

論文 画像相関法を用いた鋼繊維補強 RC はりのせん断耐荷機構の評価

阿部 加苗^{*1}・柳田 龍平^{*2}・中屋 柊人^{*3}・五十嵐 心一^{*4}

要旨：繊維混入率 v_f , せん断補強鉄筋比 r_w , 引張鉄筋比 p_w , せん断スパン比 a/d が鋼繊維補強 RC はりのせん断耐荷機構に与える影響を明らかにするために, 鋼繊維補強 RC はりのせん断載荷試験を行った。斜めひび割れの開口と進展を詳細把握するための画像解析から, 繊維が負担するせん断抵抗を算出し, 破壊の進行によるその変化を定量化した。その結果, せん断補強鉄筋と鋼繊維を併用した場合, 繊維が負担するせん断抵抗は斜めひび割れ発生後から破壊に至るまで保持されることを明らかにした。また, v_f , r_w , p_w , a/d によらず, 繊維が負担するせん断抵抗の破壊の進行に伴う変化は, ビーム作用と同様であることを明らかにした。

キーワード：鋼繊維補強 RC はり, 画像相関法, せん断耐荷機構, せん断載荷試験

1. はじめに

短繊維補強コンクリート (FRC) は, ひび割れ抵抗性等に優れているため, 既存部材の引張補強やかぶりの剥落防止など多くの目的から, その利用拡大が期待されている。一方, 各指針で FRC 構造部材の設計指針が示されているものの, 特にせん断設計においては各 FRC の特性の違いなどから指針ごとに繊維混入率やせん断補強鉄筋の使用の可否等の適用範囲が異なり, その適用範囲外の FRC の積極的な利用について課題が残っている。より合理的な設計のためには, そのせん断挙動に関する知見の蓄積が必要といえる。

現在, 土木学会の設計指針 (案) ¹⁾ では, FRC のせん断力に対する安全性を評価するにあたって, せん断ひび割れ発生後のフリーボディの力の釣合を考える修正トラス理論に基づいた式(1)が提案されている。また, 繊維補強の効果について, 実験データを安全側に近似する観点で, V_{fd} を式(2)の V_{cd} と等価と規定している。

$$V_u = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} \quad (1)$$

$$V_{cd} = 0.2f'_{cd} p_w^{1/3} (d/1000)^{1/4} b_w d \quad (2)$$

ここで, V_u : せん断耐力, V_{cd} : コンクリートが負担するせん断耐力, V_{sd} : せん断補強鉄筋が負担するせん断耐力, V_{fd} : 繊維が受け持つせん断耐力, f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度, p_w : 引張鉄筋比, d : 有効高さ, b_w : ウェブ幅である。

また, 児玉ら ²⁾ は, 引張鉄筋比 p_w , せん断スパン比 a/d をパラメータに短繊維補強 RC はりのせん断載荷試験を行い, p_w および a/d がせん断強度に影響を与える可能性があることを明らかにした。さらに, 渡辺ら ³⁾ は, 鋼繊維補強 RC はりにおいて, せん断補強鉄筋を併用することで, 鋼繊維の補強効果が増加し, V_{fd} が V_{cd} を上回ることがあることを明らかにした。また, 掛井ら ⁴⁾ は,

超高強度繊維補強コンクリートにおいて, p_w および a/d がせん断耐力に影響を与えることを明らかにしている。このように, 普通強度や超高強度レベルの繊維補強 RC はりにおいて, 引張鉄筋比, せん断スパン比, およびせん断補強鉄筋比はせん断強度に影響することが明らかにされているものの, 繊維が受け持つせん断抵抗のはりの破壊の進行に伴う変化を直接的に検討した事例はない。

そこで, 本研究では, 繊維混入率, せん断補強鉄筋比, 引張鉄筋比, およびせん断スパン比をパラメータに繊維補強 RC はりのせん断載荷実験を行う。その際, 画像相関法 (DIC) を用いて斜めひび割れの開口幅と長さを把握し, 繊維が斜めひび割れ面で受け持つせん断抵抗を算出することで, 繊維補強がせん断耐荷機構に与える影響を明らかにすることを目的とする。繊維混入率とせん断補強鉄筋比がパラメータの供試体は, 圧縮強度が 70MPa 程度の高強度レベル, 引張鉄筋比とせん断スパン比がパラメータの供試体においては, 120MPa 以上の超高強度レベルの供試体を作製した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1 にコンクリートの配合を示す。vf10rw30 は配合 vf10, vf15rw24 と vf15rw30 は配合 vf15, pw292ad35 と pw378ad35 と pw292ad25 は配合 pw を使用した。表-2 に各供試体の寸法を, 図-1 に供試体形状を, 表-3 に使用した鋼材の公称断面積 A_s と降伏強度 f_y をそれぞれ示す。供試体 vf10rw30, vf15rw24, vf15rw30 のせん断補強鉄筋には, 異形鉄筋 D6 を使用した。試験のパラメータは, 繊維混入率 (1.0vol%, 1.5vol%), せん断補強鉄筋比 (0.24%, 0.30%), 引張鉄筋比 (2.92%, 3.78%), せん断スパン比 (2.5, 3.5) とし, 計 6 体の供試体を作製

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科地球社会基盤学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系助教 (正会員)

*3 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類 土木防災コース

*4 金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系教授 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
			W	B			S	G1	G2	F	SP1 (C×%)	SP2 (B×%)
				H	N	SF						
vf10	40	60.0	175	438	-	-	969	332	332	75.0	1.40	-
vf15	40	64.6	175	438	-	-	1034	292	292	118.0	1.35	-
pw	25	55.8	190	-	684	76	736	298	298	118.0	-	2.50

W: 水道水, B: 結合材, H: 早強ポルトランドセメント, N: 普通ポルトランドセメント, SF: シリカフェューム, S: 細骨材, G1: 粗骨材 ($G_{\max}=20\text{mm}$), G2: 粗骨材 ($G_{\max}=13\text{mm}$), F: 鋼繊維 (両端フック型 30mm), SP1: 混和剤 (カルボン酸エーテル系), SP2: 高強度コンクリート用混和剤 (カルボン酸エーテル系)

表-2 供試体諸元

供試体名	h (mm)	d (mm)	b _w (mm)	a (mm)	s (mm)	a/d	p _w (%)	v _f (%)	r _w (%)	側面形状	断面形状
vf10rw30	300	250	150	700	140	2.8	2.70	1.0	0.30	(B)	(1)
vf15rw24	300	250	150	700	175	2.8	2.70	1.5	0.24	(A)	(1)
vf15rw30	300	250	150	700	140	2.8	2.70	1.5	0.30	(B)	(1)
pw292ad35	250	200	130	500	-	3.5	2.92	1.5	0.00	(C)	(2)
pw378ad35	250	200	130	700	-	3.5	3.78	1.5	0.00	(C)	(3)
pw292ad25	250	200	130	700	-	2.5	2.92	1.5	0.00	(D)	(2)

h: はり高さ, d: 有効高さ, b_w: ウェブ幅, a: セン断スパン, s: セン断補強鉄筋配置間隔, a/d: セン断スパン比, p_w: 引張鉄筋比, v_f: 繊維混入率, r_w: セン断補強鉄筋比

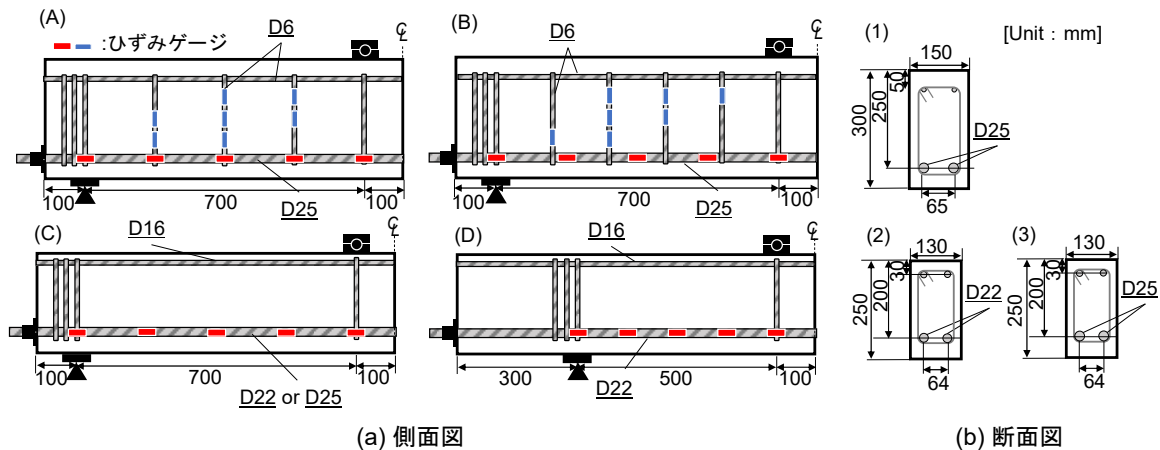


図-1 供試体概要図

表-3 使用した鋼材の物性

供試体名	圧縮鋼材			引張鋼材		
	鋼材	断面積	降伏強度	鋼材	断面積	降伏強度
		mm ²	N/mm ²		mm ²	N/mm ²
vf10rw24	D6	31.7	326	D25	490.9	1287
vf15rw24						
vf15rw30						
pw292ad35	D16	198.6	395	D22	380.1	1128
pw378ad35				D25	490.9	1112
pw292ad25				D22	380.1	1128

した。なお、全ての供試体において、供試体端部にアンカープレートとナットを配置し、引張鉄筋の定着を確保した。

2.2 載荷方法と測定項目

油圧式の載荷試験機により静的4点曲げ試験を行った。載荷点と支点には支圧版を設置し、2枚のテフロンシートの上にグリスを挟み込んだ減摩パッドを用いて支圧版

と供試体との間の水平方向の摩擦を低減した。測定項目は、荷重、スパン中央と支点における鉛直変位、引張鉄筋とセン断補強鉄筋のひずみとした。引張鉄筋のひずみは、支点直上から載荷点までを4等分するようにそれぞれ5か所の位置で測定した。セン断補強鉄筋のひずみは、引張鉄筋の高さから $d/2$ だけ圧縮鉄筋側に離れた高さ、その高さから 50mm だけ圧縮鉄筋側、引張鉄筋側にそれぞれ離れた高さにおいて測定した。

2.3 斜めひび割れ挙動の評価方法

はりに生じる斜めひび割れの幅、長さを把握するために、実験時の撮影画像を対象に画像相関法に基づく解析を行う。DICでは、変形前の供試体のデジタル画像をサブセットと呼ばれる微小領域に分割し、供試体の変形後に類似する輝度パターンのサブセットを探し出し、その2次元的な移動量を取得する。本研究では、対象面をランダムな白黒パターンに塗装し、載荷の各段階で、載

表-4 はりの載荷試験と材料試験の結果

供試体名	V_u	V_{dia}	材料試験値			
			f'_c	f_t	E_c	G_F
	kN		N/mm ²		kN/mm ²	N/mm
vf10rw24	199.0	83.0	70.4	3.9	32.7	5.8
vf15rw24	210.0	100.0	71.0	3.9	31.3	6.5
vf15rw30	195.0	105.0	71.0	3.9	31.3	6.5
pw292ad35	125.7	101.0	136.8	6.1	40.1	4.2
pw378ad35	119.7	86.2	136.8	6.1	40.1	4.2
pw292ad25	195.2	87.0	124.5	5.7	40.0	4.2

V_u : せん断耐力, V_{dia} : 斜めひび割れ発生時のせん断耐力, f'_c : 圧縮強度, f_t : ひび割れ発生強度, E_c : 弾性係数, G_F : 破壊エネルギー (引張軟化曲線下の面積)

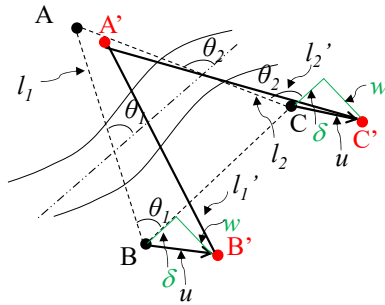


図-2 斜めひび割れ幅の算出 4)

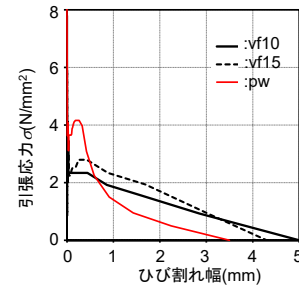
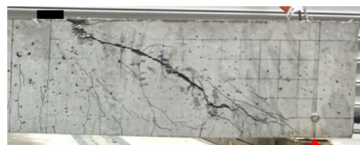


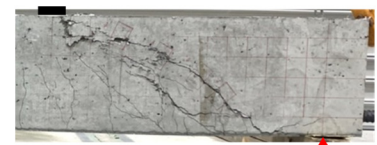
図-3 FRCの引張軟化曲線



(a) vf10rw30



(b) vf15rw24



(c) vf15rw30



(d) pw292ad35



(e) pw378ad35



(f) pw292ad25

図-4 破壊後のはりのひび割れ性状

荷によるはりの変形に応じた白黒パターンの移動量を高解像度カメラで撮影しておき、その後DICにより、斜めひび割れ幅と長さを算出した。

田所ら⁵⁾は図-2に示すようなひび割れを跨ぐ任意の3点の移動量を用いて、ひび割れ開口変位 w とせん断ずれ変位 δ の計算を式(3)と式(4)によって求めた。本研究では、この方法により w と δ を求め、斜めひび割れ幅 u はこの合成成分として算出した。なお、弾性ひずみを微小なものとみなし、無視することとした。

$$w = \frac{(l'_1 - l_1) \cos \theta_2 - (l'_2 - l_2) \cos \theta_1}{\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_1} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{(l'_1 - l_1) \sin \theta_2 - (l'_2 - l_2) \sin \theta_1}{\sin \theta_2 \cdot \cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2} \quad (4)$$

ここで、 w : ひび割れ開口変位, δ : せん断ずれ変位, l_1 : 直線ABの長さ, l_2 : 直線ACの長さ, l'_1 : 直線A'B'の長さ, l'_2 : 直線A'C'の長さ, θ_1 : 斜めひび割れと直線ABがなす角度, θ_2 : 斜めひび割れと直線ACがなす角度である。

斜めひび割れ長さは、圧縮鉄筋と引張鉄筋の間に生じた主たる連続的なひび割れの総延長距離とした。

3. 実験結果

3.1 RC棒部材のせん断破壊挙動

試験結果および材料試験結果を表-4に示す。切り欠きはりの3点曲げ試験とその逆解析により得られた引張軟化曲線(引張応力-ひび割れ幅関係)をそれぞれ図-3に示す。曲げ試験は、JCI-S-002-2003「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」に従って行い、軟化曲線はFEMプログラムを用いた逆解析によって推定した。

図-4に破壊後の供試体の写真を示す。vf15rw30を除いた全ての供試体において、斜めひび割れが貫通すると同時に荷重が急激に低下する斜め引張破壊となった。なお、せん断補強鉄筋を有する3体の供試体では、はりが最大荷重に至る前に複数箇所でせん断補強鉄筋が降伏したことを確認している。vf15rw30では、斜めひび割れの

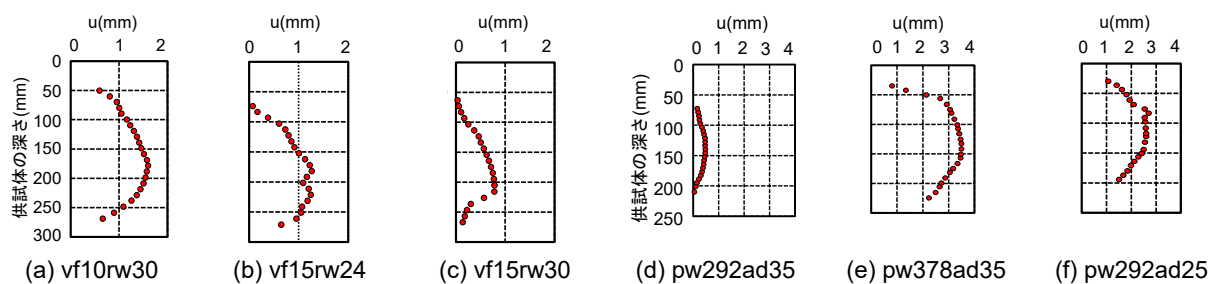


図-5 最大荷重時の斜めひび割れ幅 u の分布

■ : 最大荷重時

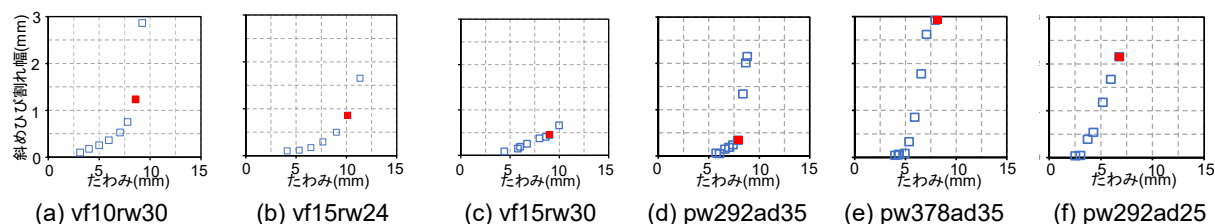


図-6 斜めひび割れ幅の平均値の推移

■ : 最大荷重時

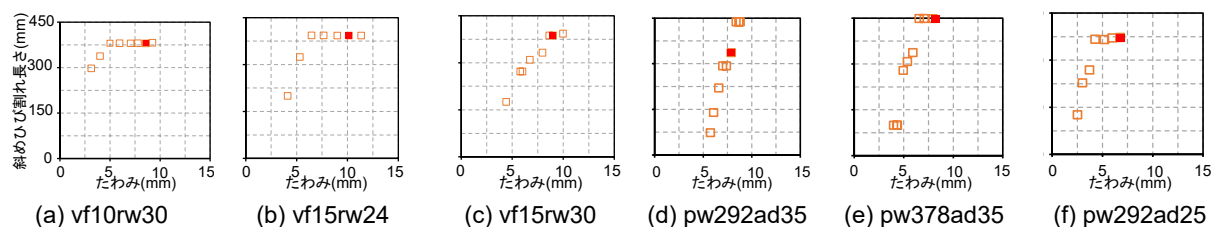


図-7 斜めひび割れ長さの推移

急激な進展はなく、載荷板近傍のコンクリートの圧壊が生じた。

3.2 破壊に支配的な斜めひび割れの挙動

図-5 に最大荷重時における破壊に支配的な主たる斜めひび割れの斜めひび割れ幅の分布を示す。vf15rw30は、vf10rw30 と vf15rw24 と比べて、斜めひび割れ幅が小さくなる傾向がみられた。鋼繊維とせん断補強鉄筋が増えた効果からひび割れの開口が抑制されたといえる。また、pw292ad35 においても、pw378ad35 と pw292ad25 に比べて、ひび割れ幅が小さくなる事が確認された。引張鉄筋比の減少、およびせん断スパン比の増加により、ひび割れの開口が抑制されたものと考えられる。

図-6 にたわみの増大に伴う斜めひび割れ幅の推移を、斜めひび割れ幅の平均値とたわみの関係として示す。ここで、斜めひび割れ幅の平均値とは、圧縮鉄筋と引張鉄筋との間に生じた斜めひび割れ幅分布を平均化したものである。全ての供試体において、ひび割れ幅が徐々に増大する挙動がみられる。また、vf15rw30を除く全ての供試体において、最大荷重直前または直後は、わずかなたわみの増大でひび割れが大きく開口することがわかる。

図-7 に斜めひび割れ長さの推移を示す。pw292ad35を除く斜め引張破壊となった供試体は、最大荷重前のある段階からひび割れの長さが一定の値を示す傾向がみ

れる。図-6 のひび割れ幅の推移と合わせて考えると、はりの最大荷重に近い段階においては、ひび割れ進展よりも開口が顕著に現れるといえる。一方、pw292ad35 は、最大荷重に至った直後に斜めひび割れが一気に開口するとともに進展したことが確認された。せん断圧縮破壊となった vf15rw30 は、他の供試体に比べて、荷重増加による斜めひび割れの進展が遅いことがわかる。このことから、せん断補強鉄筋比と繊維混入率が大きい場合、ひび割れの開口だけでなく、ひび割れの進展も抑制されることが示唆される。

3.3 斜めひび割れ面での繊維によるせん断抵抗

(1) 算出方法

本研究では、繊維が斜めひび割れ面で発揮するせん断抵抗 V_f の算出を行った。図-8 にその概要を示す。まず、田所ら⁵⁾のひび割れ開口変位とずれ変位の計算方法を用いて、主たる斜めひび割れの斜めひび割れ幅 u 分布を算出した。その後、Jongvitsakul ら⁶⁾と同様に、図-3 の材料試験で得た FRC の引張軟化曲線より、 u 分布を鋼繊維が受け持つ引張応力 σ 分布に変換し、微小区間で算出した斜めひび割れ幅と長さを用いて Jongvitsakul ら⁶⁾の式(5)から求めた値を V_f とした。なお、既往の研究⁶⁾では、式(5)からはりの最大荷重直前の V_f を算出することで、繊維が負担するせん断耐力を評価しているが、本研究で

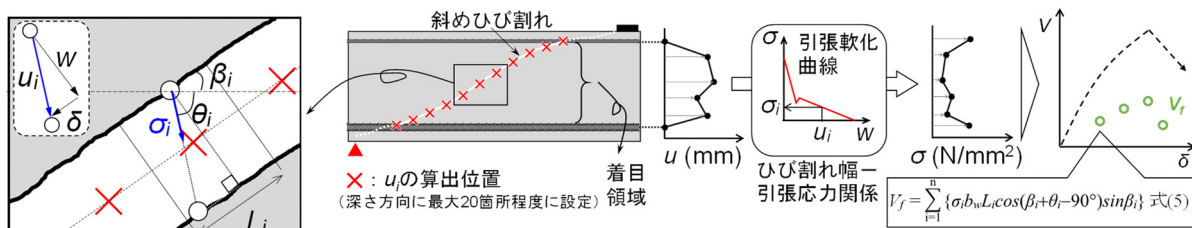


図-8 V_f の算出方法

---: V ○: V_f ×: 斜めひび割れ発生

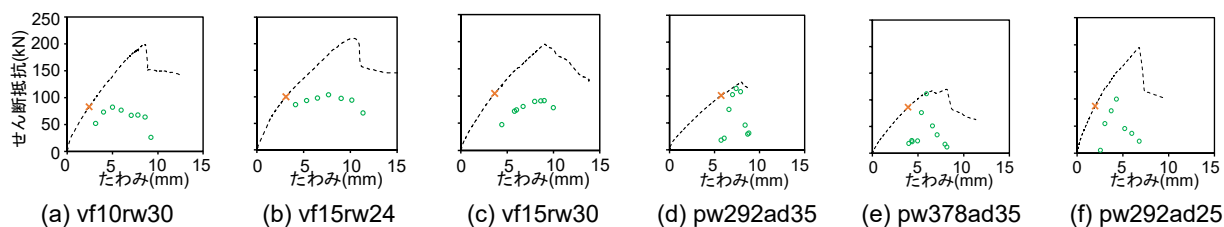


図-9 V_f の推移

は斜めひび割れ発生後の各段階でのひび割れ幅と長さを
用いて式(5)から V_f を求め、その変化を定量化した。

$$V_f = \sum_{i=1}^n \{ \sigma_i b_w L_i \cos(\beta_i + \theta_i - 90^\circ) \sin \beta_i \} \quad (5)$$

ここで、 σ_i : ある微小区間の斜めひび割れを架橋する鋼
繊維の引張応力、 b_w : 部材幅、 L_i : ある微小斜めひび割
れ区間の長さ、 β_i : 主ひずみ方向の角度、 θ_i : 斜めひび
割れ角度である。

(2) 繊維量およびせん断補強鉄筋比が与える影響

図-9 に前述の方法で求めた V_f の推移を示す。図-
9(a), (b), (c)より、vf10rw30 と vf15rw24 は最大荷重前
に V_f がやや減少または保持する傾向があるが、vf15rw30
は最大荷重まで V_f が徐々に増加する傾向が確認された。
図-6 および図-7 より、vf15rw30 は最大荷重までひび
割れ幅がそれほど開口せず、すなわち繊維が受け持つ引
張応力 σ が大きいまま、斜めひび割れが進展し続けるた
め、 V_f が最大荷重まで増加したと考える。一方、繊維量
が少ない vf10rw30 は、ある段階から斜めひび割れの進
展が止まり、ひび割れ幅のみが増大する傾向がみられた。
このひび割れの開口により引張軟化が進み、鋼繊維が受
け持つ引張応力 σ が減少したことから、 V_f が徐々に減少
したと考えられる。同様に、せん断補強鉄筋比が小さい
vf15rw24 でも、ひび割れの進展が止まるため、 V_f が最大
荷重まで増大し続けず保持した。

以上のことから、鋼繊維補強 RC はりでは、鋼繊維と
せん断補強鉄筋の併用効果により、破壊に至るまでの間、
斜めひび割れ発生時のせん断力と同程度に V_f が保持また
は増大する可能性があることが明らかとなった。

(3) 引張鉄筋比が与える影響

図-9(d), (e)より、2 体とも斜めひび割れ発生以降に
 V_f が増大していき最大荷重前にピークを迎え、その後一
気に減少する傾向がみられた。図-6 および図-7 より、

斜めひび割れ発生直後には、斜めひび割れ幅は小さい値
を維持し、すなわち繊維が受け持つ引張応力 σ が大きい
まま、斜めひび割れが進展することにより、 V_f が斜めひ
び割れ発生以降に一気に増大したと考えられる。さらに、
pw292ad35 において、最大荷重時の V_f は作用せん断力に
対して大きな割合を占めているのに対し、pw378ad35 に
おいては、最大荷重時に V_f がほとんど消失し、他の要因
がせん断力に抵抗したと考えられる。この要因について
は、次節にて後述する。図-5 より、pw378ad35 は最大
荷重時の斜めひび割れ幅が pw292ad35 より大きいため引
張軟化が進行し、最大荷重に至る前に鋼繊維が斜めひび
割れの開口に抵抗できなくなり、 V_f が低下していったも
のと考えられる。

(4) せん断スパン比が与える影響

図-9(d), (f)より、せん断スパン比が変化しても、繊
維が負担するせん断抵抗 V_f の最大値に大きな違いはみら
れなかった。また、図-6 および図-7 に示すように、
斜めひび割れ幅が小さく、繊維の引張応力 σ が大きい状
態で、斜めひび割れが進展し続けることから、2 体とも
斜めひび割れ発生直後に V_f が増大したと考えられる。さ
らに、pw292ad35 は斜めひび割れ幅が最大荷重までほと
んど開口せず、引張軟化が進行しないために、破壊に至
るまで大きな V_f を示した。一方、pw292ad25 では、
pw378ad35 と同様に斜めひび割れ幅が増大し引張軟化す
ることにより、最大荷重時の V_f がほとんど消失し、繊維
とは異なるその他のせん断抵抗によって、耐荷力が大き
くなったと考えられる。

3.4 ビーム・アーチ機構

はりのせん断耐荷機構をより詳細に分析するため、山
田 7)のひずみエネルギー法によりはりのせん断抵抗をビー
ム機構、アーチ機構に分解することを試みた。測定した
せん断スパン内の引張鉄筋 5 か所のひずみから、支点位

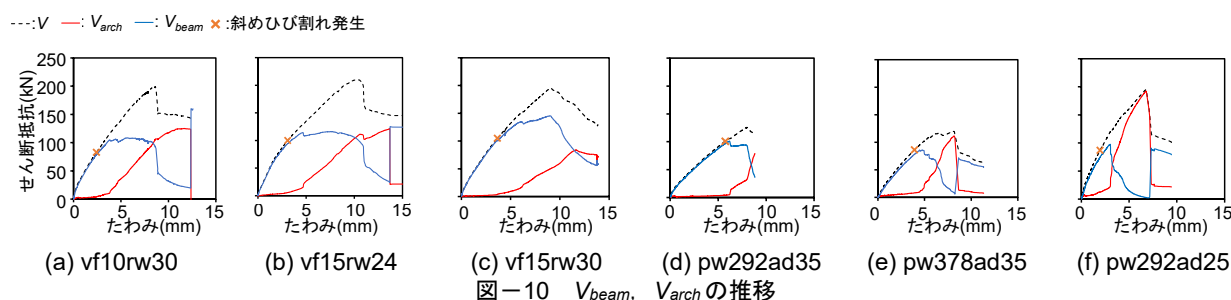


図-10 V_{beam} , V_{arch} の推移

置でのひずみを差し引いたものを、ビーム機構により鉄筋に生じたひずみとして考え、ひずみエネルギー法に基づき V_{beam} , V_{arch} をそれぞれ算出した。

図-10 にひずみエネルギー法により算出した各供試体の作用せん断力 V , V_{arch} , V_{beam} の推移を示す。いずれの供試体においても、斜めひび割れ発生前では V_{beam} の貢献割合が大きいという通常の RC はりと同様の傾向がみられた。

図-10(a), (b), (c)より、せん断補強鉄筋を使用した3体において、斜めひび割れ発生以降に、 V_{beam} は少し増加した後、概ね一定値を維持または増大しており、一方の V_{arch} の貢献割合が大きくなっていくことが確認された。また、繊維量とせん断補強鉄筋が多い供試体 vf15rw30 は、作用せん断力に対して V_{beam} が受け持つ割合が他の2体に比較して大きいことがわかる。さらに、斜めひび割れ発生後から最大荷重に至るまでの V_{beam} の推移に着目すると、 V_f が保持される傾向であった vf10rw30 と vf15rw24 では V_{beam} も保持され、 V_f が増大し続ける傾向であった vf15rw30 では V_{beam} も増大しており、 V_f がビーム機構によるせん断抵抗と同様の推移となることが明らかとなった。

さらに、図-10(d), (e), (f)より、最大荷重前に V_f が低下する傾向であったせん断補強鉄筋を用いない3体において、同様に V_{beam} は保持せず低下していくことが確認された。特に、pw292ad35 を除いた2体に関しては、最大荷重時においてせん断力のほとんどを V_{arch} が占めていることがわかる。このことから、3.3 で前述した繊維が受け持つせん断抵抗 V_f 以外の他の要因は、アーチ作用によるものであると考えられる。

4. まとめ

鋼繊維補強 RC はりにおいて、繊維混入率 v_f , せん断補強鉄筋比 r_w , 引張鉄筋比 p_w , およびせん断スパン比 a/d がせん断耐荷機構に与える影響を明らかにするため、せん断耐荷試験を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 鋼繊維補強 RC はりにおいて、鋼繊維とせん断補強鉄筋を併用することで、破壊に至るまで V_f が保持または増加することを明らかにした。
- 2) p_w が変化しても V_f の推移は概ね同様であったが、 p_w

が大きい場合はアーチ作用により耐荷力が発揮されることが確認された。

- 3) a/d が変化しても、 V_f の最大値はほとんど変化しないことが明らかとなった。
- 4) せん断補強鉄筋を有する鋼繊維補強 RC はりにおいて、破壊に至るまでのビーム機構の推移と V_f の推移がほぼ同様であることが明らかとなった。

謝辞：本研究は、科学研究費助成事業（若手研究，課題番号：20K14809）の助成を得て実施されたものである。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），コンクリートライブラリー，No.97，1999.11
- 2) 児玉亘，大寺一清，二羽淳一郎：短繊維補強された RC はりの斜めひび割れ特性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1327-1332，2005
- 3) 渡辺健ほか：鋼繊維とせん断補強鉄筋の併用による RC 棒部材のせん断補強効果，土木学会論文集 E，Vol.65，No.3，pp.322-331，2009.7
- 4) 掛井孝俊，村田裕志，二羽淳一郎，兵頭彦次：超高強度繊維補強セメント系複合材料を用いたはり部材のせん断特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.787-792，2004
- 5) 田所敏弥，佐藤靖彦，上田多門：斜めひび割れ面のせん断伝達機構と鉄筋コンクリート棒部材の斜め引張破壊，土木学会論文集 No.739/V-60，pp.195-211，2003.8
- 6) Jongvivatsakul, P., Matsumoto, K., Niwa, J., “Shear Capacity of Fiber Reinforced Concrete Beams with Various Types and Combinations of Fibers”, Journal of JSCE, Vol.1, No.1, pp.228-241, 2013
- 7) 山田雄太：ひずみエネルギーに基づく種々の荷重状態に適用可能な RC はり部材におけるせん断耐荷機構分解手法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No2，pp.559-564，2020