

## 論文 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的物性

田村雅紀\*1・野口貴文\*2・橘高義典\*3

要旨：骨材回収型リサイクル指向コンクリートは、「コンクリートの力学特性に過度な低下が生じない程度に骨材表面に改質処理を施して、骨材 - マトリックス間の付着力を低減し、原骨材を容易に回収することを可能とするコンクリート」と定義され、コンクリート構成材料を閉じた系内で循環利用することを可能にする。本研究では、経済性・使用性・剥離効果を考慮して抽出した改質処理剤を用いて改質骨材を製造しそれを構成材料としたコンクリートについて、基礎物性、破壊特性およびリサイクル特性による基礎的物性を明らかにした。

キーワード：材料保存性、順逆工程生産システム、骨材改質処理、界面剥離効果、骨材回収性

## 1. はじめに

現在、コンクリート廃材の主用途は路盤材であり、再生製品の品質が元の製品よりも低下するダウンサイクルの更新形態をとる<sup>1)</sup>。一方、骨材資源は急速に枯渇し始めており、現状の処理・利用体系のまま、コンクリート産業の持続可能な発展はもはや期待できないと思われる。この事態は、製品のライフサイクルを想定しない戦後日本における順工程生産システム<sup>2)</sup>（製品の易分解性を考慮せず、製造におけるコスト低減および効率に重点を置いたシステム）に起因するものと考えられる。従って、現在主流であるコンクリートのリサイクル技術は、順工程生産システムによる既存構造物を対象としたものと見なすことができ、設計時にリサイクルを考慮しない使用済み製品を再生する概念に基づいている。現在、コンクリート塊から高品質再生骨材を製造できる技術<sup>3)</sup>も実用化がなされたが、悪循環を引き起こす順工程生産システムは未だ維持されている。従って、将来的にコンクリートのクローズドループ<sup>4)</sup>の形成は困難であり、広い産業領域に物質が拡散しダウンサイクル化を繰り返す循環が形成される傾向にある。

本報では、構成材料のクローズドループが実現できる骨材回収型リサイクル指向コンクリ

ートについて基礎的検討を行った。本コンクリートは、順工程を合理化するシステムを維持しつつ生産の逆工程を考慮して、生産とリサイクルを一貫させた順逆工程生産システム<sup>5)</sup>の実現を目標としている。更新形態はレベルサイクル<sup>4)</sup>となり、原骨材およびセメント原料は意図した形で容易に回収でき、廃棄物の発生は抑制され、環境問題を根本的に解決できる条件が整う。これは、従来型の順工程生産システムとは大きく相違する仕組みであり、「生産とリサイクルは同一体系」と捉えた生産システムに基づく。

2. コンクリート構造物における材料保存性  
材料保存性(Resource Conservability)<sup>6)</sup>とは、「製品に適用された素材が、供用期間中に製品の一部として使用され、解体分離後も品質の低下がないまま同製品および他製品の素材として使用でき、製品を媒体として循環し続けることが可能な性質」を示す。現在の日本においては、コンクリートの材料であるセメントおよび骨材は、素材の組成特性、素材の資源賦存量、コンクリート構造物の陳腐化による短寿命化現象、廃棄処分場枯渇問題および再生品の需用を抑制する社会システムの影響などの問題を考慮すると、材料保存されるべきであると考えられる。

\*1 東京都立大学大学院助手 工学研究科建築学専攻 修士(工学)(正会員)

\*2 東京大学大学院助教授 工学系研究科建築学専攻 博士(工学)(正会員)

\*3 東京都立大学大学院教授 工学研究科建築学専攻 工学博士(正会員)

### 3. 実験内容

#### 3.1 使用材料

使用材料を表 - 1 に、骨材の改質処理方法を表 - 2 に示す。粒形の異なる 3 種類の粗骨材について、表乾状態で骨材表面に改質処理剤を均一に散布し、自然乾燥する簡便な方法で改質処理骨材を製造した。化学処理は、骨材界面におけるセメント水和物の生成を化学的に抑制する処理方法であり、物理処理は、被膜形成により骨材界面の微細な凹凸面を平滑にし、機械的摩擦力を低減する処理方法である。

#### 3.2 実験方法

試験項目と評価内容を表 - 3 に、実験要因を表 - 4 に、計画調合を表 - 5 に示す。粗骨材、改質処理および水セメント比を区別した全 18 種類のコンクリートについて、力学特性および破壊

表 - 1 使用材料

骨材	記号	種類	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	粒径判定実積率 (%)
細骨材	S	砂岩砕砂	2.62	1.71	1.44	55.8	---
	L	石灰石砕石	2.71	0.24	1.68	60.7	60.7
粗骨材	S	砂岩砕石	2.66	0.80	1.59	60.2	60.2
	G	砂利	2.60	1.34	1.71	65.7	65.7

備考) セメント：普通ポルトランド (密度: 3.15 (g/cm<sup>3</sup>))  
粗骨材：火成岩、変成岩、堆積岩の大分類に属する各種骨材から、将来的な汎用性と形状的な特徴を考慮して優先選択した。

表 - 2 改質処理方法とその効果

項目	内容
方法 1	化学処理(C)
内容	合板、木製型枠用 - 水溶性剥離剤
化学名	混合物
成分	鉱物油、乳化剤、ラノリン脂肪酸、脂肪酸石けん
効果	改質処理剤は、鉱物油、油脂を主成分とする。鉱物油における親油基を含む分子群は、セメント水和物とは表面エネルギーの差に基づく非接触状態を確保する。油脂に含まれるエステル系化合物は、コンクリート中の金属イオン存在下で、アルカリ条件における加水分解を起こし、不溶性アルカリ金属塩および酸を生成する。改質骨材の微細界面では、主にこれらの反応・状態により、通常のセメント水和物の生成は抑制され、遷移帯の空隙が増長し、骨材との付着力を化学的に低減する。
方法 2	物理処理(P)
内容	コンクリート表面強化用 - 合成樹脂エマルジョン溶液
化学名	アクリル変性スチレン - ブタジエン系共重合体
成分	SBR、界面活性剤、水
効果	改質処理剤は、コンクリートの摩耗処理・打継処理等に使用される合成樹脂系エマルジョン溶液であり、接着被膜の形成が容易であり、セメント水和物中で安定である。骨材表面の凹凸面、微細空隙は、改質処理剤が付着または充填し、骨材全体の形状に影響しない微細界面レベルで骨材表面は平滑化する。結果、骨材界面とセメント水和物間に発生する機械的な付着力を物理的に低減する。

特性を実験・解析により評価し、割裂破壊した試料破断面の表面粗さおよび骨材表面剥離面積率を実験・画像解析により評価し、最後に、骨材の改質処理効果を評価するために簡便破碎により再生骨材を製造し、モルタル付着率がゼロである原骨材のみの質量割合である原骨材回収率および再生骨材の密度・吸水率を実験により評価した。

### 4. 実験結果と考察

#### 4.1 力学特性による基礎的物性の評価

圧縮強度およびヤング係数を図 - 1 に、割裂引張強度 $F_t$ と有効引張強度 $F_{t\text{eff}}$ を図 - 2 に示す。有効引張強度は引張軟化曲線の開口変位 0.1mm 以下における平均結合応力であり、破壊力学パラメータより算定できる引張特性の評価値となる。コンクリー

表 - 3 試験項目と評価内容

項目	評価内容	
基礎性状	ループ特性	スランプ、空気量
	力学特性	圧縮強度、ヤング係数、引張強度 (標準 4 週)
	破壊特性	荷重変形曲線 (くさび割裂試験: 試験体寸法 100*100*120mm) 破壊パラメータ (引張軟化曲線、有効引張強度)
破断面性状	原骨材剥離面積率	引張割裂試験による破断面について、二次元画像解析手法による面積率 (%)
	表面粗さ (Ra)	レーザー変位計による破断面の表面粗さ $Ra = \frac{1}{L} \int_0^L  f(x)  dx$ Ra (μm): 算術平均粗さ, L (mm): 測定長さ (200mm), f(x): 破断面粗さ曲線
骨材回収性状	原骨材回収率	簡易破碎 (ジョークラッシャー、ボールミル) により製造した再生骨材に占める原骨材のみの質量割合 (%)
	密度・吸水率	本実験では再生粗骨材を対象とした

表 - 4 実験要因

項目	要因
水セメント比	0.6(N-series), 0.4(H-series)
細骨材	S (砂岩砕砂)
粗骨材	L (石灰石砕石), S (砂岩砕石), G (砂利)
改質処理	n (無処理), c (化学処理), p (物理処理)
コンクリート	N-(Ln, Lc, Lp, Sn, Sc, Sp, Gn, Gc, Gp) H-(Ln, Lc, Lp, Sn, Sc, Sp, Gn, Gc, Gp)

表 - 5 計画調合表

記号	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対質量 (kg/m <sup>3</sup> )		
				セメント	細骨材	粗骨材
NL-series	60	46.5	169	281	846	1014
NS-series	60	46.5	169	281	846	995
NG-series	60	41.0	168	281	749	1071
HL-series	40	41.3	184	461	675	995
HS-series	40	41.3	184	461	675	976
HG-series	40	35.2	184	461	576	1053

備考) 各シリーズ内の調合は同一。化学混和剤は W/C=40 (ポリカルボン酸エーテル系), W/C=60 (リガニル系) を所定量添加

トは載荷条件に因らず、改質処理および骨材種類に起因する特徴的な強度発現性<sup>7)</sup>が認められた。砕石であるLおよびSは改質処理による強度低減が無処理の場合と比較して大きくなり、圧縮強度に関しては23%程度の強度低下を示し、改質処理による界面付着力低減効果が有効に作用しているのに対し、粒形の良い砂利であるGは無処理の場合との強度差は小さくなり同様の効果は発現しにくくなっている。また改質処理を施したLおよびSの強度は、同一水セメント比において、無処理であるGよりも大きい値を示す場合があることも認められ、この傾向は弾性係数についても同様であった。骨材形状に起因するマトリックスとの機械的なかみ合わせ力<sup>8)</sup>が影響しているといえる。

また界面付着力低減効果の水セメント比依存性が確認され、モルタルが高強度である場合の方が改質処理による強度低減が大きく、砕石骨材の場合に顕著であった。これは骨材界面の脆弱部に対し、骨材およびモルタルが相対的に高強度となり、破壊進展領域が骨材界面に優先的に形成され、破壊が生じやすくなるためと考えられる。なお砂利のように粒形が良い場合は、改

質処理の有無に関らず骨材界面からひび割れが進展するものと考えられ、改質処理による強度低減効果は大きくはなく、かつ強度および初期剛性は砕石骨材よりも相対的に小さくなった。

#### 4.2 破壊特性による基礎的物性の評価

図 - 3 にくさび割裂試験による荷重開口変位曲線(L-CMOD)を、図 - 4 に引張軟化曲線(TSD)を、図 - 5 に有効破壊エネルギー( $G_F^U$ )を示す。

コンクリートの破壊は、本質的には引張応力下での局所的なひび割れ発生・進展メカニズムに支配される。本実験で採用したくさび割裂試験<sup>9)</sup>はモード (引張型)の破壊モードを小試験体で得ることが可能である。試験体には、予め50mmの切欠きを入れ、そこに高感度クリップゲージを取り付け、安定した破壊が得られるように変位速度を制御した載荷を行い、荷重および開口変位(CMOD)を測定した。このL-CMODによって囲まれる面積を破断面の投影面積で除したものが破壊エネルギー( $G_F^{WOF}$ )であり、靱性能の評価指標として有効であるが、本実験では、L-CMODを多直線近似法<sup>10)</sup>により逆解析を行ってTSDを求め、そのTSDにおけるCMODが0.5mmに到達す

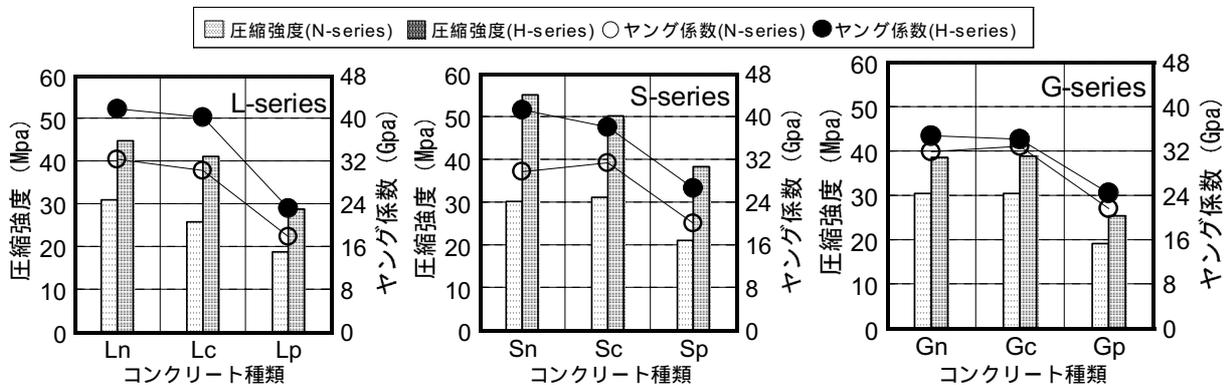


図 - 1 圧縮強度およびヤング係数

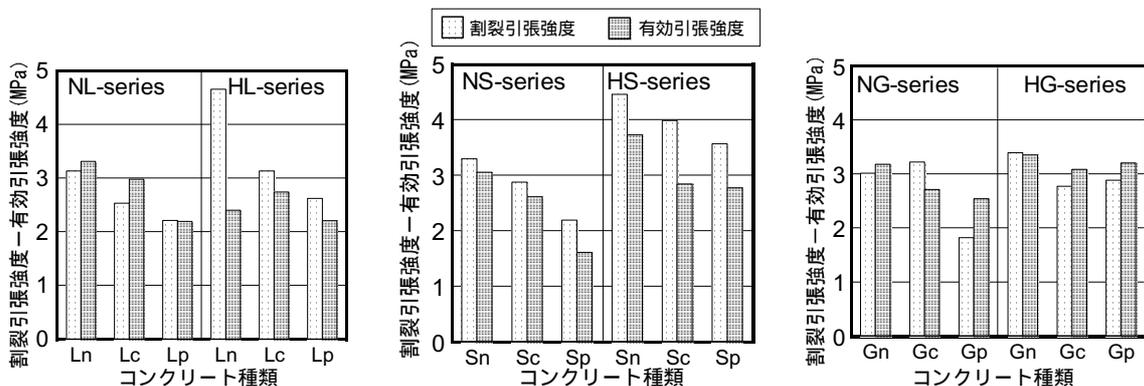


図 - 2 割裂引張強度および有効引張強度

る点(有効ひび割れ幅)により囲まれた面積を有効破壊エネルギー( $G_F^u$ )とした。なお  $G_F^u$  は  $G_F^{WOF}$  と等価である。有効ひび割れ幅は、部材の耐久性、防水性、美観の観点から、その機能が大きく低下する値として設定した。

L-CMOD では、改質処理の場合、最大荷重および周域面積が低下することがわかった。また 0.5mm 開口時点の残存強度に着目した場合、改質処理を施した場合は残存強度が大きく破壊が延性的となる場合があった。ひび割れが骨材 - マトリックス界面の脆弱部分に迂回する形で進展したため<sup>11)</sup>と考えられ、骨材の分離採取に寄与する界面付着力の低減効果が作用していると考えられる。この傾向は TSD の履歴性状からも確認できる。なおその効果は、碎石である L および S の方が顕著であった。 $G_F^u$  では、L-CMOD および TSD で認められた改質処理効果の影響がエネルギー的に示されており、碎石である L および S は、多少のばらつきはあるが、骨材の改質処理による大幅な  $G_F^u$  の低下現象は認められなかった。一方、砂利を用いた場合には、普通強度コンクリート、高強度コンクリートともに  $G_F^u$  の値は低下しており、特に高強度の場合の低下率が大きいことが認められた。改質処理を施した場合、骨材によるトラッピングに伴い、ひび割れが改質骨材界面を迂回して進展することにより、ひび割れ進展

の駆動力が減少し、逆に破壊靱性が高まるクラックディフレクション効果<sup>12)</sup>が作用することが考えられ、その効果は骨材粒形に大きく関係すると考えられた。

以上より、改質処理によるひび割れの回り込み作用により、破壊に対する抵抗性は増大する<sup>13)</sup>。また骨材として碎石を用いた場合は、無処理の場合と比較したその効果は顕著であり、骨材の分離採取に有効に作用することが期待できるといえる。

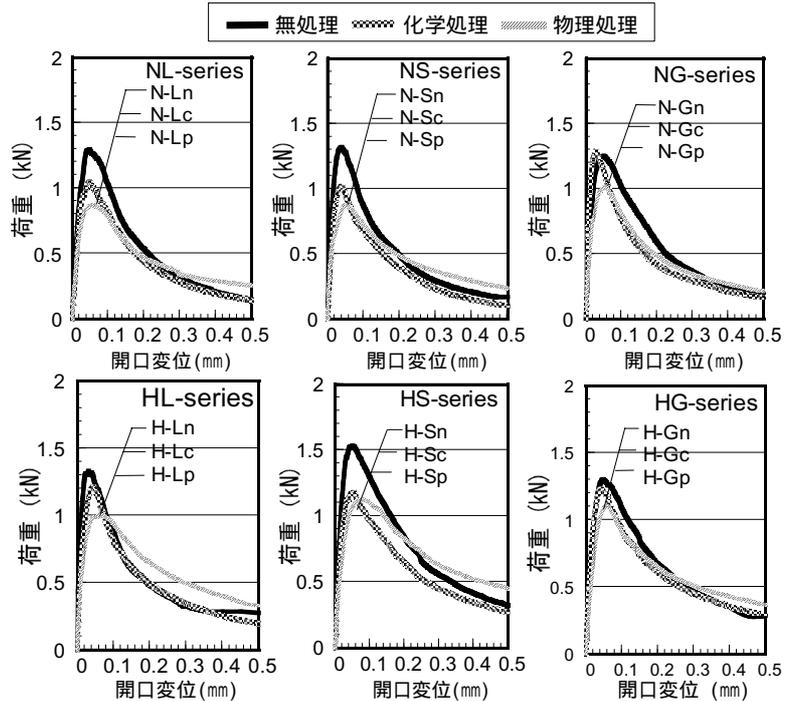


図 - 3 荷重 - 開口変位曲線 (L-CMOD)

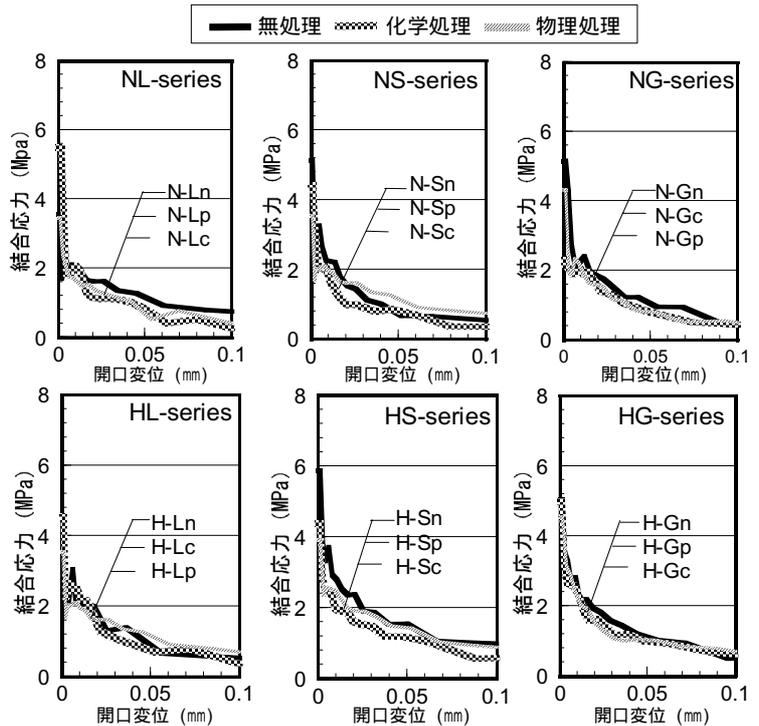


図 - 4 引張軟化曲線 (TSD)

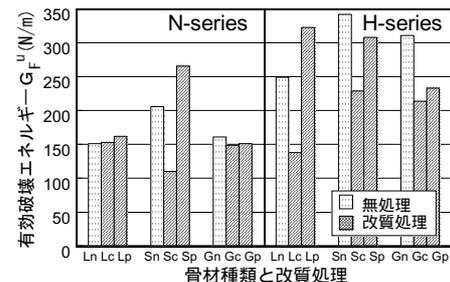


図 - 5 有効破壊エネルギー ( $G_F^u$ )

### 4.3 表面粗さによる破断面性状の評価

図 - 6 に破断面の表面粗さを示す。試料は力学特性調査で用いたものと同様とし、高感度レーザー変位計により割裂破壊したコンクリート破断面の凹凸を測定し表面粗さを求めた。

改質処理の場合は、測定データである破断面波形の振幅・うねりが大きくなり、破断長さも 21 ~ 24% 増加し、表面の凹凸が大きくなることが認められ、表面粗さにもその性状が定量値として反映された。この傾向は砕石である L および S の場合が顕著であった。すなわち、砕石を用いたコンクリートは、いずれの改質処理を施した場合も、無処理の場合と比較して、ひび割れ進展に伴い割裂する骨材は少なく、骨材界面でひび割れが進展する割合が大きいといえる。この傾向は、砂利を用いたコンクリートでは生じにくくなる。以上より、改質処理によりひび割れは骨材界面の脆弱部に迂回する形で進展するようになり、骨材とマトリックスとの剥離性を向上することが実証された。

### 4.4 骨材剥離面積率による破断面性状の評価

図 - 7 に破断面の骨材分布画像を、図 - 8 に破断面の骨材面積率を、図 - 9 に骨材界面剥離効果と水セメント比の関係を、図 - 10 に骨材界面剥離効果と粒形判定実積率の関係を示す。破断面における骨材面積率は、破断全断面を骨材部分とモルタル部分に分けた二値化画像を用いて、骨材部分における骨材剥離面と骨材割裂面の面積率を画像解析により算定して求めた。また剥離面積の増加率を骨材界面剥離効果として式(1)により定量化した。

$$R = (Sc - Sn) / Sn \times 100 \quad (1)$$

ここに、

- R : 骨材界面剥離効果 (%)
- Sn : 骨材界面剥離部分の面積率 (無処理の場合) (%)
- Sc : 骨材界面剥離部分の面積率 (改質処理の場合) (%)

骨材分布画像より、改質処理の場合は骨材界面剥離部分が多くなることが確認できる。界面剥離部分の面積率も増加しており、ひび割れが骨材界面の脆弱部に周り込む形で発生し、骨材界面剥離効果が発現していることが再確認できる。また式(1)による骨材界面剥離効果と水セメン

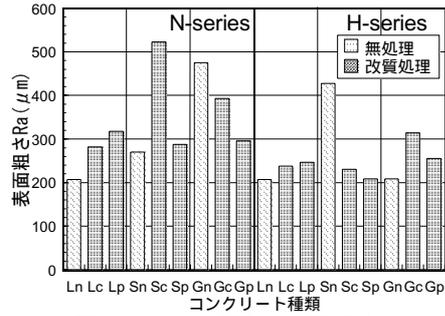


図 - 6 破断面の表面粗さ

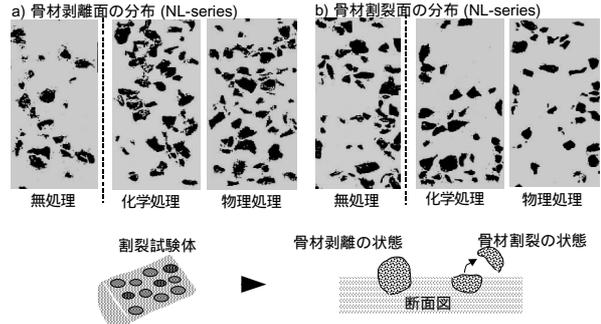


図 - 7 破断面の骨材分布画像

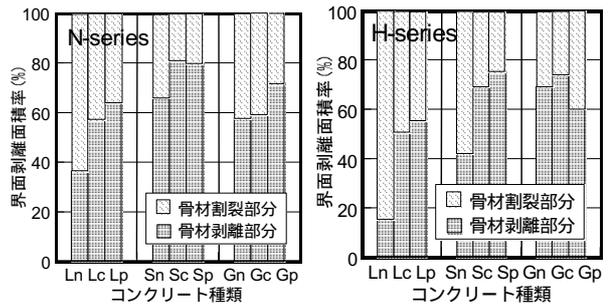


図 - 8 破断面の骨材面積率

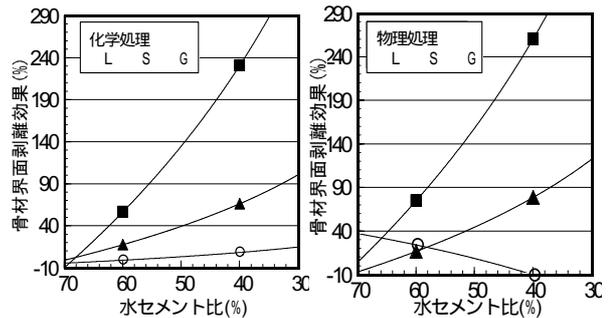


図 - 9 骨材界面剥離効果および水セメント比

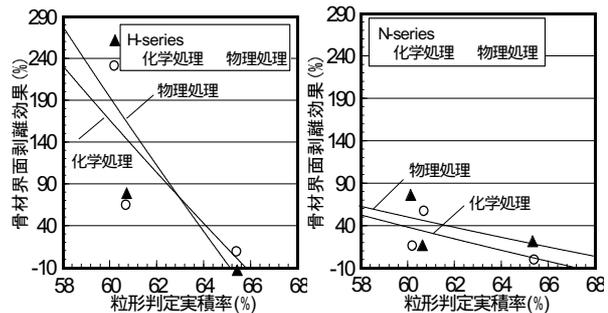


図 - 10 骨材界面剥離効果および粒形判定実積率

ト比および粒径判定実績率との関係を示した。界面剥離効果は、水セメント比に比例して増加しており、骨材界面の脆弱部がマトリックスおよび骨材に対し相対的に弱くなる結果が反映されている。また骨材の粒径判定実績率には反比例しており、粒径が良くなるにつれ界面剥離効果は低下しており、その傾向はマトリックスが高強度になるほど顕著になることが認められる。

以上より、骨材の界面剥離効果が最も期待できるのは、マトリックス部分が高強度であり、かつ粗骨材の粒径判定実績率が小さい砕石を使用する場合である。このようなコンクリートは、元来、解体コンクリートからの高品質再生骨材の回収が困難であるとされるが、骨材表面の改質処理を行うことにより、コンクリートを解体処理する際の骨材回収率の向上および再生骨材の高品質化が期待できるといえる。

#### 4.5 骨材回収性状の評価

図 - 11 に原骨材回収率を示す。検討したコンクリートは力学特性の調査で用いたものと同じであり、20 の水中で3ヶ月間養生した後に骨材回収実験を行った。コンクリートは2段階の工程によって破碎し、一次破碎は骨材同士の擦り揉みを生じさせる機構を持つ改良型ジョークラッシャーで行い、その全量をボールミルに投入し、2次破碎として一定時間の擦り揉み処理を施した。製造した再生骨材から、5-20mmの粒径の再生粗骨材を抽出し、全量中の原骨材の質量割合を骨材回収率と定義し、その値を求めた。密度および吸水率も同時に測定した。

骨材の改質処理により、砕石を使用したコンクリートではマトリックス強度に因らず原骨材回収率が増加しており、特に化学処理の効果が顕著であり、簡便な破碎で高品質の再生骨材を製造することが可能になる。一方、砂利を使用した場合の効果は現れにくく、特にマトリックスが高強度である場合は骨材回収率に差は認められなくなった。この傾向は密度・吸水率の値にも反映されており、使用する骨材の粒径により、改質処理が原骨材回収率の向上に与える影響に差があることが確認された。

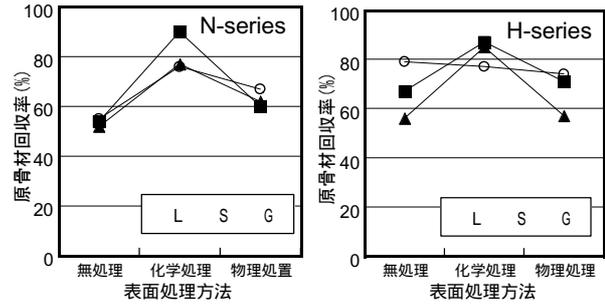


図 - 11 原骨材回収率

#### 5. まとめ

骨材回収型リサイクル指向コンクリートは、改質処理骨材を導入することで力学特性に過度に影響しない程度に、骨材 - マトリックス間の付着力を低減し、原骨材を容易に回収することを可能にし、骨材の材料保存性を確保することができる。また骨材種および水セメント比により、ひび割れの骨材界面迂回作用に起因した破壊の延性化現象も起こりうるため、界面剥離性が力学的性質に効果的となる場合もありうる。

#### 謝辞

実験の実施にあたり、ご協力くださった当時東京都立大学工学部建築学科 土屋潤氏(現在、東京都立大学大学院)に心より感謝します。

#### 参考文献

- 1) 例えば, Hendriks, Ch.F. and Janssen, G.M.T. : Construction and demolition waste-general process-, HERON, Vol.46, No.2, pp.79-88, 2001
- 2) 吉川弘之, インバースマニュファクチャリング研究会: 逆工場, 日刊工業新聞社, 1999
- 3) Shima, H., Tateyashiki, H., et al., "New Technology for Recovering High Quality Aggregate from Demolished Concrete", Proceedings of the Fifth Int. Symp. East Asian Recycling Technology, The M.M.P.I. in Japan, 1999, pp.106-109.
- 4) T. Noguchi and M. Tamura, Concrete Design toward Complete Recycling, Structural Concrete, Volume 2, Number 3, pp. 255 -267, Sep.2001
- 5) 野口貴文, 田村雅紀: 特集:再生・リサイクル - 完全リサイクルを実証するコンクリートデザイン, 建築と社会, 日本建築協会, pp. 22-27, 2002年2月
- 6) 田村雅紀, 野口貴文, 友澤史紀: 材料保存を基調としたリサイクルコンクリートの提案と実証 コンクリート工学, Vol.38, No.11, pp.29-35, 2000年11月
- 7) Aitcin, P.C. and Mehta, P.K., "Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Performance Concrete", ACI Material Journal, 1990, Vol.87, No.2, pp.103-107.
- 8) Kaplan, M.F., "Flexural and Compressive Strength of Concrete Affected by the Properties of Coarse Aggregate", ACI Journal, 1959, Vol.30, No.11, pp.1193-1208.
- 9) RILEM Draft Recommendation (50-FMC), "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams", Materials and Structures, 1985, Vol.18, No.106, pp.285-290.
- 10) Kitsutaka, Y., "Fracture Parameters by Poly-Linear Tension Softening Analysis", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997, Vol.123, No.5, pp.444-450.
- 11) Lange, F.E., "The Interaction of a Crack Front with a Second-Phase Dispersion", Philosophical Magazine, 1970, Vol.22, pp.983-992.
- 12) Faber, K.T. and Evans, A.G., "Crack Deflection Processes - I. Theory", Acta Metal, 1983, Vol.31, No.4, pp.565-576.
- 13) Green, L.D. and Nicholson, P.S., "Fracture of Brittle Particulate Composite", Fracture Mechanics of Ceramics, 1978, Vol.4, Crack Growth and Microstructure, Edited by Bradt, R.C., pp.945-960