

# コンクリート廃材からの再生骨材を用いたRCはり部材の力学的特性

PROPERTIES OF RECYCLED REINFORCED CONCRETE BEAMS  
MADE FROM CRUSHED CONCRETE COARSE AGGREGATE

柳下文夫\*・佐野正典\*・山田 優\*\*

By Fumio YAGISHITA, Masanori SAN0 and Masaru YAMADA

## 1. まえがき

近年、コンクリート系構造物の解体に伴って発生するコンクリート廃材の量は年々増加する傾向にある。しかし、この廃材の最終処分地は、特に都心部およびその近郊においてかなり不足しているのが現状である。その結果、処分地の確保難や処理費用の高騰などに起因する不法投棄が多発し、大きな社会問題となっている。

この問題の解決策の一つとして、コンクリート廃材からコンクリート用骨材を再生して再利用するという、いわゆる骨材のリサイクルが考えられる。昭和49年頃から始まったこの種の研究<sup>1)</sup>では、骨材再生に使用した破砕機は初期型のものであり、再生された骨材を用いたコンクリートの品質に関して、強度・乾燥収縮等の面で問題点が指摘された。その後、昭和57年から59年計画で実施された『建設省総合技術開発プロジェクト（建設事業への廃棄物利用技術の開発）土木構造物分科会』による研究<sup>2)・3)</sup>では、独自の専用プラントが研究・開発され、再生骨材の品質も向上し、骨材としての実用化の目途が立つに至った。しかし、製造コストなど未解決の問題も多く、使用の状況も低強度の構造物やコンクリート二次製品の域にとどまっている。

再生骨材を用いたコンクリートの構造部材への利用に関する研究は数例<sup>4)</sup>あるものの、疲労載荷によりその構造特性を検討した研究は皆無に等しい。そこで本研究では、再生骨材の真の実用化を目的とし、川砂および碎石と再生骨材を混合使用したコンクリートによる鉄筋コンクリートはり部材の疲労載荷実験を行い、この種のコンクリートの構造部材への適用性を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体および使用材料

試験体の種類及び配筋方法を表1に示す。試験体の断面は  $b \times D = 12\text{cm} \times 18\text{cm}$ 、せん断スパン比  $a/d$  は曲げ試験用 = 3.17、せん断試験用 = 1.58である。全粗骨材量に対する再生骨材 [一次再生(MG-0)：インパクトクラッシャー

表1 試験体の一覧

試験体 No.	記号	再生骨材 置換率(%)		引張鉄筋		圧縮鉄筋		せん断補強筋比 (%)
		MG-0	MG-1	配筋	$a_t$ (%)	配筋	$a_c$ (%)	
B1-0-0	△	—	—	2D-13	1.34	2-φ6	0.29	0.47
B1-1-3	□	30	—					
B1-1-6	○	60	—					
B1-2-3	○	—	30	3D-13	2.02	2-φ6	0.29	0.47
B1-2-6	●	—	60					
B2-2-3	●	—	30					
B2-2-6	●	—	60					
S1-0-0	△	—	—	3D-13	2.02	—	—	0.47
S1-1-3	□	30	—					
S1-1-6	○	60	—					
S1-2-3	○	—	30	3D-13	2.02	—	—	0.93
S1-2-6	●	—	60					
S2-2-3	●	—	30					
S2-2-6	●	—	60					

MG-0：インパクトクラッシャーによる破砕のみ

MG-1：粗骨材再生機の衝撃力のみを与えて"MG-0"を再生したものの

表2 コンクリートの配合

種別	試験体	原材
水セメント比 (%)	73	73
スランプ (cm)	15	15
細骨材率 (%)	49	46
単位水量 (kgf/m <sup>3</sup> )	182	190
絶対容積 (1/m <sup>3</sup> )	セメント	58
	砂	356
	砂利(小)	255
	砂利(大)	109

一による破砕のみ、二次再生(MG-1)：粗骨材再生機の衝撃力のみを与えてをMG-0再生したもの]の置換率を0%、30%、60%の三種類に設定した。

曲げ疲労用試験体について、引張鉄筋比は [B1-0-0~B1-2-6] が  $a_t = 1.34\%$ 、 [B2-0-0~B2-2-6] が  $a_t = 2.02\%$  であり、圧縮鉄筋比およびせん断補強筋比はそれぞれ  $a_c = 0.29\%$ 、  $p_w = 0.47\%$  と全試験体共通である。

せん断疲労用試験体について、全ての試験体の引張鉄筋比は  $a_t = 2.20\%$  であり、せん断補強筋比は [S1-0-0~S1-2-6] が  $p_w = 0.47\%$ 、 [S2-0-0~S2-2-6] が  $p_w = 0.93\%$  である。

コンクリートの設計基準強度は  $200\text{kgf/cm}^2$  とし、その配合を再生骨材の原コンクリートのものと併せて表2に

\* 近畿大学講師 理工学部土木工学科 (〒577 大阪府東大阪市小若江3丁目4-1), \*\* 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科

示した。セメントは早強ポルトランドセメント，細骨材は最大粒径2.5mmの川砂，普通粗骨材は粒径15mm~25mmおよび5mm~15mmの砕石を3:7に重量配分したものをそれぞれ用い，再生骨材については粒径その他についても普通粗骨材に準じた。ベーススランプは15cmであるが，打設時スランプは平均12cmであった。

使用した鉄筋の機械的性質のうち降伏点応力度および引張応力度は，φ6について $f_{sy}=2600\text{kgf/cm}^2$ ， $f_{su}=3500\text{kgf/cm}^2$ ，D13について $f_{sy}=3500\text{kgf/cm}^2$ ， $f_{su}=5600\text{kgf/cm}^2$ である。

再生骨材の吸水率は，普通骨材のものとは大きく異なることが品質上の特徴の一つである。本実験に用いた再生骨材の吸水率は一次再生骨材で3.72%と普通砕石の4.7倍であり，二次再生骨材で1.88%と普通砕石の2.4倍となっている。

2.2 加力および測定方法

(1) 曲げ疲労実験(Bシリーズ)

加力および測定方法を図-1(a)に示す。加力は単純ば

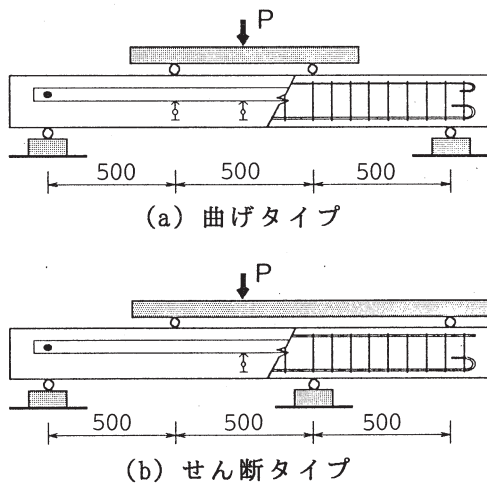


図 1 試験体と加力方法

り3等分点荷方式を用いた。疲労荷重は，初期静的荷重(処女荷重)において引張主筋のひずみが $1,000\mu$  ( $\epsilon_{sy}=2,050\mu$ )に達したときの荷重を上限荷重に設定し，下限荷重0.5tonfの間で1万回を5回，計5万回の定荷重疲労荷重を行った。1万回毎の上限荷重において試験体のたわみ(カンチレバ型ひずみ変換式変位計： $\pm 5\text{mm}$ ， $50\mu/\text{mm}$ )，鉄筋の軸方向ひずみ(ワイヤーストレインゲージ)，ひび割れ幅(クラックスケール)，ひび割れ状況等を測定・観察した。疲労荷重の後，部材角Rが1/25に達するまで静的漸増単調荷重を行い実験を終了した。

(2) せん断疲労実験(Sシリーズ)

加力および測定方法を図-1(b)に示す。加力は逆対称連続ばり方式を用いた。疲労荷重は，初期静的荷重において試験区間内のいずれかのせん断補強筋のひずみが $800\mu$  ( $\epsilon_{sy}=1600\mu$ )に達したときの荷重を上限荷重に設定し，下限荷重の0.5tonfの間で1万回を5回，計5万回の定荷重疲労荷重を行った。1万回毎の上限荷重において試験体のせん断変形，鉄筋の軸方向ひずみ，ひび割れ幅，ひび割れ状況等を測定・観察した。疲労荷重の後，せん断変形が20mmに達するまで静的漸増単調荷重を行い実験を終了した。

3. 実験結果と考察

3.1 曲げ疲労実験結果(Bシリーズ)

疲労荷重における荷重レベル，主筋およびせん断補強筋の降伏の有無，曲げ終局強度の実験値と計算値，破壊モード等の一覧を表3に示す。

図-2に，1万回繰り返し毎に測定した上限荷重荷重時の剛性低下の推移を示す。同図より，B1シリーズの各試験体では，一部の試験体(B1-1-3)を除き同様な剛性低下の傾向を示した。しかし，再生骨材の置換率が高い試験体ほど低い剛性を示しており，その値については平均10%程度の低下になっている。また，再生骨材(一次再生・二次再生)の種類による差は顕著ではなかった。

図-3は，疲労荷重によって生じた主ひび割れ幅の最大値の変化量を示したものである。B1シリーズでは，一次再生骨材を置換した試験体は普通骨材使用の試験体に比べて大きな値を示した。しかし，B2シリーズの試験体では置換率による差は余り現れなかった。このほか，図-4に示す通り，5万回経過後における試験体中央部の圧縮縁ひずみと引張主筋のひずみの変化量は若干量であり，中立軸深さにおいてもその変化はほとんど

表 3 実験結果一覧(曲げシリーズ)

試験体	コンクリート強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	疲労実験		静加力実験						
		上限荷重比 $P_{exp}/P_u$	RY	SY	最大曲げモーメント ( $\text{tf}\cdot\text{m}$ )		実験値 計算値	RY	SY	破壊 モード
					実験値	計算値				
B1-0-0	201	0.47	×	×	1.53	1.47	1.04	○	×	B
B1-1-3	235	0.49	×	×	1.57	1.53	1.03	○	×	B
B1-1-6	218	0.45	×	×	1.45	1.49	0.98	○	×	B
B1-2-3	246	0.47	×	×	1.46	1.49	0.98	○	×	B
B1-2-6	233	0.46	×	×	1.50	1.49	1.00	○	×	B
B2-0-0	181	0.44	×	×	2.18	1.92	1.13	○	×	B+DT
B2-2-3	175	0.43	×	×	2.10	1.88	1.12	○	×	B+DT
B2-2-6	235	0.45	×	×	2.17	2.08	1.05	○	×	B+DT

RY: 引張鉄筋の降伏の有(○)無(×)， SY: スターラップの降伏の有(○)無(×)  
B: 曲げ破壊， DT: 斜張り破壊

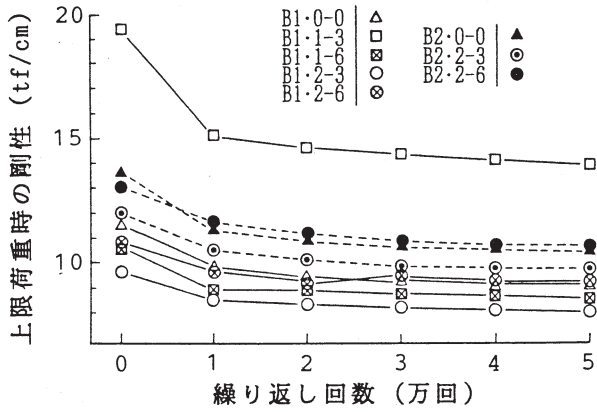


図 2 繰り返し回数と剛性低下の関係

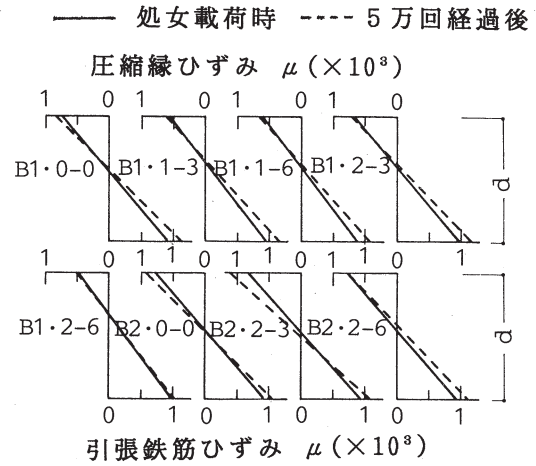


図 4 疲労载荷におけるひずみの変化

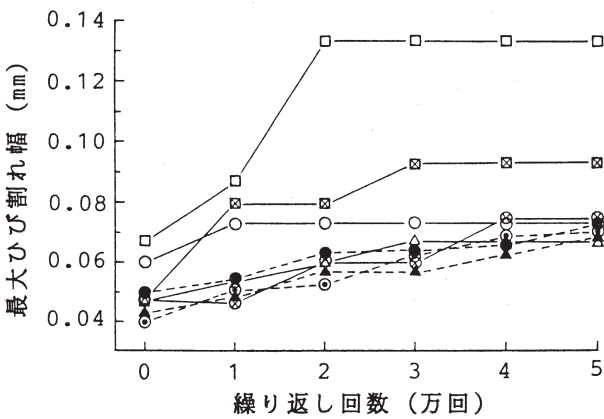


図 3 繰り返し回数とひび割れ幅の関係

見られなかったこと。そして、図-5に示す各試験体の処女载荷時と5万回経過時のひび割れパターンを比較した場合、B1・B2シリーズとも、曲げひび割れ（一部の試験体では軽微な曲げせん断ひび割れが発生している）の進展がみられる程度であり、再生骨材置換による差はほとんど認められなかったこと等が確認されている。

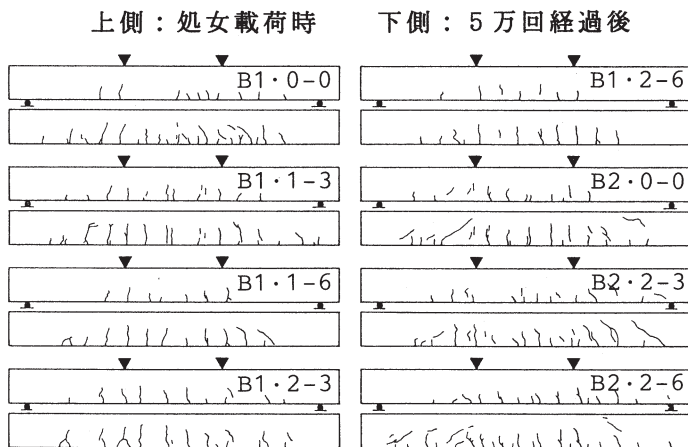


図 5 ひび割れ状況

上記の結果および考察を総合的に判断すると次のようになる。

a) ひび割れ幅およびひび割れパターンから判断すると、剛性低下およびその差の主因は引張側のひび割れによるものであり、再生骨材を置換した試験体では主ひび割れ間に生じた内部ひび割れ（付着の劣化に伴う主鉄筋近傍の微細なひび割れも含む）が大きく影響していると思われる。これは、そのメカニズムについて現時点では明確になっていないものの、再生骨材に付着した原コンクリートのモルタル部に平均的な空隙が存在していることから考えるとマクロ的判断ではあるが推測に値するものと思われる。

b) ひび割れ幅を支配する主要因は；(イ)ひび割れ断面における鉄筋応力。(ロ)鉄筋のかぶり厚さ。(ハ)引張部分に配された鉄筋の本数、などであるという結論が支持されていることは周知である。このことを本実験結果と結びつけて考えるなら、再生骨材を置換したことによる引張側の主ひび割れは、ある程度引張鉄筋により制御できるということになる。(図-3, B2シリーズ)

c) 圧縮域コンクリートが最大圧縮強度に達するまでの範囲においては、応力-ひずみ曲線の勾配  $\partial \sigma / \partial \epsilon$  に対して、再生骨材の影響はほとんどないものと思われる。

### 3.2 曲げ疲労実験後の静的载荷結果(Bシリーズ)

#### (1) 破壊状況

図-6は、各試験体の部材角  $R=1/25$  におけるひび割れパターンを示したものである。B1, B2シリーズとも破壊に至る過程に曲げせん断ひび割れが多数発生したものの最終的には引張鉄筋のひずみの増大と曲げ圧縮域のコンクリートの圧壊により破壊に至っ



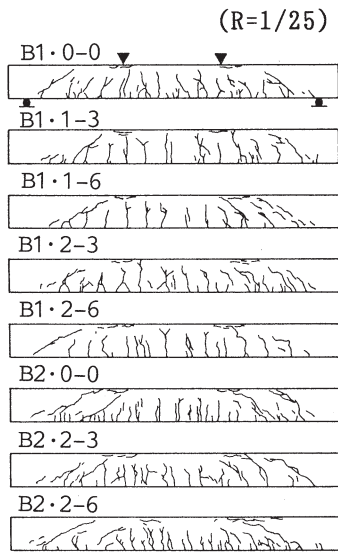


図 6 最終ひび割れ状況

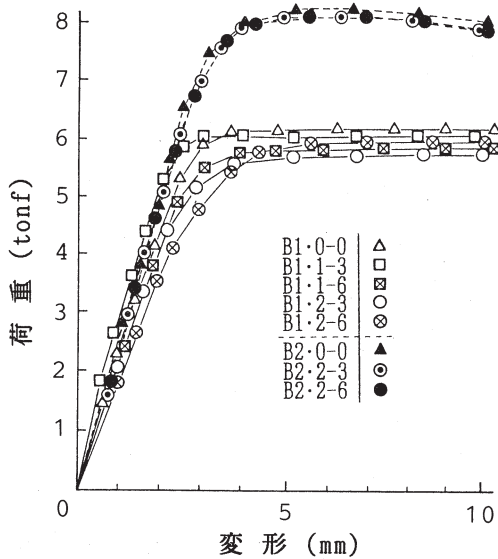


図 7 荷重 - 変形関係

換率60%の試験体についてその傾向が大きい。これは、低応力域とは異なり、高応力下において、再生骨材境界面での微小破壊が著しく生じたためと思われる。

(3) 曲げ耐力

表3には各試験体の破壊抵抗曲げモーメントの比較も示してあるが、再生骨材置換による耐力低下はほとんど見られず、実験値と計算値の間には良い一致がみられた。

3.3 せん断疲労実験結果(Sシリーズ)

疲労载荷における荷重レベル、主筋およびせん断補強筋の降伏の有無、最大せん断応力度の実験値と計算値、破壊モード等の一覧を表4に示す。

図-8には、1万回繰り返した後毎に測定した上限荷重到達時の剛性の推移を示す。S1シリーズの剛性の推移において、再生骨材の置換率が高い試験体ほど低い剛性を示した。このことは、後のひび割れパターンからも推察できるが、再生骨材を多く置換した試験体では微細な初期斜めひび割れが多く発生し、せん断変形を増加させることが原因の一つであると思われる。しかし、S2シリーズではその差は小さい。

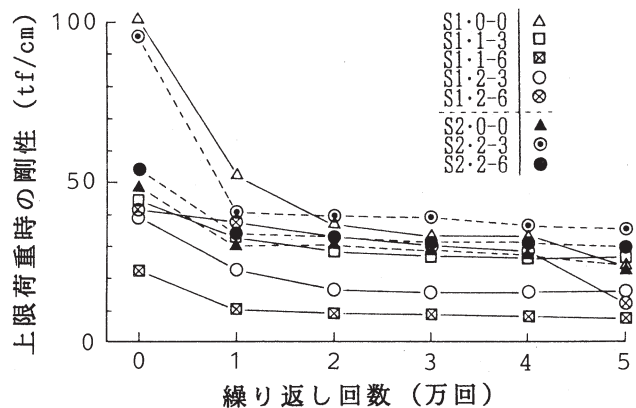


図 8 繰り返し回数と剛性低下の関係

た。すなわち、再生骨材の置換による破壊モードの変化はみられなかった。

(2) 変形性状

図-7に疲労载荷後の静的载荷による荷重-変形関係を示す。同図より、B1シリーズの最大荷重近傍で変形性状に大きな差が現れた。一部の試験体(B・1-3)を除き再生骨材置換による剛性の低下が顕著であり、置

表 4 実験結果一覧(せん断シリーズ)

試験体	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	疲労実験				静加力実験				破壊モード
		上限荷重比 P <sub>exp</sub> /P <sub>u</sub>	RY	SY	最大せん断応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		RY	SY		
					実験値	計算値				
S1.0-0	191	0.75	×	×	37.3	34.0	1.10	×	○	ST-d
S1.1-3	255	0.59	×	×	47.6	38.5	1.24	×	○	SC
S1.1-6	218	0.77	×	○	41.2	36.2	1.14	×	○	ST-b
S1.2-3	192	0.65	×	×	37.4	34.1	1.09	○	○	SC
S1.2-6	174	0.94	×	×	55.8	32.9	1.69	○	○	ST-b
S2.0-0	224	0.58	×	×	46.9	40.7	1.15	×	○	ST-b
S2.2-3	212	0.48	×	×	40.6	39.3	1.03	○	○	SC+ST-b
S2.2-6	233	0.60	○	×	60.9	41.1	1.48	○	○	SC+ST-b

RY:引張鉄筋の降伏の有(○)無(×), SY:スターラップの降伏の有(○)無(×)  
SC:せん断圧縮破壊, ST-b:せん断引張破壊(付着劣化), ST-d:せん断引張破壊(だぼ作用)

図-9は試験体S2・0-0～S2・2-6のせん断補強筋のひずみ分布を示したものである。いずれのせん断補強筋も疲労加载中には降伏が確認されず、再生骨材置換による顕著な差も認められなかった。

疲労载荷前および5万回経過後の各ひび割れパターンを図-10に示す。処女载荷時から5万回経過後パターンを比較した場合、再生骨材を置換した試験体には主筋の付着劣化を示すひび割れの進展が顕著であり、せん断補強筋比の小さい試験体では微細なひび割れも多く発生している。しかし、比較的良質な二次再生骨材を30%置換し

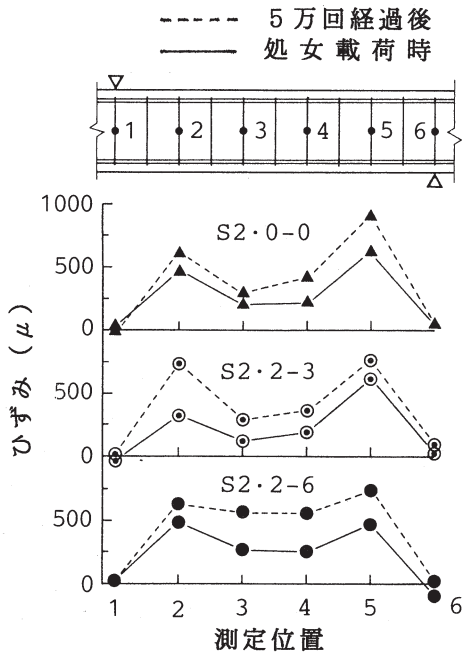


図 9 せん断補強筋のひずみ分布

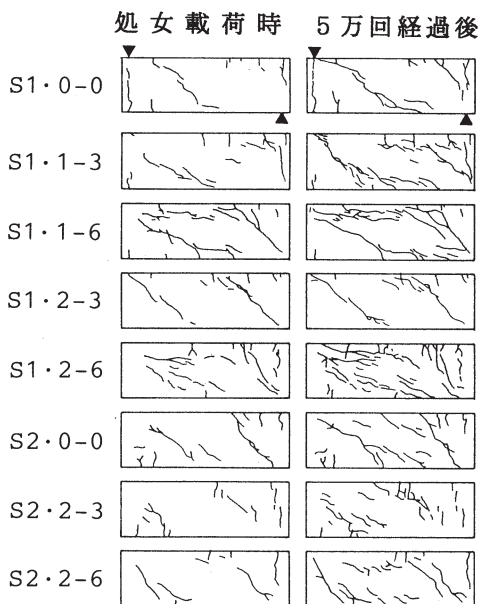


図 10 ひび割れ状況

た試験体S1・2-3では、無置換の試験体S1・0-0とほぼ同様なパターンを示した。

これらのことを総合的に判断すると次のようになる。すなわち、疲労载荷においてせん断状態が支配的な部材では、再生骨材を多く置換した場合ほど引張主筋の付着破壊が起こりやすく、せん断補強筋比できるだけ小さく抑える、引張鉄筋の周長確保、など配筋上の工夫・注意が要求されると思われる。

### 3.4 せん断疲労実験後の静的载荷結果(Sシリーズ)

#### (1) 破壊状況

写真-1に最終破壊状況を示す。S1シリーズに関して、普通骨材を用いたのはりは、ひび割れ開口部における引張鉄筋のだぼ作用(dowel action)によるコンクリートの割裂と斜めひび割れ延長線上の曲げ圧縮域コンクリートの圧壊により破壊し、一次再生骨材置換の試験体は、主に引張鉄筋の付着破壊が支配的になるという傾向が見られた。一方、二次再生骨材を置換した試験体では、引張鉄筋の付着破壊と斜めひび割れ延長上の曲げ圧縮域のコンクリートの圧壊によって部材は耐力を失う傾向にある。また、再生骨材の置換率から見れば、60%の場合は軽微な斜めひび割れが多く発生した。

S2シリーズにおいては、再生骨材置換率による破壊モードに大差はなく、せん断補強筋の効果により終局段階での斜めひび割れが抑制され、斜めひび割れ延長上の引張鉄筋の付着破壊によるコンクリートの割裂を主としたせん断引張破壊の形態を示した。

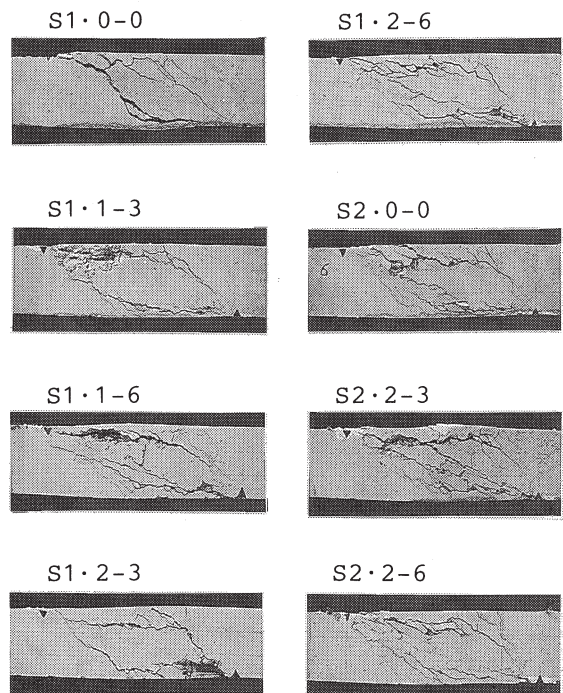


写真 1 最終ひび割れ状況

## (2) 変形状

図-11に疲労載荷後の静的載荷によるせん断力-変形関係を示す。同図より、S1シリーズ試験体の最大荷重に達するまでの剛性に大きな差が表れた。また、一次・二次再生骨材を置換した試験体で、置換率60%のものほど剛性低下が顕著である。これらの傾向は、疲労載荷（荷重レベルが比較的高いところに設定された）の段階のものと同様なものである。

## (3) せん断耐力

各試験体の最大せん断応力度は式(1)に示す大野・荒川式より求めた。

$$\tau_u = k_u \cdot k_p (180 + F_c) \frac{0.12}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot s \cdot \sigma_y} \quad (1)$$

実験値が計算値を下回るケースは存在しなかったが、全体的にばらつきが大きく、再生骨材置換による影響が明白に示されなかった。

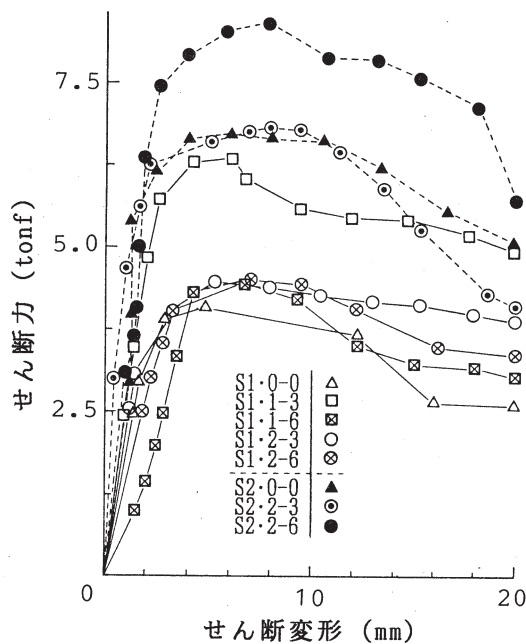


図 11 せん断力-変形関係

## 4. まとめ

再生骨材の実用化を目的とし、川砂・碎石と再生粗骨材を混合使用したコンクリートによる鉄筋コンクリートはり部材の疲労試験を行った。本実験で得られた知見をまとめると次のようになる。

(1) 疲労載荷による剛性の低下は、再生骨材置換率が高い試験体ほど大きい。特に、せん断載荷に対して傾向が顕著である。これは、主に高応力下での内部ひび割れの発生が起因していると思われ、今後、引張鉄筋近傍の

内部ひび割れ発生メカニズムの解明が必要となる。

(2) 再生骨材を用いたことによる若干の構造的なマイナス面は、配筋等を含めた設計・施工方法を検討することにより、ある程度改善できると思われる。

(3) 再生骨材は普通骨材に比べて、比重が小さい、吸水率が大きい、など材料的性質が若干異なる。したがって、ワーカビリティ・所要強度確保等を念頭に置いた材料実験手法および配合設計の検討も行っていく必要がある。

(4) 再生される骨材の品質はプラントごとに異なる。したがって、統合的な品質基準の設定・規定が必要となり、実用化に向けての基礎的実験研究と併せて、再生骨材における材料的性質の把握も急務である。

また、今後の最も大きな課題は、低コストでより天然の骨材に近いものが製造可能なプラントの開発である。

[謝辞] 本実験は、コンクリート廃材リサイクル研究会（会長：大阪市立大学本田淳裕教授）の活動の一貫として行ったものであり、関係各位に感謝致します。

## 参考文献

- (財)建設業界、委員会：“再生骨材コンクリートに関する研究”，コンクリート工学，昭和53年7月，16-7
- 小林茂敏：“コンクリート廃材の現状と利用技術”，土木施工，昭和61年11月，27-15
- 畑 実：“コンクリート廃材の再生技術の改善”，土木施工，昭和61年11月，27-15
- 向井 毅ほか：“再生骨材を用いたコンクリートの構造部材への利用に関する研究”，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和53年9月，1044。