

# 論文 再生骨材の特性がコンクリートの曲げ破壊性状に及ぼす影響

国枝 稔<sup>\*1</sup>・島崎 鮎<sup>\*2</sup>・鎌田 敏郎<sup>\*3</sup>・六郷 恵哲<sup>\*4</sup>

**要旨:** 再生骨材の特性がコンクリートの曲げ破壊性状に及ぼす影響について、破壊力学パラメータを用いて検討した。再生粗骨材を使用したコンクリートの曲げ破壊性状は、原骨材を使用したコンクリートに比べて、最大荷重以降荷重がやや急に低下する傾向を示した。また、破壊エネルギーを用いて、原コンクリートの破碎時強度の違いや破碎処理程度による違いが曲げ破壊性状に及ぼす影響について評価可能であることが確認できた。本研究の範囲内では、載荷により発生するAEは、新コンクリートと原コンクリートの強度の差が大きいほど、多くなる傾向を示した。

**キーワード:** 再生骨材、破碎時強度、破碎処理、曲げ破壊性状、引張軟化曲線、破壊エネルギー

## 1. はじめに

近年、再生骨材を使用したコンクリート部材の力学特性について検討した研究が数多くなされている<sup>1,2)</sup>。筆者らも、原コンクリートの破碎時強度（以後、破碎時強度と呼ぶ）や破碎処理程度が圧縮強度、弾性係数およびAE発生の特性に及ぼす影響について検討している<sup>3)</sup>。再生粗骨材と新モルタルの付着特性が圧縮強度や弾性係数等に及ぼす影響について検討されたものは多いが、曲げを受ける部材に及ぼす影響等について検討した研究は少ない。本研究では、再生粗骨材の破碎時強度や破碎処理程度が曲げ破壊性状に及ぼす影響について、曲げ強度、引張軟化曲線の形状、破壊エネルギー、およびAE発生数等を用いて検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本研究では、再生粗骨材の破碎時強度および破碎処理程度の影響を確認するため、原コンクリート強度を3水準とし、それぞれについて破碎処理程度を3段階とした9種類の再生粗骨材、

および原粗骨材を用いた。表-1に示すように、破碎時強度が高強度なものからA、B、Cとし、破碎処理程度の小さい方から1、2、3とした。また、原粗骨材をVCとした。

新コンクリートの水セメント比は40%および65%の2種類とし、使用したコンクリートの配合を表-2に示す。

### 2.2 供試体および載荷方法

供試体には100×100×400mmのはり供試体を用いた。1条件につき4体の供試体を作製し、載荷試験の前日に、供試体中央部に深さ20mmの切欠きをコンクリートカッターを用いて設けた。養生は水中養生(20°C)とし、材齢28~30

表-1 再生粗骨材の種類

骨材記号	原コンクリート強度区分	破碎時強度(MPa)	モルタル混入率(%)	絶乾比重	吸水率(%)
A 1	高強度	60.1	42.5	2.31	4.88
A 2			33.2	2.36	4.12
A 3			22.6	2.43	3.14
B 1	中強度	41.7	44.3	2.28	5.58
B 2			37.0	2.34	4.64
B 3			23.4	2.42	3.19
C 1	低強度	25.5	42.3	2.23	6.27
C 2			36.6	2.28	5.42
C 3			25.2	2.39	3.76
VC	—	—	0.00	2.62	0.84

※骨材最大寸法はいずれも20mm

\*1 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工修（正会員）

\*2 岐阜工業高等専門学校教授 環境都市工学科（正会員）

\*3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

\*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

日にて、3点曲げ載荷試験（載荷スパン：300mm）を行ない、荷重、CMOD（切欠き部の開口変位）を計測した。なお、最大荷重以降急激に破壊が進行する場合には、必要に応じて除荷、再載荷を行なった。

圧縮強度ならびに弾性係数の測定は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の円柱供試体（1条件につき3体）を用いた。はり供試体と同様に養生された円柱供試体の相対する側面（2ヶ所）にひずみゲージを貼付し、ひずみおよび荷重を計測した。

### 2.3 引張軟化曲線の推定

本研究では、多直線近似解析法を有限要素法に組み込んだ手法<sup>4)</sup>を用い、実験により得られた荷重-CMOD曲線に一致するよう引張軟化曲線を推定した。

### 2.4 破断面形状の計測

破断面形状の計測には、破碎処理程度や付着モルタル強度が大きく異なるA1, A3, C1, C3およびVCの計5種類の供試体を用いた。曲げ載荷試験により得られた破断面のうち $70 \times 70\text{mm}$ の範囲を対象として、触針式3次元形状計測装置を用い、計測間隔 $0.4\text{mm}$ にて3次元形状を計測した。さらに、計測点を三角形で結び、表面積を算出した。

### 2.5 AE計測の概要

ひび割れの進展が予想される部分を挟む位置（はり高さの $1/2$ ）に $150\text{kHz}$ 共振型センサを2個（センサ間隔： $100\text{mm}$ ）貼付し、検出したデータをプリアンプ（増幅率 $40\text{dB}$ ）、メインアンプ（増幅率： $40\text{dB}$ ）で増幅処理し、AE計測装置で記録、解析した。なお、しきい値は $40\text{dB}$ とした。普通コンクリートの場合、骨材とマトリックスとの付着が良好でない場合、低荷重レベルにおいていわゆるボンドクラック等が生じ、AEの発生特性に影響を及ぼすことが知られている<sup>5)</sup>。すなわち、曲げ載荷試験における再生粗骨材と新モルタルとの付着特性とAE発生特性との関係を明らかにするためには、できるだけ初期のAE発生特性を把握するのが望ましい。実際の曲げ試験においては、最大荷重到達

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	骨 材 種 類	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G	Ad. (ml) *1	Air 調整剤 *2
40	VC	42	163	404	705	989	250	2.5A
	A1	42	160	395	717	925	250	1.5A
	A2	40	157	388	688	980	200	2.0A
	A3	40	156	388	687	1003	175	2.0A
	B1	41	162	401	706	940	150	1.0A
	B2	40	159	396	695	982	150	1.6A
	B3	40	159	364	695	995	150	1.6A
	C1	42	159	393	715	920	150	1.6A
	C2	44	157	390	689	969	150	1.6A
	C3	44	159	385	693	989	125	1.6A
65	VC	48	163	248	860	951	250	2.0A
	A1	48	159	244	880	892	250	1.0A
	A2	46	155	236	835	936	250	1.2A
	A3	46	157	241	853	975	150	1.2A
	B1	47	159	242	855	926	200	1.5A
	B2	46	157	240	850	945	225	1.2A
	B3	46	157	242	855	961	250	1.2A
	C1	48	159	242	874	872	250	1.5A
	C2	46	156	240	849	937	250	1.2A
	C3	46	157	241	853	955	250	1.2A

\*1: AE 減水剤（セメント $100\text{kg}$ あたりの使用量）

\*2:  $1\text{A} = \text{C} \times 0.002\%$

時までは、ほとんどAEは発生しないこと、および破断に近くになるとひび割れの成長により、AE測定の精度が低下すると予想されることなどを考慮し、載荷開始直後から最大荷重を経て、最大荷重の $1/2$ の荷重に低下するまでのAE発生数を測定項目とした。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 圧縮強度および弾性係数

実験により得られた圧縮強度を図-1に示す。破碎時強度の違いが圧縮強度に及ぼす影響については、破碎時強度が高強度ならびに中強度の場合（A, Bシリーズ）、新コンクリートの水セメント比が40%, 65%のいずれの場合においても、VCシリーズと同等以上の圧縮強度となった。一方、破碎時強度が低強度の場合には、特に水セメント比が40%において、VCシリーズの圧縮強度より小さくなり、付着モルタル量が多いほど（破碎処理程度が小さいほど）、圧縮強度は小さくなつた。

弾性係数については、図-2より分かるように、破碎時強度や新モルタルの水セメント比の違いにかかわらず、付着モルタル量が多くなる

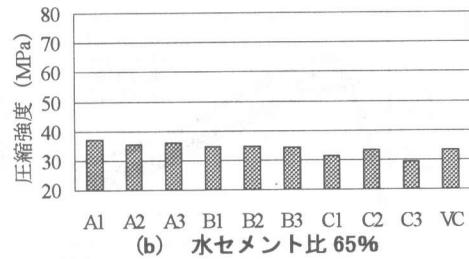
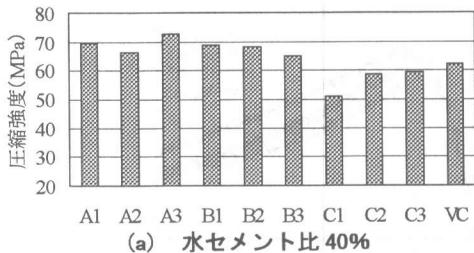


図-1 圧縮強度

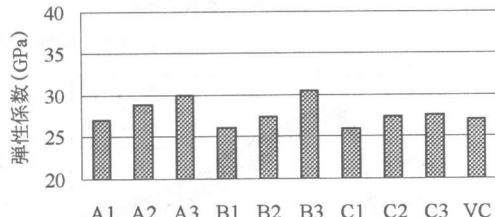
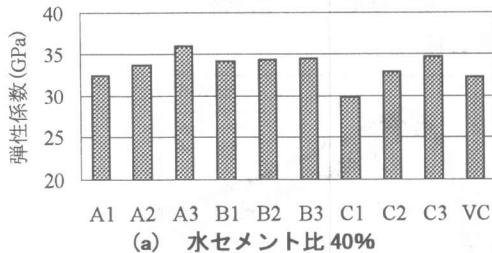


図-2 弾性係数

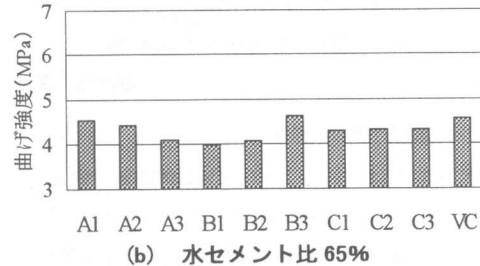
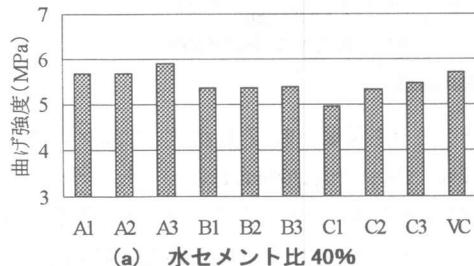


図-3 曲げ強度 (切欠き供試体)

ほど (破碎処理程度が小さいほど) 小さくなり、既往の結果<sup>1), 2), 3)</sup>とも一致している。

### 3.2 曲げ破壊性状

#### (1) 曲げ強度

切欠きを有する供試体を用いて得られた曲げ強度を図-3に示す。破碎時強度が中強度ならびに低強度の場合 (B, C シリーズ), VC シリーズに比べて曲げ強度が小さくなつた。破碎処理程度の違いが曲げ強度に及ぼす影響については、水セメント比が 40% の場合、破碎処理程度が大きくなるにつれて曲げ強度が大きくなつてゐるが、水セメント比が 65% の場合には、明確な差が生じなかつた。

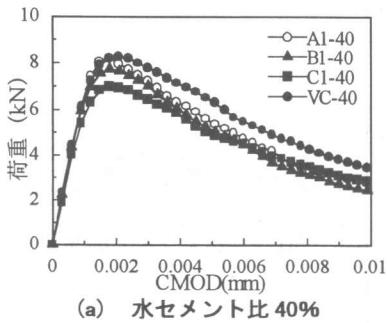
#### (2) 荷重-CMOD 曲線

実験により得られた荷重-CMOD 曲線のうち破碎時強度の異なる A1, B1, C1 シリーズ、破

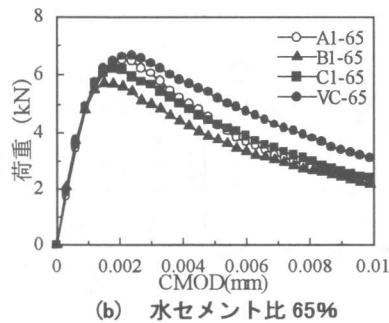
表-3 破断面の表面積 (70 × 70mm)

	破断面の表面積 (mm <sup>2</sup> )	
	水セメント比 40%	水セメント比 65%
A1	5840	5950
A3	5900	6050
C1	5880	6090
C3	5940	6140
VC	5910	6190

碎処理程度の異なる A1, A2, A3 シリーズを VC シリーズとともに図-4, 5 に示す。再生粗骨材を使用したコンクリートの荷重-CMOD 曲線の方が、原骨材を使用した VC シリーズに比べて、最大荷重以降に荷重の低下がやや急となる傾向が認められた。この理由としては、再生粗骨材の付着モルタルの存在により、原粗骨材の量が減少していることから、モルタルの破壊性状に近づいていることによるものと考えられる。特に、破碎時強度が大きくなるほど、最大荷重

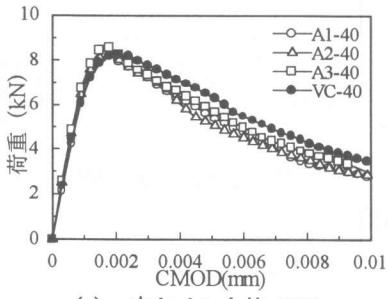


(a) 水セメント比 40%

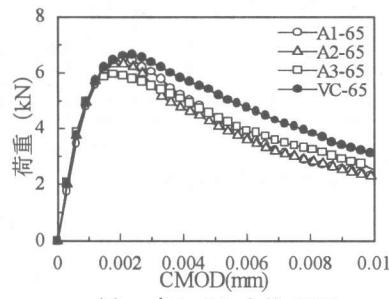


(b) 水セメント比 65%

図-4 荷重-CMOD 曲線



(a) 水セメント比 40%



(b) 水セメント比 65%

図-5 荷重-CMOD 曲線

以降の荷重低下が大きい。

3 次元形状計測により得られた破断面の表面積を表-3 に示す。破碎時強度が大きくなるにつれて、表面積がやや小さくなっている。破断面の凹凸が小さくなっていることが分かる。破断面の観察によると、破碎時強度が大きくなることにより、付着モルタルだけでなく原骨材をも貫通するひび割れが発生しやすくなることで、凹凸の小さい破断面を形成したものと考えられる。破碎時強度が小さい場合には、原骨材を貫通するひび割れが少なく、原骨材の径に依存した凹凸が破断面に現れやすくなったものと考えられる。破断面の表面積は、破碎処理程度が大きくなるにつれて、やや大きくなる傾向がある。この理由としては、破碎処理程度が大きくなるにつれて、相対的に原骨材の量が増加し、原骨材寸法に依存した凹凸が生じやすいためと考えられる。

### 3.3 引張軟化曲線および破壊エネルギー

推定された引張軟化曲線のうち、破碎時強度の異なる A1, B1, C1 シリーズと、破碎処理程度の異なる A1, A2, A3 シリーズと、VC シリ

ーズとともに図-6, 7 に示す。水セメント比 40%, 65%いずれの場合においても、同一のひび割れ幅に対応する引張応力は、原骨材を用いたコンクリートに比べて、再生粗骨材を用いたコンクリートの方が小さくなっている。ここでは、各引張軟化曲線におけるひび割れ幅 0.005, 0.01, 0.02, 0.05mm までの破壊エネルギー（引張軟化曲線下の面積）を求め、同一のひび割れ幅における VC の破壊エネルギーとの比を算出し、図-8, 9 に示す。引張軟化曲線のひび割れ幅の小さい領域の破壊エネルギーは曲げ強度に影響を及ぼしていることが知られているが、水セメント比 40%では、破碎処理程度の違い (A1, A2, A3) による差は小さく、破碎時強度の違い (A1, B1, C1) による差が大きい。他のシリーズ (A2, B2, C2 および A3, B3, C3) においても、破碎時強度が大きくなるにつれて破壊エネルギーが大きくなかった。水セメント比 65%の場合では、破碎処理程度の違い (A1, A2, A3), 破碎時強度の違い (A1, B1, C1) による差はともに大きい結果となった。他のシリーズについても、破碎時の強度が大きいほど、

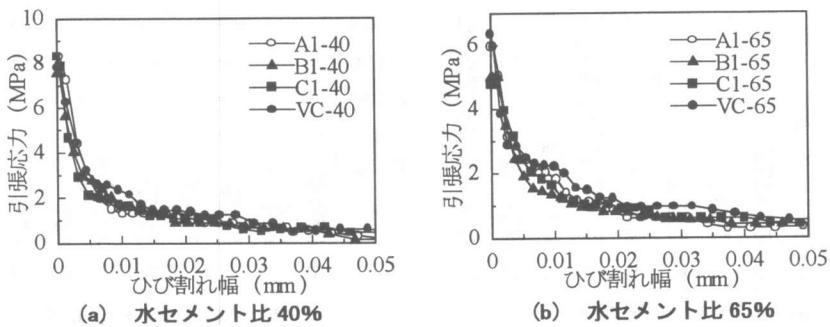


図-6 推定された引張軟化曲線

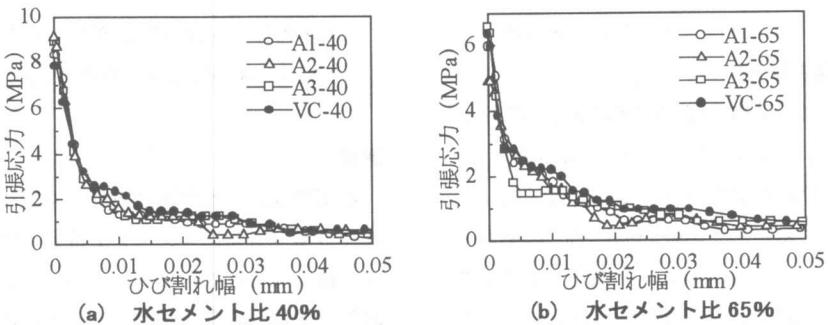


図-7 推定された引張軟化曲線

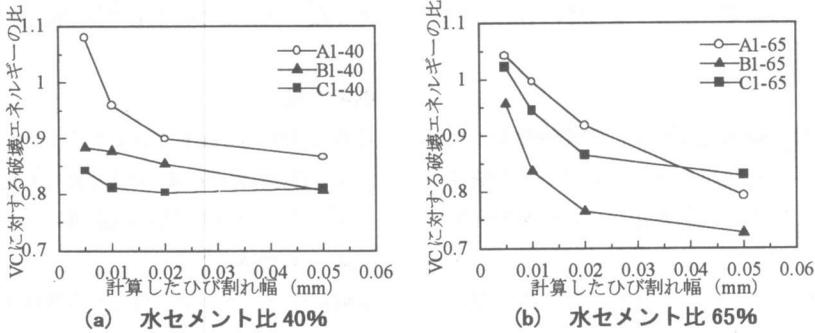


図-8 破壊エネルギー比と破碎時強度

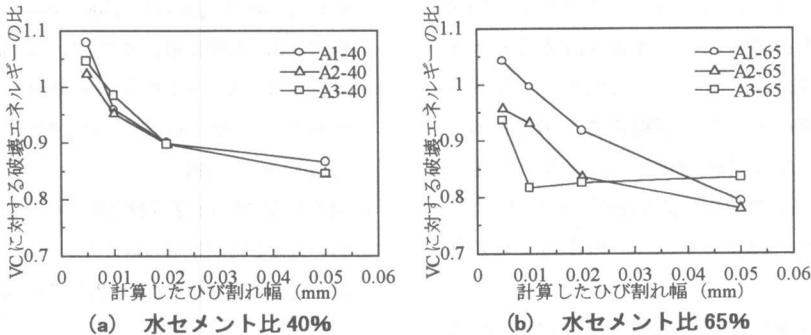
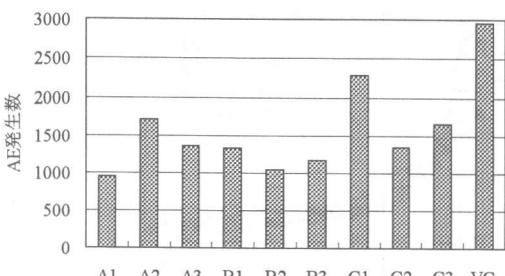


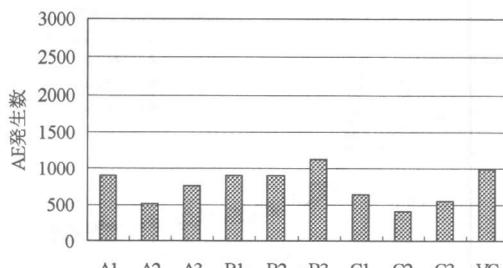
図-9 破壊エネルギー比と破碎処理程度

破碎処理程度が大きいほど、破壊エネルギーが大きくなる傾向にあった。以上より、曲げ強度

からは判別し難い最大荷重以降の挙動の評価には、引張軟化曲線や曲線下の面積で表される破



(a) 水セメント比 40%



(b) 水セメント比 65%

図-10 曲げ試験における AE 発生数

壊エネルギーを用いることが有効であった。

### 3.4 AE 発生特性

図-10 に曲げ載荷試験時に得られた AE 発生数を示す。水セメント比が 40% の場合の C シリーズおよび水セメント比が 65% の場合の A, B シリーズにおいて、比較的多く AE が発生した。すなわち、新コンクリート強度と原コンクリート強度の差が大きい再生骨材コンクリートの場合、比較的多くの AE が発生するものと考えられ、既往の結果<sup>3)</sup>とも一致している。

## 4. 結論

本研究では、破碎処理程度と破碎時強度の異なる再生粗骨材を使用したコンクリートの曲げ破壊性状について、破壊力学パラメータ等を用いて検討し、以下の結論を得た。

(1) 再生骨材コンクリートの曲げ強度は、原コンクリートの破碎時強度および破碎処理程度の影響を受ける。原コンクリートの破碎時強度を高強度にし、破碎処理程度を大きくすれば、原骨材を使用したコンクリートと同程度の曲げ強度が得ることができる。しかし、原骨材を使用したコンクリートに比べて、最大荷重以降の荷重の低下がやや急となり、破壊エネルギーは小さくなる傾向がある。

(2) ひび割れ幅の小さい領域までの破壊エネルギーによって、原コンクリートの破碎時強度の違いおよび破碎処理程度の違いが評価可能である。

(3) 曲げ試験により得られた AE 発生数は、新

コンクリートの強度と原コンクリート強度の差が大きいほど多くなる傾向を示す。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業（研究プロジェクト番号：96R07601）より援助を受けて行なったものである。ここに記して謝意を表す。また、本研究の遂行にあたり、岐阜大学卒論生 川崎智之 君に多大なる協力を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 南波篤志 ほか：再生コンクリートの力学特性および乾燥収縮に及ぼす再生粗骨材の品質の影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 1047-1052, 1996
- 2) 鯉江利夫 ほか：再生骨材の簡易コンクリートへの適用性、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 1099-1104, 1997
- 3) 鎌田敏郎, 後藤友和, 六郷恵哲, 長瀧重義：再生骨材を用いたコンクリートの強度および AE 発生の特性、第 52 回セメント技術大会講演要旨, pp. 406-407, 1998
- 4) 栗原哲彦 ほか：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短纖維補強コンクリートの曲げ破壊性状、土木学会論文集 No. 532/V-30, pp. 119-129, 1996
- 5) 岩波光保, 大即信明：コンクリート中の粗骨材－モルタル間の付着状態が弾性波伝播特性および AE 発生特性に及ぼす影響、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, V, pp. 580-581, 1998