

論文 超軽量人工骨材を使用した普通強度 RC はりのせん断耐力

川口 哲生*¹・二羽 淳一郎*²・文 載欽*³・前堀 伸平*⁴

要旨： 近年開発された超軽量人工骨材を使用した普通強度 RC はりを対象に、コンクリート比重を変化させ、せん断耐荷特性及び土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式の適用性について検討した。また、せん断補強及びビニロン短繊維補強効果について検討を行った。その結果、圧縮強度を普通強度レベルとすることにより、圧縮強度あたりのせん断耐力は向上することと、土木学会標準示方書における軽量骨材を使用した際のコンクリート分担分に対する低減率 70% は比重によっては適切ではないこと、さらにビニロン短繊維補強によりせん断耐力と変形能力が向上することが確認された。

キーワード： 超軽量人工骨材, ビニロン短繊維, 破壊エネルギー, 引張軟化曲線, 有限要素解析

1. はじめに

近年開発された超軽量人工骨材¹⁾の特徴としてあげられるのは、従来の軽量骨材より大幅に低い吸水率と比重、またそれを使用することによって従来の軽量コンクリートより高強度な超軽量コンクリートを製造することが可能となることである。しかしながら、超軽量コンクリートにおいては、普通コンクリートと比較して圧縮強度が増加するにつれて、より顕著に引張強度と圧縮強度の比が減少する傾向がある。そのため、せん断補強を行わない高強度の超軽量 RC はりのせん断耐力は、土木学会標準示方書のせん断耐力算定式(以下示方書式と略記)では過大に評価されることになる。そこで本研究では、圧縮強度を普通強度レベル(20~30N/mm²)に減少させることにより、示方書式の適用性について検討することとした。また、一般に超軽量コンクリートは普通コンクリートと比較して破壊エネルギーが小さく、より脆性的に破壊する傾向がある。そこで、コンクリートの変形能力向上に効果のある短繊維補強につ

いて検討することとし、低比重、付着性、耐アルカリ性の観点より、ビニロン短繊維を超軽量コンクリートに混入しそのせん断補強効果、変形能力向上効果について実験的に検討することにした。また本実験にともない、破壊力学特性値である引張軟化曲線と破壊エネルギーを算出し、これを組み込んだ仮想ひび割れモデルの有限要素解析を行い、実験結果と比較した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の形状図を図-1に示す。各供試体の目標圧縮強度は普通強度レベルとした。また、供試体のせん断スパン比(a/d)を3.5、引張鉄筋比(p_w)を1.77%、有効高さを300mmとした。また、せん断補強するケースに対しては、せん断補強鉄筋比(γ_w)を土木学会標準示方書にある最小せん断補強鉄筋比である0.15%とした。またビニロン短繊維補強に関しては、予備実験より繊維長が15mm、

*1 東京工業大学 工学部土木工学科 (正会員)

*2 東京工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 東京工業大学 研究生土木工学科

*4 太平洋セメント(株) 研究本部 清澄研究所 工修(正会員)

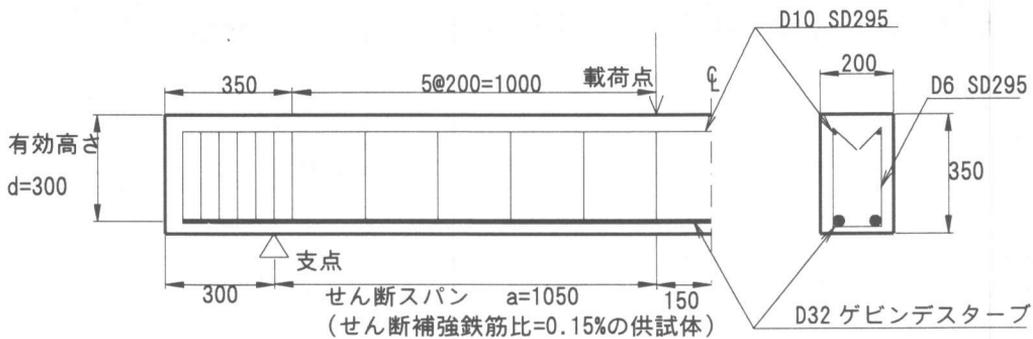


図-1 供試体形状図

表-1 供試体諸元

供試体名称	単位容積重量(kg/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)	せん断補強鉄筋比(%)	ピニロン混入量(%)
A 1	1720	18.7	0	0
A 2	1720	18.7	0.15	0
A 3	1789	12.2	0	0.3
B 1	1540	22.5	0	0
B 2	1540	22.5	0.15	0
B 3	1591	26.3	0	0.3
C 1	1382	27.9	0	0
C 2	1382	27.9	0.15	0
C 3	1461	19.9	0	0.3
D 1	1186	20.2	0	0
D 2	1186	20.2	0.15	0
D 3	1197	18.4	0	0.3
E	1630	47.0	0	0

繊維混入量はワーカビリティを考慮して、コンクリート体積の0.3%とした。表-1に供試体諸元を示す。本研究では、コンクリート比重を4レベル設定しており、目標比重1.8をAシリーズ、1.6をBシリーズ、1.4をCシリーズ、1.2をDシリーズとした。また、せん断補強を行わないものを1、せん断補強を行うものを2、ピニロン短繊維補強を行うものを3とした。なお、Eは、過去に行った実験のデータであり、比較のために用いている。本実験においては、荷重制御の静的載荷を行い、供試体の支点は、ピン支持とし支点部の拘束による水平反力が発生しないように、支点上にテフロンシートを挿入した。

また、本実験に伴ない全ケースに対しRILEMの推奨する3点曲げ試験に従い破壊エネルギーを測定した。

表-2 使用材料

種類	比重	その他
普通セメント C	3.14	—
石灰石微粉末 P	2.70	ブレン値4000
天然山砂	2.60	吸水率:2.2%
超軽量人工粗骨材	1.18	吸水率:1.8%
	0.88	吸水率:2.0%
超軽量人工細骨材	1.00	吸水率:5.5%
軽量人工細骨材	1.27	吸水率:8.7%
ピニロン短繊維	1.30	繊維長:15mm

表-3 示方配合

供試体名称	W/C (%)	s/a (%)	単位量 kg/m ³						
			W	C	P	S			G
						山砂	超軽量	軽量	
A	66.5	46.1	165	248	141	778	0	0	414
B	50.0	46.1	165	330	71	472	132	0	414
C	40.0	47.5	155	388	0	127	95	95	297
D	40.0	48.0	150	375	0	0	179	186	297
E	30.0	46.0	150	500	0	422	162	0	294

2.2 使用材料

本研究で使用した材料について表-2、示方配合を表-3に示す。本実験においては、圧縮強度を普通強度レベルとするに際して、材料分離を抑制するためにW/Cを上げず、石灰石微粉末をセメントの一部と置換して、圧縮強度を普通強度レベルに維持した。なお、予備実験の結果、石灰石微粉末の置換率はAシリーズで40%、Bシリーズで20%、C、Dシリーズで0%とした。また軸方向鉄筋には異形PC鋼棒($f_y=930\text{N/mm}^2$)、せん断補強筋にはSD295異形鉄筋($f_y=368\text{N/mm}^2$)を使用した。

表-4 結果および計算値

供試体 名称	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー ギ- (N/m)	せん断耐力	算出値		算出値		破壊形態
				実験値 V _{exp} (kN)	V _{u,cal} (2) (式 2) (kN)	V _{exp} /V _{u,cal} (2)	V _{u,cal} (1) (式 1) (kN)	V _{exp} /V _{u,cal} (1)	
A1	18.7	2.04	51.6	44.3	59.7	0.74	51.9	0.85	斜め引張破壊
A2	18.7	2.04	51.6	87.5	84.1	1.04	73.1	1.19	せん断圧縮破壊
A3	12.2	1.98	287.3	43.3	45.2	0.96	39.3	1.10	斜め引張破壊
B1	22.5	1.98	57.7	46.6	63.6	0.73	55.3	0.84	斜め引張破壊
B2	22.5	1.98	57.7	85.8	87.9	0.98	79.7	1.08	せん断圧縮破壊
B3	26.3	2.46	150.1	69.4	67.0	1.04	58.3	1.19	斜め引張破壊
C1	27.9	2.19	34.0	57.1	68.4	0.84	59.5	0.96	せん断圧縮破壊
C2	27.9	2.19	34.0	95.6	92.8	1.03	83.9	1.14	せん断圧縮破壊
C3	19.9	2.49	156.8	59.3	61.0	0.97	53.1	1.12	斜め引張破壊
D1	20.2	1.98	18.2	31.9	61.7	0.52	53.6	0.59	斜め引張破壊
D2	20.2	1.98	18.2	76.9	86.1	0.89	78.0	0.98	せん断圧縮破壊
D3	18.4	2.43	181.4	45.2	59.5	0.76	51.7	0.88	斜め引張破壊
E	47.0	3.01	49.4	52.4	81.4	0.64	70.8	0.74	斜め引張破壊

3. 実験結果

実験結果及びせん断耐力算出結果について表-4に示す。せん断補強を行っていないRCはり部材のせん断耐力について、現行のせん断耐力算定式との比較を行った。現行のせん断耐力算定式として、式(1)に示す方書式と、式(2)に示す基本式²⁾を用いた。またせん断補強を行ったRCはり部材のせん断耐力については、式(3)に示す修正トラス理論により算出した。

示方書式 $V_c = 0.20f_c^{1/3}d^{-1/4}p_w^{1/3}b_wd$ (1)

基本式 $V_c = 0.20f_c^{1/3}d^{-1/4}p_w^{1/3}b_wd$
 $(0.75 + 1.4/(a/d))b_wd$ (2)

修正トラス理論 $V_u = V_c + V_s$ (3)

ここに、

V_c:せん断補強を行わないはり部材のせん断耐力

V_s:せん断補強筋により受け持たれるはり部材のせん断耐力

3.1 破壊性状

図-2は、せん断強さされていない供試体、せん断補強を行った供試体、ピニロン短繊維補強された供試体の終局時におけるひび割れ状況である。い

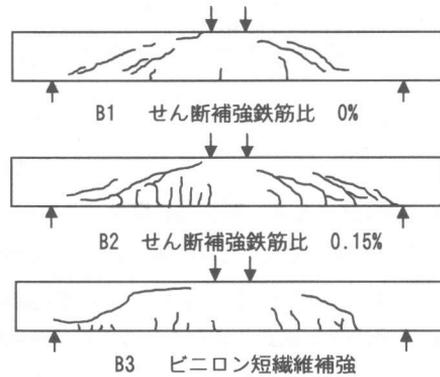


図-2 ひび割れ状況図

ずれのケースにおいても供試体の中央部に曲げひび割れが生じ、その後斜めひび割れが発生した。せん断補強を行った供試体は、斜めひび割れ発生後も急激に耐力を失わず荷重点付近が圧壊するせん断圧縮破壊となった。また、せん断補強を行っていないケースとピニロン短繊維補強を行ったケースではほとんど全て、斜めひび割れ発生後に急激に耐力を失う斜め引張破壊となった。しかしながら、ピニロン短繊維補強されたケースでは、発生する斜め方向のひび割れは、ピニロン補強していないケースよりも少ないことが全ケースにおいて確認された。

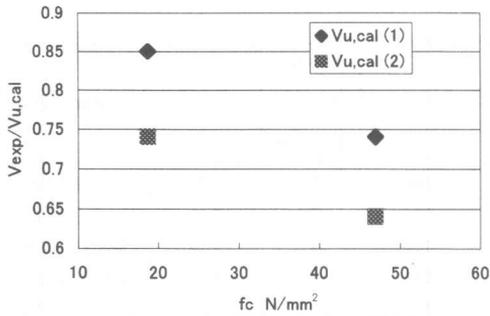


図-3 $V_{exp}/V_{u,cal}$ と f_c の関係

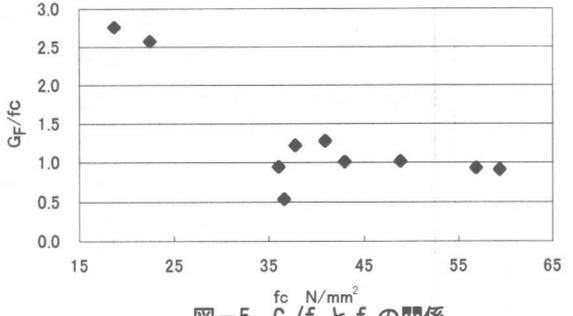


図-5 G_f/f_c と f_c の関係

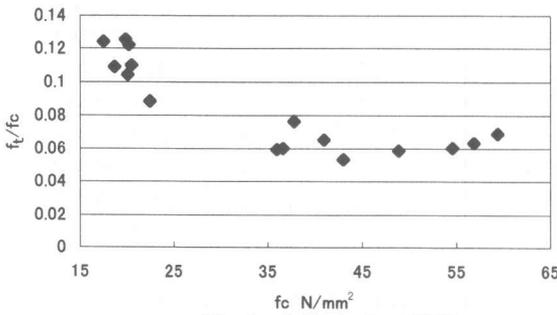


図-4 f_t/f_c と f_c の関係

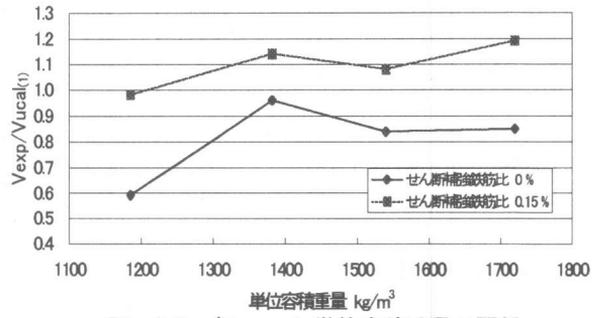


図-6 $V_{exp}/V_{u,cal(1)}$ と単位容積重量の関係

3.2 低強度化とせん断耐力の関係

図-3に単位容積重量のほぼ等しいA1とEのせん断耐力の $V_{exp}/V_{u,cal}$ を f_c に対して示す。図-3より、圧縮強度を減少させることにより、せん断耐力の $V_{exp}/V_{u,cal}$ の値は上昇することが確認される。その原因として、図-4に示すように圧縮強度が減少するのに伴い、 f_t/f_c の値が増加することと、また図-5に示すように圧縮強度あたりの破壊エネルギーが増加するため斜め引張破壊するRCはり部材のせん断耐力が算定式による予測に近づいていくためと考えられる。

3.3 単位容積重量とせん断耐力の関係

図-6にせん断耐力の $V_{exp}/V_{u,cal(1)}$ と単位容積重量の関係を示す。図-6から確認されるのはせん断補強を行っていないRCはりに対して、示方書に規定されるように、軽量コンクリート使用の際のコンクリートの分担するせん断耐力の低減率を一律70%とすることは、単位容積重量によ

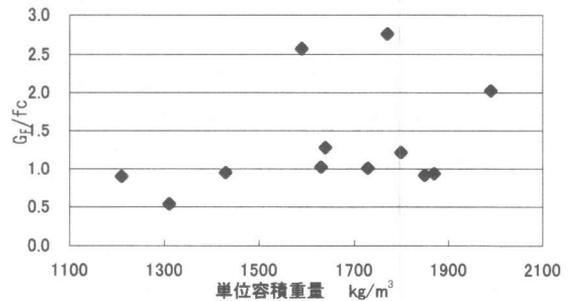


図-7 G_f/f_c と単位容積重量の関係

っては、適切ではないことである。また、最小量であるせん断補強によって、せん断耐力が算定式による予測に近くなることが分かる。また、単位容積重量が減少するにつれて、 $V_{exp}/V_{u,cal(1)}$ の値が減少する傾向があるが、これは、図-7に示すように圧縮強度あたりの破壊エネルギーが減少しているためと考えられる。

3.4 ビニロン短繊維補強効果

図-8にビニロン短繊維補強による $V_{exp}/V_{u,cal(1)}$ と単位容積重量の関係を示す。また図-9にD1とD3の荷重-変位曲線を示す。図-8より、

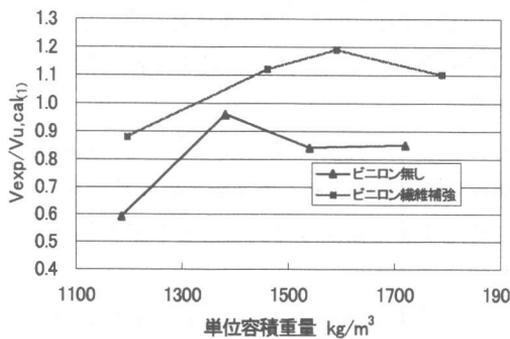


図-8 ビニロン繊維補強を行ったはりの $V_{exp}/V_{u,cal(1)}$ と単位容積重量の関係

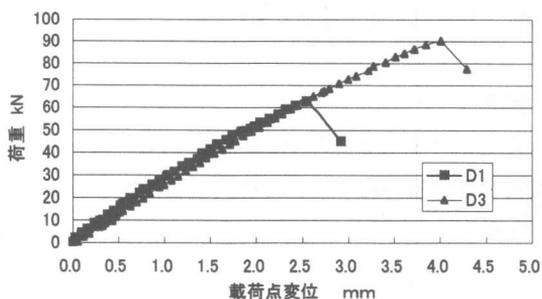


図-9 D1 と D3 の荷重-変位曲線

ビニロン短繊維補強を行った全ケースに対して、せん断耐力が上昇していることがわかる。また、図-9より変形能力も向上していることが確認される。これも、ビニロン短繊維補強により圧縮強度あたりの破壊エネルギーが増加したためと考えられる。

4. 有限要素法解析の適用

4.1 解析の概要

せん断補強を行っていない超軽量RCはりを対象に有限要素解析⁴⁾を行った。この有限要素解析は、あらかじめひび割れ面の位置を仮定する仮想ひび割れモデルであり、破壊力学特性値である引張軟化曲線と破壊エネルギーを組み込んで解析するものである。本研究で行ったせん断荷重実験に用いた超軽量コンクリートを対象に、新修正J積分法⁵⁾にて算出した引張軟化曲線と1/4モデルの引張軟化曲線を一例として、図-10に示す。

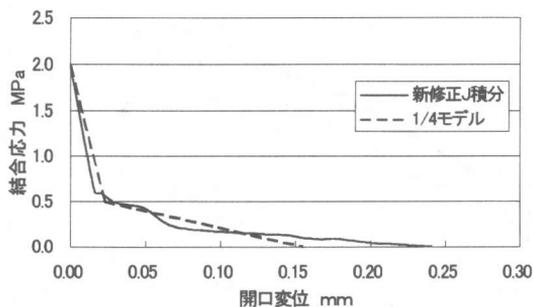


図-10 D1, D2の引張軟化曲線

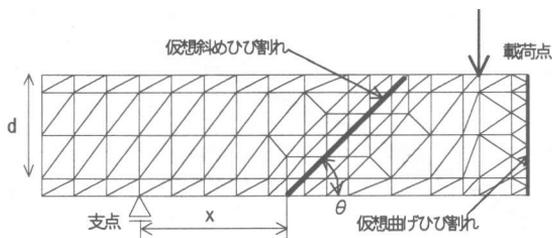


図-11 モデル化概要図

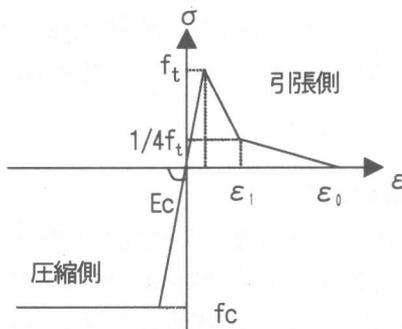


図-12 ロッド要素の応力ひずみ関係

図-10を参考にして、引張軟化曲線は1/4モデルで近似することにした。本解析においては図-11に示すモデル化を行い、予備解析により $x/d=1.7$ 、 $\theta=43^\circ$ と決定した。また図-12に示す応力-ひずみ関係をもつロッド要素を仮想ひび割れ面上に配置した。図-12の引張側の応力-ひずみ曲線は実験から求めた破壊エネルギー G_F を用い、1/4モデルから決定した。なお、 ϵ_1 、 ϵ_0 は式(4)、(5)から実験的に求まる。

$$\epsilon_1 = 0.75G_F / f_t L \quad (4)$$

$$\epsilon_0 = 5G_F / f_t L \quad (5)$$

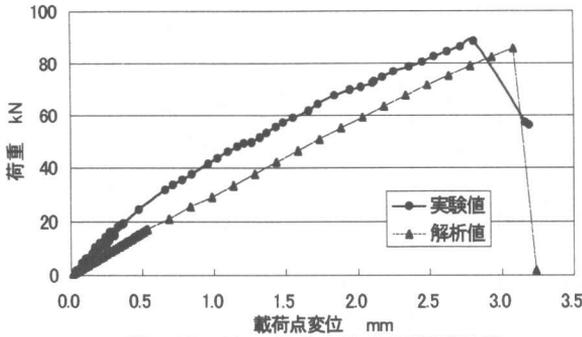


図-13 A1の荷重変位曲線解析結果

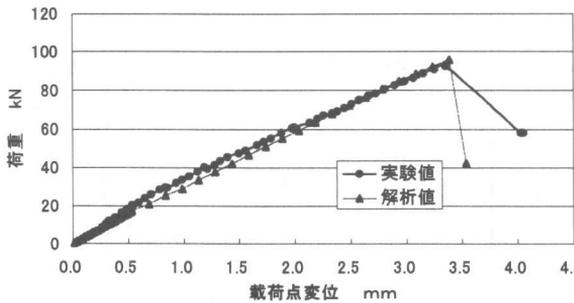


図-14 B1の荷重変位曲線解析結果

なお、ロッド要素の長さは単位長さ($L=1\text{cm}$)とし、これより軟化後のロッド要素のひずみ ε を決定した。

4.2 解析結果

A1, B1のケースを対象にした有限要素解析によって得られた荷重-変位曲線を図-13, 図-14に示す。A1, B1に対してせん断耐力を、精度良く推定できることがわかる。これより、せん断補強を行っていない超軽量RCはりに対して、破壊力学特性値である引張軟化曲線を定めて、これを解析に取り入れるることにより、仮想ひび割れモデルによって、せん断耐力を予測できると考えられる。

5. 結論

- (1)超軽量コンクリートの圧縮強度を普通強度レベルに低下させることにより、圧縮強度あたりのせん断耐力は向上する。
- (2)せん断補強が行われていないRCはりに対して、超軽量コンクリート使用時のコンクリート分

担分の低減率を一律に70%とすると、コンクリートの比重によっては分担分を過小評価する場合がある。

(3)コンクリート比重1.4以上において、最小せん断補強鉄筋量で、せん断補強効果が確認され、そのせん断耐力は示方書式による予測値を上回った。

(4)ビニロン短繊維補強を行うことにより、せん断耐力と変形能力が向上する。

(5)破壊力学特性を組み込んだ有限要素解析で、せん断補強を行っていない超軽量RCはりのせん断耐力を精度良く推定できた。

謝辞

最後に、本研究を実行するにあたり、ビニロン短繊維を提供頂いたユニチカ株式会社に謝意を表します。

参考文献

- 1)岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正:超軽量コンクリート:コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1
- 2)RILEM: Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bent Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.93, pp.285-290.1983.
- 3)二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: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, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 4)平井友紀, 二羽淳一郎:各種横荷重と軸方向引張力を同時に受けるコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, 1996, pp.797-802
- 5)二羽淳一郎, Taweechai SUMRANWANICH, 松尾豊史:コンクリートの引張軟化曲線決定に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.606/V-41, pp.75-88, 1998.11