

論文 廃棄物を混入したレジンコンクリートに関する性能評価

島崎 磐^{*1}・鎌田敏郎^{*2}・国枝 稔^{*3}・六郷恵哲^{*4}

要旨：産業廃棄物である解体コンクリートや廃プラスチック類から製造した骨材を用いたレジンコンクリートの力学特性について検討した。再生骨材を利用した場合には、曲げ強度の低下がみられるものの、絶乾状態の再生骨材で置換した場合には、曲げ強度の低下は小さくなった。また、廃プラスチック類から作ったプラスチック骨材を用いることにより、レジンコンクリートの韌性が改善された。

キーワード：レジンコンクリート、廃プラスチック類、再生骨材、AE計測

1. まえがき

プラスチック類の廃材は比較的手軽に破碎処理が可能であるが、再生利用率は低い¹⁾。解体コンクリートの再利用は、路盤材としては進んでいるが、コンクリート用骨材としては始まったばかりである²⁾。また、粗骨材を再生する際に生じる再生細骨材については利用が難しいため、いわゆる処分による処理がほとんどである。

一方、レジンコンクリートは、高い曲げ強度を活用して構造利用されているが、強度が大きい割には韌性が小さいため、破壊はぜい性的であり、コーナー部等からのひび割れ発生が問題となる場合がある。

そこで、解体コンクリートから製造した再生骨材や廃プラスチック類から製造したプラスチック骨材を、レジンコンクリート用骨材の置換材として用い、レジンコンクリートの強度や韌性等の力学特性について検討を試みた。

2. 使用材料

実験には、再生骨材(5~10mm)とプラスチック骨材(5mm以下)を使用した。再生骨材は、PC部材製作工場の廃材である円柱供試体($\phi 10 \times 20$ cm, 設計基準強度 50MPa)を6ヶ月以上

放置した後、破碎機で処理したものである。プラスチック骨材は製品製造過程で残余する廃材を直接破碎機で処理した粒状の樹脂であり、Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), Polypropylene (PP) ならびに Polystyrene (PS) の3種類である。それらの主な物性を、表-1に示す。また、図-1にはプラスチック骨材の破碎後の粒度分布を示す。これによると、PPの粒径は2~2.5mmに集中しており、ABSとPSが似通った粒度分布を示している。なお、ABS

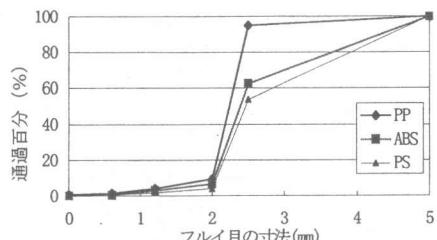


図-1 プラスチック骨材の粒度曲線

表-1 プラスチック骨材の物性³⁾

項目	ABS	PP	PS
引張強度 (MPa)	45.1	28.4	26.5
伸び (%)	6	500以上	44
曲げ強度 (MPa)	75.5	50.0	47.1
曲げ弾性係数 (GPa)	2.42	1.47	2.18
原材料密度 (g/cm^3)	1.16	0.90	1.15
成形収縮率 (%)	0.50	1.65	0.45
吸水率 (%)	0.6	0.1	0.1

*1 岐阜工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (正会員)

*2 岐阜大学工学部助教授 工博(正会員)

*3 岐阜大学工学部助手 工博(正会員)

*4 岐阜大学工学部教授 工博(正会員)

と PS は立体感のある粒状をしている。PP はやや偏平な形状をしていて、比表面積も他に比較して大きい。

3. 実験の概要

表-2, 3 に示す配合により、曲げ供試体(寸法: 6×6×24cm)各 4 本を作製した。供試体名は、標準配合のものを標準とした。プラスチック骨材は、粒径は小さいが、本実験では粗骨材と置換しており、置換割合を樹脂名の後に数値(例えば、5 は 5 割)で示して供試体名とした。再生骨材を用いたレジンコンクリートでは、再生細骨材の使用の有無(RF, RC)と骨材の乾燥状態(絶乾: OD, 気乾: AD)により供試体名をついた。気乾状態の再生骨材の練混ぜ時における含水率は、粒径 5~10mm で 3.31%, 粒径 0.15~0.3mm で 5.07%, 粒径 0.15mm 以下で 5.17% であった。結合材に不飽和ポリエステル樹脂を、また、触媒にメチルエチルケトンパーオキサイド、促進剤にナフテン酸コバルト、添加剤に界面改質剤をそれぞれ可使時間 20 分で適量(微

表-2 再生骨材混入レジンコンクリートの配合

材 料 名	レジンコンクリートの種類と配合(数値: 質量%)				
	標準	RCOD	RCAD	RFOD	RFAD
不飽和ポリエステル樹脂	10	10	10	17.6	17.6
炭酸カルシウム(充填材)	20	20	20		
RF(充填材, 0.15mm 以下)				18.3	18.3
細骨材(0.15~0.3mm)	20	20	20		
粗骨材(5~10mm)	50				
RC(5~10mm)		50	50	45.8	45.8
RF(0.15~0.3mm)				18.3	18.3

RC; 再生粗骨材, RF; 再生細骨材
OD; 絶乾骨材, AD; 気乾骨材

表-3 プラスチック骨材を用いた
レジンコンクリートの配合

材 料 名	レジンコンクリートの種類と配合(数値: 質量%)				
	標準	ABS10	PP10	PS10	PS5
不飽和ポリエステル樹脂	10	14.2	14.2	14.2	11.8
炭酸カルシウム(充填材)	20	28.6	28.6	28.6	23.5
細骨材(0.15~0.3mm)	20	28.6	28.6	28.6	23.5
粗骨材(5~10mm)	50				29.4
PPチップ			28.6		
ABSチップ		28.6			

量) 使用した。充填材として用いる炭酸カルシウム粒径が 40 μm 以下であるのに対して、再生骨材の場合は採取の都合から 0.15mm 以下

のものとした。比重は細骨材、粗骨材とも 2.6、再生骨材は絶乾で 2.3、表乾で 2.4 とした。レジンコンクリートを、自転公転ミキサにより混練量 10kg として練混ぜた後、型枠に打設して、振動台上で 30 秒間締め固めた。

曲げ試験はスパン 18cm で曲げスパン 6cm の 2 点載荷とし、スパン中央に加工したノッチ(深さ 3cm)にクリップゲージを装着して載荷時の開口変位量を測定した。なお、曲げ試験はノッチを入れない供試体でも行った。表-3 に示す供試体では、曲げ試験で 2 分割された折片から作製した供試体(6×6×6cm)の圧縮載荷試験を行い、側面に貼付した抵抗線ひずみゲージ(ゲージ長 30mm、120Ω)によりひずみを計測するとともにロードセルを用いて荷重を計測した。なお、レジンコンクリート供試体のうち、標準と ABS10 の 2 ケースについては、曲げ載荷時に AE 計測を行った。AE 計測は、供試体の両端面にそれぞれ AE センサを貼付し、2 チャンネルで実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 再生骨材混入の場合

(a) 曲げ強度

再生骨材を用いたレジンコンクリートの曲げ強度試験の結果を図-2 に示す。同図には供試

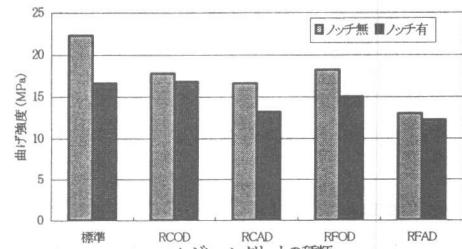


図-2 再生骨材混入供試体の曲げ強度

体中央下縁部にノッチがある場合の強度結果を併記した。これによると、ノッチがある場合、標準と RCOD 供試体の曲げ強度がほぼ同程度の結果となった。しかし、ノッチがない場合には標準の場合が大きく、RCOD, RCAD, RFOD 供試体が同程度の曲げ強度を示した。このこと

から、再生骨材は絶乾状態で使用するか、あるいは気乾状態でも再生粗骨材のみの置換が有効であるといえる。

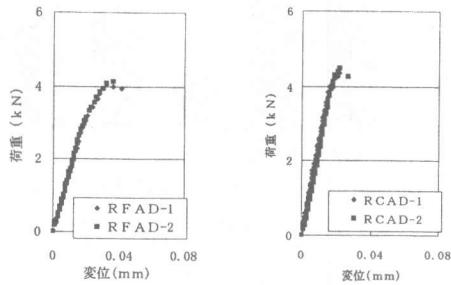


図-3 荷重と供試体ノッチ先端部の変位

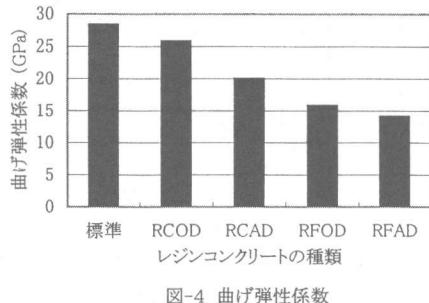


図-4 曲げ弾性係数

(b) 曲げ弾性係数

曲げ試験で得られた荷重とノッチ先端部の変位との関係を図-3に示す。この変位は、クリップゲージで計測したノッチ開口部(肩部)の変位から換算したものである。供試体2本ごとの実験結果はよく一致している。なお、図-3には最大荷重の手前の比較的早い段階で直線性が失われている結果を示したが、他の供試体ではより高い荷重段階まで線形を呈する結果を得た。そこで、破壊荷重の約1/2までの曲げ応力とひずみの関係をもとに曲げ弾性係数を求め、図-4に示す。これによると、弾性係数は標準の場合が最も大きく、続いてRCOD、RCAD、RFOD、RFADの順に小さくなっている。すなわち、再生骨材が気乾状態の場合やすべて再生骨材で置換した場合には、弾性係数は大きく低下する結果となった。

4.2 プラスチック骨材混入の場合

(a) 韧性

供試体中央下縁部のノッチ開口変位(CMOD)と

荷重の関係を図-5に示す。荷重-CMOD曲線は材料の破壊エネルギー吸収性能を評価する上で重要な指標の一つで、同時にひび割れに対す

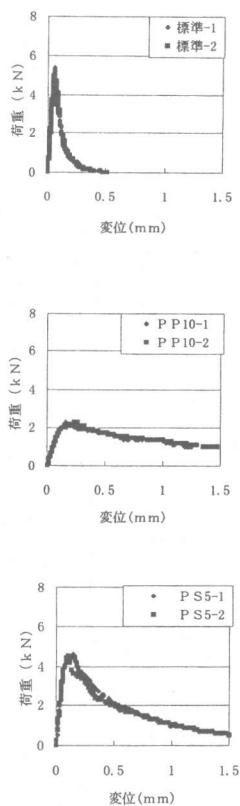


図-5 荷重-CMOD

る抵抗性を示す韌性と大きな関連がある⁴⁾。図-5は各供試体2本ごとの荷重-CMOD曲線であるが、結果のバラツキは小さく、使用した骨材それぞれの影響がよく出ている。すなわち、通常の骨材のみを混入した標準供試体はピーク近傍での尖りが鋭くなっている。一方、プラスチック骨材を混入した場合は、最大荷重以降荷重は緩やかに下降している。また、終局変位量も1.5mmを超えて、標準供試体の約0.5mmを遥かに凌ぐ延性を示している。また、PSの骨材置換割合を5割にしたPS5の荷重-CMOD曲線は、標準とPS10の曲線の中間の形状になっている。この結果から、PSを混入することで大きな韌性の改善を期待できることがわかる。

(b) 引張軟化特性

図-5に示した各荷重-CMOD曲線の平均曲線から多直線近似解析法⁴⁾により引張軟化曲線(ひび割れ領域において伝達される引張応力と

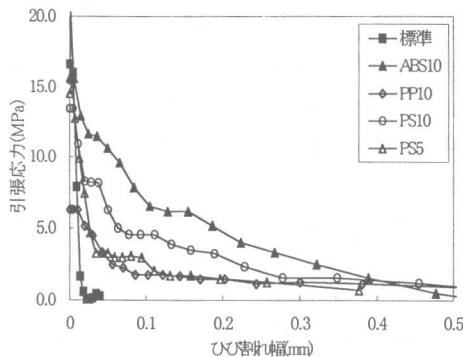


図-6 引張応力とひび割れ幅

表-4 軟化開始点応力と破壊エネルギー

レジンコンクリートの種類	軟化開始点応力(MPa)	破壊エネルギー(J)
標準	16.7	0.17
ABS10	15.7	1.66
PP10	6.3	0.51
PS10	13.5	1.08
PS5	14.6	0.67

ひび割れ幅との関係であり、一軸引張試験時の挙動に相当)を推定した結果を図-6に示す。また、表-4には引張軟化曲線の軟化開始点応力およびひび割れ幅0.2mmまでの破壊エネルギー(引張軟化曲線下の面積)を示す。これによると、軟化開始点応力(引張強度に相当)は標準供試体の場合が最も大きく、PP10で最も小さくなつた。破壊エネルギーはプラスチック骨材を混入すると大きくなり、特にABS混入の場合が最も大きくて標準の約10倍になった。また、PS5の結果によると、軟化開始点応力は標準には及ばないが破壊エネルギーに関しては著しく大きくなつた。このことから、レジンコンクリートのひび割れ抵抗性の改善には、必要に応じて通常の骨材の一部またはすべてをABS等のプラスチック骨材で置換することが有効であるといえる。

(c) 曲げ強度および弾性係数

図-7にはプラスチック骨材を混入した供試体の曲げ強度を示す。これによると、ノッチがある場合と無い場合の強度の差は標準供試体の場合は大きいが、プラスチック骨材で置換した場合は小さい。PP10供試体の曲げ強度は、最

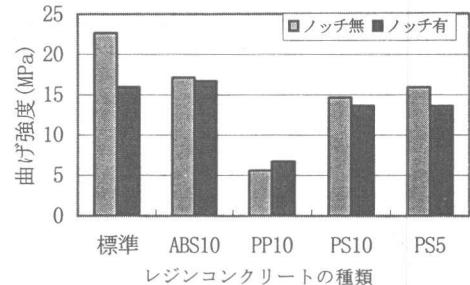


図-7 プラスチック骨材混入供試体の曲げ強度

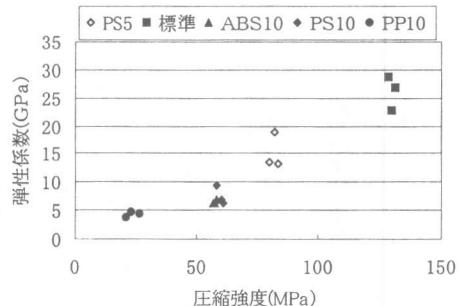


図-8 弾性係数と圧縮強度

も小さな値となつた。破断面の観察によれば標準の場合は骨材が破断しているのに対し、プラスチック骨材の場合は骨材界面での付着破壊が生じていた。

図-8に圧縮試験の結果から得た1/3割線弾性係数を示す。これによると、弾性係数と圧縮強度との間には比較的よい相関が認められる。また、弾性係数はプラスチック骨材自身の曲げ弾性係数より著しく大きくなっている。

(d) AE計測による破壊過程の評価

① AE発生数による検討

図-9に曲げ載荷の経過時間に伴う荷重とAE発生数の関係を示す。これによれば、標準供試体では荷重のピーク以前にはAEの発生はほとんどみられず、荷重がピークに達するとともにAE発生数が急増し、その後最終破断に至るまで連続的にAEが計測された。荷重のピーク以前にAEが発生しないのは、普通コンクリートの曲げ試験における傾向⁵⁾と同様であり、ひび割れの発生以前には、内部の損傷はほとんど起こっていないものと考えられる。一方、ABS10供試体では、荷重のピーク以前からAE

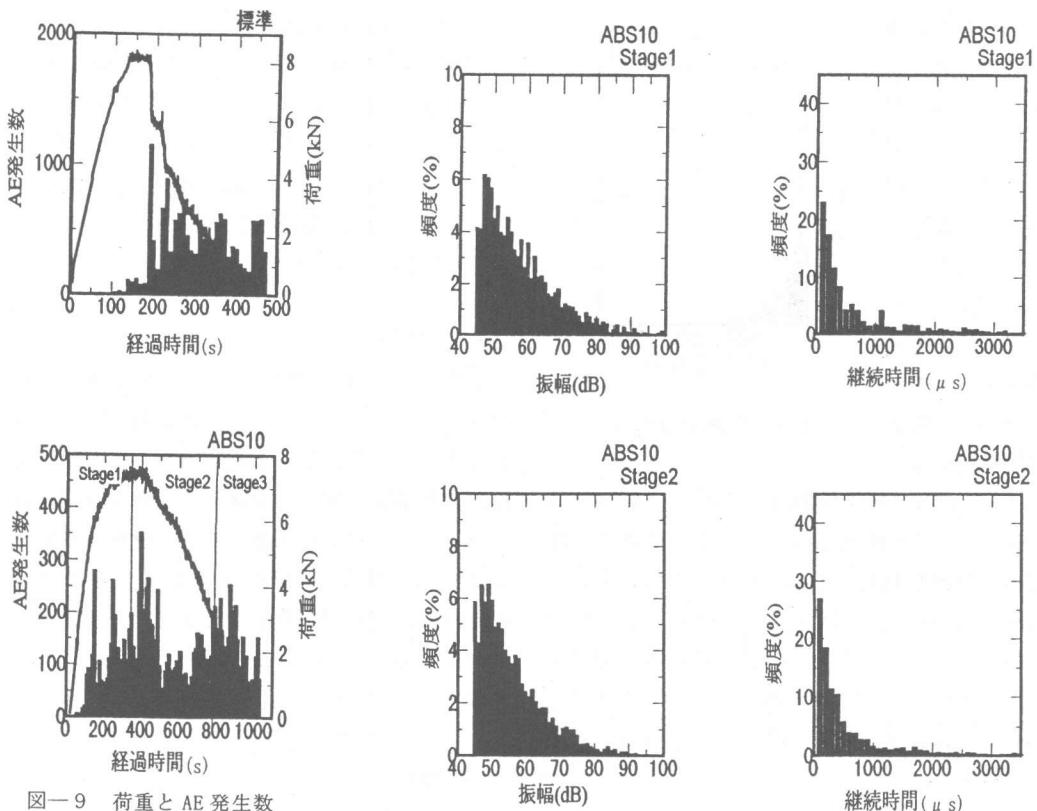


図-9 荷重と AE 発生数

が発生しており、荷重が低い段階から微小破壊の発生が始まっていることが予想される。そこで、図に示すように、AE発生の段階を Stage1～Stage3 の 3 つに区分し、それぞれの Stage における AE パラメータの特徴を把握することにより ABS10 供試体の破壊過程について検討を加えた。評価パラメータとしては、最大振幅値と継続時間を用いた。

②最大振幅値による破壊過程の評価

最大振幅値の規模別頻度分布を Stage1～Stage3 について、それぞれ図-10 に示す。これによれば、Stage1 および Stage2 では、Stage3 と比較すると振幅規模の大きな AE の割合が大きくなってしまい、Stage ごとに明かに破壊の形態が変化していることがわかる。

③継続時間による評価

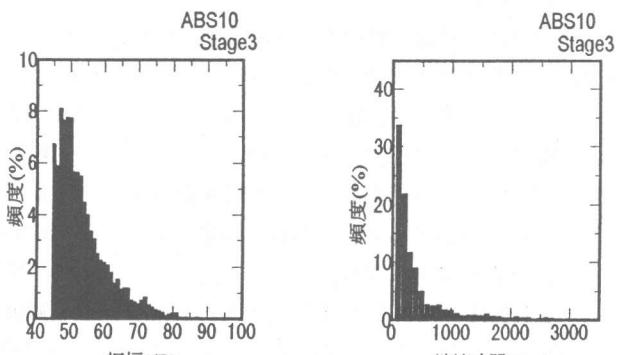


図-10 振幅分布

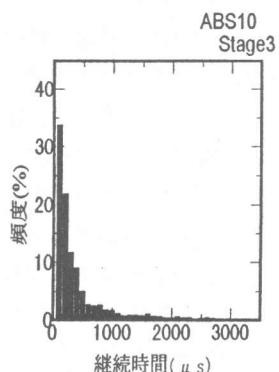


図-11 継続時間分布

図-11 に、それぞれの Stage で計測された AE の継続時間の頻度分布を示す。Stage1 では、継続時間の長い AE が含まれているのに対して、Stage3 では傾向が異なり、ほとんどが継続時間の短い AE であった。AE パラメータとしての継続時間は、すべりに起因する AE の場合は、ひび割れに起因するものと比較して長いものが多くなる⁶⁾特徴が認められており、Stage1 で

は、ひび割れ発生の前に ABS とマトリクスの付着破壊および界面でのすべり等の破壊が卓越し、これらによる AE が計測された可能性が考えられる。また、

Stage3 の継続時間の分布は、

図-12 に示す標準供試体のものとほぼ同じ傾向を示した。ABS を混入していない標準供試体では、計測された AE は、ほとんどひび割れの進展によるものと考えられる。また、ABS10 供試体においても、荷重ピーク以降の後半ではマトリクスのひび割れが卓越することにより、分布の傾向が標準供試体の場合に近くなったものと考えられる。

5. あとがき

本研究では、通常の骨材を、再生骨材またはプラスチック骨材で置換したポリエステルレジンコンクリートの力学特性について検討した。曲げ強度等の必要な性能を保つつつ、これらの骨材を用いることができることや韌性を改善できることを明らかにした。得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- 1) 再生骨材で置換した場合、置換していない標準のものと比較して、曲げ強度は低下する。しかしながら、再生骨材を絶乾状態で使用すれば、強度低下は小さい。
- 2) 気乾状態の再生骨材で置換した場合、絶乾状態のものに比べ弾性係数の低減が大きい。
- 3) プラスチック骨材で置換した場合、その種類によっては、置換しない場合と同程度の曲げ強度を得ることができる。しかし、圧縮強度や弾性係数は大きく低下する。
- 4) プラスチック骨材の種類や配合割合の選

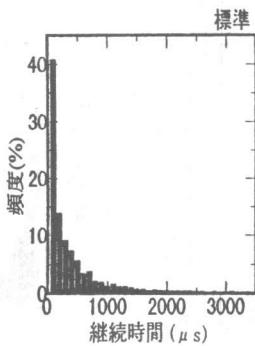


図-12 継続時間分布

択を適正に行えば、レジンコンクリートの韌性やひび割れ抵抗性の改善に有効である。

- 5) 曲げ試験において発生する AE を評価することによって、プラスチック骨材の ABS とマトリクスとの付着破壊および界面でのすべり等の破壊過程を明らかにすることができる。

謝 辞

本研究は、(株)サンレック小牧工場、丸栄コンクリート工業(株)ならびに水野プラスチック工業(有)の協力により行った。また本研究は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「ライフサイクルを考慮した建設材料のリサイクル方法の開発」(研究プロジェクト番号: 96R07601, プロジェクトリーダー: 長瀬重義)の一環として行われたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) たとえば、正木剛大郎: 資源リサイクルの動向、コンクリート工学, Vol. 35, No. 7, PP. 4-7, 1997. 7
- 2) たとえば、笠井芳夫: 解体コンクリートの処理と再利用の現状、コンクリート工学, Vol. 35, No. 7, pp. 13-18, 1997. 7
- 3) たとえば、鐘淵化学工業(株), 三井東圧化学(株)および電気化学工業(株)の製品資料
- 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. 2
- 5) 鎌田敏郎ほか: AE 法によるコンクリートのひび割れ種類の識別、東京工業大学土木工学科研究報告, No. 55, pp. 1-12, 1997. 3
- 6) 駒井謙治郎ほか: 一方向強化炭素繊維/エポキシ樹脂複合材料の引張破壊特性と AE 波形解析、日本機械学会論文集(A編), Vol. 56, No. 528, pp. 72-79, 1990. 8