

論文 ポリプロピレン短繊維と有機系収縮低減剤を併用した高強度軽量 RC はり部材のせん断強度評価

河野 克哉^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}・大滝 晶生^{*3}

要旨：高品質軽量骨材を用いた高強度コンクリートをはり部材に適用する場合、脆性的な破壊や自己収縮の増加によりせん断性能に弱点を生じやすい。このことを改善する目的でポリプロピレン短繊維と有機系収縮低減剤を併用した高強度軽量 RC はりを作製し、載荷実験を行った。この RC はりのせん断強度に及ぼす有効高さ、せん断スパン有効高さ比などの影響を従来式と比較し、せん断耐荷機構に生じる変化を考察した。この結果、収縮低減剤は斜めひび割れ面に架橋した短繊維の応力伝達に作用し、せん断強度の向上に寄与できることを見出した。また、この RC はりのせん断強度式を構築し、この式の算定精度が高いことを確認した。

キーワード：軽量骨材、高強度、短繊維、収縮低減剤、せん断強度、引張軟化曲線、タイド・アーチ

1. はじめに

最近では、一般的な人工軽量骨材の原料である頁岩以外の鉱物質微粉末を主原料とし、少量の添加材を加えて、混合・造粒・焼成した高品質な軽量骨材が開発・製造されるようになった¹⁾。高品質軽量骨材は内部組織が微細な独立空隙で構成されるため、低吸水性で高強度な骨材であることを特長とする。このため、軽量骨材コンクリートの施工性や耐久性を飛躍的に改善させることになったほか、微粉材料や高性能 AE 減水剤などと組み合わせることで低水結合材比とすることで軽量かつ高強度なコンクリートの開発を実現可能にした。

このように優れた性能を有する高強度軽量コンクリートは上部構造に適用して自重低減を図ることで、建設重機の省力化・架設用鋼材の節減・基礎工の簡略化などに寄与できる。しかし、はり部材などに適用する場合には脆性的な破壊を生じやすく、せん断性能が弱点となることも指摘されている²⁾。また、低吸水性である高品質軽量骨材を低水結合材比で使用すると自己収縮が大きいかも報告されており³⁾、RC はりのせん断に対する収縮の影響も懸念される。このような問題を改善する目的で、筆者らは合成短繊維で補強した高強度軽量 RC はりのせん断耐荷機構の検討や強度式の構築などを行った⁴⁾。

本研究では、さらにポリプロピレン短繊維とともに有機系収縮低減剤を使用し、高強度軽量 RC はりのせん断強度を改善・評価することを目的とした。そのために合成短繊維と収縮低減剤を併用した高強度軽量 RC はりの作製ならびに曲げせん断載荷実験を行った。この実験結果を既往のデータと併せて再検討する形で耐荷機構を考察するとともに、このような RC はりに適用できるせん断強度の算定式を提案した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの材料ならびに配合

(1) 使用材料

表-1 に使用材料を示す。早強セメントとともにシリカフュームならびに高性能 AE 減水剤を用い、細骨材には陸砂を、粗骨材には最近開発された低吸水性の中国製高品質軽量骨材(以下、HLA)を使用した。また高強度コンクリートの自己収縮の低減に有効となる混和剤として、有機系の収縮低減剤(以下、SRA)を使用した。この収縮低減剤と組み合わせる短繊維は、軽量性と流動性を確保する観点から合成繊維とし、波形の形状を有する市販のポリプロピレン(以下、PP)とした⁵⁾。

(2) 配合

表-2 に示すように、すべての配合で水結合材比を 22%で一定とし、短繊維混入率(以下、 V_f)を 0.0%、1.0% および 2.0%の 3 水準に、収縮低減剤添加量(以下、 V_{sra})を 0kg/m^3 ならびに 6kg/m^3 の 2 水準に変化させた。スランブならびに空気量はそれぞれ $21\pm 1.5\text{cm}$ 、 $4.0\pm 1.5\%$ となるように混和剤添加量で調整した。これらの配合では表-2 に示すように単位容積質量 1.9t/m^3 程度で圧縮強度 70N/mm^2 以上の軽量かつ高強度なコンクリートとなった。

2.2 RC はりの概要ならびに載荷方法

RC はりの形状ならびに配筋を図-1 に、その諸元ならびに寸法を表-3 に示す。RC はりは軸方向引張鉄筋比(以下、 p_w)を 3.38%とし、表-3 のように有効高さ(以下、 d)を 100mm、200mm および 300mm の 3 水準、せん断スパン有効高さ比(以下、 a/d)を 2.5、3.5 および 4.5 の 3 水準とした。なお、斜めひび割れが発生するスパンを片側(B-B'断面)に限定するため、もう一方のスパン(A-A'断面)にはせん断補強筋(降伏強度 $f_y=325\text{N/mm}^2$)を配置し

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発1部セメント化学チーム主任研究員 修(工) (正会員)

*2 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 全日本空輸(株) 運航本部運航訓練室操縦士訓練生 修(工)

表-1 コンクリートの使用材料

材 料	種 類	記号	物 性 また は 成 分
結合材 (B)	早強セメント	C	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4490cm ² /g
	シリカフェーム	SF	密度 2.22g/cm ³ , 比表面積 200000cm ² /g
細骨材	普通砂	S	小櫃産, 表乾密度 2.60kg/ℓ, 吸水率 1.53%, 粗粒率 2.63
粗骨材 (G)	高品質軽量骨材	HLA	絶乾密度 1.17kg/ℓ, 24 時間吸水率* ¹ 1.77%, 煮沸吸水率* ² 4.40%, 最大寸法 15mm, 粗粒率 6.48 黄河流域堆積粘土(黄土), 造粒型, 中国製
短繊維	ポリプロピレン	PP	波形, 繊維長 30mm, アスペクト比 54.2, 密度 0.91kg/ℓ, 引張強度 465N/mm ² , 弾性係数 15kN/mm ²
混和剤	収縮低減剤	SRA	有機系, 低級アルコールアルキレンオキシド付加物, 密度 1.00g/cm ³
	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物, 密度 1.07g/cm ³
	AE 剤	AE	変性アルキルカルボン酸化合物

[注釈] *¹ 骨材を 24 時間静水に浸漬して表乾状態にしたときの含水率 *² 骨材を 2 時間煮沸して表乾状態にしたときの含水率

表-2 コンクリートの配合

No.	配合条件											フレッシュ性状			強度性状
	W/B (%)	s/a (%)	単位量									Slump (cm)	Air (%)	単位容 積質量 (kg/m ³)	圧縮強度 [水中 28d] (N/mm ²)
			W (kg/m ³)	SRA (kg/m ³)	C (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	S (kg/m ³)	HLA (ℓ/m ³)	PP* ³ (vo1.%)	SP (B×%)	AE (B×%)				
1	22	46.1	165	0	675	75	656	300	0.0	1.10	0.006	22.5	3.8	1938	78.6
2									1.0	1.20	0.006	22.0	4.4	1919	74.3
3									2.0	1.30	0.006	19.5	4.9	1916	71.2
4			159	6					0.0	1.10	0.006	22.0	3.9	1939	80.4
5									1.0	1.20	0.006	21.5	4.2	1924	74.7
6									2.0	1.30	0.006	21.0	4.9	1918	73.6

[注釈] *³ コンクリート体積に対する短繊維の外割体積比(=V_f)

た。RC はりは材齢 14 日までポリ塩化ビニリデンフィルムで封緘養生した後、静的 2 点集中荷重による曲げせん断載荷実験に供した。なお載荷点ならびに支点にはローラー支承と RC はりとの間に支圧板とフッ素樹脂シートを挿入し、RC はりの水平方向移動を可能にするとともに載荷点や支点の直下における局所的破壊を防止した。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 RC はりの破壊状況ならびに荷重たわみ曲線

SRA を添加した RC はりの載荷実験結果を表-3 中に併記した。なお、SRA を添加しなかった RC はりの載荷実験結果については、すでに筆者らの既往の研究⁴⁾で報告したため、この表中への記載は省略した。載荷実験に供した RC はりはすべて斜め引張破壊し、PP を混入していない RC はりは斜めひび割れの発生とほぼ同時に破壊に至るのに対して、PP を混入した RC はりでは斜めひび割れが発生しても直ちに破壊せず荷重がある程度増加した後で破壊に至った。なお、PP が無混入の場合でも $a/d=2.5$ のディープビーム的な RC はりでは斜めひび割れ発生後の荷重増加が認められた。図-2 は $d=200\text{mm}$, $a/d=3.5$ および $p_w=3.38\%$ と一定の下でコンクリートの V_f ならびに V_{sra} を変化させた RC はりの荷重たわみ曲線を示したものである。PP のみ用いた場合に比べて、PP と SRA を併用した場合は斜めひび割れ発生後も高い荷重を保持し、終局耐力が増大している。これは SRA の添加によって短繊維の補強効果が高くなり、ひび割れたコ

ンクリートにおける引張応力の伝達性能が向上することを意味している。

3.2 RC はりのせん断強度に及ぼす d および a/d の影響

式(1)は、土木学会コンクリート標準示方書においてせん断補強筋が無い普通コンクリートを用いた RC はり(以下、普通 RC はり)のせん断強度を算定する上で、その基本となった二羽らの式である⁶⁾。

$$v_c = 0.2f_c' p_w^{1/3} (10^3/d)^{1/4} \{0.75 + 1.4/(a/d)\} \quad (1)$$

また示方書には、軽量骨材コンクリートを用いた RC はり(以下、軽量 RC はり)のせん断強度は普通 RC はりによる算定値を一律 70%とすることが推奨されている。そこで筆者らは高品質軽量骨材を用いて高強度化した場合に、舟橋らが提案するコンクリートの単位容積質量(以下、 ρ)に応じた低減係数⁷⁾、さらに圧縮強度(以下、 f_c')による増進割合を低減した指数を導入したせん断強度式として式(2)を提案した。この式の構築は式(1)にもとづくものであり、PP 短繊維による補強効果を考慮した形となっている⁴⁾。

$$v_c = (1+\kappa)\eta_c 0.2f_c' p_w^{1/3} (10^3/d)^{1/4} \{0.75 + 1.4/(a/d)\} \quad (2)$$

ここに、 $\kappa = 0.4V_f$, $\eta_c = (\rho/2.3)^{3/2}$

ここでは本研究で対象とする PP 短繊維と SRA を併用した高強度軽量 RC はりについて、終局時せん断強度(以下、 v_u)に対する d ならびに a/d の影響を検討する。それらの影響を前述した 2 つの従来式に共通する $(10^3/d)^{1/4}$ ならびに $\{0.75 + 1.4/(a/d)\}$ の項の形で表現できるかどうかを、図-3 ならびに図-4 を用いて次のように検討した。

表-3 RC はりの諸元ならびに載荷試験結果

No.	RC はりの諸元									載荷実験結果 (SRA を添加した配合) *4						
	配合		はり供試体寸法						主鉄筋		コンクリート		RC はり			
	V_f (%)	V_{sra} (kg/m ³)	a (mm)	d (mm)	a/d	b (mm)	h (mm)	L (mm)	p_w (%)	f_y (N/mm ²)	f'_c (N/mm ²)	ρ (t/m ³)	P_c (kN)	P_u (kN)	v_u (N/mm ²)	破壊 形式
1	0.0	0 or 6	700	200	3.5	150	250	1800	3.38	379	83.9	1.96	86.6	86.6	1.44	DT ₁
2	1.0										73.0	1.93	90.1	134.3	2.24	DT ₂
3	2.0										74.3	1.94	119.0	197.2	3.29	DT ₂
4	0.0	0 or 6	350	100	3.5	75	125	900	3.38	379	82.4	1.98	27.4	27.4	1.83	DT ₁
5	0.0		1050	300		225	375	2700			82.4	1.98	166.0	166.0	1.23	DT ₁
6	1.0		350	100		75	125	900			81.4	1.96	40.1	42.2	2.81	DT ₂
7	1.0	0 or 6	1050	300	3.5	225	375	2700	3.38	379	81.4	1.96	227.7	282.9	2.10	DT ₂
8	2.0		300	100		75	125	900			73.7	1.93	31.6	57.1	3.81	DT ₂
9	2.0		1050	300		225	375	2700			73.7	1.93	230.3	405.4	3.00	DT ₂
10	0.0	0 or 6	500	200	2.5	150	250	1400	3.38	379	71.8	1.91	80.7	99.2	1.65	DT ₂
11	0.0		900		4.5			2200			71.8	1.91	78.4	78.4	1.31	DT ₁
12	1.0		500		2.5			1400			70.2	1.92	115.3	196.5	3.28	DT ₂
13	1.0	0 or 6	900	200	4.5	150	250	2200	3.38	379	70.2	1.92	87.5	102.1	1.70	DT ₂

[略号] V_f : 短繊維混入率, V_{sra} : 収縮低減剤添加量, a : セン断スパン, d : 有効高さ, a/d : セン断スパン有効高さ比, b : 幅, h : 高さ, L : はり全長, p_w : 鉄筋比, f_y : 降伏強度, f'_c : 圧縮強度(はり同一養生, 封緘 14d), ρ : 単位容積質量, P_c : 斜めひび割れ発生荷重, P_u : 終局荷重, v_u : 公称セン断強度($=P_u/2/(bd)$), DT: 斜め引張破壊(添え字の 1 は斜めひび割れ発生と同時に破壊を, 添え字の 2 は斜めひび割れ発生で破壊せず荷重増加後の破壊を示す。)

[注釈] *4 $V_{sra}=0(\text{kg/m}^3)$ の場合の載荷実験結果は既往のデータ⁴⁾における表-3 中の No.1~3 ならびに No.10~21 を参照。

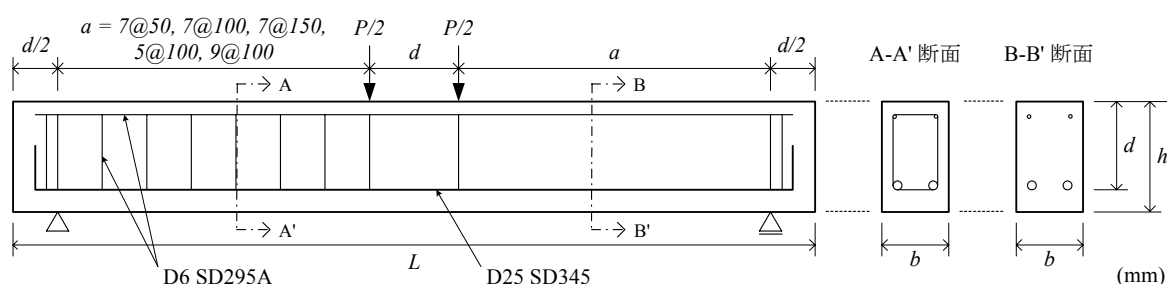


図-1 RC はりの形状ならびに配筋

(1) d の影響

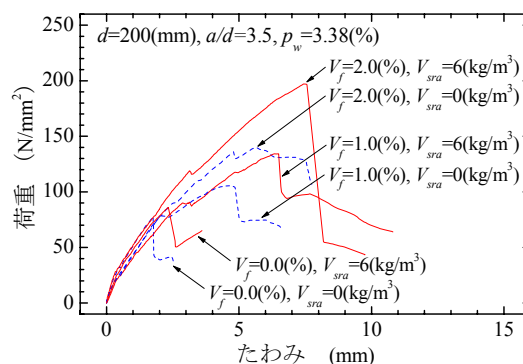
図-3(a)ならびに(b)に V_{sra} を変化させたときの v_u と d の関係を示す。SRA を添加することで、いずれの V_f の場合にも v_u は増加するが、その増加の程度は $V_f=0.0\%$ の場合よりも $V_f=1.0\%$ または 2.0% の場合の方が大きいことがわかる。PP と SRA を併用することで v_u の複合的な改善効果を生じている。なお、 d が v_u に及ぼす影響には SRA 添加の有無は大きく関与しておらず、従来式と同じ $(10^3/d)^{1/4}$ の形で表現できるものと考えられる。

(2) a/d の影響

図-4(a)ならびに(b)に V_{sra} を変化させたときの v_u と a/d の関係を示す。 v_u は従来式と同じ $\{0.75+1.4/(a/d)\}$ の形で完全に表現できていない。例えば $V_{sra}=0\text{kg/m}^3$ の場合で $V_f=2.0\%$ のとき、ならびに $V_{sra}=6\text{kg/m}^3$ の場合で $V_f=1.0\%$ 以上のときは従来式の形と一致せず、次第に乖離している。このことは SRA の添加によってセン断強度・耐荷機構と a/d の関係に変化が生じていることを示唆している。

(3) セン断強度・耐荷機構と a/d の関係

図-5(a)は $V_f=0.0\sim 1.0\%$ ならびに $V_{sra}=0\sim 6\text{kg/m}^3$ の範囲で組み合わせた高強度軽量 RC はりの v_u の実験値に対

図-2 V_f ならびに V_{sra} を変化した RC はりの荷重たわみ曲線

して、普通 RC はりにおける斜めひび割れ発生時(斜め引張破壊)とアーチ機構破壊時(セン断圧縮破壊)のセン断強度(以下、それぞれ v_c , v_d)の計算値を重ね合せたものである。すなわち、斜め引張破壊については前述した式(1)で、セン断圧縮破壊については式(3)に示す二羽のディープビーム式で算出した⁸⁾。ただし、支圧板の幅 r は実際に使用した板の値を、 f'_c は図中の 5 種類のコンクリートの平均値を用いた。

$$v_d = 0.244 f'_c {}^{2/3} (1 + p_w {}^{1/2}) / \{1 + 3.33r/d\} / \{1 + (a/d)^2\} \quad (3)$$

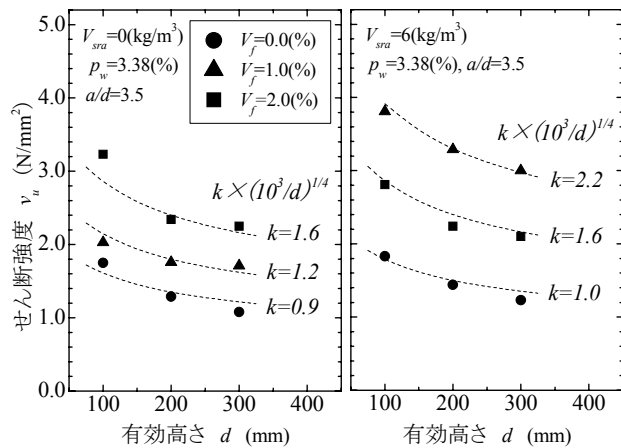


図-3 RC はりのせん断強度に及ぼす d の影響

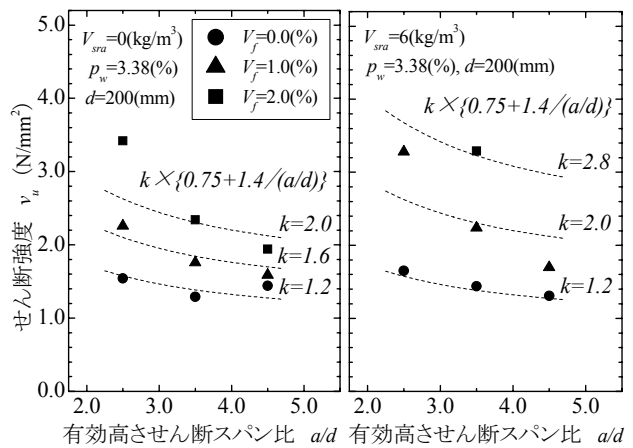


図-4 RC はりのせん断強度に及ぼす a/d の影響

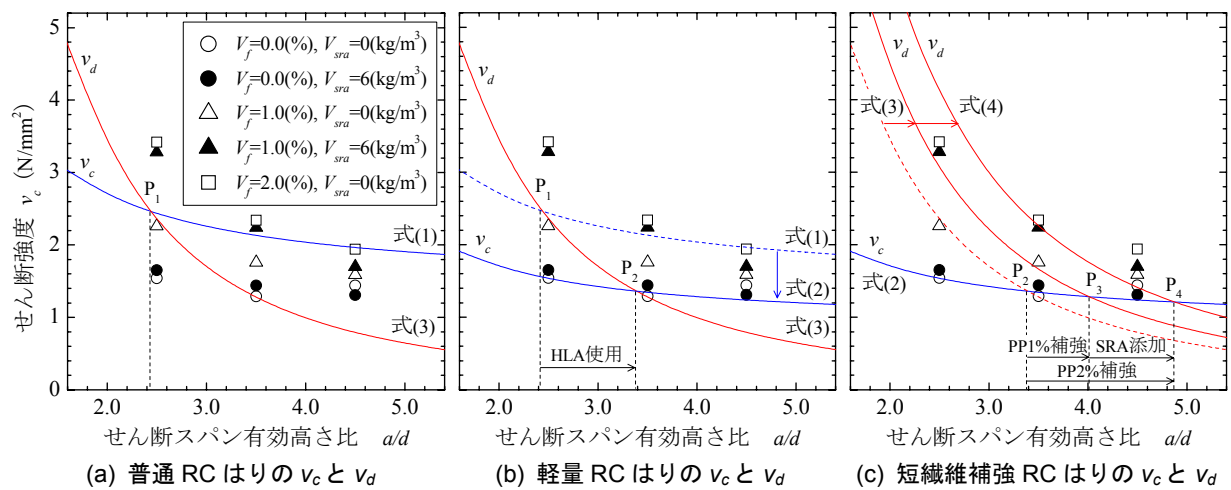


図-5 せん断強度・耐荷機構と a/d の関係

ここで普通RCはりの v_u は式(1)による曲線上の v_c と式(3)による曲線上の v_d のうちで大きい方の値として評価され、これら2曲線の交点は図中の P_1 で示される。これは、せん断圧縮破壊は斜めひび割れ発生後のアーチ機構の破壊により生じることや、斜め引張破壊では斜めひび割れ発生前にアーチ機構は存在しないがこれは斜めひび割れ発生後のアーチ耐力が斜めひび割れ耐力よりも小さいことから明白である。

図-5(b)に $V_f=0\%$ のときの軽量RCはりの v_c を式(2)で $\rho=1.93$ として算出した曲線を示す。式(2)による v_c 曲線は $V_f=0\%$ の下で $V_{sra}=0 \text{ kg/m}^3$ ならびに 6 kg/m^3 とした軽量RCはりの実験値とよく一致し、式(1)による普通RCはりの v_c 曲線から縦軸鉛直下方向へ移動する。このため2曲線の交点が P_1 から P_2 まで移動し(交点の a/d は約2.4から約3.4に増加)、軽量RCはりでは普通RCはりにくらべて大きな a/d でタイド・アーチ的な耐荷機構に移行する。

図-5(c)に短繊維で補強した普通RCはりの v_d を式(4)から算出した曲線を示す。この式はポリビニルアルコール系の短繊維に対し、式(3)を基本にして伊藤らが提案した⁹⁾。

$$v_d = \{1 + 0.2(\sigma_{bp} - 0.1)/(d/10^3)\} \cdot v_{d0} \quad (4)$$

ここに、 σ_{bp} : 引張軟化曲線の折れ曲がり点応力 (N/mm^2)、 v_{d0} : 式(3)のせん断強度 (N/mm^2)

ここで、図-6は筆者らが既往の研究¹⁰⁾で実施した $V_f=1.0 \sim 2.0\%$ の下で $V_{sra}=0 \sim 6 \text{ kg/m}^3$ の範囲で組み合わせた同一の高強度軽量骨材コンクリートの3配合について、それぞれの引張軟化曲線を示したものである。図-6から $V_f=1.0\%$ のコンクリートにSRAを添加することで引張軟化曲線の折れ曲がり点応力ならびに結合応力がともに増加し、 $V_f=2.0\%$ のコンクリートの引張軟化特性とほぼ同等になることがわかる。式(4)の計算で必要となる σ_{bp} (N/mm^2) の値は、各配合の引張軟化曲線から読み取り、 $V_f=1.0\%$ で $V_{sra}=0 \text{ kg/m}^3$ の配合が0.4、 $V_f=1.0\%$ で $V_{sra}=6 \text{ kg/m}^3$ の配合ならびに $V_f=2.0\%$ で $V_{sra}=0 \text{ kg/m}^3$ の配合がいずれも0.8とした。図-5(c)に示すように、 $V_f=1.0\%$ の場合は式(3)による v_d 曲線は横軸水平右方向へ移動し、式(2)による軽量RCはりの v_c 曲線との交点が P_2 から P_3 まで移動する。そして $V_f=2.0\%$ の場合は v_d 曲線の水平方向移動量がさらに増加し、 v_c 曲線との交点は P_2 から P_4 まで移動

する。図-5(c)において $V_{sra}=0\text{kg/m}^3$ で $V_f=1.0\%$ とした RC はりの v_u の実験値は式(4)による v_d 曲線とあまり一致しないが、 $V_f=2.0\%$ とした RC はりの v_u の実験値は式(4)による計算結果にかなり近づいている。これは、いずれの RC はりにおいても最終的な破壊形式は斜め引張破壊であったものの、PP の混入によって斜めひび割れの拡大が抑制され、斜めひび割れ発生後もタイド・アーチ的な耐力を保持できるように耐荷機構が変化するためと考える。すなわち、 $V_f=1.0\%$ の場合はまだ短繊維量が少ないため、斜めひび割れ発生後に形成されるアーチ機構が十分に作用しなかったが、 $V_f=2.0\%$ まで短繊維量を増加すると斜めひび割れの発生からしばらくの間は全体的な破壊に至らず、アーチ機構が荷重増加に寄与できたと考える。

ここで PP と SRA を併用した場合を考えると、 $V_f=1.0\%$ で $V_{sra}=6\text{kg/m}^3$ とした RC はりは $V_f=2.0\%$ で $V_{sra}=0\text{kg/m}^3$ とした RC はりとほぼ同等の v_u を示しており、 $V_f=1.0\%$ の場合であっても SRA を添加することでタイド・アーチ的耐荷機構に移行する a/d は交点 P_2 の移動によって約 3.4 から $V_f=1.0\%$ のときは約 4.0 まで、 $V_f=2.0\%$ のときは約 4.9 まで増加する。 $V_f=1.0\%$ の RC はりに対して SRA を 6kg/m^3 添加した場合も $V_f=2.0\%$ の場合と同じように交点が移動するため、耐荷機構の変化の分岐点となる a/d は約 4.9 まで増加する。このため、 $V_f=1.0\%$ で $V_{sra}=6\text{kg/m}^3$ とした RC はりや、 $V_f=2.0\%$ で $V_{sra}=0\text{kg/m}^3$ とした RC はりの v_u の実験値は、アーチ機構にもとづいた式による計算結果とよく一致するようになったと考える。なお、図-5(c)に示すように、 $V_f=1.0\%$ の RC はりに対して SRA を 6kg/m^3 添加する効果は、同じ $V_f=1.0\%$ の RC はりに対して PP 短繊維をもう 1.0% 追加する効果にほぼ匹敵するといえる。

3.3 RC はりのせん断強度に及ぼす V_{sra} ならびに V_f の影響

(1) SRA による v_u の改善に対する考え方

本研究のように低水結合材比とした高強度な母材には大きな自己収縮が生じており、この自己収縮によって母材と短繊維との界面に発生する応力、すなわち母材の収縮を短繊維が拘束することで生じる応力(微視的な自己収縮応力)が作用している。SRA の添加によって母材の自己収縮が低減されることで母材と短繊維との界面付着が改善し、ひび割れ面で架橋した短繊維の応力伝達効果が向上する¹⁰⁾。このことはコンクリートがひび割れたときの引張軟化特性に寄与し、RC はりのせん断耐力が増加するように働いたと考える。

また、SRA の添加は高強度コンクリートが鉄筋などから受ける拘束応力(巨視的な自己収縮応力)を低減するため、このことが RC はりのせん断に関与することも指摘されている¹¹⁾。たとえば、 p_w の変化は収縮を生じるコンクリートの拘束度に関与し、SRA の添加が RC は

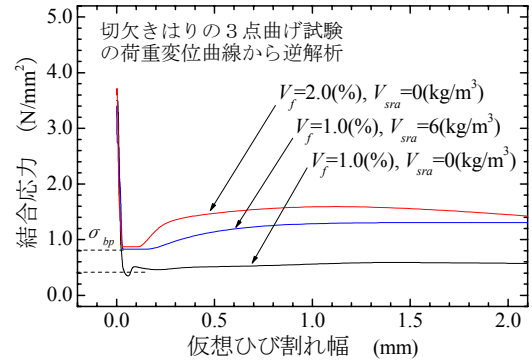


図-6 高強度軽量骨材コンクリートの引張軟化曲線

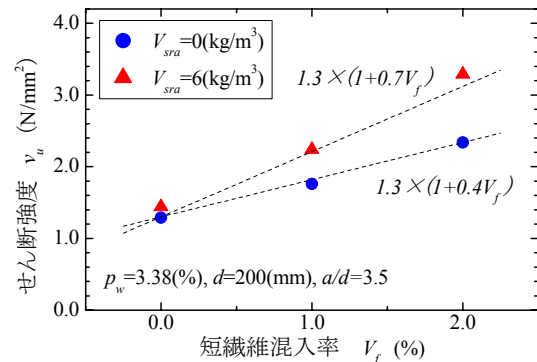


図-7 SRA を添加した RC はりの v_u に及ぼす V_f の影響

りの v_u と p_w の関係に影響することも予想される。このことは本研究の中で十分に検討できていないが、図-3(a)ならびに(b)から $p_w=3.38\%$ の下で $V_f=0.0\%$ とした RC はりの巨視的自己収縮応力の影響を考えると、SRA の添加によって v_u が改善する程度は高々 1 割である。これに対して $V_f=1.0\%$ または 2.0% の場合に SRA を添加する効果、つまり PP との界面近傍に作用する母材の微視的自己収縮応力を低減する効果の方が v_u に寄与する程度は大きい。

(2) SRA の添加が v_u と V_f の関係に与える影響

式(2)における $(1 + \kappa)$ の項は、鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案)¹²⁾を参考にして、 v_u に対する V_f の影響を割増し係数の形で導入したものである。そこで、本研究における v_u の実験値も $\beta \cdot (1 + \alpha V_f)$ の形で直線回帰することを試み、図-7 にその結果を示す。この図から α の値は PP のみを単独で使用した場合は 0.4 となるものの、SRA を 6kg/m^3 添加し、PP と SRA を併用した場合には 0.7 となった。このように SRA の添加は主に短繊維補強の効率を高めるように作用すると考えられる。

3.4 せん断強度式の提案ならびに評価

本研究ならびに既往の研究⁴⁾では、PP 短繊維と SRA を用いたせん断補強筋が無い高強度軽量 RC はりのせん断強度を $d=100\sim 300\text{mm}$, $a/d=2.5\sim 4.5$, $p_w=2.58\sim 4.28\%$, $V_f=0.0\sim 2.0\%$, $V_{sra}=0\sim 6\text{kg/m}^3$ および $f'_c=44.2\sim 83.9\text{N/mm}^2$ の範囲で検討した。一部のデータでは a/d , V_f および V_{sra} の組み合わせによってアーチ機構にもとづいた式に整

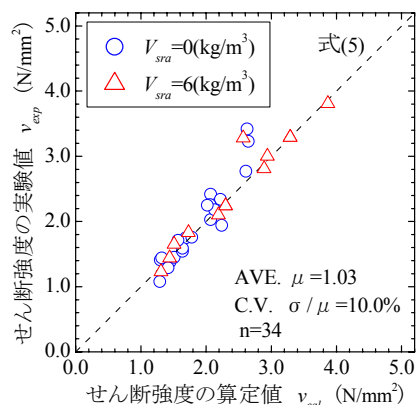


図-7 提案式による v_u の算定値と実験値の関係

性が認められた。しかし本実験の範囲ではそれらのデータ数が少ないこともあり、従来から提案している式にもとづいて、式(5)のようにせん断強度式を整理した。

$$v_c = (1 + \kappa) \eta_c 0.2 f_c^{1/3.5} p_w^{1/3} (10^3/d)^{1/4} \{0.75 + 1.4/(a/d)\} \quad (5)$$

ここに、 $\kappa = \alpha V_f$, $\eta_c = (\rho/2.3)^{3/2}$

ただし、 $V_{sra}=0$ のとき $\alpha=0.4$, $V_{sra}=6$ のとき $\alpha=0.7$

図-7はPP短繊維で補強した高強度軽量RCはりのせん断強度について、SRAを添加していない既往のデータ21個にSRAを添加した本研究のデータ13個を加えた合計34個の実験値を式(5)による算出値と比較したものである。この結果、式(5)によって平均値1.03、変動係数10.0%の高い精度でせん断強度を評価できた。なお、SRAを無添加とした既往のデータ21個に対する算定精度は平均値1.03、変動係数10.9%であり、SRAを添加した本研究のデータを追加しても算定精度に差がなかった。

なお、本研究におけるデータの範囲では十分に検証できなかった課題として、次のことが挙げられる。

- i) V_{sra} を変化させた高強度軽量RCはりの v_u に及ぼす p_w の影響を把握すること。
- ii) アーチ機構に移行する a/d に及ぼす V_f , V_{sra} およびこれらの組み合わせの影響を把握し、耐荷機構の変化に応じて式を適用すること。

今後は、これらを反映したせん断強度式の構築によって適用範囲の拡大や算定精度の向上ができるものとする。

4. まとめ

本研究ではPP短繊維と有機系収縮低減剤を併用した高強度軽量RCはりの載荷実験を行い、せん断耐荷機構の考察ならびにせん断強度式の提案を行った。本研究で得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 収縮低減剤は斜めひび割れに架橋したPP短繊維の応力伝達に作用し、せん断強度の向上に寄与できる。
- (2) 収縮低減剤を添加した場合でもせん断強度に及ぼす d ならびに a/d の影響は普通コンクリートに対する従来の算定式と同様の形でおおむね評価できる。

- (3) 収縮低減剤を添加した場合ならびに無添加とした場合のRCはりのせん断強度に対して、斜め引張破壊にもとづく提案式は平均値1.03、変動係数10.0%の高い精度で算定が可能である。
- (4) 提案式で適用範囲の拡大や算定精度の向上を図るためには、アーチ機構に移行する a/d が軽量骨材、PP短繊維および収縮低減剤の使用やそれらの量と組み合わせによって変化することを考慮した評価が必要となる。

謝辞

本研究の実施に当たっては、伊藤忠商事社、萩原工業社およびBASFポゾリス社からコンクリートの使用材料を提供して頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 岡本享久ほか：高性能軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.37，No.4，pp.12-18，1999.4
- 2) 二羽淳一郎ほか：高品質軽量コンクリートの構造部材への適用，コンクリート工学，Vol.38，No.12，pp.3-9，2000.12
- 3) 河野克哉ほか：高品質軽量骨材を用いた低水セメント比コンクリートの体積変化機構，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.123-136，2005.11
- 4) 河野克哉ほか：ポリプロピレン短繊維で補強した高強度軽量RCはりのせん断強度式，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，pp.1549-1554，2007
- 5) 平石剛紀ほか：ポリプロピレン短繊維補強コンクリートのフレッシュおよび硬化性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.283-288，2000
- 6) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.167-176，1986.8
- 7) 舟橋政司ほか：高性能軽量コンクリートを用いたRC部材のせん断耐力評価手法，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.211-226，2004.8
- 8) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディーブビームのせん断耐力算定式の提案，第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp.119-126，1983
- 9) 伊藤始ほか：PVA短繊維で補強したRCはりのせん断耐力評価に関する実験的研究，土木学会論文集，No.774/V-65，pp.123-138，2004.11
- 10) 河野克哉ほか：混和材料と合成繊維を併用した高強度軽量骨材コンクリートの破壊力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，pp.1369-1374，2005
- 11) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮委員会報告書，pp.183-189，2002.9
- 12) 土木学会：コンクリートライブラリー97 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案)，pp.15-16，1999.11