

# 論文 超軽量人工骨材を用いたコンクリートの破壊力学特性値に関する実験的研究

木場 美子\*1・川口 哲生\*2・高濱 達矢\*3・二羽 淳一郎\*4

**要旨:** 超軽量人工骨材を使用したコンクリートに、ピニロン短繊維を混入し、補強の効果を、破壊エネルギーと引張軟化曲線を算出することによって検討した。その結果、ピニロン短繊維で補強すると、骨材自体が破壊することが抑制され、破壊エネルギーが著しく向上することが確認できた。さらに、骨材の一部を砕石で置換して、その影響を検討した。また、破壊力学特性値を求める実験としてコンパクトテンション法を適用し、その適用性を検討した。その結果、破壊エネルギーはリガメント部に含まれる超軽量人工骨材の量に影響されること、およびコンパクトテンション法は安定した結果を得ることが確認された。

**キーワード:** 超軽量人工骨材, 破壊力学特性, ピニロン短繊維, コンパクトテンション法

## 1. はじめに

超軽量人工骨材<sup>1)</sup>は、従来の軽量骨材より吸水率、比重が大幅に低いため、従来の軽量コンクリートより、高性能かつ軽量のコンクリートを製造することを可能にした。

しかし、普通コンクリートと比較すると、超軽量コンクリートは、骨材の引張強度が弱く、骨材自体が破壊するために、破壊エネルギーが小さく、脆性的に破壊する傾向にある。

そこで、本研究では、超軽量コンクリートにピニロン短繊維を混入し、混入量を変化させることにより、その補強の効果を検討した。破壊力学特性値として破壊エネルギーを求め、さらに拡張J積分法<sup>2)</sup>を用いて引張軟化曲線を算出

した。ピニロン短繊維は、低比重でかつ、付着性、耐アルカリ性に優れ、超軽量コンクリートに混入することにより、変形能力向上が期待できる。

また、引張に弱い超軽量コンクリートの弱点を向上させることを意図して、骨材の一部を砕石で置換して、破壊エネルギーと引張軟化曲線を求めた。破壊力学特性値を求める試験方法として RILEM の切り欠きはり3点曲げ試験と、直接引張試験であるコンパクトテンション法<sup>3)</sup>を採用し、コンパクトテンション法(以下 CT 法)の適用性についての検討も行った。

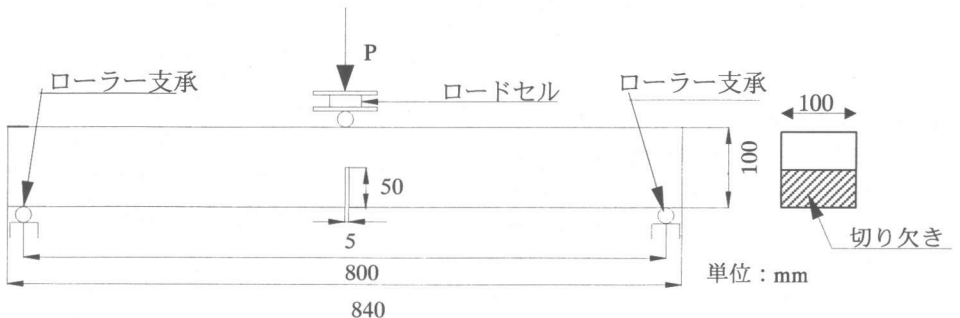


図-1 RILEM 法供試体概要図

\*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 工学部土木工学科 (正会員)

\*3 東京工業大学 工学部土木工学科

\*4 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)

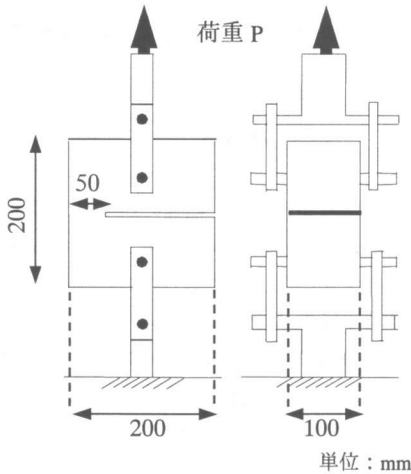


図-2 CT法供試体概要図

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

試験方法として、RILEMが推奨する切り欠きはりを用いた3点曲げ試験を行った。供試体概要を図-1に示す。拡張J積分法では、除荷一再載荷パスに基づいて弾性エネルギーの解放分を定式化するため、荷重軟化域で繰り返し荷重を行った。また、ひび割れの進展を評価するため、 $\pi$ 型変位計をリガメント部の片側に3個、反対側に2個の合計5個を11mm間隔で設置した。荷重速度は0.1mm/minとした変位制御の荷重を行った。支点をローラーにすることにより拘束をなくし、水平反力が生じないようにした。

図-2にCT法の供試体概要を示す。荷重は試験体の下端を固定し、RILEM法と同じ荷重条件で行った。

### 2.2 使用材料

本実験で使用した材料を表-1、コンクリートの示方配合を表-2に示す。本研究では、圧縮強度を普通強度レベルに保つことを意図している。圧縮強度を普通強度レベルに保つ際に、材料分離を抑制するため、石灰石微粉末で調整を行った。

ピニロン短繊維補強超軽量コンクリートをAシリーズとし、ピニロン混入量がコンクリート体積あたり0%のケースをA-1、0.1%をA-2、0.3%をA-3、0.5%をA-4とした。また、超軽量人工骨材を砕石で置換した場合、超軽量人

表-1 使用材料

種類	比重	その他
普通セメント C	3.14	プレーン値 4000
石灰石微粉末 P	2.70	
千葉県小櫃産陸砂	2.60	吸水率:2.20%
東京都青梅産砕石	2.64	吸水率:0.93%
超軽量人工 粗骨材	1.2品	吸水率:1.8%
	0.85品	吸水率:2.0%
ピニロン	1.30	繊維長:15mm 集束型

表-2 示方配合

供試体名	W/C (%)	s/a (%)	単体量 kg/m <sup>3</sup>					
			w	C	P	S		
						陸砂	砕石	超軽量
A	66.5	46.1	165	248	141	778	0	414
B-1	40.0	46.0	160	280	103	852	0	456
B-2	40.0	46.0	160	280	103	852	100	410
B-3	40.0	46.0	160	280	103	852	200	365
C-1	40.0	48.0	165	289	106	878	0	311
C-2	40.0	48.0	165	289	106	878	95	280
C-3	40.0	48.0	165	289	106	878	190	249
C-4	40.0	48.0	165	289	106	878	285	218

工骨材の比重が公称1.2のケースをBシリーズ、公称0.85のケースをCシリーズとして、全粗骨材体積に対し、砕石を0%使用したものを1、10%を2、20%を3、30%を4とする。なおA-1およびA-3は過去に行った実験のデータである。

### 2.3 破壊力学特性値算出方法

破壊エネルギー $G_F$ は式(1)より求める。

$$G_F = (W_o + mg \delta_o) / A_{lig} \quad (1)$$

ただし、 $W_o$ : 実測された荷重-変位曲線下の面積、 $mg$ : RILEMの3点曲げ試験では両支点間の供試体重量、CT法では供試体全重量の2分

表-3 Aシリーズの実験結果

名称	比重	$f_c'$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$G_F$ (N/m)
A-1	1.77	18.7	2.0	52.5
A-2	1.75	15.7	2.0	70.1
A-3	1.77	20.5	2.3	287.3
A-4	1.78	24.6	2.5	159.8

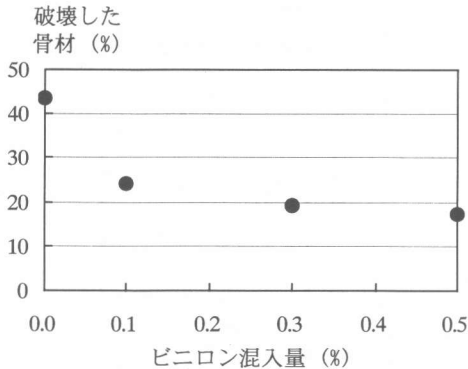


図-4 リガメント部における破壊した骨材の割合

の1を表す,  $\delta_o$ : 供試体破断時の変位,  $A_{lig}$ : リガメント面積を表す。

引張軟化曲線は拡張J積分法<sup>2)</sup>を用いて求めた。拡張J積分法は加えられたエネルギーのうち一部弾性エネルギーとして、解放されるとして、繰り返し荷重を行い除荷-再荷重パスの定式化を行う。また、リガメント部分に設置した5個の $\pi$ 型変位計よりひび割れ進展状況を測定し、ひび割れ進展についても定式化する。

以上の2点が従来の修正J積分法<sup>4)</sup>と異なる拡張J積分法の特徴としてあげられる。

なお、引張軟化曲線の軟化開始応力は推定値であり、使用するデータに依存するため、ばらつきが大きくなる。本研究では、コンクリートの割裂引張強度で置き換えることにした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 ビニロン短繊維補強

実験より得られたAシリーズの材料特性および破壊エネルギーを表-3に示す。

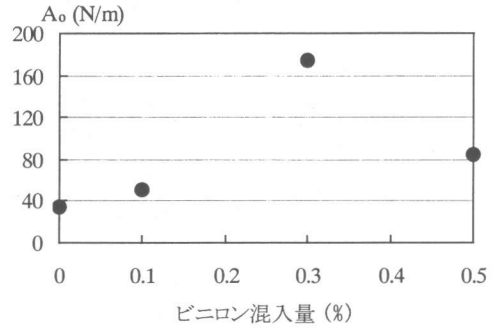


図-3 Aシリーズの $A_o$ の値

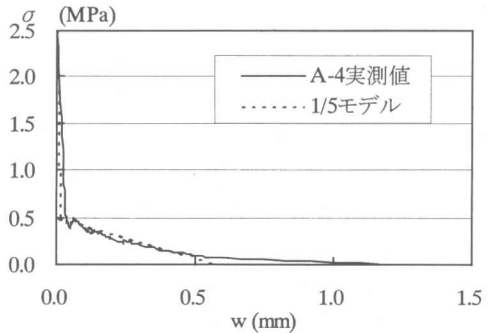
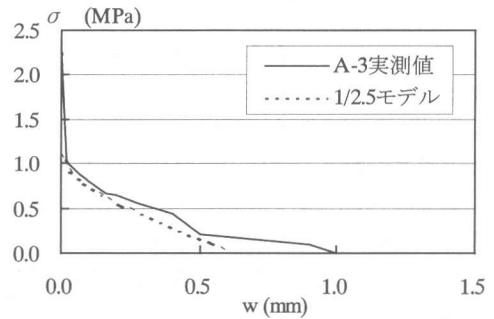


図-5 Aシリーズの引張軟化曲線

CEB-FIP Model Code90 では破壊エネルギーはコンクリートの圧縮強度と骨材の最大寸法の関数として与えられている。

そこでこれを参考にして実測された破壊エネルギーを、無次元化した圧縮強度の0.7乗で補正した定数 $A_o$ (式(2))を材料の特性値として、比較することにした。(図-3)

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

ただし、 $G_F$ : 破壊エネルギー(N/m),  $f_c'$ : コンクリートの圧縮強度(MPa),  $f_{co}$ : 定数(10MPa)

図-4は画像解析を行い、リガメント部に含まれる破壊した超軽量人工骨材の面積をリガ

表-4 BとCシリーズの実験結果

名称	$f_c'$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$G_{FR}$ (N/m)	$G_{FCT}$ (N/m)
B-1	22.9	2.0	52.8	59.7
B-2	21.1	2.3	67.9	44.3
B-3	24.2	1.7	74.8	63.1
C-1	16.5	1.6	55.5	48.2
C-2	23.8	1.6	45.5	70.7
C-3	23.8	1.6	76.4	73.7
C-4	25.7	2.4	54.2	65.4

メント全面積に対する割合として示したものである。ビニロン混入量が少ないほど、超軽量コンクリートが脆性的に破壊する原因の1つであると考えられる、骨材の破壊割合が大きく、ビニロン混入量が多くなると、骨材は割れずに、界面から剥離する傾向が確認された。このため、ビニロンを混入すると破断時のひび割れ幅や、破壊エネルギーの値が大きくなっているのではないかと推測される。

しかしながら、表-3を見てわかるように、ビニロン短繊維の混入量を増加させると、圧縮強度および、引張強度は増加の傾向が見られるが、破壊エネルギーや、図-3に示す $A_0$ の値はビニロン混入量0.3%のケースが最も大きくなっている。

また、図-5に示す引張軟化曲線でも、ビニロン混入量0.3%の場合(A-3)は第二勾配開始点の結合応力は、引張強度の1/2.5程度であるが、0.5%混入の場合(A-4)は1/5程度まで低下しており、1/5モデル<sup>9)</sup>で近似される。ここで、1/2.5モデルは、ビニロン混入量0.3%のコンクリートの過去の実験データを基に、1/4モデル<sup>9)</sup>を参考に近似したものである。

コンクリート中で、混入したビニロン短繊維の補強効果が最も期待される状態は、ビニロン短繊維が均一に分散し、より多くのビニロンがひび割れ面に対して直角に混入されている状態であると考えられるので、上記の結果が得られた原因として考えられることは、ビニロン混入量0.3%と比較して、0.5%混入の場合はリガメント部のビニロンが均一に分散しなかったから

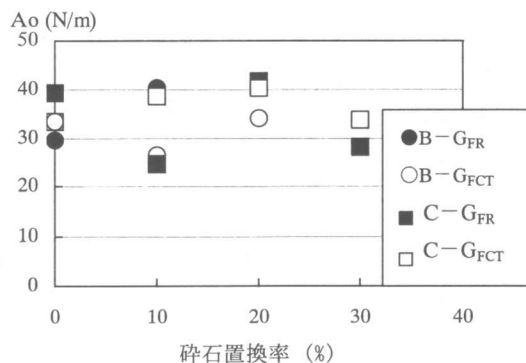


図-6 BとCシリーズの $A_0$ の値

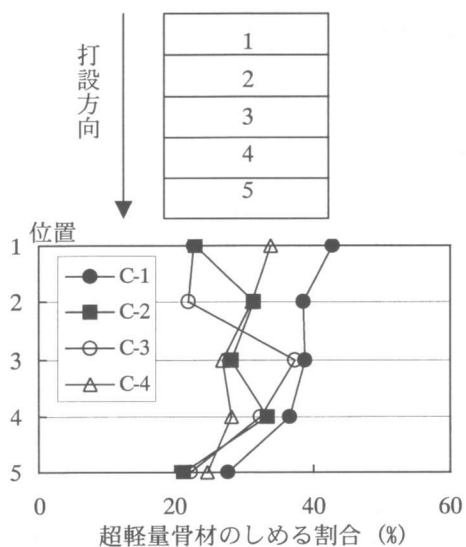


図-7 超軽量人工骨材の分布状況

ではないかということである。

また、以上のことから、ビニロン補強の効果は、プレピーク域のひび割れ進展の段階から現れることが推測される。

今後、より効果的にビニロン繊維で超軽量コンクリートの補強を行うため、配合、ビニロンの種類、混入量等を検討していくことが重要な課題となると思われる。

### 3.2 碎石置換とCT法

Bシリーズ、Cシリーズの実験より得られたコンクリート強度と破壊エネルギーを表-4に示す。表中の $G_{FR}$ はRILEMの切り欠きはり3点曲げ試験より得られた破壊エネルギーを表し、

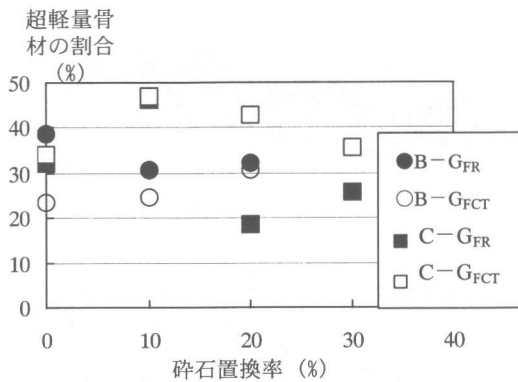


図-8 リガメント部に存在する超軽量人工骨材の割合

$G_{FCT}$  は CT 法によるものである。この場合の  $A_0$  (式(2)) の値を図-6 に示す。

また、図-7 に割裂試験後の供試体断面（高さ約 20cm）を 5 等分し、1 区間（高さ約 4cm）に含まれる超軽量人工骨材の割合を示す。その結果、どのケースの高さ方向に関しても、超軽量人工骨材の占める割合は 20% から 40% の範囲に収まっていることから、打込み方向に著しい材料分離は生じていないことが確認できた。

図-6 に示す  $G_{FR}$  より求めた  $A_0$  について比較すると、比重 1.2 の超軽量人工骨材を用いた B シリーズにおいて、 $A_0$  の値は、砕石置換率 0% のケースと比較して CT 法では砕石置換率 10% のケースは、20% 程度低下しているが、RILEM 法では砕石置換率 10%、20% のケースはともに 35% 程度向上することが確認された。

しかし、比重 0.85 の超軽量人工骨材を用いた C シリーズでは、 $A_0$  の値の増加率は砕石置換率の増加と必ずしも一致していない。

図-8 に RILEM 法と CT 法のリガメント面積に面積に対する超軽量人工骨材の面積の割合を砕石置換率別に示す。

RILEM 法のリガメント部に占める骨材の割合は、B シリーズは比較的安定しているが、C シリーズでは、砕石置換率 10% のケースが大きく、20% のケースでは逆に小さくなっている。この結果と図-6 の  $A_0$  の結果は同様の傾向を示すことが確認された。

また、C シリーズについて RILEM 法と、CT 法で用いた供試体のリガメント部に含まれる超

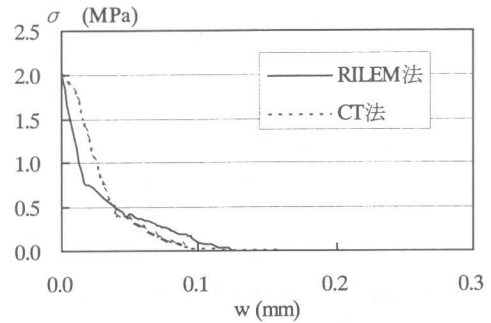


図-9 B-1 の引張軟化曲

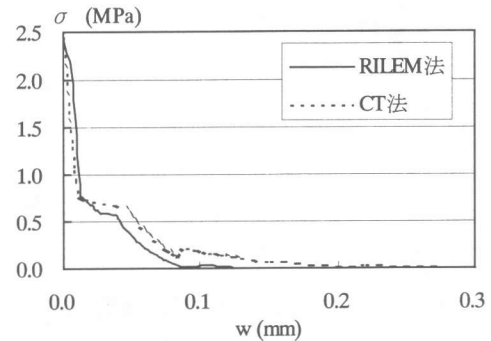


図-10 C-4 の引張軟化曲線

軽量人工骨材の割合についても比較する。RILEM 法の切り欠きはりより、CT 法で用いた供試体のほうが超軽量人工骨材の割合は安定していることが確認された。

さらに、図-6 の C シリーズの  $A_0$  の値を RILEM 法と CT 法について比較すると、CT 法で得られた破壊エネルギーより算出した  $A_0$  は、砕石置換率 30% で若干小さな値となったが、やはり砕石置換率が増加するにつれて、増加の傾向が見られた。したがって、RILEM 法より求めた  $A_0$  が振動したのは、供試体の軸方向に骨材が偏在したからではないかと推測される。

図-9 と図-10 に今回拡張 J 積分法を用いて算出した引張軟化曲線を示すが、RILEM 法と CT 法の引張軟化曲線は比較的一致することが確認できた。

図-11 のようにひび割れ幅分布を仮定する。なお、 $a_0$  : リガメント長さ、 $a$  : ひび割れ長さ、 $w_{max}$  : 破断時の開口変位、 $w$  : 開口変位を表している。

リガメント部におけるひび割れの進展を示した図-12 と図-13 を比較してわかるように、

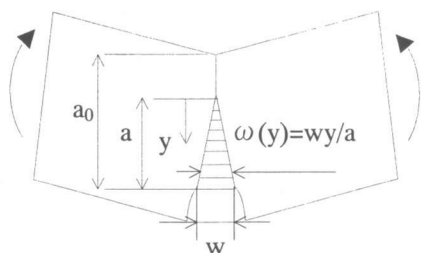


図-11 ひび割れ幅分布

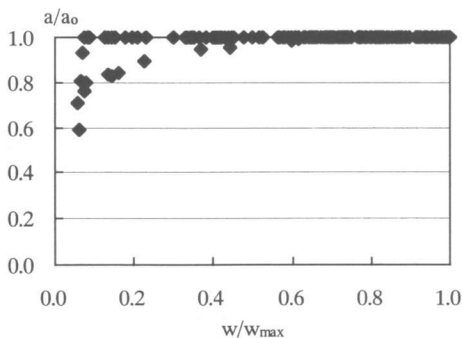


図-13 CT法でのひび割れ進展状況

CT法では、RILEM法と比較して、荷重初期の段階からひび割れがリガメント部全域に到達していく傾向にある。

CT法は脆性的な破壊を示す超軽量コンクリートに対しては、繰り返し荷重時に注意が必要であるが、比較的安定した値が得ることができ、試験体のサイズが小さく供試体の取扱いも容易であるため、破壊力学特性値を求める実験方法として有効な方法であるといえる。

#### 4. 結論

本研究より、次の結論が得られた。

(1) 超軽量コンクリートにピニロン短繊維を混入することにより、破断時のひび割れ幅や破壊エネルギーは増加する。

(2) ピニロン繊維の混入により、リガメント部に含まれる超軽量骨材のうち、破壊する骨材が減少していく。ピニロンの効果が現れるよう、適切な練り混ぜ方法を今後さらに検討していく必要がある。

(3) 破壊エネルギーの値は、リガメント部分に含まれる超軽量人工骨材の量によって影響を受ける。

(4) 均一に締固めしやすいCT法で用いる供試

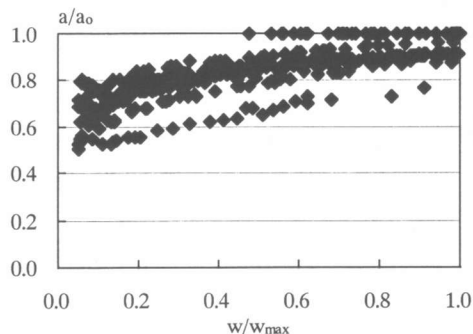


図-12 RILEM法でのひび割れ進展

体のほうが、RILEM法の切り欠きはよりリガメント部に超軽量人工骨材が偏在する可能性が小さく、安定した値を得ることができる。

(5) CT法は、RILEM法と同様に引張軟化曲線を求めることができ、CT法は破壊力学特性値を求める実験方法として有用であることが確認できた。

#### 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) 二羽淳一郎, Tawechai 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
- 3) Uchida, Y., Barr, B.I.G.: Tension Softening Curves of Concrete Determined from Different Test Specimen Geometries, Proceedings of FRAMCOS-3, Vol. 1, pp.387-398, 1997.
- 4) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 治: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, Vol.426, pp.203-212, 1991.2
- 5) 橘高義典, 中村成春, 三橋博三: コンクリートのパイリニア型引張軟化構成則の簡易評価方法について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 20, No.3, pp.181-186, 1998.
- 6) Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T. and Koyanagi, W.: Testing Method to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy, Fracture Toughness and Fracture Energy, Balkema, pp.153-163, 1989.