

論文 高靱性型セメント系複合材料を用いた梁部材の構造性能

蔵谷 幸憲^{*1}・福山 洋^{*2}・中野 克彦^{*3}・松崎 育弘^{*4}

要旨：本研究では、鉄筋コンクリート梁部材と高靱性型セメント系複合材料としてビニロン繊維を 1.5%混入したビニロン繊維補強モルタル（以下、PVA-ECC (Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite)）を用いた梁部材の曲げせん断実験を行い、PVA-ECC 梁と RC 梁を比較することで、PVA-ECC の構造部材への適用性を検討した。その結果、PVA-ECC のせん断補強効果は高く、RC と比較してひび割れの分散によるひび割れ開口幅の抑制効果が見られ、せん断耐力および靱性能の向上に効果があることを確認した。

キーワード：高靱性型セメント系複合材料、ビニロン繊維、靱性能、せん断補強効果

1. はじめに

高靱性型セメント系複合材料の特徴として、ひび割れ発生後の繊維による補強効果によりひび割れ面における応力伝達が存在し、ひび割れの分散効果、強度増加、靱性向上などの材料特性が挙げられる。その結果、高靱性型セメント系複合材料を構造部材として用いた場合、①引張靱性、②せん断耐力・せん断破壊後の靱性能、③付着性状、④エネルギー吸収能など、構造性能の向上を期待できる。こういった観点から、梁ヒンジ部や柱梁接合部、耐震壁などに高靱性型セメント系複合材料を適用し、これを材料特性を積極的に利用した構造デバイスとして機能させ、地震時の損傷を制御する方法が考えられる。しかし、国産の短繊維を用いた高靱性型セメント系複合材料の材料特性が明らかになりつつあるなか、高靱性型セメント系複合材料を構造部材に適用した場合の構造性能は明らかでない。そこで本研究では、RC梁部材とPVA-ECC梁部材の比較実験を行い、PVA-ECCを梁に用いた場合のせん断性状・付着性状および靱性能といった基本的な構造性能を把握することを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 試験体

表-1 に試験体一覧および図-1 に試験体配筋図を示す。試験体は実大の 1/3 スケールを想定した矩形梁で、梁幅(b)×梁せい(D)=200×270(mm)の矩形断面とし、せん断スパン a = 540mm(a/D=2.0)とした。表-1 中に試験体の断面図を示す。主筋およびせん断補強筋の配筋は、文献¹⁾²⁾の実験結果を参考にし、RC試験体において明確なせん断破壊先行型(No.1)・付着破壊先行型(No.5)の破壊モードとなるよう設計した。

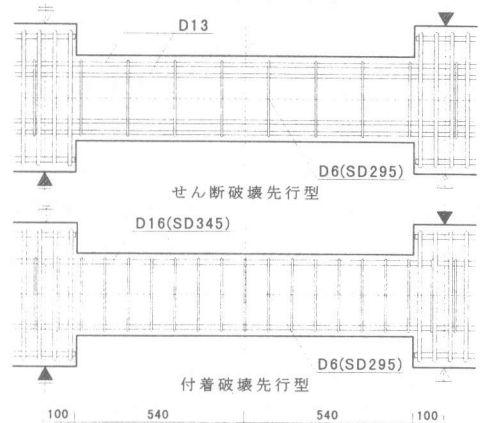


図-1 試験体配筋図

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻

*2 建設省建築研究所 国際地震工学部 主任研究員 工博

*3 東京理科大学助手 工学部建築学科

*4 東京理科大学教授 工学部建築学科 工博

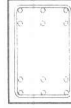
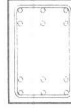
(正会員)

(正会員)

(正会員)

(正会員)

表－１ 試験体一覧

No		1	2	3	4	5	6	7
断面形状			$b \times D = 200 \times 270\text{mm}$ $a / D = 2.0$					
コンクリート	種類	RC	PVA-ECC			RC	PVA-ECC	ハイブリッド [*]
	Vf(%)	—	1.5			—	1.5	
	$\sigma_B(\text{MPa})$	34.0	53.3	43.2	46.7	35.9	51.5	35.0(57.2)
	$E_c(\text{GPa})$	23.6	18.5	14.6	16.4	23.1	16.2	22.3(17.0)
	配筋	3+3-D13			4-D16			3+3-D13
主筋	$\sigma_y(\text{MPa})$	397		760	397			
	pt(%)	1.69			1.38			1.69
	配筋	D6-@150			—	D6-@75		
補強筋	$\sigma_y(\text{MPa})$	272			—	272		
	pw(%)	0.21			0	0.43		
	計算結果	$Q_{mu}(\text{kN})$ ¹⁾	114		218	114	128	114
	$Q_{su}(\text{kN})$ ²⁾	90.3			58.7	138	122	
	$\tau_{bu}(\text{MPa})$ ³⁾	4.28			3.97	3.18	4.58	
	$\tau_f(\text{MPa})$	2.95		5.65	2.95	3.76	2.95	

1) RC規準曲げ略算式 2) 終局強度型設計・施工指針 セン断強度式A法非靱性 3) 同指針 付着強度式

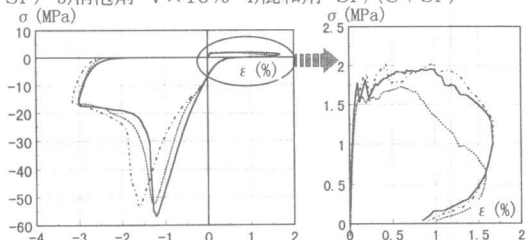
表－２ PVA-ECC 調合表

繊維名	水結合材比 ¹⁾ wt. (%)	繊維混入量 Vf vol.(%)	所要量							混和剤 ⁴⁾ SP (%)
			水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	シリカフューム SF (kg/m ³)	砂 S (kg/m ³)	繊維 Vf (g/m ³)	増粘剤 ²⁾ V (g/m ³)	消泡剤 ³⁾ (g/m ³)	
PVA(U-2)	45.0	1.5	424	788.8	197.2	394.5	19500	887.1	88.7	2.0

1) 水結合比 $(W+SP)/(C+SF)$ 2) 増粘剤 $V/(W+SP)$ 3) 消泡剤 $V \times 10\%$ 4) 混和剤 $SP/(C+SF)$

No.1 は上下主筋を 6-D13($pt=1.69\%$), セン断補強筋を 2-D6@15($pw=0.21\%$), No.5 は上下主筋を 4-D16($pt=1.38\%$), セン断補強筋を 2-D6@15($pw=0.43\%$)とした。PVA-ECC 試験体は No.1, No.5 を基準としてコンクリートを PVA-ECC に換えた No.2, No.6, さらにセン断補強筋のない No.4, No.2 の主筋の降伏点強度を高めて入力セン断力を高めた No.3 を計画した。また, No.7 は No.2 の両端ヒンジ部 (1D 区間, D: 梁せい) のみに PVA-ECC を用いた試験体である。RC と PVA-ECC 打ち継ぎ面にはエキスパンドメタルを用い, 打ち継ぎ面にズレが生じないようにした。

表－２に今回用いた PVA-ECC の調合表, 表－１中に材料試験結果を示す。ビニロン繊維は長さ 15mm, 直径 $40.8\mu\text{m}$ のものを使用し体積混入率は 1.5%とした。試験体打設は, ひび割れ観測面を下向きとした横打ちとし PVA-ECC を平滑に充填してゆき, 1 体につき 2 バッチ (1



図－２ PVA-ECC の材料特性

バッチにつき調合容量で 85 リットル) で打ち終えることを基本とし, 合計 10 回の混練により打設を行った。図－２に PVA-ECC の材料特性を示す。表－１中に示すように実験時の圧縮強度は RC で 34.0～35.9MPa, PVA-ECC で 43.2～53.3MPa であった。引張強度は文献³⁾の方法で行った結果, RC で約 3MPa, PVA-ECC で約 2MPa となり, PVA-ECC では引張歪が約 1.5%まで引張応力を保持する高い引張靱性を示す材料である。

2.2 実験方法

加力は, 大野式逆対称モーメント形式の正負交番漸増繰返し载荷とした。

表-3 実験結果一覧表

No	曲げひび割れ		せん断ひび割れ		付着ひび割れ		鉄筋降伏 ¹⁾		部材降伏 ²⁾		最大耐力		破壊モード
	Q _{mc} (kN)	δ _{mc} (mm)	Q _{sc} (kN)	δ _{sc} (mm)	Q _{bc} (kN)	δ _{bc} (mm)	Q _{by} (kN)	δ _{by} (mm)	Q _y (kN)	δ _y (mm)	Q _{max} (kN)	δ _{max} (mm)	
1	19.3	0.54	58.2	3.63	-	-	97.7	6.23	-	-	110	8.61	せん断破壊
2	34.6	1.85	63.8	3.98	-	-	88.2	6.56	127	13.5	141	21.6	曲げ降伏
3	29.9	1.51	63.6	4.18	-	-	-	-	-	-	191	21.6	せん断付着破壊
4	25.0	1.15	68.9	4.61	-	-	86.2	6.22	135	13.9	147	32.8	曲げ降伏後せん断破壊
5	24.4	0.48	72.3	2.95	133	8.74	109	6.08	-	-	141	10.0	付着割裂破壊
6	19.8	0.84	58.9	3.83	-	-	123	10.4	153	13.9	159	32.1	曲げ降伏
7	4.9	0.15	78.7	5.17	-	-	104	7.22	129	10.7	145	42.5	曲げ降伏

1)鉄筋降伏は、主筋が初めて降伏至みに達した点とした。 2)部材降伏は、主筋が降伏至みに達し、梁部材のせん断力-相対変位曲線上より剛性が明らかに低下する点を明記した

3. 実験結果

表-3に実験結果一覧表を示す。

3.1 変形状態および破壊性状

(1) せん断破壊先行型試験体 (No. 1, 2, 3, 4)

各試験体とも部材角(以下, R)が 1/200rad.に向かうサイクルにおいて、曲げひび割れ、せん断ひび割れと順次発生した。

図-3に No.1 の荷重(Q)-相対変位(δ)曲線と No.2 包絡線比較、図-4に No.2 の Q-δ 曲線、写真-1に No.1, 写真-2に No.2 の最終破壊状況を示す。

RC 部材である No.1 は、R=1/170rad.においてせん断補強筋が降伏し、その直後部材降伏することなく最大耐力を向かえた。その後試験体中央から加力点を結ぶせん断ひび割れが卓越し

せん断破壊に至った。一方 No.2 は、R=1/165rad.において主筋が降伏し、R=1/80rad.において部材降伏した。その後、R=1/50rad.において最大耐力を向かえ、その後の変形においても耐力低下は見られなかった。また、繰返し履歴による耐力低下は同サイクルの処女履歴に対して2~7%程度で、繰返し履歴による耐力低下はほとんど見られなかった。また、破壊経過ではせん断補強筋が降伏した R=1/100~1/50rad.以降において、細かいひび割れが多数、分散して入り、変形の増大に伴いひび割れの数も増す傾向が確認できた。

図-5に No.4 の Q-δ 曲線と No.2 の包絡線比較、写真-3に No.4 の最終破壊状況を示す。せん断補強筋の無い No.4 は R=1/33rad.にお

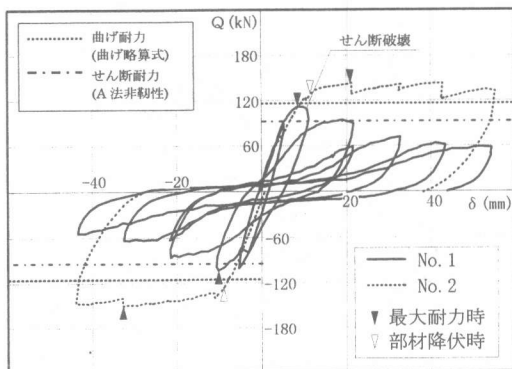


図-3 No. 1, 2 Q-δ 曲線比較

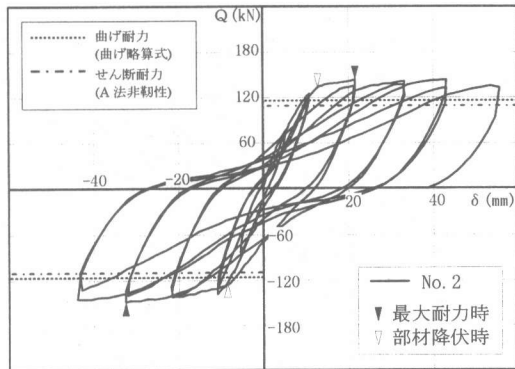


図-4 No. 2 Q-δ 曲線

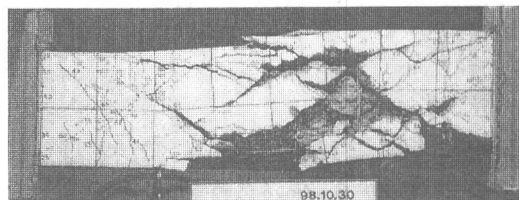


写真-1 No. 1 最終破壊性状

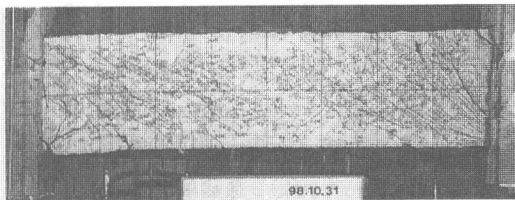


写真-2 No. 2 最終破壊性状

いてせん断破壊に至るまでは、耐力、変形状は No.2 と同様の傾向を示した。破壊経過においても、せん断破壊に至るまでは No.2 と同様細かいひび割れが多数、分散して入る傾向が確認された。

(2) 付着破壊先行型試験体 (No. 5, 6)

図-6 に No.5 の $Q-\delta$ 曲線と No.6 の包絡線比較、図-7 に No.6 の $Q-\delta$ 曲線、写真-4 に No.5、写真-5 に No.6 の最終破壊状況を示す。RC 部材である No.5 は、 $R=1/100\text{rad}$. に向かうサイクルにおいて上端主筋沿いの付着ひび割れが顕著となり、最大耐力を向かえ付着割裂破壊に至った。付着破壊後の $R=1/50\text{rad}$. 以降のサイクルでは最大耐力の 20%以上の耐力低下が見られた。一方 No.6 は、顕著な付着ひび割れの発生は見られず、 $R=1/77\text{rad}$. において部材降伏し、最大耐力を向かえた $R=1/33\text{rad}$. に至るまで耐力低下は見られなかった。また、繰り返し履歴による耐力低下も同サイクルにおける処女載荷の 4%程度で、No.2 同様繰り返し履歴による耐力低下はほとんど見られなかった。

(3) ハイブリッド試験体 (No. 7)

図-8 に No.7 の $Q-\delta$ 曲線と No.2 の包絡線

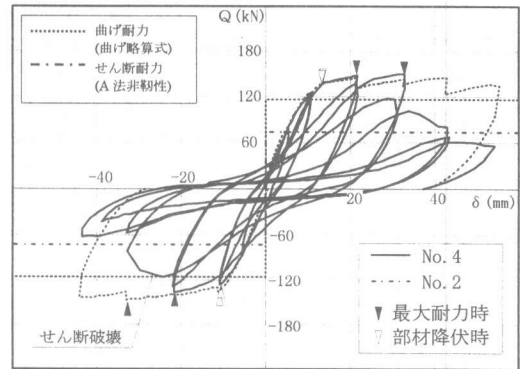


図-5 No. 2, 4 $Q-\delta$ 曲線比較

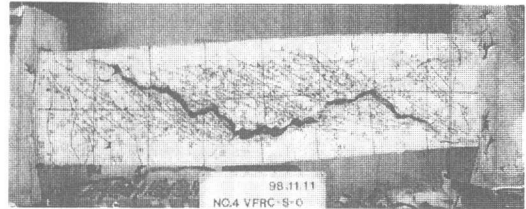


写真-3 No. 4 最終破壊性状

比較、写真-6 に No.7 の最終破壊状況を示す。両端ヒンジ部のみに PVA-ECC を用いた No.7 は、 $R=1/150\text{rad}$. において主筋が降伏し、 $R=1/100\text{rad}$. において部材降伏した。その後 $R=1/33\text{rad}$. に向かうサイクルにおいてせん断補強筋が降伏し、ヒンジ部におけるひび割れ分散が確認された。一方、コンクリート部では大き

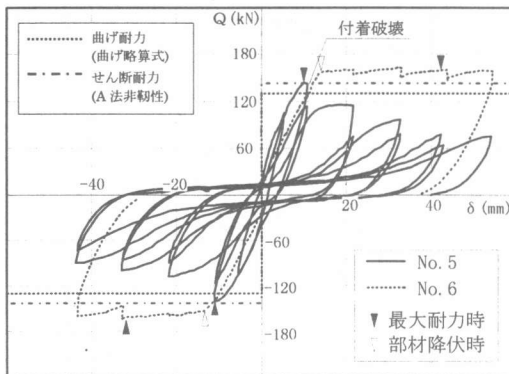


図-6 No. 5, 6 $Q-\delta$ 曲線比較

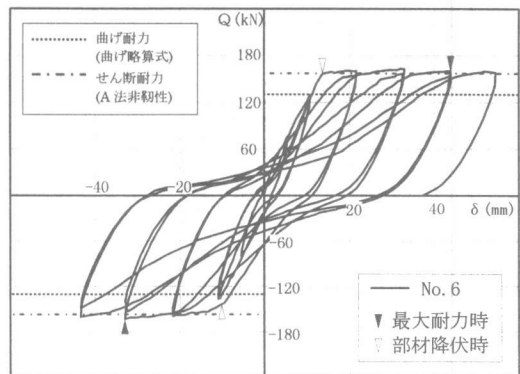


図-7 No. 6 $Q-\delta$ 曲線

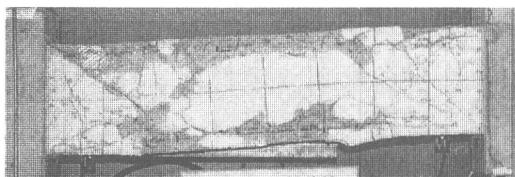


写真-4 No. 5 最終破壊性状

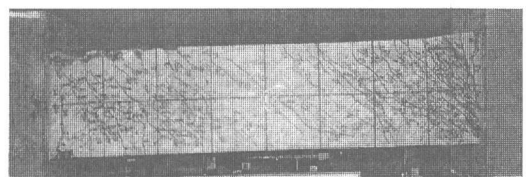


写真-5 No. 6 最終破壊性状

なひび割れは発生せず、最大ひび割れ幅で0.6mm程度であった。また履歴性状はNo.2, No.6同様曲げ降伏型を示しており、ヒンジ部のみにPVA-ECCを用いても良好な靱性能が得られることがわかった。

3. 2 PVA-ECCのせん断性状への影響

図-9にせん断破壊先行型試験体であるNo.1～No.4のひび割れ開口幅の推移状況(試験区間において最大開口幅を記録したもので、計測はクラックスケールによる)を示す。せん断破壊したNo.1およびNo.4に関しては、せん断破壊を呈したサイクルにおいてひび割れ幅が大きく進展していることがわかる。しかし、曲げ降伏したNo.2においては大きなひび割れ進展はなく、最大でも0.35mm程度で繊維混入によりひび割れが分散することにより、ひび割れ開口幅の抑制効果が高いことがわかる。

図-10に、No.1, No.2およびNo.7のせん断補強筋の歪み分布を示す。せん断初ひび割れが発生した $R=1/200\text{rad.}$ においては、せん断補強筋の歪み分布に大きな差異は見られない。しかし、 $R=1/100\text{rad.}$ においてせん断破壊したNo.1においては、この時点でせん断補強筋は降伏歪みに達している。一方PVA-ECCを使用しているNo.2では、 $R=1/100\text{rad.}$ においてまだすべてのせん断補強筋は降伏歪みに達しておらず、部材降伏した $R=1/80\text{rad.}$ 程度で降伏歪みに達した。No.2では試験区間全体にわたり、せん断補強筋の歪みに増加傾向が見られ、繊維混入によるひび割れ分散の影響が現れている。またNo.7では、PVA-ECCを用いたヒンジ部付近においてせん断補強筋の歪みに増加傾向が見ら

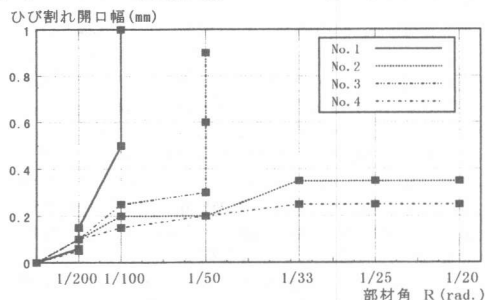


図-9 ひび割れ開口幅推移

れ、一方RC部分のせん断補強筋の歪みが抑制されていることから、ヒンジ部においてひび割

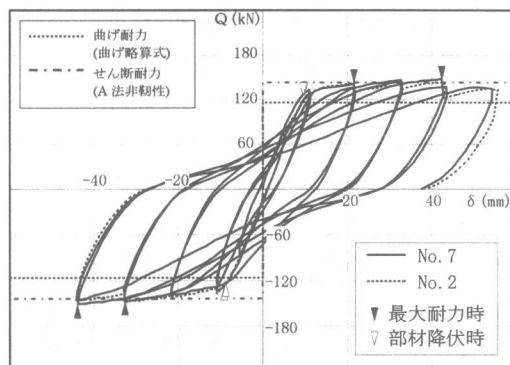


図-8 No. 2, 7 Q- δ 曲線

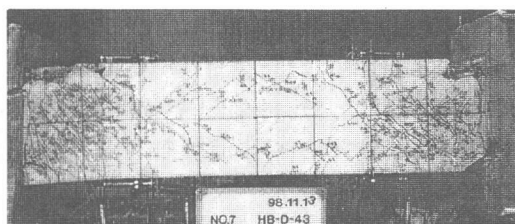


写真-6 No. 7 最終破壊性状

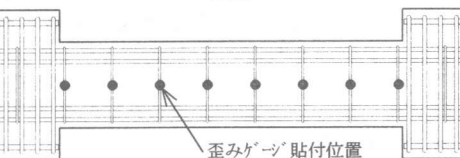
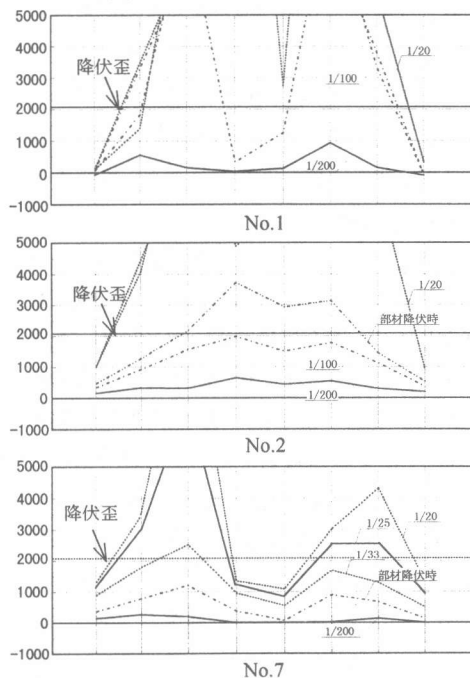


図-10 せん断補強筋の歪み分布(No.1,2)

れが集中していることがわかる。

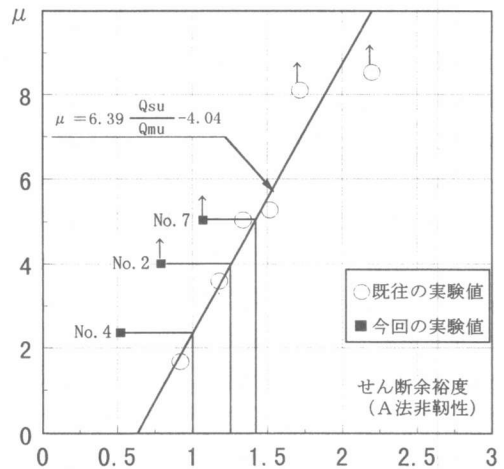
4. 繊維混入によるせん断補強効果

表－4 にせん断破壊先行型試験体である No.2,4,7 の限界塑性率 (μ) と A 法非靱性式によるせん断余裕度を示す。表－4 中の矢印は、実験時に限界変形に達しなかったためそれ以上の値であることを示している。図－11 には、既往の研究^{1),2)}の限界塑性率とせん断余裕度との関係を示す。ここでは、今回実施した RC 梁に対して、PVA-ECC 梁がどの程度のせん断補強効果を示したかについて推定する。なお、本実験結果のせん断余裕度は RC として計算している。限界塑性率は、せん断耐力が試験体の経験した最大耐力の 80%に低下した時の変形を限界変形とし、これを部材降伏時変形で除したものである。既往の研究^{1),2)}では、せん断余裕度をを用いた靱性能の定量化を行っており、実験値の直線回帰により曲げ降伏するために最低必要なせん断余裕度を示している。本研究ではこの中からせん断補強筋の降伏点強度が 300MPa 程度およびコンクリート圧縮強度が 42MPa のものを取り出し、直線回帰を行った。図－11 中に本論での回帰式を示す。

本研究で得られた曲げ降伏型の試験体における限界塑性率がこの回帰直線上にあると仮定して算出したせん断余裕度を表－5 に示す。表中に示す Σpw は得られたせん断余裕度を A 法非靱性式により逆算したもので、せん断補強筋と PVA-ECC による補強効果を示すものである。 Σpw からせん断補強筋比を減じた pwf は PVA-ECC による補強効果を示しており、せん断補強筋のない No.4 が、 $pwf=0.37\%$ になっていることから、コンクリート圧縮強度が 40MPa 級およびせん断補強筋が 300MPa 級の RC 梁に換算すると、0.4%程度のせん断補強効果があると思われる。

5. まとめ

鉄筋コンクリート梁部材と高靱性型セメント



図－11 限界変形率とせん断余裕度

表－4 限界変形率とせん断余裕度

No	Q_{mu} (kN)	Q_{su} (kN)	$e \delta y$ (mm)	δu (mm)	Q_{su}/Q_{mu}	μ
2	113.78	90.26	13.45	54.00 ↑	0.79	4.01 ↑
4	113.78	58.70	13.93	32.84	0.52	2.36
7	113.78	121.81	10.71	54.00 ↑	1.07	5.04 ↑

表－5 PVA-ECC による補強効果

No	算出したせん断余裕度	Σpw (%)	pwf (%)
2	1.26	0.57 ↑	0.36 ↑
4	1.00	0.37	0.37
7	1.42	0.70 ↑	0.27 ↑

系複合材料としてビニロン繊維補強モルタルを適用した梁部材の比較実験を行った結果、PVA-ECC を用いた梁部材は、RC 部材でせん断破壊先行型および付着破壊先行型で設計した場合においても良好な靱性能が得られることがわかった。その要因として、繊維混入によるせん断耐力の増加、ひび割れの分散およびひび割れ開口幅の抑制といったせん断補強効果が確認された。

【謝辞】本研究は、「高引張強度・高靱性コンクリートのハイブリッド構造への利用研究委員会」の活動の一環として行ったものである。

【参考文献】1) 平川勝基, 松崎育弘, 渡辺英義: 鉄筋コンクリート梁部材の靱性評価に関する実験研究－せん断余裕度の評価方法と靱性との関係－その 1 実験概要及び結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.733, 1992.5. 2) 渡辺英義, 松崎育弘, 平川勝基: 鉄筋コンクリート梁部材の靱性評価に関する実験研究－せん断余裕度の評価方法と靱性との関係－その 2 靱性能の定量化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.735, 1992.5. 3) 佐藤幸博, 福山洋, 諏訪田晴彦: 高靱性セメント材料の構造物への利用に関する基礎研究 (その 1 繊維補強モルタルの引張・圧縮繰り返し加力実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.931, 1998.9.