

## 論文 超軽量人工骨材と普通骨材を混合した RC はりのせん断耐力

川口哲生\*<sup>1</sup>・木場美子\*<sup>1</sup>・二羽淳一郎\*<sup>2</sup>・岡本享久\*<sup>3</sup>

**要旨:** 近年開発された超軽量人工骨材を使用した RC はりに対して普通碎石を混合し, RC はりのせん断耐力および変形能力の向上を目指した。斜め引張破壊する RC はりのせん断載荷実験を行い, 土木学会標準示方書<sup>1)</sup>のせん断耐力算定式の適用性について検討を行った。また, 少量のビニロン短繊維補強効果についても検討を行った。その結果, 超軽量人工骨材に普通碎石を混合することにより, せん断耐力は向上し, さらに少量のビニロン短繊維補強によりせん断耐力および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, せん断耐力, ビニロン短繊維, 破壊エネルギー

### 1. はじめに

近年開発された超軽量人工骨材<sup>2)</sup>は吸水率が従来の軽量骨材より大幅に小さく, ポンプ圧送が可能となり, 凍結融解抵抗性に優れ, 骨材比重も小さい。この超軽量人工骨材を使用することにより, 従来の軽量コンクリートより低比重, 高強度の超軽量コンクリートが作製可能となりその実用化が期待されている。

土木学会標準示方書の規定によれば, 軽量コンクリートを使用した RC はりのせん断耐力に対するコンクリートの分担分は, 圧縮強度, コンクリート比重に関わらず一律に普通コンクリートの 70%とされている。著者ら<sup>3)</sup>は, 超軽量コンクリートの分担分を一律に 70%とすることは普通強度レベル (20MPa 程度) では, 単位容積質量によって過小評価となることを示してきてはいるが, せん断耐力が普通コンクリートに比べて低下することは否定できない。そこで本研究では, 超軽量人工骨材に普通碎石を混合することにより, 普通強度レベルにおけるせん断耐力の向上, 変形能力の向上を目指した。

超軽量人工骨材には, 骨材比重 1.2 と 0.85 の 2 種類がある (以降, 骨材比重 1.2 のものを超軽量人工骨材 1, 骨材比重 0.85 のものを超軽量人工骨材 2 と表記) このうち, 超軽量人工骨材 2 を, 細骨材に軽量骨材を用いない軽量 1 種コンクリートに適用し検討した例は, あまり多くない。そこで超軽量人工骨材 2 を適用することにより骨材比重の違いが, せん断耐力に及ぼす影響と, 超軽量人工骨材 2 の軽量 1 種コンクリートへの適用性を検討することにした。

著者ら<sup>3)</sup>は超軽量コンクリートに低比重で, 耐アルカリ性に優れたビニロン短繊維を少量 (コンクリート体積の 0.3%) 混入することで, ワークビリティを確保しつつ変形能力およびせん断耐力と破壊エネルギーが向上することを実験的に示したが, さらに今回, ビニロン混入量がせん断耐力に及ぼす影響と超軽量骨材と普通碎石混合時のビニロン短繊維の補強効果についても検討を行った。

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

\*3 太平洋セメント (株) 中央研究所 工博 (正会員)

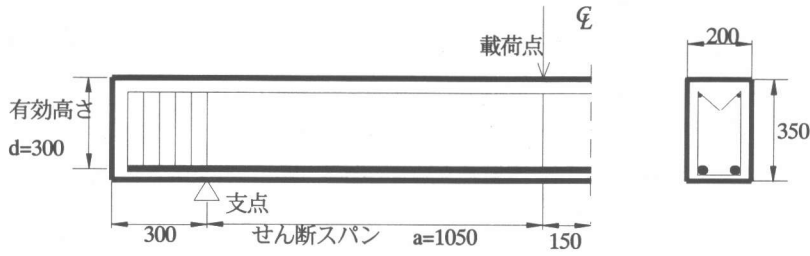


図-1 供試体形状図

単位 mm

表-1 供試体概要

供試体名称	普通砕石置換率 (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (MPa)	ピニロン混入量 (%)
A-1	0	1649	15.3	0
A-2	10	1769	22.5	0
A-3	20	1923	22.4	0
B-1	0	1633	16.5	0
B-2	10	1782	13.4	0
B-3	20	1859	21.6	0
B-4	30	1950	22.7	0
B-5	20	1860	37.9	0
C	0	1673	15.8	0.1
D	0	1703	20.9	0.3
E	20	1854	33.3	0.3

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
シリカフェューム	2.10	—
小瀬産陸砂	2.59	吸水率 2.2% : 粗粒率 2.5
青梅産砕石	2.64	吸水率 0.93 : 粗粒率 7.0
超軽量人工粗骨材 1	1.18	吸水率 1.8%
超軽量人工粗骨材 2	0.88	吸水率 2.0%
ピニロン短繊維	1.30	収束型ピニロン 引張強度 1470MPa, 繊維長 15mm
高性能 AE 減水剤	1.00	ポリカルボン酸系
AE 助剤	1.00	—

普通砕石, 超軽量骨材共に最大骨材寸法は 15mm

表-3 示方配合

試験体名称	W/C (%)	単位量 kg/m <sup>3</sup>						
		W	C	P	S 陸砂	G		
						超軽量 1	超軽量 2	普通砕石
A-1	40	160	280	103	852	455	---	0
A-2	40	160	280	103	852	410	---	100
A-3	40	160	280	103	852	364	---	200
B-1	40	165	288	106	878	---	311	0
B-2	40	165	288	106	878	---	279	95
B-3	40	165	288	106	878	---	249	190
B-4	40	165	288	106	878	---	217	285
B-5	30	160	533	0	801	---	246	188
C	40	165	288	106	878	---	311	0
D	40	165	288	106	878	---	311	0
E	40	165	371	27	878	---	249	190

E の混和材 P はシリカフェューム

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

供試体の形状を図-1, 表-1 に本研究に

おける供試体の概要, 表-2 に使用材料, 表-3 に示方配合を示す。本実験においては, 材料分離を抑えるため W/C を 40%, 単位水量を 160kg 前後とした。

表-4 実験結果および算出結果

供試体 名称	単位容積 質量(kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	破壊エネルギー ギー (N/m)	せん断耐力		算出値 V <sub>u,cal</sub> (kN)	V <sub>exp</sub> /V <sub>u,cal</sub>
					実験値 V <sub>exp</sub> (kN)			
A-1	1649	15.3	2.06	52.8	41.6	47.9	0.87	
A-2	1769	22.5	1.91	67.9	50.6	53.9	0.94	
A-3	1923	22.4	2.25	74.8	50.7	54.3	0.93	
B-1	1633	16.5	1.63	55.5	45.7	49.2	0.93	
B-2	1782	13.4	1.56	45.5	34.2	45.3	0.75	
B-3	1859	21.6	2.12	76.4	54.3	53.6	1.01	
B-4	1950	22.7	2.02	54.2	56.2	54.6	1.03	
B-5	1860	37.9	2.56	106.1	60.0	64.8	0.93	
C	1673	15.8	2.96	76.1	50.1	48.3	1.04	
D	1703	20.9	2.09	245.0	62.1	53.1	1.17	
E	1854	33.4	1.69	180.3	67.1	62.1	1.08	

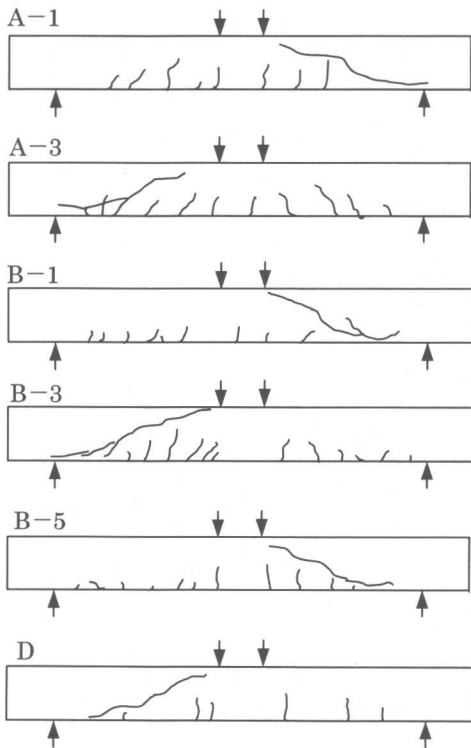


図-2 ひび割れ状況図

また使用する骨材について、超軽量骨材1のケースをAシリーズ、超軽量骨材2のケースをBシリーズとした。

ここで、試験体 B-5, E を除き、石灰石微粉末を混入し圧縮強度が普通強度レベル(20MPa)となるようにした。Eは混和材にシリカフェームを用い圧縮強度の増加を図った。超軽量人工骨材に普通骨材を混合するにあたり、単位容積質量が1700~1900kg/m<sup>3</sup>程度となるように普通骨材置換率を設定した。ここで普通骨材置換率は、全粗骨材体積の内の普通碎石の体積比率である。単位容積質量1700~1900kg/m<sup>3</sup>の範囲で、置換率がAシリーズでは、0%をA-1, 10%をA-2, 20%をA-3とし、Bシリーズでは、0%をB-1, 10%をB-2, 20%をB-3, 30%をB-4とした。またB-5の骨材置換率は20%ではあるが、W/Cを30%と変化させ圧縮強度の増加を図った。

コンクリートの練り混ぜは、粉体と砂をミキサーに投入し1分間空練りを行い、その後普通碎石、超軽量骨材、水を投入し2分間練り混ぜを行った。また、ビニロン短繊維を混入する場合には、粉体とビニロン短繊維を投入後3分間空練りを行った後、普通碎石、超軽量骨材、水

を投入し3分間練り混ぜた。またスランプ、エアは高性能AE減水材とAE助剤で調整した。

使用したビニロン短繊維はアスペクト比 8.33 で繊維を収束したタイプで、短繊維の長さは 15mm であり、その混入量は所要のワーカビリティを保持しつつ D, E のケースで 0.3%, C のケースで 0.1% とした。ここで混入率とはコンクリート全体積に対するビニロン短繊維全体の体積比率である。

## 2.2 実験概要

供試体の形状は、斜め引張破壊するように、試験体のせん断スパン比  $a/d$  は 3.5 とし、有効高さは 300mm、せん断スパンは 1050mm、軸方向筋に異形 PC 鋼棒(降伏強度  $f_y=930\text{MPa}$ )を使用し軸方向鋼材比を 1.77% とした。また载荷に際して、試験体の支点はピン支持とし支点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、荷重制御の試験機により静的载荷を行った。また、本実験と同時に RILEM<sup>4)</sup>の推奨する 3 点曲げ試験を行い破壊エネルギーを測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 単位容積質量と $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ の関係

実験結果およびせん断耐力算定式による算出結果を、表-4 に示す。また、せん断補強を行っていない RC はりのせん断耐力算定式として、式 (1) に示す土木学会標準示方書式<sup>1)</sup>を用いて、実験値との比較を行った。

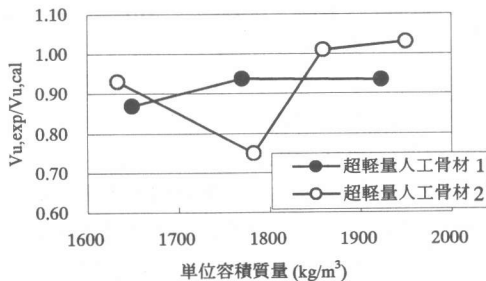


図-3 単位容積質量と  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$  の関係

$$\text{示方書式 } V_{u,cal}=0.20f_c^{1/3}d^{1/4}p_w^{1/3}b_wd \quad (1)$$

$f_c$ :コンクリート圧縮強度(MPa),  $p_w$ :軸方向鉄筋比(%),  $d$ :有効高さ(m),  $a$ :せん断スパン,  $b_w$ :ウェブ幅(m)

一例として、図-2 に示すように本実験の全ケースにおいてその破壊モードは、斜めひび割れが発生後急激に耐力を失う斜め引張破壊であることが確認された。目視によるひび割れ性状では、A シリーズと B シリーズ、骨材置換率の違いには、明確な差は見られなかった。しかし、ビニロン補強したケースでは、発生する曲げひび割れの本数が少ないことが確認された。

図-3 に A, B シリーズの  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$  と単位容積質量の関係を示す。これより、単位容積質量の増加すなわち普通砕石置換率の増加に伴い実験値の値が式(1)による算出値に近づくことがわかる。また、超軽量人工骨材 1 と 2 の  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$  の値は、超軽量人工骨材 1 の方がやや小さい傾向があるが、ほぼ同等であり超軽量人工骨材 2 を用いた場合、単位容積質量が  $1850\text{kg/m}^3$  以上では、実験値は算出値を上回ることがわかる。

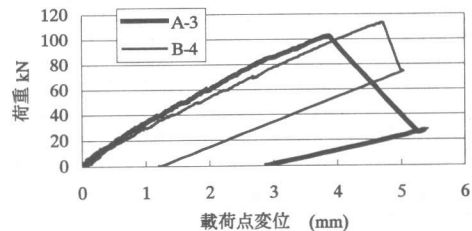


図-4 A-3とB-4の荷重-変位曲線

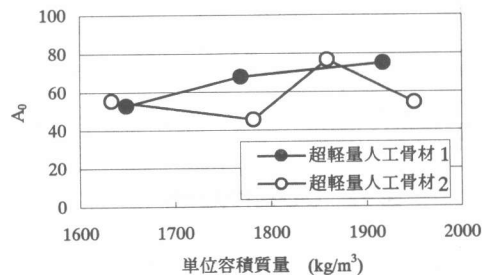


図-5  $A_0$ と単位容積質量の関係

次に図-4 に圧縮強度、単位容積質量のほぼ等しい A-3 ( $f_c'=22.4\text{MPa}$ , 単位容積質量  $1923\text{kg/m}^3$ ) と B-4 ( $f_c'=22.4\text{MPa}$ , 単位容積質量  $1950\text{kg/m}^3$ ) の荷重-変位曲線を示す。これより、B-4 のせん断耐力及びエネルギー吸収能力が A-3 をやや上回っていることがわかる。また図-3 に示すせん断耐力の増加は、図-5 に示すように、単位容積質量が増加するにつれて圧縮強度あたりの破壊エネルギー  $A_0$  が増大しているためと考えられる。またこの傾向は、超軽量人工骨材 1 と 2 に大幅な相違は見られない。なお、 $A_0$  は式 (2) より求めている。

$$A_0 = G_F / (f_c' / f_{c0})^{0.7} \quad (2)$$

$G_F$ : 破壊エネルギー  $f_c'$ : 圧縮強度 (MPa),  $f_{c0}$ : 定数 (10MPa)

### 3.2 圧縮強度と $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ の関係

図-6 にコンクリートの普通骨材置換率が等しい B-3 と B-5 の  $f_c'$  と  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$  の関係を示す。これより、碎石を混合した場合でも、圧縮強度が減少するにつれて、実験値が算定式による予測に近づいていくことがわかる。これは図-7 より圧縮強度を減少させると  $A_0$  が増加することから裏付けられる。

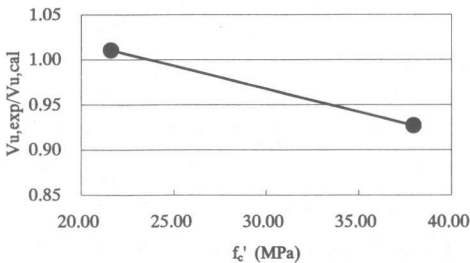


図-6  $f_c'$  と  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$  の関係

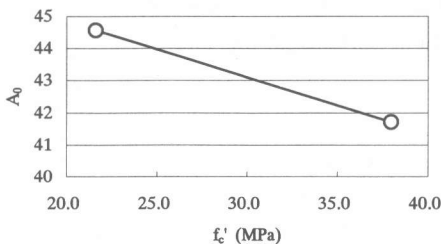


図-7  $f_c'$  と  $A_0$  の関係

### 3.3 ビニロン短繊維補強

図-8 に碎石を混合し圧縮強度を増加させた場合(普通碎石置換率 20%)と普通碎石を混合していない場合の、ビニロン混入量と  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$  の関係を示す。いずれもビニロン混入量の増加とともにせん断耐力が増加しているが、これは、図-9 に示すように、ビニロン混入量の増加とともに圧縮強度あたりの破壊エネルギーが増大するためと考えられる。普通碎石を混合しない場合 ( $f_c'$ :  $16.5\sim 20.9\text{MPa}$ ), 混入量が 0.1% 以上で実験値が示方書式による算定値を上回っている。

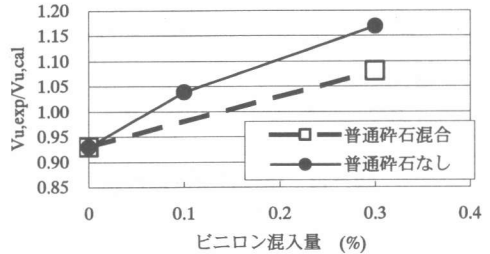


図-8 ビニロン混入量と  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$  の関係

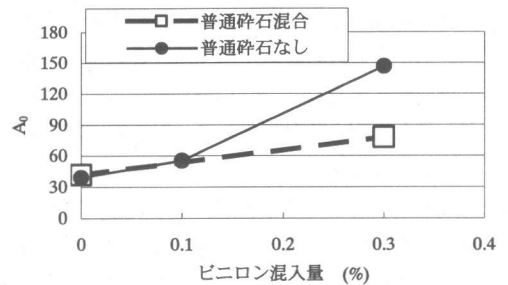


図-9 ビニロン混入量と  $A_0$  の関係

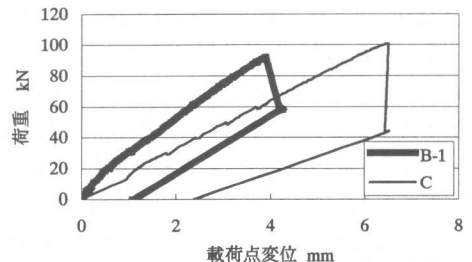


図-10 B-1 と C の荷重変位-曲線

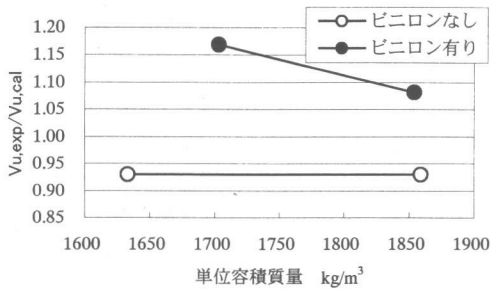


図-11 単位容積質量と  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$

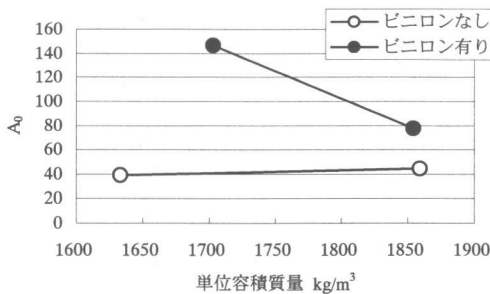


図-12 単位容積質量と  $A_0$

図-10 にコンクリート単位容積質量と圧縮強度がほぼ等しい、B-1( $f'_c=16.5\text{MPa}$ , 単位容積質量  $1633\text{kg/m}^3$ )と C( $f'_c=15.8$ , 単位容積質量  $1673\text{kg/m}^3$ )の荷重-変位曲線を示す。(B-1とCはともに普通砕石置換率は0%) これより、ピニロン混入量0.1%であっても、剛性が減少するが、せん断耐力及びエネルギー吸収能力が明確に増加することがわかる。

図-11 に単位容積質量と  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$  の関係、図-12 に単位容積質量と  $A_0$  の関係を示す。ここで、単位容積質量が  $1633\sim 1709\text{kg/m}^3$  のデータでは普通砕石置換率は0%、 $f'_c$ は  $16.5\sim 21.6\text{MPa}$  であり、単位容積質量  $1850\text{kg/m}^3$  のデータでは普通砕石置換率は20%、 $f'_c$ は  $33.4\sim 37.9\text{MPa}$  となっている。これより単位容積質量が小さくなるほど、すなわち置換率が小さくなるほど、ピニロン補強による補強効果が高いことがわかる。これは、ピニロン短繊維混入時に、単位容積質量が減少するとともに、圧縮強度あ

りの破壊エネルギー $A_0$ が増大することからも説明できる。

#### 4. 結論

- (1)超軽量人工骨材に普通骨材を混合することにより、圧縮強度あたりのせん断耐力および変形能力は増加する。
- (2)単位容積質量  $1850\text{kg/m}^3$  以上の普通強度レベルにおいて、コンクリート比重が同等ならば超軽量人工骨材の比重が1.2と0.85と異なることにも関わらず、せん断耐力はほぼ同等である。
- (3)普通砕石混合時とピニロン混入時において、圧縮強度を減少させると、圧縮強度あたりのせん断耐力が増加する。
- (4)ピニロン短繊維補強において、ピニロン混入量0.1%以上でせん断耐力と変形能力の向上が確認された。
- (5)単位容積質量が減少するほど、ピニロン短繊維の補強効果は増大する。

#### 参考文献

- 1)土木学会：平成8年度制定コンクリート標準示方書，設計編
- 2)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
- 3)川口哲生，二羽淳一郎，文載欽，前堀伸平：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No2，pp.595-600,2000.6
- 4)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.