 一軸引張応力下で高い靱性を有する Engineered Cementitious Composites¹⁾ (以下, ECC) に代表される高靱性セメント複合材料を構造要素に使用するために, 鉄筋補強された ECC 部材の構造実験が行われている。これらは, エネルギー吸収部材等への適用を目的としているため, 曲げ破壊型の実験結果が多く, せん断設計法構築のためのバックデータが不足しているのが現状である。そこで著者らは, 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い, せん断強度算定式を提案した²⁾。本稿では, データの更なる蓄積を目的とし, より広範囲の筋量に対してせん断破壊型の試験体の加力実験を行うと共に, 曲げ降伏先行後せん断破壊する試験体の性状についても検討した。また, 先のせん断強度算定

式の提案では, ECC の引張強度に等しいせん断強度を累加する形としたが, これについての実験的な検討はされていなかった。本稿では, 予亀裂を与えた ECC の一面せん断実験を行い, 梁部材におけるひび割れ面での ECC のせん断強度に関する検討を行った。

2. 梁部材の曲げせん断実験

2.1 試験体・加力計測方法

試験体の形状は昨年報告したもの²⁾と同様, 断面が 180×280mm, せん断スパン比が 1.5 である。実験因子は, 筋比 (0.6%, 0.89%), 及び繊維混入率 V_f (1.0%, 1.5%, 2.0%) である。筋比 0.60% の試験体形状及び配筋を 図-1 に示す。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。曲げ降伏先行型試験体 F シリーズの主筋には SD390 を

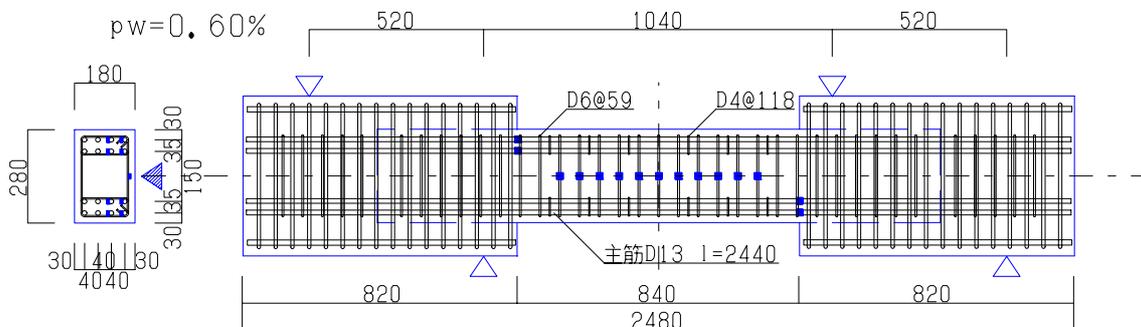


図-1 試験体形状・配筋図

*1 筑波大学大学院 (正会員)

*2 太平ホーム (株) (元筑波大学学生) (正会員)

*3 筑波大学 機能工学系講師 博士 (工学) (正会員)

*4 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)

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 (%)
MT-30	(モルタル)		61.0	28.6	SHD685	2-D4@47	0.30
MT-60						2-D6@59	0.60
MT-89						2-D6@40	0.89
PVA10-60	PVA	1.0	49.9	20.2	SHD685	2-D6@59	0.60
PVA10-89						2-D6@40	0.89
PVA10-89F						SD390	0.89
PVA15-60		1.5	50.3	19.4	SHD685	2-D6@59	0.60
PVA15-89						2-D6@40	0.89
PVA15-89F						SD390	0.89
PVA20-60		2.0	45.8	19.5	SHD685	2-D6@59	0.60
PVA20-89						2-D6@40	0.89
PVA20-89F						SD390	0.89

用いた。試験体一覧及び 100φ×200mm シリンダーによる圧縮試験結果を表-1 に示す。ここで ECC の配合は表-2 に示す $V_f=2.0\%$ の PVA-ECC (PVA20) の配合計画を元に、繊維のみを減じて他の V_f の ECC を配合した。また、比較のために PVA-ECC の繊維を除いたモルタル (MT) 試験体も作製した。鉄筋の引張試験結果を表-2 に示す。

加力方法は大野式の曲げせん断一方向載荷³⁾とし、部材角 1/20rad まで加力した後除荷した。

2.2 実験結果の概要

全ての試験体において、部材角 1/800rad までに曲げひび割れが発生し、1/200rad 程度でせん断ひび割れが順次発生した。実験結果一覧を表-4 に示す。なお、曲げ降伏先行型試験体 F シリーズは、1/20rad においても荷重は増加中であった。せん断破壊した試験体においては、繊維混入率

表-2 配合計画

	水結合 材比	砂結合 材比	V_f (%)	空気量 (%)
PVA20	0.42	0.77	2.0	10

表-3 鉄筋の引張試験結果

名称	降伏 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	降伏 歪 (μ)	破断 伸び (%)
D13 ^{*1}	438	175	2510	18.3
D13 ^{*2}	711	178	3850	10.8
D4 ^{*3}	358	193	1850	15.4
D6 ^{*4}	334	173	1940	17.9

*1 : F シリーズ用主筋 *2 : F シリーズ以外の試験体用主筋 *3 : $p_w=0.30\%$ 試験体用肋筋 *4 : $p_w=0.60\%, 0.89\%$ 試験体用肋筋

の増加、及び肋筋量の増加に伴い最大荷重時のせん断力及び部材角が増加傾向にある。

同一肋筋比の試験体において MT 試験体に対

表-4 梁実験結果一覧

試験体名	ひび割れ発生荷重(kN)		最大荷重時		限界変形時 ^{*1}		主たるせん断ひび割れ角度 ^{*2} ($^\circ$)	破壊形式 ^{*3}
	曲げ	せん断	せん断力 (kN)	部材角 ($\times 10^{-3}$ rad)	せん断力 (kN)	部材角 ($\times 10^{-3}$ rad)		
MT-30	9.7	96.3	177.7	13.7	—	—	29.1	S
MT-60	23.4	67.8	230.7	15.5	—	—	28.7	S
MT-89	50.2	70.3	277.1	18.3	—	—	35.1	S
PVA10-60	18.1	128.9	262.7	14.8	(210.2)	44.0	33.7	S
PVA10-89	25.1	130.2	317.9	19.0	(254.3)	47.5	34.6	S
PVA10-89F	26.1	94.9	259.0 ^{*4}	50.7 ^{*4}	—	—	36.5	F
PVA15-60	22.4	150.7	295.5	16.9	(236.4)	31.5	27.0	S
PVA15-89	39.5	143.9	343.9	23.3	—	—	34.1	S
PVA15-89F	31.0	166.7	269.7 ^{*4}	49.9 ^{*4}	—	—	31.0	F
PVA20-60	15.0	146.5	310.2	18.8	(248.2)	23.9	30.3	S
PVA20-89	19.1	163.4	341.2	19.2	(272.9)	43.1	34.9	S
PVA20-89F	24.7	178.1	272.4 ^{*4}	50.1 ^{*4}	—	—	36.1	F

*1 : 最大荷重の 80% まで荷重低下したとき *2 : 主だったせん断ひび割れの部材軸に対する角度

*3 : S はせん断破壊, F は曲げ降伏 *4 : 除荷時前 (1/20) の荷重

する最大荷重の増加量は、PVA10 試験体が 32.0kN ($p_w=0.60\%$), 40.8kN ($p_w=0.89\%$), 同様に PVA15 試験体が 64.8kN, 66.8kN, PVA20 試験体が 79.5kN, 64.1kN であった。この増加量を梁幅 (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 PVA10 試験体で 0.96MPa, 1.23MPa, PVA15 試験体で 1.95MPa, 2.01MPa, PVA20 試験体で 2.39MPa, 1.92MPa であった。

2.3 せん断力-部材角関係

全試験体のせん断力-部材角関係を図-2 に示す。図中には曲げひび割れ発生時, せん断ひび割れ発生時, 主筋降伏時, 肋筋降伏時, 最大荷重時, 限界変形時を示した。全ての試験体において肋筋の降伏が認められた。最大荷重後に急激な荷重低下を起している試験体について

は, ひび割れの拡大, 変形の局所化に対応している。F シリーズにおいては主筋が降伏し, その後肋筋の降伏で剛性は低下したものの, 荷重が漸増した。MT 試験体では最大荷重以降, 顕著な荷重低下は認められない。

3. PVA-ECC 部材のせん断強度評価法の検証

3.1 一軸引張試験

著者らが昨年提案したせん断強度評価法²⁾の検証を行なう。まず, 梁試験体と同バッチで作製した角柱くびれ型試験体を用いた一軸引張試験結果を報告する。一軸引張試験の試験体および加力計測方法は, 文献 4) 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

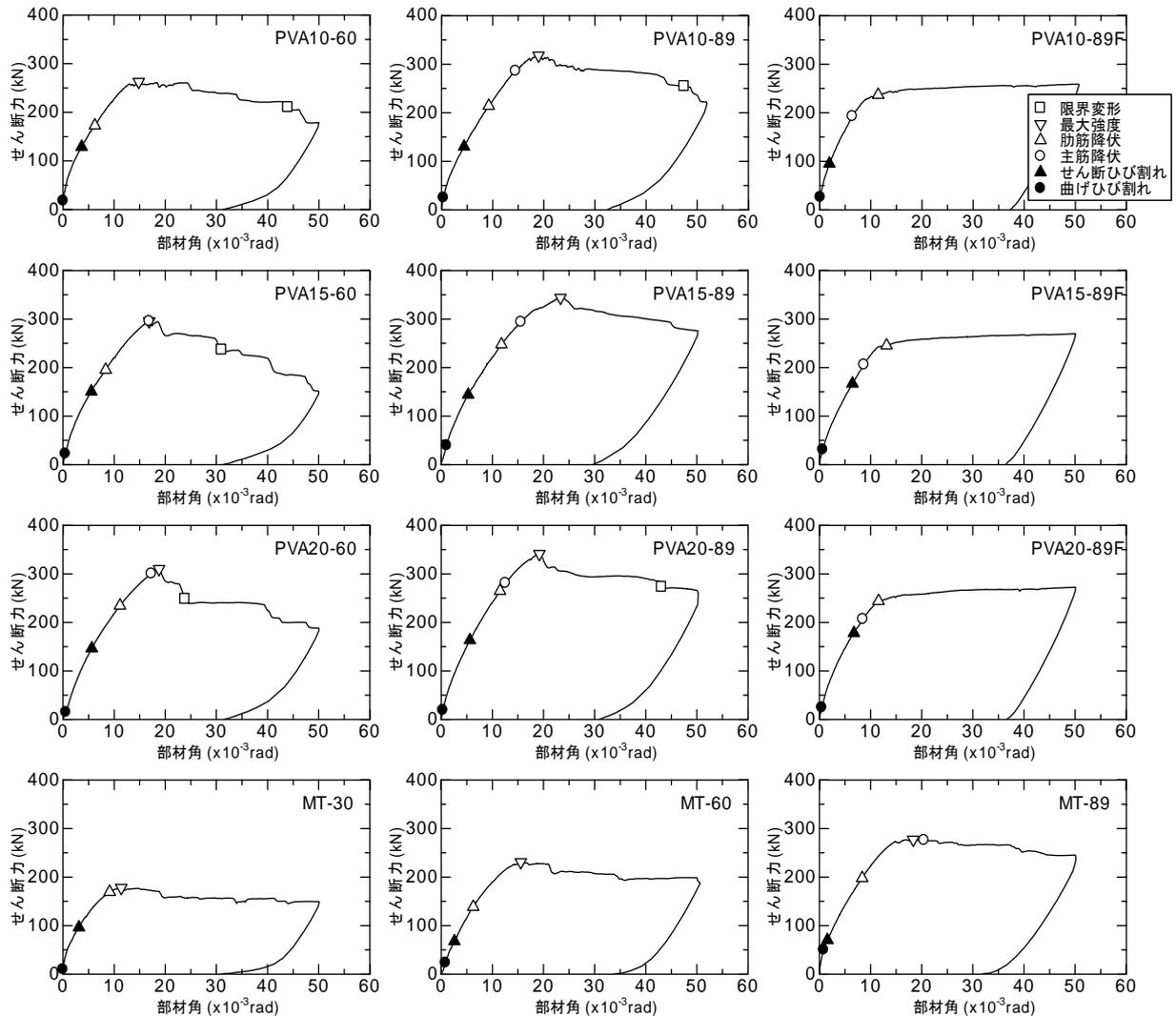


図-2 せん断力-部材角関係

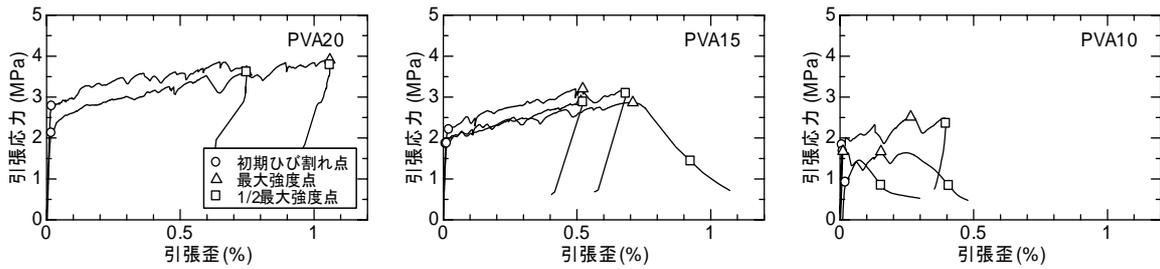


図-3 引張応力-歪関係

表-5 一軸引張試験結果

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	1.47	0.014	2.09	0.21	(1.05)	0.32
	変動係数(%)	33.2	52.3	28.7	37.7	—	44.9
PVA15	平均値	1.98	0.015	2.99	0.58	(1.50)	0.71
	変動係数(%)	9.9	41.8	6.3	18.9	—	28.5
PVA20	平均値	2.45	0.019	3.76	0.90	(1.88)	0.90
	変動係数(%)	19.0	4.6	5.6	24.4	—	24.3

を行うものである。引張応力-歪関係を図-3に、一軸引張試験結果を表-5に示す。繊維混入率の違いによる明確な差が認められた。

3.2 せん断強度評価法の検証

せん断強度評価算定式を以下に示す。

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

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

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

$$\leq 1$$

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

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} : 引張強度

D : 部材せい

v : 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

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

この評価法の概要は、PVA-ECC 部材のひび割

れ面におけるせん断強度を引張強度と同等として、日本建築学会 A 法に累加したものである。せん断強度評価法の検証結果を図-4に示す。曲げ強度計算値はPVA-ECCの応力-歪関係として圧縮側を圧縮強度及び圧縮強度時歪を頂点とする放物線モデル、引張側は引張強度を降伏応力とし 1/2 引張強度時歪を終局歪とする完全弾塑性モデルとして、断面曲げ解析により算出した。

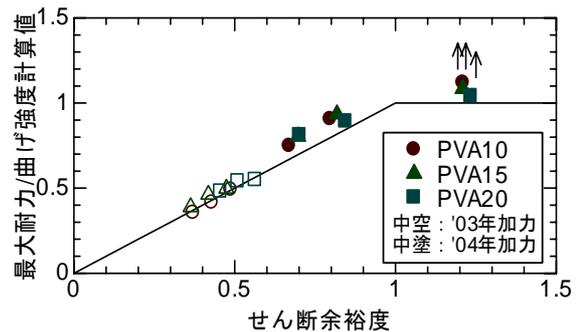


図-4 せん断強度評価法の検証

図中の矢印は、試験体 F シリーズの経験最大強度をプロットしている為、実際の最大耐力はこれよりも大きいことを示している。前年実施試験体分も含め、本提案式がせん断強度を良く模擬していることが分かる。また、破壊形式の区分も良い精度で評価できている。

4. 一面せん断実験

先に提案した梁部材のせん断強度算定式では、ECC の引張強度と等価なせん断強度を日本建築学会 A 法に累加している。これは、部材中のせん断ひび割れ面において、ECC が引張強度と等価なせん断応力を保持することを仮定している。ECC のひび割れ面におけるせん断伝達機構は、破壊力学的な検討⁵⁾や平板による純せん断加力⁶⁾等で検討されているが、直接的せん断実験が行われた報告例はない。本稿では、あらかじめ引張加力により予亀裂を導入した試験体に一面せん断加力を行い、ひび割れ面における ECC のせん断伝達の基本的性状の把握を試みた。

4.1 実験方法

形状及び加力・計測方法を図-5 に示す。試験体は梁試験体と同バッチの材料を用い、形状は 100×100×400mm の角柱試験体の中央部に深さ 30mm の切り欠きを設け、断面が 40×100mm である。加力方法は、ひび割れ面でのせん断伝達機構を検討するため、まず一軸引張加力により予亀裂を与えた後に一面せん断加力を行った。一軸引張試験方法は、M12 ネジ棒を介してユニバーサル試験機のヘッドチャックに端部支持条件をピン固定となるように設置し、静的载荷した。目視によりひび割れが断面全体に発生した時点で除荷し、その後、一面せん断加力を行った。変位計測は図-5 に示すようにトラス状に配したπ型変位計によりひび割れ幅、せん断ずれ変位を計測した。ここで、ひび割れ幅 u 及びせん断ずれ変位 v は以下の式により算出した。

$$u = (\delta_1 + \delta_2) / 2 \quad (6)$$

$$v = \frac{122}{70} \cdot \left(\delta_3 - \frac{100}{122} \left(\frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right) \right) \quad (7)$$

ここで、 δ_1 、 δ_2 : 上下のπ型変位計変位(mm)

δ_3 : 斜めのπ型変位計変位(mm)

4.2 実験結果

せん断力-せん断ずれ変位及びひび割れ幅関係を図-6 に、せん断加力後の写真 (PVA20-SH3) を図-7 に示す。荷重増加に伴い、せん断ずれ変位及びひび割れ幅が増加し、最大荷重付近で急

激に変形が進展して破壊に至った。本実験は引張加力によりひび割れを生じさせた後にせん断加力を行うため、ひび割れが閉じて噛み合いが生じていると推測される。また、引張加力時において二次曲げの影響を多大に受けた試験体 (PVA20-SH1) では、適切にせん断加力が行えなかった。しかしその他の試験体においては、切り欠き部にはほぼ直線状にひび割れが生じており (図-6)、またこのことは全 9 試験体中 6 体が直線的ひび割れ分布を示したことから、有効にせん断加力が行えていると考えられる。

4.2 引張強度とせん断強度の関係

一面せん断実験結果一覧を表-6 に、一軸引張試験により得られた引張強度とせん断強度の関

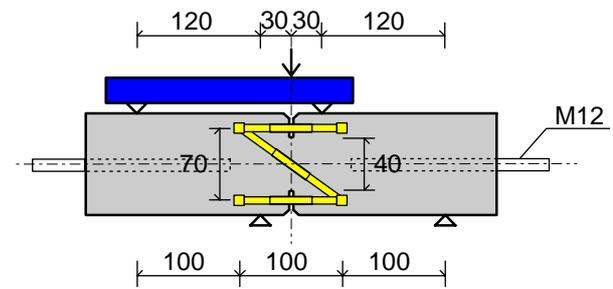


図-5 一面せん断加力方法

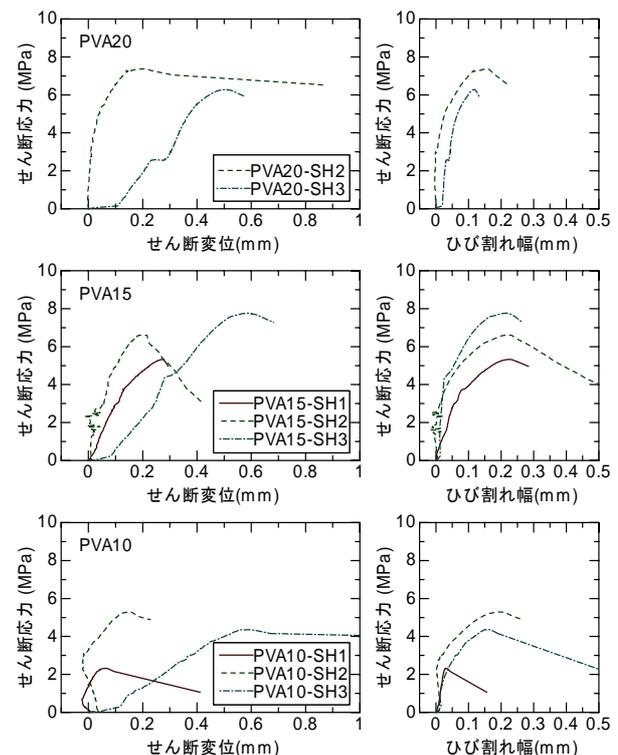


図-6 せん断力-せん断変位、ひび割れ幅関係

表一6 一面せん断試験結果

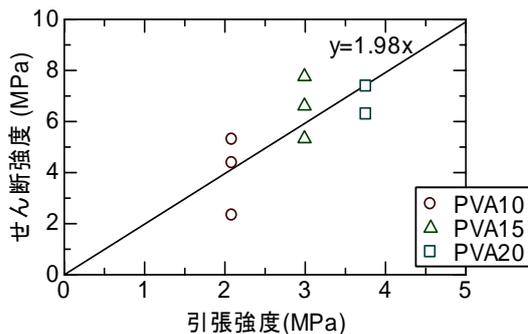
試験体名	引張加力		せん断加力		
	経験最大 応力 (MPa)	経験最大 変位 (mm)	最大荷重時		
			せん断強度 (MPa)	ひび割れ幅 (mm)	せん断変位 (mm)
PVA10-SH1	1.90	0.137	2.32	0.032	0.065
PVA10-SH2	1.75	0.169	5.29	0.199	0.152
PVA10-SH3	2.08	0.134	4.37	0.151	0.569
PVA15-SH1	2.39	0.104	5.33	0.228	0.273
PVA15-SH2	2.63	0.223	6.61	0.213	0.190
PVA15-SH3	3.23	0.162	7.76	0.215	0.585
PVA20-SH1	4.03	0.261	—*	—*	—*
PVA20-SH2	2.99	0.129	7.37	0.157	0.201
PVA20-SH3	2.91	0.091	6.28	0.117	0.501

* 有効にせん断加力が行えなかった



図一7 破壊例

係を図一8に示す。引張強度に比べせん断強度が2倍程度大きいですが、コンクリートの圧縮強度と引張強度の差のような違いはなく、応力レベルとしては同程度であるとみなせる。なお、今回のような一面せん断加力の場合、ひび割れ面のかみ合いによるせん断応力の増加分が大きいと考えられるため、実際の部材中におけるひび割れ面での挙動を模擬した一面せん断加力、すなわち、引張応力を与えた状態でのせん断加力を行うことで、ひび割れ面でのせん断強度と引張強度が同程度の値を示すものと考えられる。



図一8 引張強度とせん断強度の関係

5. まとめ

- (1) PVA-ECC 梁部材の曲げせん断実験を行った。せん断強度評価算定式により、せん断強度を精度良く評価できる。
- (2) PVA-ECC の一面せん断実験を行った。その結果、ひび割れ面でのせん断強度は一軸引張強度とほぼ同レベルの強度を有しているこ

とが分かった。

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 Eng., 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
- 3) 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
- 4) 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : HPRCC 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
- 5) 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
- 6) 金久保利之, 諏訪田晴彦, 福山 洋 : 高靱性セメント系複合材料を用いたパネルの純せん断性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), C-2 構造IV, pp.425-426, 2003.9