繊維補強コンクリートを用いた短スパン梁の曲げせん断挙動に 論文 関する実験研究

西川 恭平^{*1}・磯 雅人^{*2}・郷 雅紀^{*1}・徳橋 一樹^{*3}

要旨: PVA 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を把握するために繊維混入 率を変動要因とした短スパン梁試験体の曲げせん断実験を行った。せん断実験では, PVA 繊維 補強によりせん断耐力が向上し, せん断補強に効果があることを示した。PVA 繊維補強された RC 梁のせん断耐力式として,終局強度型耐震設計指針式のトラスの項に PVA 繊維補強コンクリ ートの見かけの引張応力を累加した式を提案した。本実験の範囲内では,おおむね実験値を精 度良く評価できた。曲げ実験では, PVA 繊維の繊維体積混入率を増加させることにより靭性能 およびエネルギー吸収能力を向上できることが確認された。

キーワード: PVA 繊維補強コンクリート,短スパン梁,曲げせん断挙動,繊維体積混入率

1.はじめに

阪神大震災では,新耐震以降の建物においては, 人命保護の目的はおおむね達せられた。しかし,そ の後の補修または補強のための修復費用がかかる などの問題も大きくとりざたされた。そのため,被 災時の建物の損傷を軽減し,応答を制御することの 必要性が喚起された。また,その後の性能設計の導 入より,部材に生じる変形または応力に応じた「損 傷状態の定量的評価」が求められていると同時に 「建物の損傷制御技術」の開発が急務とされている。 以上のような背景から筆者らは,損傷・変形が集中 する境界梁 (短スパン梁)の損傷の軽減を目的にコ ンクリート中に短繊維(ポリビニルアルコール繊維 (以下, PVA 繊維))を混入した短スパン梁のせん 断実験を実施し,従来のRC部材に比較して損傷を 軽減でき、PVA 繊維がせん断補強に効果を発揮する ことの結果を得た¹⁾。しかしながら,繊維体積混入 率を変動させた場合の構造性能に与える影響は不 明である。本研究では,変動要因を繊維体積混入率 とした場合の短スパン梁の構造性能を把握するた め,曲げおよびせん断実験を実施し,その構造性能 に与える繊維体積混入率の影響を把握することを 目的とした。また,比較のため繊維を混入していな



試験体 表 -1

*1 福井大学大学院 工学研究科建築建設工学専攻 (正会員) *2 福井大学 工学部建築建設工学科講師 博士(工学) (正会員) *3 敦賀セメント(株) 事業企画室企画グループ 博士(工学) (正会員)

NO.	試験体名	水粉体比 水セメント	水ヤメント比	細骨材率	空気물	水	セメント	細	材	相景材	混和材-1	混和材-2	混和剂	繊維	消泡剂
			312/12/100				27.21	S1(4割)	S2(6割)	144 19 19	(石灰石微粉末)	(膨張材)	760-14713		/3/0/13
		(%)	(%)	(%)	(%)		単位量(kg/m ³) 単位量(g/m ³)							単位量(g/m ³)	
1	RC-0.2-F													Ν	
2	RC-0.4-F	31.1	60.0	50.0	2.00	171	262	321	481	812	258	30.0	4.13	\backslash	4.13
3	RC-0.6-F														
4	PVA0.5-0.2-F	30.6	60.0	55.0	2.00	168	262	350	525	725	258	30.0	5.50+0.55*	6.50	13.8
5	PVA1.0-0.2-F	30.7	60.0	55.0	2.00	169	262	347	520	719	258	30.0	6.05	13.0	12.1
6	PVA1.5-0.2-F	30.7	60.0	55.0	2.00	169	262	344	516	713	258	30.0	5.78+0.27 *	19.5	12.1
7	RC-0.2-S	31.1	60.0	50.0	2.00	171	262	321	481	812	258	30.0	4.13	/	4.13
8	PVA0.5-0.2-S	30.6	60.0	55.0	2.00	168	262	350	525	725	258	30.0	5.50+0.55 *	6.50	13.75
9	PVA1.0-0.2-S	30.7	60.0	55.0	2.00	169	262	347	520	719	258	30.0	6.05	13.0	12.10
10	PVA1.5-0.2-S	30.7	60.0	55.0	2.00	169	262	344	516	713	258	30.0	5.78+0.27 *	19.5	12.1
1) 混和剤は単位水量の一部とする															
2) 膨張材はセメントの一部とする															
*:フロー調整のため混和剤を後添加した															

表 2 コンクリート調合表

表 3 鉄筋材料試験結果一覧

/	降伏強度	降伏歪	引張強度	ヤング係数	
	(N/mm^2)	(µ)	(N/mm^2)	$\times 10^{5} (N/mm^{2})$	
主筋 D13(SD345)	358	2010	521	1.71	
主筋 D13(SHD685)	760	3980	972	2.00	
補強筋 D6(SD295A)	393	2100	511	1.87	

NRC 試験体の実験も同時に行い比較・検討する。

2.実験概要

表 1 に試験体一覧,図 1 に試験体図を示す。試 験体の共通要因は断面 b×D=175mm×270mm,せん 断スパン比 a/D=1.5 である。曲げシリーズの主筋は 曲げ破壊を先行させるため上下端ともに 4-D13(SD3 45)を,せん断シリーズはせん断破壊を先行させるた め上下端ともに高強度鉄筋4+2-D13(SHD685)を使用 した。変動要因は繊維体積混入率(V_f)とし,V_fを 0. 5%,1.0%,1.5%の3 水準変動させた。また,繊維 の補強効果を明確にするために,RCの基準試験体 も同時に作製し,比較・検討することとした。RC の基準試験体は,曲げシリーズではせん断補強筋比 (p_w)を 0.2%,0.4%,0.6%の3 水準変動させ,せん 断シリーズでは, $p_w=0.2\%$ とした。

試験体数は,曲げシリーズではRC 試験体3体, PVA 試験体3体の計6体,せん断シリーズでは, RC 試験体1体,PVA 試験体3体の計4体を計画した。以上,試験体総数は10体である。コンクリートの調合表を表2に示す。PVA 繊維補強コンクリートの調合はコンクリートの強度及び粘性を調整するために石灰石微粉末を使用した。また,乾燥収縮を抑制するために膨張材を,繊維混練による空気量の増加を抑制するために消泡剤を使用した。繊維

表 4 コンクリート材料試験結果一覧

	-1-1				N 元
NO	材齢	圧縮強度	曲げ強度	割裂引張強度	ヤング係数
NO.	(日)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	$\times 10^4 (N/mm^2)$
1,2,3	75	39.9	5.29	2.27	2.95
4	73	48.8	6.29	2.73	2.73
5	81	37.8	7.35	2.75	2.75
6	81	39.7	8.68	3.13	3.13
7	33	39.7	4.14	2.21	2.80
8	37	44.9	4.76	2.77	2.85
9	40	33.9	5.57	2.62	2.72
10	41	34.5	5.76	2.92	2.56





		r				社会人				
No.		hn	美教祖							
		#	最大	507J	田げ降伏的刀	でん断終局前7		173		
	試験体名	方向	_e Q _{max}	e max	,Q _{my} :(3)式	_ケース1 ケース2 ケース3 。Qt(1)式				
			(kN)	(mm)	(kN)	(kN)				
4	RC-02-F	(+)	102	7.14		117				
•	100 012 1	(-)	-101	-7.94						
2	RC-0.4-F	(+)	110	16.20		159				
		(-)	-101	-8.23						
3	RC-0.6-F	(+)	110	24.70		200				
-		12	-114	-20.04	93.3					
4	PVA0.5-0.2-F	(+)	-113	-8 21		126	162	155		
E	PVA1.0-0.2-F	(+)	117	16.42		445	454	444		
9		(-)	-114	-8.20		115	191	144		
6	PVA1.5-0.2-F	(+)	111	8.30		117	153	146		
•		(-)	-110	-13.34						
7	RC-0.2-S	\sim	106	5.39		117				
8	PVA0.5-0.2-S	7	162	10.40	207	122	159	152		
9	PVA1.0-0.2-S	Ζ	150	7.39	231	110	146	139		
10	PVA1.5-0.2-S	Ζ	140	9.46		111	147	140		
ケース1:日本建築学会終局強度型指針式A法(非靭性式)により算出した値										
ケース2:修正A方式(非靭性式)に _{FRC,mean} を用いて算出した値										
ケース3:修正A方式(非初性式)に =====を用いて算出した値										

の練り混ぜは,アジテーター車に繊維を手投入し, 撹拌することにより作製した。表3に鉄筋材料試験 結果一覧,表4にコンクリート材料試験結果一覧を 示す。繊維補強コンクリートの圧縮強度,曲げ強度,



150

100

Q(kN)

割裂引張強度は,若干ば らつきがみられるが材齢 とともに強度が上昇する 傾向が見られる。表 5 に 繊維の力学的特性を示す。 繊維補強コンクリートに 使用した PVA 繊維は, 繊維長 L=30mm,直径 =660µm である。図 3 に 100mm × 100mm × 400m mのコンクリートおよび PVA 繊維補強コンクリ

ート供試体の2点集中荷重による曲げ応力度(σ_f) -中央変位(δ)関係を示す。図4に 100mx 200mmの 円柱供試体のコンクリートおよびPVA 繊維補強コン クリートの圧縮応力度(σ) - ひずみ度(ε)関係を示す。 V_fを増加させることにより,曲げひび割れ後および 圧縮強度後の靭性を向上できることがわかる。加力 模式図を図2に示す。加力は大野式による逆対称モ ーメント加力とした。曲げシリーズは正負交番漸増 繰り返し載荷とし,部材角により制御を行った。載 荷履歴は1/200(rad.)を正負1回,1/100,1/50,1/ 33(rad.)を正負2回ずつ繰返し,1/25(rad.)を正負1 回繰り返して終了とした。せん断シリーズは一方向 単調載荷とした。

3.実験結果

表6に実験結果および計算結果一覧を示す。

3.1 破壊性状

写真 -1 に最終破壊状況の一例を示す。曲げシリー



200 Q(kN)

PVA0.5-0.2-S

RC 0.2 S(せん断引張破壊)

壊) PVAO.5 0.2 S(せん断引張破壊) 写真 1 最終破壊状況

ズのRC試験体は,いずれも主筋降伏後に主筋に沿った付着ひび割れが顕著になり,曲げ降伏後の付着破壊を示した。一方,PVA試験体は主筋降伏後にせん断ひび割れの開口が顕著になり,曲げ降伏後のせん断破壊を示し,RC試験体と異なる破壊性状を示した。これは繊維補強により付着耐力がせん断耐力よりも大きく向上したためと考えられ,そのため破壊モードがせん断破壊に移行したと考えられる。せん断シリーズのRC試験体およびPVA試験体はせん断ひび割れを横切るせん断補強筋が降伏することにより終局に至るせん断引張破壊の様相を示した。また,PVA試験体のひび割れ幅は,RC試験体に比べて小さく,損傷を軽減できることがわかる。

3.2 変形性状

図 5, 図 6 に曲げシリーズの RC 試験体および P VA 試験体のせん断力(Q) 相対変位(δ)関係の包絡 線を示す。RC の基準試験体は, pwの増加とともに 靭性能およびエネルギー吸収能力が向上することが わかる。PVA 試験体も RC 試験体と同様に, Vfの増



加とともに靭性能およびエネルギー吸収能力が向上 することがわかり,曲げ挙動においても短繊維によ る補強効果が確認された。図 7 にせん断シリーズの RC 試験体および PVA 試験体のせん断力—相対変位 関係を示す。PVA 試験体のせん断ひび割れ後の剛性 及び最大耐力は RC 試験体に比べて大きく,繊維に よる補強効果が確認された。

3.3 耐力

図 8 に曲げシリーズ試験体及びせん断シリーズ 試験体の最大耐力(_{eQmax}) 繊維体積混入率(V_f)関 係を示す。曲げシリーズの PVA 試験体の曲げ終局耐 力は, RC 試験体とほぼ同程度であり, 明確な繊維 補強による効果が確認できなかった。せん断シリー ズでは, PVA 試験体は RC 試験体に比べて耐力が向 上し短繊維補強によるせん補強効果が確認された。 V_fによる影響では、V_fの増加とともにせん断終局耐 力が減少する傾向が見られる。これは, V_f =0.5%の 試験体のコンクリート強度が 44.9(N/mm²)と他の試 験体に比べて約 10(N/mm²)ほど高く , そのことが大 きく影響していると考えられる。また, V_f=1.5%の 試験体が V_f=1.0%の試験体に比較して若干,耐力が 低下している。これはV_f=1.5%の繊維補強コンクリ ートのワーカビリティが悪く,試験体の打設にやや 難があり,繊維の分散性が良好でなかったと推察さ れる。なお,曲げシリーズのV_f=1.5%の試験体も同 様の状況であった。

4.検討

4.1 せん断終局耐力

図 9 にせん断補強に寄与する PVA 繊維補強コンク リートの見かけの引張強度(σ_{FRC})と V_fとの関係を 示す。 σ_{FRC} は,式(1)による計算値と実験値が等価で あると仮定して,逆算して求めた値である。式(1)は, 日本建築学会終局強度型指針式A法(非靭性式)の 項にせん断補強に寄与する PVA 繊維補強コンクリ ートの見かけの引張強度(σ_{FRC})を累加したもので ある。

・修正 A 方式(非靭性式)

$${}_{c}Q_{su1} = b \cdot j_{t}(p_{w} \cdot \sigma_{wy} + \sigma_{FRC}) \cot \phi$$

 $+ \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_{B} / 2$
(1)

ただし,

 $v = v_{0} = 0.7 - \sigma_{B} / 2000$

 $\beta = \frac{(1 + \cot^{2} \phi)(p_{w} \cdot \sigma_{wy} + \sigma_{FRC})}{v_{0}\sigma_{B}}$
1

ここに,

_{FRC}: せん断補強に寄与する PVA 繊維

補強コングリートの見かけの引張強度

その他の記号および計算方法は文献 2) を参照。

図より PVA 繊維補強コンクリートの見かけの引張 強度(σ_{FRC})は,0.559~0.753(N/mm²)の範囲となり, σ_{FRC} の平均値(σ_{FRC_mean})は 0.692(N/mm²),下限値 (σ_{FRC_min})は 0.559(N/mm²)であった。V_f =0.5%から 1.0%までの範囲では, σ_{FRC} はほぼ同程度であり V_f の違いによる影響は認められなかった。一方,施工 性に難があったV_f=1.5%ではV_f=0.5%,1.0%に比べ て σ_{FRC} が低下し,施工性による影響が認められた。 図 40 にせん断シリーズのせん断終局耐力実験値 ($_eQ_{su}$)と式(1)による計算値($_eQ_{sul}$)との比較を示 す。なお 検討にあたっては式(1)の σ_{FRC} を0(N/mm²), σ_{FRC_mean} , σ_{FRC_min} の3種類を用いて検討を行った。 $\sigma_{FRC}=0(N/mm²)$ として PVA 繊維補強コンクリートの



補強効果を無視した場合,実験値は計算値を上回り 安全側に評価した。 σ_{FRC_mean} を代入して算出した場 合には,せん断終局耐力の実験値と計算値を適合さ せるように σ_{FRC} を決定したため実験値は計算値 1.0 付近に分布する。また, σ_{FRC_min} を代入して算出した 場合には,比較値の平均値は 1.07 でやや安全側の評 価となった。

4.2 限界部材角

図 41 から図 44 に曲げシリーズの各 PVA 試験体 のせん断力(Q)と相対変位(δ)関係を示す。限界 部材角実験値(_eR_u)を 印,限界部材角計算値(_eR_u) を 印,最大耐力(_eQ_{max})を 印で示す。限界部材 角実験値(_eR_u)は降伏後のせん断力(Q)が最大耐 力(_eQ_{max} 印)の 80%に低下した時点の部材角と



定義する。限界部材角計算値 ($_{c}R_{u}$) は,トラスの項 に繊維補強コンクリートの見かけの引張強度(σ_{FRC}) を累加した式(2)による耐力が式(3)による曲げ降伏 耐力の 8 割に低下した時点での部材角と定義した。 ここに σ_{FRC} の引張強度は安全側の評価とするため $\sigma_{FRC_min}=0.559(N/mm^2)を用いて検討を行った。また,$ 式(3)の曲げ降伏耐力はRC試験体とPVA 試験体の曲 $げ終局耐力実験値(<math>_{e}Q_{max}$)にあまり差がなかったこと から繊維の影響は無視した。

・修正A方式(靭性式)

$$_{c}Q_{su2} = b \cdot j_{t}(p_{w} \cdot \sigma_{wy} + \sigma_{FRC}) \cot \phi$$

 $+ \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_{B} / 2$
ただし,
(2)



=(1.0 -15R_p) 0 0 < R_p 0.05
 =0.25 0 0.05 > R_p
 ここに、
 FRC: せん断補強に寄与する PVA 繊維
 補強ン/リートの見かけの引張強度
 σ_{FRC_min}=0.559(N/mm²)を代入
 その他の記号および計算方法は文献 2) を参照。

<u>・曲げ降伏耐力略算式³⁾</u>

cQ_{my}=2・M_y/h=2×(0.9a_t・_y・d)/h (3) ここに, h:スパン(=810mm) 記号は文献 3)を参照。

包絡線の耐力低下部分は, PVA0.5-0.2-F 試験体を 除き,(2)式によりをおおむね安全側に評価できてい る。PVA0.5-0.2-F 試験体は,他のPVA 試験体に比べ て曲げ降伏後のせん断破壊が早期に起こり,早い段 階でせん断ひび割れが口開いてしまった。そのこと が耐力を早期に低下させた要因と考えられる。

RC 試験体の限界部材角実験値($_{eR_u}$)とせん断補 強筋比(p_w)との関係を図 45 に,限界部材角実験 値($_{eR_u}$)と繊維体積混入率(V_f)との関係を図 46 に示す。 p_w の影響では,限界部材角は p_w の増加と ともにも上昇する傾向が認められる。 V_f による影響 では, $V_{f=0.0\%}$ の RC 試験体を除けば V_f の増加とと もに限界部材角の値も上昇する傾向が認められる。 PVA 試験体の限界部材角が RC 試験体に比べて,若 干,低い値となっているが,これは RC 試験体の破 壊が曲げ降伏後の付着破壊を,PVA 試験体は曲げ降 伏後のせん断破壊を示し,破壊モードが異なったた めと推察される。図 47 に限界部材角の実験値($_{eR_u}$) と計算値($_{eR_u}$)との比較を示す。図より,RC 試験 体は実験値を評価できているが,PVA 試験体の比較 値(=実験値計算値)の平均は0.77 でやや危険側に 評価される傾向がある。原因として前述したとおり 破壊モードの違いによる影響と考えられる。

5.まとめ

- (1)せん断実験では, PVA 試験体のせん断耐力は RC 試験体に比べて向上し, 短繊維によるせん断補 強効果が確認された。また, V_F=1.5%の試験体は 施工性の影響もあり, V_fの違いによるせん断耐 力への影響は明確に確認できなかった。
- (2) PVA 繊維補強された RC 梁のせん断耐力式として, 終局強度型耐震設計指針式のトラスの項に PVA 繊維補強コンクリートの見かけの引張強度 (σ_{FRC})を累加した式を提案した。PVA 繊維補強 コンクリートの見かけの引張強度に, σ_{FRC_min}=0.559(N/mm²)を使用することにより,概 ね実験値を安全側に評価できることを示した。
- (3) 曲げ実験では, PVA の繊維体積混入率を増加さ せることにより靭性能およびエネルギー吸収能 力を向上できることを示した。

参考文献

- 西川恭平,磯雅人他:繊維補強コンクリートを 用いた短スパン梁のせん断挙動に関する実験研 究 その1,その2,日本建築学会大会学術梗概 集,C構造,pp99~102,2005,9
- 2) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局 強度型耐震設計指針・同解説,1990
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規 準・同解説,1999