

論文 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

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として適用する場合にせん断性能が弱点となりやすい。このような構造性能を改善する目的で、ポリプロピレン短繊維で補強した高強度軽量 RC はりを作製し、曲げせん断載荷実験を行った。この RC はりのせん断強度に及ぼす鉄筋比、有効高さ、せん断スパン有効高さ比、短繊維混入率および圧縮強度の影響を従来式と比較検討するとともに、そのせん断耐荷機構の変化について考察した。また、合成短繊維で補強した高強度軽量 RC はりに対するせん断強度式を新たに構築し、この提案式を用いることで高い精度にてせん断強度が算定できることを確認した。

キーワード：短繊維，軽量骨材，高強度，せん断強度，斜めひび割れ，タイド・アーチ

1. はじめに

現在、構造用の軽量コンクリートには一般に頁岩を主原料とする非造粒型の人工軽量骨材が用いられている。しかし、最近では、頁岩以外の鉱物質微粉末を造粒・焼成した高品質な人工軽量骨材が開発・実用化されるようになった¹⁾。この高品質軽量骨材は内部が微細で独立した空隙構造であるために吸水性が低く、施工性や耐久性が飛躍的に改善できる。さらに骨材自体の強度も高いことから、軽量骨材コンクリートの高強度化が実現できることも特長となっている。

高品質軽量骨材を用いた高強度コンクリートは上部構造の自重低減を可能にし、建設重機の省力化、仮設用鋼材の節減、基礎工の簡略化などに寄与できる。しかし、はり部材等に適用した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可能性も指摘されている²⁾。

本研究では、このような構造性能の改善を目的として合成短繊維で補強した高強度軽量 RC はりの載荷実験を行った。この RC はりについて、せん断耐荷機構を検討するとともに、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 減水剤を併用し、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, NL)を用いた。また短繊維は軽量性と流動性を確保する観点から、合成繊維で波型形状を有する市販のポリプロピレン(以下, PP)とした³⁾。

(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%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 水準に変化させた。スランプならびに空気量は、それぞれ $21 \pm 1.5\text{cm}$, $4.0 \pm 1.5\%$ となるように混和剤の添加量で調整した。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ている。

2.2 RC はり供試体の概要ならびに載荷方法

RC はり供試体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

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部セメント化学チーム 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) 成田空港支店 修(工) (正会員)

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
	シリカフェューム	SF	密度 2.22g/cm ³ , 比表面積 200000cm ² /g
細骨材	小瀬産陸砂	S	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	NL	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	波型, 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	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

*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

配 合 条 件											フレッシュ性状			強度性状
No.	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)	C (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (ℓ/m ³)	PP* ³ (vol.%)	SP (B×%)	AE (B×%)				
1	22	46.1	165	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

*³ コンクリート体積に対する短繊維の外割体積比(=V_f)

はり供試体は、表－３のように有効高さ(以下、 d)を 100mm, 200mm および 300mm の 3 水準、鉄筋比(以下、 p_w)を 2.58%, 3.38%および 4.28% 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一方(B-B'断面)に限定するため、もう片方のスパン(A-A'断面)にはせん断補強筋(降伏強度 $f_y=325\text{N/mm}^2$)を配置した。供試体は材齢 14 日にて静的 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ではローラー支承と供試体との間に支圧板とフッ素樹脂シートを挿入し、供試体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 せん断破壊の状況

RC はり供試体の載荷実験結果を表－３中に併記した。すべての供試体は斜め引張破壊したものの、その破壊に至るまでの過程には主として短繊維の有無による違いが見られた。すなわち、短繊維が無混入のはりでは斜めひび割れ発生とほぼ同時に破壊に至るのに対して、短繊維を混入したはりでは斜めひび割れが発生しても

直ちに破壊に至らず荷重増加後に破壊する。ただし、 $a/d=2.5$ でディーブビームに比較的近い RC はりでは、短繊維が無混入であっても斜めひび割れ発生後に荷重が増加した(供試体 No.16)。

3.2 せん断強度に及ぼす p_w , d および a/d の影響

軽量骨材コンクリートを用いた RC はりのせん断強度は、普通 RC はりのせん断強度式による算定値を一律に 70%とするように土木学会では推奨している⁴⁾。ここで、式(1)はコンクリート標準示方書に規定された普通 RC はりのせん断強度式の基本になった二羽らの式である⁵⁾。

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

これに対して、舟橋らは式(2)のようにコンクリートの単位容積質量(以下、 ρ)に応じた低減係数を乗じることで、高品質軽量骨材を用いた RC はりのせん断強度の算定を行っている⁶⁾。

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

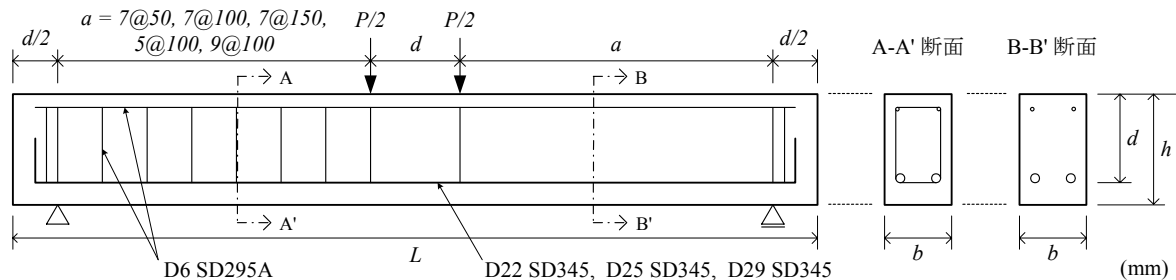
$$\text{ここに、} \eta_c = (\rho/2.3)^{3/2}$$

これらより、PP 短繊維で補強した高品質軽量骨材 RC はりの終局時せん断強度(以下、 v_u)に対する影響として、式(1)と式(2)に共通する $p_w^{1/3}$, $(10^3/d)^{1/4}$ および $\{1 + 1.4/(a/d)\}$ の項の形で評価できるかどうかを、図－２を用いて以下に検討した。

表－３ RC はり供試体の諸元ならびに載荷実験結果

RC はり供試体諸元									載荷実験結果						
No.	配合	はり供試体寸法						主鉄筋		コンクリート		RC はり			
	V_f (%)	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	700	200	3.5	150	250	1800	3.38	379	78.8	1.97	77.6	77.6	1.29	DT ₁
2	1.0									69.0	1.87	78.2	105.4	1.76	DT ₂
3	2.0									62.9	1.87	88.4	140.2	2.34	DT ₂
4	0.0	700	200	3.5	150	250	1800	2.58	379	78.8	1.97	84.4	84.4	1.41	DT ₁
5								4.28		71.6	1.93	82.5	82.5	1.38	DT ₁
6	1.0							2.58		62.9	1.81	63.6	86.7	1.45	DT ₂
7								4.28		73.7	1.98	105.0	130.8	2.18	DT ₂
8	2.0							2.58		61.7	1.90	82.1	145.1	2.42	DT ₂
9								4.28		72.8	1.92	91.0	166.1	2.77	DT ₂
10	0.0	350	100	3.5	75	125	900	3.38	379	76.4	1.98	26.2	26.2	1.75	DT ₁
11		1050	300		225	375	2700			76.4	1.98	146.3	146.3	1.08	DT ₁
12	1.0	350	100		75	125	900			65.9	1.86	11.7	30.4	2.03	DT ₂
13		1050	300		225	375	2700			65.9	1.86	194.7	230.3	1.71	DT ₂
14	2.0	300	100		75	125	900			61.9	1.88	27.1	48.4	3.23	DT ₂
15		1050	300		225	375	2700			61.9	1.88	120.7	303.8	2.25	DT ₂
16	0.0	500	200	2.5	150	250	1400	3.38	379	78.8	1.98	75.6	92.1	1.54	DT ₂
17		900		4.5			2200			78.8	1.98	86.3	86.3	1.44	DT ₁
18	1.0	500		2.5			1400			67.4	1.90	81.1	135.8	2.26	DT ₂
19		900		4.5			2200			62.3	1.91	79.4	95.4	1.59	DT ₂
20	2.0	500		2.5			1400			63.9	1.91	133.8	205.2	3.42	DT ₂
21		900		4.5			2200			67.2	1.96	94.5	116.3	1.94	DT ₂

V_f : 短繊維混入率, 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, 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 : 公称せん断強度($=P_u/2/(bd)$), 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, 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)



図－１ RC はり供試体の形状ならびに配筋

(1) p_w の影響

図－２の(a)から, d ならびに a/d が一定のとき, p_w が大きくなるほど v_u は増加することがわかる。この傾向は V_f が増加した場合も同様であり, p_w が v_u に与える影響は V_f に依らず $p_w^{1/3}$ に任意の定数を乗じた形で表現できるものと考え。

(2) d の影響

図－２の(b)から, p_w ならびに a/d が一定のとき, d が大きくなるほど v_u は低下することがわかる。この傾向は V_f が増加した場合も同様であり, d が v_u に与える影響は V_f に依らず $(10^3/d)^{1/4}$ に任意の定数を乗じた形で表現できると考える。

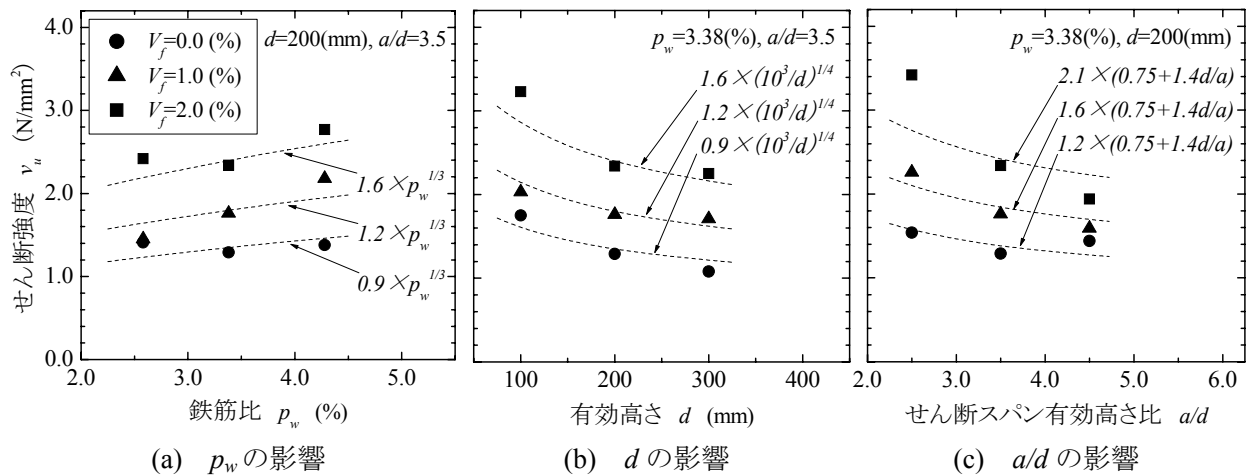
(3) a/d の影響

図－２の(c)から, p_w ならびに d が一定のとき,

a/d が大きくなるほど v_u は低下することがわかる。 a/d の増大に対する v_u の低下は V_f が増加するほど顕著であり, V_f が増加して 2.0% になると v_u は $\{1+1.4/(a/d)\}$ に比例する形から大きく乖離した。このような現象を生じた理由については次節で考察しているものの, まだデータ数も少ないため, 本研究の定式化ではいずれの V_f においても $\{1+1.4/(a/d)\}$ の形を用いることにする。

(4) 軽量骨材と短繊維の組合せによるせん断強度・耐荷機構と a/d の関係

図－３は, $V_f=0.0\%$ ならびに 2.0% の高強度軽量 RC はりの実験値に対して, 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(せん断圧縮破壊)のせん断強度(以



図－2 セン断強度に及ぼす p_w , d および a/d の影響

下, それぞれ v_c , v_d) を計算した結果を重ね合わせたものである。すなわち, 斜め引張破壊については前述した式(1)にて, 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⁷⁾にて算出した。ただし, r は実際の 75mm, f_c' は図中の供試体 6 本の平均値 70.0N/mm^2 とした。

$$v_d = 0.244 f_c'^{2/3} (1 + p_w^{1/2}) (1 + 3.33r/d) / \{1 + 1.4(a/d)^{1/2}\} \quad (3)$$

ここに, r : 支圧板の幅(mm)

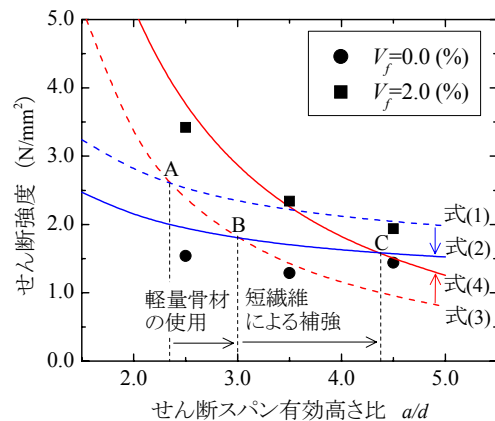
ここで, 普通 RC はりの v_u は式(1)の曲線上の v_c と式(3)の曲線上の v_d で大きい方の値となり, その 2 曲線の交点は図中の A となる。舟橋らは, 軽量 RC はりの v_c は図のように式(2)で示す曲線となって, 式(1)で示す普通 RC はりの曲線よりも低下するため, 2 曲線の交点は A から B へ移動することを指摘した⁶⁾。つまり, 軽量 RC はりでは, 普通 RC はりにくらべて大きな a/d でタイド・アーチ的耐荷機構に移行しやすい。

さらに, 伊藤らはポリビニルアルコール系の合成短繊維で補強した普通 RC はりの v_d として, 式(3)を基本とする以下の式(4)を提案している⁸⁾。

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

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

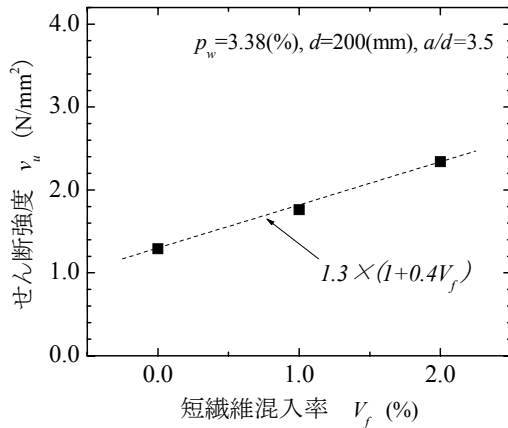
図中には式(4)による曲線も併記したが, その計算に際しては, 筆者らの既往の研究⁹⁾から $V_f=2.0\%$ で PP 短繊維を用いた高強度軽量骨材コ



図－3 セン断強度・耐荷機構と a/d の関係

ンクリートの σ_{BP} を 0.9N/mm^2 とした。この結果, 短繊維で補強した軽量 RC はりの v_d は式(4)の曲線の位置まで増加し, 2 曲線の交点はさらに B から C へ移動することがわかった。したがって, $V_f=2.0\%$ の軽量 RC はりではタイド・アーチ的耐荷機構に移行する a/d が 4.5 程度まで増加する。このため, 本実験における a/d の範囲では $V_f=2.0\%$ の実験値はすべて式(4)の計算結果に近づいたものと考えられる。表－3 で示したように短繊維を混入した RC はりは, 最終的にはすべてが斜め引張破壊であった。しかし, 短繊維がひび割れ面で架橋してひび割れの拡大を抑制することで, 斜めひび割れ発生後のタイド・アーチ的な耐力を保持できたものとする。

以上を勘案すれば, 本来は V_f の増加にともなってアーチ機構が考慮されたせん断強度式を適用する形が望ましいと思われる。



図－4 セン断強度に及ぼす V_f の影響

3.3 セン断強度に及ぼす V_f ならびに f_c' の影響

(1) V_f の影響

図－4 は高強度軽量 RC はりの v_u と V_f の関係を示したものであり、 v_u は V_f に比例して直線的に変化することがわかる。ここで、鋼繊維で補強した RC はりの場合は、鋼繊維混入によるせん断強度の増加を式(5)に示すように割増し係数を導入する形で表現している¹⁰⁾。

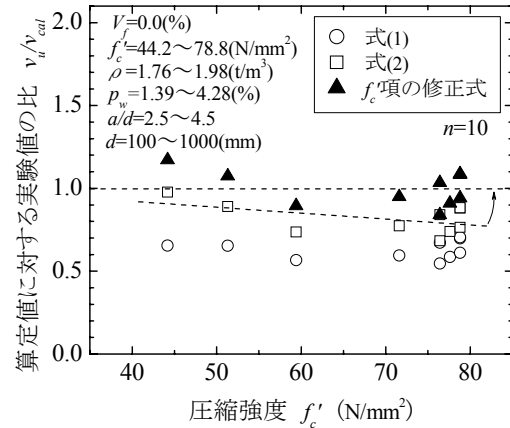
$$v_c = (1 + \kappa) \cdot 0.2f_c'^{1/3} p_w^{1/3} (10^3/d)^{1/4} \{1 + 1.4/(a/d)\} \quad (5)$$

ここに、 κ ：定数(=1.0)

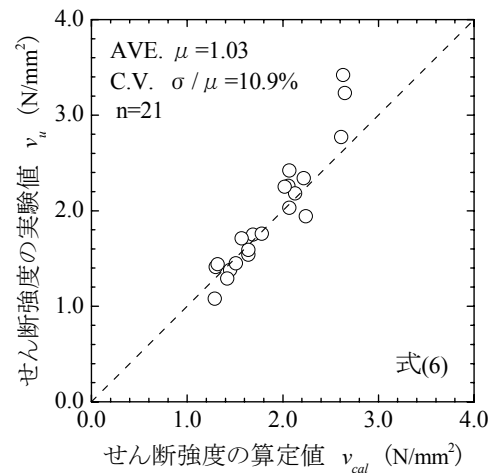
しかしながら、上式では V_f の影響が考慮されていない。このため $\kappa = \alpha V_f$ と考えることで、すなわち $\beta \cdot (1 + \alpha V_f)$ の形で本実験の v_u を直線回帰することで(α と β は、ともに定数)、図－4 中に示すように α として 0.4 の値が得られた。

(2) f_c' の影響

f_c' の影響としては、本研究の対象である f_c' が 70N/mm^2 を超えるような高強度域での整合性を考えることが重要である。これまで適用を検討した式(1)ならびに式(2)は、 f_c' がそれぞれ $12 \sim 66\text{N/mm}^2$ 、 $23 \sim 45\text{N/mm}^2$ の範囲の実験データをもとに構築されている。図－5 は短繊維が無混入の RC はりについて、式(1)ならびに式(2)によるせん断強度の算定値に対する実験値の比(以下、 v_u/v_{cal})を f_c' との関係で整理したものである。なお、 f_c' が 60N/mm^2 以下のデータは、本実験と同一の軽量骨材を用いた RC はりに関する筆者らの実験^{11),12)}と小野らの実験¹³⁾を参考にした。



図－5 セン断強度に及ぼす f_c' の影響



図－6 提案式による算定値と実験値の関係

図から、普通強度の軽量骨材コンクリートに対する式(2)では f_c' が増加すると v_u/v_{cal} は徐々に 1.0 よりも小さくなる傾向が認められた。これは軽量骨材コンクリートが高強度になると普通コンクリートの場合以上に f_c' に対する引張強度の比 (f_t/f_c') が減少し、式(2)の適用性が低下することを意味する。そこで式(2)の f_c' に関する項を $f_c'^{1/3}$ から $f_c'^{1/3.5}$ に修正する形で再計算した。この結果、図に示すように普通強度から高強度までの広い範囲で v_u/v_{cal} を 1.0 に近づけることができた。

3.4 セン断強度式の提案

本研究では、高品質軽量骨材と PP 短繊維を用いた高強度 RC はりの載荷実験を行い、 $d=100 \sim 300\text{mm}$ 、 $a/d=2.5 \sim 4.5$ 、 $p_w=2.58 \sim 4.28\%$ 、 $V_f=0.0 \sim 2.0\%$ の範囲にてせん断強度を検討した。この実験結果にもとづいて、 $f_c'=80\text{N/mm}^2$ 程度の高強度域まで適用できるせん断強度式を式(6)に提案

する。なお、短繊維の材質や形状が本実験と異なる場合には、その補強効果が適切に評価されるような κ の値を再設定することが必要となる。

$$v_c = (1 + \kappa) \eta_c 0.2 f_c^{1/3.5} p_w^{1/3} (10^3/d)^{1/4} \{1 + 1.4/(a/d)\} \quad (6)$$

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

図－6 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関して、式(6)による算定値と実験値を比較したものである。本実験のデータ 21 個に対して平均値 1.03、変動係数 10.9% の高い精度でせん断強度を評価することができた。

4. まとめ

本研究では PP 短繊維を用いた高強度軽量 RC はりの載荷実験を行い、せん断強度式を提案した。その結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) せん断強度に及ぼす p_w , d ならびに a/d の影響は、普通強度の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。
- (2) 軽量 RC はりでは、タイド・アーチ的耐荷機構に移行する a/d が普通 RC はりにくらべて大きいうえ、その a/d が短繊維混入率 V_f によって変化することを考慮する必要がある。
- (3) PP 短繊維によるせん断強度の増加割合は $(1 + 0.4 V_f)$ を乗じる形で、また、高強度化にともなうせん断強度の増加割合は従来式よりも小さい $f_c^{1/3.5}$ の形で表現できる。
- (4) 提案したせん断強度式では、平均値 1.03、変動係数 10.9% の高精度な評価が可能となる。

謝辞

本研究の実施に当たっては、伊藤忠商事、萩原工業、ポゾリス物産の各社からコンクリート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.

- 3) 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.
- 4) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 構造性能照査編，pp.67-72，2002.3
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式の提案，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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 大滝晶生ほか：高品質軽量骨材を用いた RC はりの力学特性に及ぼす自己収縮の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1459-1464，2005.
- 12) 大滝晶生ほか：中国産高品質軽量骨材を用いたコンクリートにおける短繊維補強効果，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集第 V 部，pp.953-954，2004.
- 13) 小野聖久ほか：繊維補強材を用いた軽量コンクリート梁のせん断耐荷力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1639-1644，2004.