

6.5 骨材回収型リサイクル指向コンクリートのリサイクル性評価

6.5.1 背景と目的

骨材回収型リサイクル指向コンクリートの実証に必要となる骨材の改質処理方法、コンクリートの基礎的物性および改質処理がコンクリートの破壊特性に及ぼす影響などが明らかにされた。そして、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの骨材強度、粒形および水結合材比等の条件により、ひび割れが骨材界面に優先的に進展し、破壊が延性化して破壊に要するエネルギーが増大することが確認されたため、ひび割れを界面で発生させる条件を明確にすることで、付着ペーストの少ない高品質の再生骨材を容易に回収する仕組みの確立に繋がるといえる。

本節では、骨材回収型完全リサイクルコンクリートにおける界面付着力の低減性に起因する骨材界面剥離効果を評価するために、高精度レーザー変位計をセンサー部分とした表面形状測定器を用いた破断面の形状分析、画像解析による破断面の骨材剥離面積率の測定、そして最後に、簡易破碎により実際に再生骨材を製造し、その密度・吸水率の調査を行うとともに、高度処理がない条件で原骨材が回収できることを示すための原骨材回収率試験を実施する。

以上により、骨材回収型リサイクル指向コンクリートが、力学特性に過度な低下を生じ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できるコンクリートとなることを実証する。

6.5.2 実験概要

(1) 実験要因

表 6.5.1 に実験要因と水準を示す。実験試料としたコンクリートは、6.3 節および 6.4 節における検討で使用した試料と同一である。シリーズⅠは、石灰石碎石(L)、硬質砂岩碎石(S)および砂利(G)を原骨材として使用し、物理処理および化学処理による改質処理骨材を使用した普通強度(N)と高強度(H)のコンクリートであり、本節の基本試料である。シリーズⅡは、6.3 節におけるコンクリートの補強効果を検討する際に使用した硬質砂岩碎石(S)を原骨材とした普通強度(N)と高強度(H)のコンクリートであり、塩酸溶解法による原骨材含有率試験に使用する。なおシリーズⅠおよびシリーズⅡにおける骨材回収型リサイクル指向コンクリートに関する使用骨材の性質、骨材の改質処理方法、コンクリートの計画調合表およびコンクリートの基礎的性質は、6.3 節および 6.4 節における検討結果が参照できるものとする。

表 6.5.1 実験要因と水準

要因	水準	
	シリーズⅠ	シリーズⅡ
コンクリート	普通コンクリート N-(Ln, Lc, Lp, Sn, Sc, Sp, Gn, Gc, Gp)	普通コンクリート N-(Sn, Sc, Sp)
	高強度コンクリート H-(Ln, Lc, Lp, Sn, Sc, Sp, Gn, Gc, Gp)	高強度コンクリート H-(Sn, Sc, Sp)
水セメント比	0.6(普通強度 N), 0.4(高強度 H)	0.6(普通強度 N), 0.3(高強度 H)
細骨材	砂岩砕砂(S)	砂岩砕砂(S)
粗骨材	石灰石碎石(L), 硬質砂岩碎石(S), 砂利(G)	硬質砂岩碎石(S)
改質処理	無処理(n), 化学処理(c), 物理処理(p)	無処理(n), 化学処理(c), 物理処理(p)

シリーズⅠ：破断面性状(表面粗さ、骨材面積率)、再生骨材の品質(原骨材回収率、密度・吸水率)

シリーズⅡ：再生骨材の品質調査(塩酸溶解法による原骨材含有率試験)

(2) 実験方法

表 6.5.2 に実験項目および方法を、図 6.5.1 に表面粗さ測定器を、図 6.5.2 に再生骨材製造方法を示す。本実験では、シリーズⅠの試料を対象としたリサイクル性の評価が大部分であり、骨材回収性を更に詳しく評価するための追加的な検証実験としてシリーズⅡを実施した。

シリーズⅠに関しては、原骨材の易分解性を評価するための試験として、割裂破断したコンクリートに対し、高感度レーザー変位計をセンサー部とした表面粗さ測定器により破断面における骨材占有部分がもれなく測定できるような位置に対する二次元破断面形状の測定を行う。界面付着力低減効果およびマトリックスと骨材の相対強度差などの材料および調合要因により、破断面には骨材クラックが卓越した骨材破断モードのひび割れや、ボンドクラックが卓越した骨材界面破断モードのひび割れが発生する結果、破断面は、貫通ひび割れによる凹凸のない面で構成される場合、骨材剥離面による凹凸面が構成される場合およびその中間的な場合とに区別されると考えられる。また、原骨材の易分解性を更に具体的に評価するために、破断面の全骨材に占める骨材剥離面と骨材割裂面の面積率を、高解像度デジタル画像情報を基にした二次元画像解析により求め骨材剥離面積率 S_1 を算定する。そして、骨材剥離面積率 S_1 を基に骨材界面剥離効果を定量化し、骨材種、改質処理の性質、水セメント比と骨材界面剥離効果の関係を明確にする。

続いて、実際に再生骨材を製造し、品質の優れた再生骨材の回収可能性について検討する。実務において解体処理工程を想定し、ジョークラッシャーでの粗割りによる試料調整、改良型ジョークラッシャーにおける破砕室での骨材滞留による繰り返し破砕を施した一次破砕、擦り揉み破砕機構を有するボールミルによる二次破砕により、一般的かつ簡便な破砕工程で再生骨材を製造する。再生骨材に対し、密度・吸水率および、比重選別法および目視抽出法によりモルタル付着率がゼロである原骨材の質量割合を示す原骨材回収率を調査する。またシリーズⅡの試料を対象に、塩酸溶解法による再生骨材中の原骨材の含有率を測定する。

表 6.5.2 実験項目および方法

試験項目		試験方法	備考
シリーズⅠ	表面粗さ測定試験	JIS B 0601	高感度レーザー変位計(測定分解能 $1\mu\text{m}$ 許容分解能 $10\mu\text{m}$) をセンサー部とした表面粗さ測定器により、コンクリート割裂破断面の粗さ曲線を測定(4 測定長さ/個) 破断面粗さ曲線 $f(x)$ を基に算術平均粗さ R_a の平均値を算定 $R_a = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) dx$ ここに $R_a(\mu\text{m})$: 算術平均粗さ、 $L(\text{mm})$: 測定長さ(20mm)
	骨材面積率測定試験	---	コンクリート割裂破断面における高解像度デジタル画像情報を基に、二次元画像解析手法により骨材剥離面積率 S_1 を測定 $R_{S1} = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \cdot 100$ ここに $R_{S1}(\%)$: 骨材剥離面積率、 $S_1(\text{pixel})$: 骨材剥離部分総画素数、 $S_2(\text{pixel})$: 骨材割裂部分総画素数
	再生骨材製造試験	---	一般的な製造装置により破砕・分級した 2005 再生骨材を製造 一次破砕: 改良型ジョークラッシャー 二次破砕: ボールミル
	密度・吸水率試験	JIS A 1110	2005 再生骨材
	原骨材回収率試験	比重選別法および原骨材抽出法	2005 再生骨材を対象に、比重選別法および目視抽出法により付着モルタルがゼロである原骨材粒子のみの質量割合
シリーズⅡ	原骨材含有率試験	塩酸溶解法 (ASTM C85 66)	小骨材(05-10mm)および大骨材(10-20mm)に分けた再生骨材(硬質砂岩碎石)を対象に、塩酸(濃度 10%)によりセメント成分を溶解して得られた残存骨材の質量割合

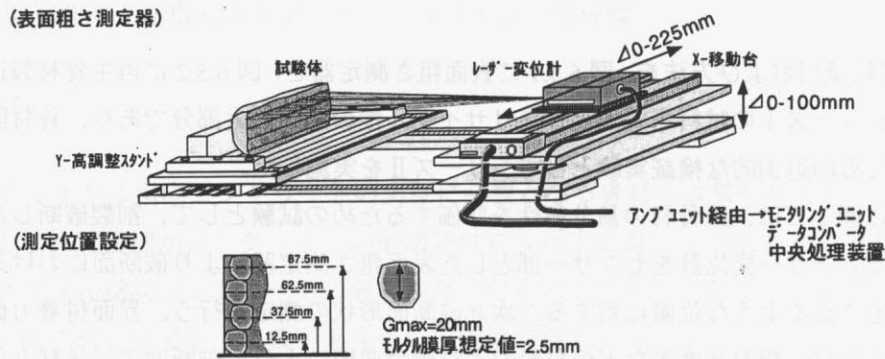


図 6.5.1 表面粗さ測定器の概要

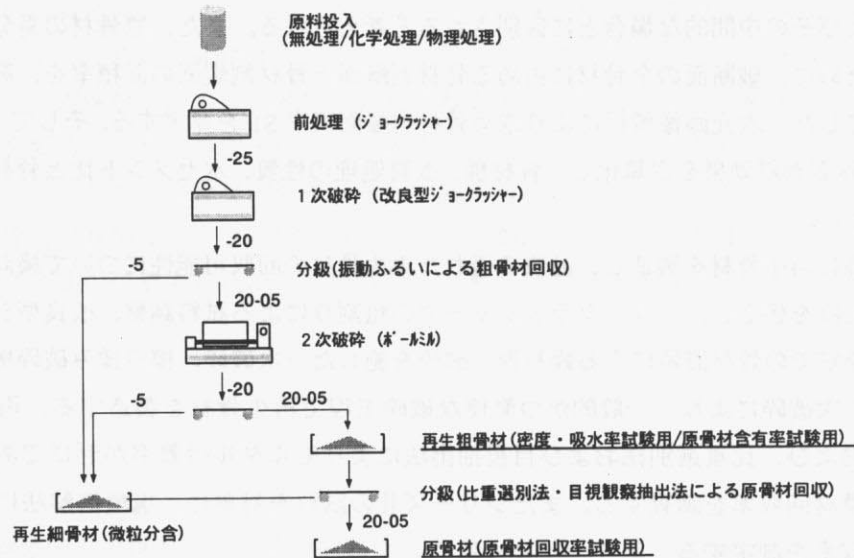


図 6.5.2 再生骨材の製造方法

6.5.3 結果および考察

(1) 改質処理がコンクリート破断面の表面粗さに及ぼす影響

図6.5.3にコンクリート破断面の粗さ曲線事例(NL-series)を、図6.5.4にコンクリート破断面の算術表面粗さ R_a を示す。なお粗さ曲線は代表してNL-seriesのみを示すが、粗さ曲線より破断面における凹凸差が定性的に評価できることを示す。表面粗さに関しては、粗さ曲線の特性を算術表面粗さとして定量化したデータにより評価することとした。

無処理試料に対する改質処理試料の粗さ曲線は、波形の目視による観察から、破断面波形の振幅・うねりが大きくなる傾向があることが確かめられた。また破断面測定部における、平均破断長さは21～24%増加し、表面の凹凸が大きくなることが確認された。この凹凸は、主に粒径20mm程度の大粒径の粗骨材形状が反映される場合が多い。なお、この傾向は碎石であるL-seriesおよびS-seriesの場合に顕著であった。

続いて、無処理試料に対する改質処理試料の算術表面粗さ R_a による改質処理の影響について検討した。算術表面粗さは、測定した粗さ曲線の中心高さを関数軸としてみなし、関数軸と粗さ曲線により囲まれた面積を、測定長さ200mmで除して求められる。式(6.5.1)に算定式を示す。

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad \cdots \text{式(6.5.1)}$$

ここに $Ra(\mu m)$: 算術平均粗さ、 $L(mm)$: 測定長さ(20mm)

L-series は、水セメント比に関わりなく、いずれの改質処理を施した場合も、算術表面粗さ Ra が増大することが確認され、骨材表面が露出した状態で、凹凸破断面が形成される傾向が確認された。S-series は、普通強度(N)に関しては、L-series と同様の傾向があるが、高強度(H)に関しては、骨材破断モードで割裂する部分がいくつかあり、凹凸面が平滑になる傾向が確認された。G-series は凹凸変化の傾向がばらついているが、高強度(H)の場合、改質処理により若干算術表面粗さ Ra が大きくなり、骨材表面が露出した破断面が形成される傾向にあるといえる。

以上、粗さ曲線の形状分析および算術表面粗さ Ra の評価により、改質処理によりひび割れ進展に伴う割裂骨材は少なくなり、骨材界面破断モードによりひび割れが進展して、骨材表面が露出する凹凸破断面が形成される傾向が確認された。しかしながら、測定結果も若干ばらついているため、測定位置および測定個数を考慮した更なる検討により、分析精度は向上するものと考えられる。

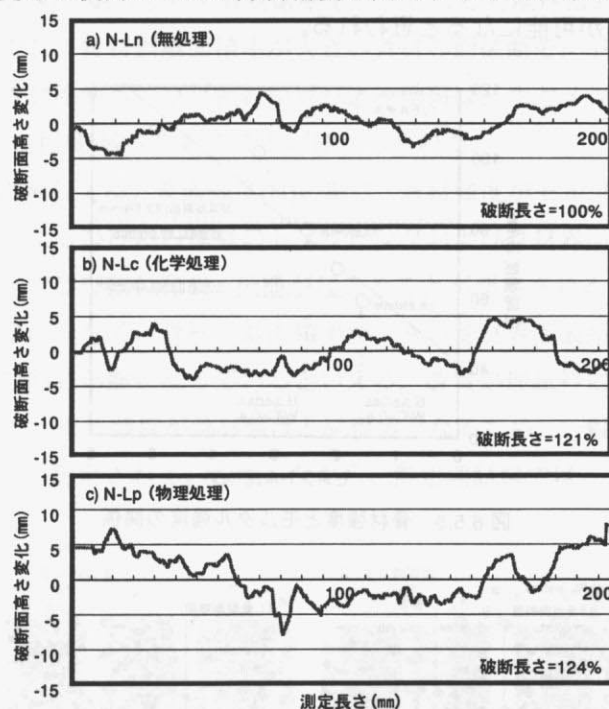


図6.5.3 コンクリート破断面の粗さ曲線(NL-series)

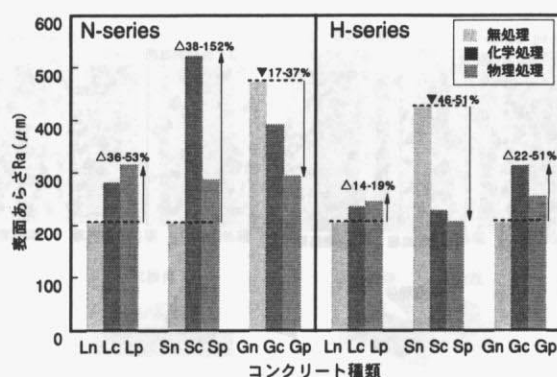


図6.5.4 コンクリート破断面の算術表面粗さ Ra

(2) 改質処理がコンクリート破断面の原骨材剥離面積率に及ぼす影響

図6.5.5に骨材回収型リサイクル指向コンクリートに使用した骨材強度とモルタル強度の関係を示す。なお、骨材の圧縮強度は、同一産地における岩石の切り出し試験体(基本寸法20mm×20mm×20mm)を作製し、最大6試料の平均圧縮強度により求めた。モルタルの圧縮強度は、コンクリートと同一の細骨材を使用したモルタル試験体(基本寸法20mm×20mm×20mm)3試料の平均圧縮強度により求めた。

コンクリートのひび割れ発生・伝播は、骨材強度とモルタル強度の要因が大きく影響することは先に述べたが、本実験では、水セメント比0.6の普通強度(N)および水セメント比0.4の高強度(H)のコンクリートにおけるモルタルと同一強度となるモルタル試験体の圧縮強度を調査したところ、水セメント比0.6のモルタル試験体(58.8N/mm²)については、石灰石碎石(60.4N/mm²)と同程度の圧縮強度を有し、水セメント比0.4のモルタル試験体(79.9N/mm²)については、砂利(82.0N/mm²)および硬質砂岩碎石(82.5N/mm²)と同程度の圧縮強度を示した。骨材強度とモルタル強度は小試験体での平均圧縮強度であり、骨材回収型リサイクル指向コンクリート中の骨材とモルタルの強度特性を正確に反映したものであるとはいえないが、相対強度の概算値と見なすことでひび割れ発生・伝播の特徴を骨材およびモルタルの強度要因に関連づけて具体的に検討することが可能になると思われる。

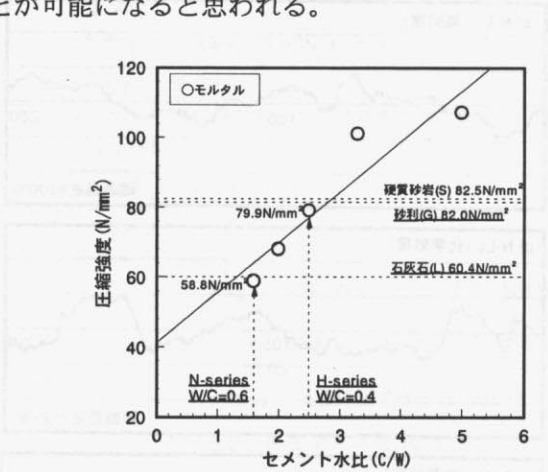


図 6.5.5 骨材強度とモルタル強度の関係

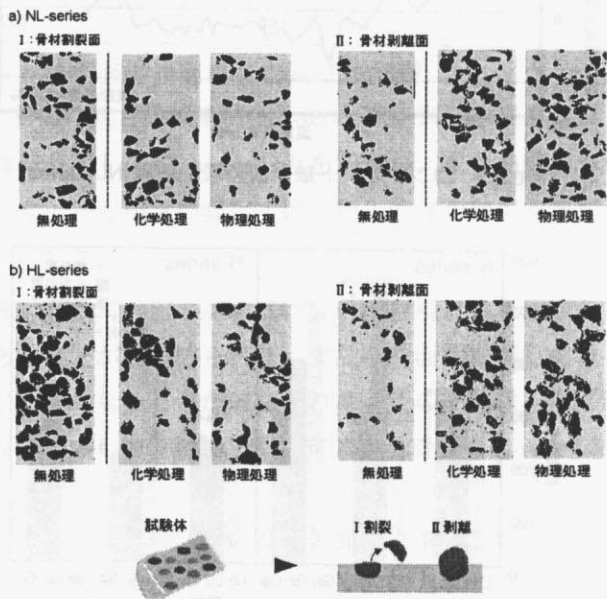


図6.5.6 碎石シリーズの破断面骨材分布(上：普通強度 下：高強度)

図6.5.6に碎石シリーズ(L-series)の破断面構成を、図6.5.7に砂利シリーズ(G-series)の破断面構成を示す。ここでは、粒形による界面剥離性状の違いを明確にするために、碎石と砂利という区分に基づき破断面の骨材剥離性状を評価するとし、L-seriesとG-seriesを対象とした比較検討により、骨材とモルタルの相対強度に起因するひび割れ発生・伝播の特徴も明確になると考えられる。

碎石シリーズに関しては、普通強度(N)の場合、骨材強度が、モルタル強度と同程度であるため、一般的には骨材破断モードでひび割れ発生・伝播することが想定される。無処理試料は、骨材割裂面積率が多く、骨材剥離面積率が少ない骨材破断モードでひび割れ面が形成されており、想定したひび割れ形態となっているといえる。改質処理試料は、骨材割裂面積率は少なく骨材剥離面積率が大きい骨材界面破断モードでひび割れ面が形成されており、骨材界面の脆弱部におけるひび割れの周り込みが確認された。一方、高強度(H)の場合は、モルタル強度が骨材強度より明らかに大きくなるため、明確な骨材破断モードでのひび割れ発生・伝播が想定される。無処理試料は、骨材割裂面積率が大部分を占め、骨材剥離面積率が非常に少ない明確な骨材破断モードでひび割れ面が形成されており想定した結果となっている。改質処理試料は、普通強度(N)の場合よりも骨材破断モードとなる可能性は高くなるものの、骨材割裂面積率が少ない状態は保持され、骨材剥離面積率が大きい骨材界面破断モードでひび割れ面が形成される状態となった。つまり、骨材界面へのひび割れが周り込み効果は、水セメント比が一定量低減された状態においても(実験では20%程度)確保されることが確かめられた。

続いて、砂利シリーズに関しては、普通強度(N)の場合、骨材強度がモルタル強度よりも高強度となるため、一般的には、骨材によるひび割れ進展のトラッピングおよび骨材界面へのひび割れ回り込み作用による界面界面破断モードでひび割れ発生・伝播が起こることが想定される。普通強度(N)における無処理試料は、骨材割裂面積率が少なく、骨材剥離面積率が大きい骨材界面破断モードでひび割れ面が形成されており、想定したひび割れ形態となっているといえる。改質処理試料についても同様であった。一方、高強度(H)の場合は、モルタル強度が骨材強度と同程度となるため、一般的には骨材破断モードでひび割れ発生・伝播することが想定される。しかしながら、無処理試料では、普通強度(N)と同様に、骨材

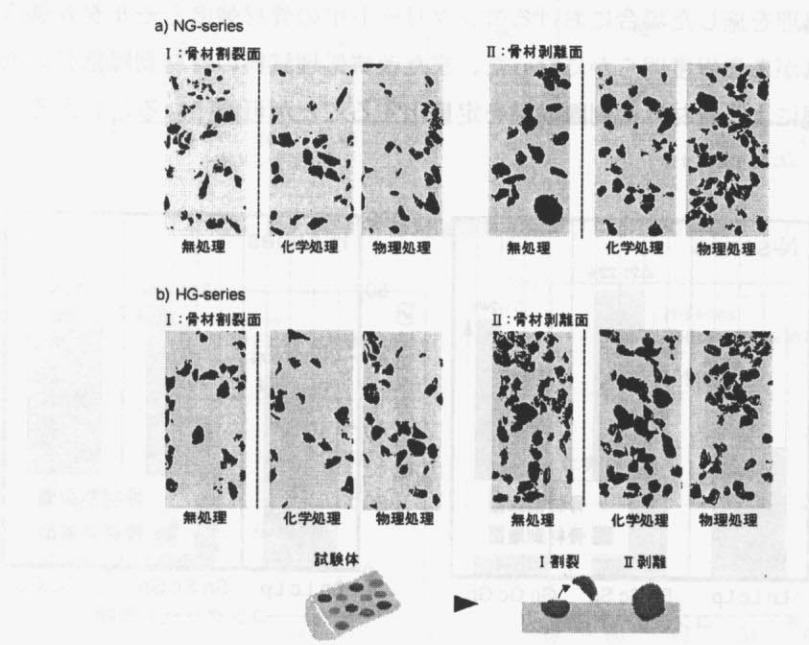


図6.5.7 砂利シリーズの破断面骨材分布(上：普通強度 下：高強度)

割裂面積率が小さく骨材剥離面積率が大きくなる骨材界面破断モードのひび割れ面が形成されている。これは、砂利のように粒形が優れる骨材の場合、碎石と比較して機械的かみ合わせ力が小さいため、骨材界面破断モードに移行しやすい傾向があることが考えられた。改質処理試料についても同様に骨材界面破断モードによるひび割れ面が形成されたため、結果的に、改質処理による骨材界面剥離効果は碎石骨材を使用した場合ほど大きくは現れないことが確認されたといえる。

以上より、粒形が良い骨材は、水セメント比によっては、骨材の改質処理による骨材界面剥離効果を付与する必要性が少なくなることが確かめられ、逆に粒形の悪い碎石のような骨材に対しては、骨材の改質処理により骨材界面剥離効果は大きく得られ、かつその効果は低水セメント比においても顕著に発現するため、現在の碎石を中心とした骨材需給体系が維持され、コンクリートが高強度化する傾向が一般的である間は、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの特性が効果的に反映できる可能性は高い。

図 6.5.8 にコンクリート破断面における全骨材に占める、骨材剥離部分の面積率を示す。骨材剥離部分の面積率 Rs_1 は、コンクリート破断面の高解像度デジタル画像情報を基に、二次元画像解析手法により破断面の全骨材に占める骨材剥離面と骨材割裂面の総画素数を求め、式(6.5.2)の計算式から求めた。

$$Rs_1 = S_1 / (S_1 + S_2) \times 100 \quad \cdots \text{式(6.5.2)}$$

ここに Rs_1 : 骨材剥離面積率(%), S_1 : 骨材剥離部分総画素数(pixel), S_2 : 骨材割裂部分総画素数(pixel)

普通強度(N)に関しては、碎石である L-series は無処理試料に対し 57～79%の割合で、S-series は無処理試料に対し 21～22%の割合で骨材剥離面積が増大しており、改質処理により骨材界面剥離効果が有効に作用することが実証された。これに対し、G-series は増加率が 1～24%であり、一定の効果は認められるが、碎石シリーズほどには有効に作用しないといえる。一方、高強度(H)に関しては、碎石である L-series は、無処理試料に対し 230～266%の割合で、S-series は無処理試料に対し 64～79%の割合で骨材剥離面積が大幅に増大しており、改質処理により骨材界面剥離効果が更に有効に作用することが実証された。これに対し、G-series は骨材界面剥離率が低下する場合も発生し、低水セメント比の場合において特に骨材界面剥離効果が作用しにくくなることが明らかとなった。

以上により、改質処理を施した場合におけるコンクリート中の骨材強度とモルタル強度に起因するひび割れ発生・伝播機構がある程度明らかになった。また改質処理試料の骨材剥離部分の面積率増加分の算定により、改質処理による骨材界面剥離効果を定量化することが可能になるといえる。

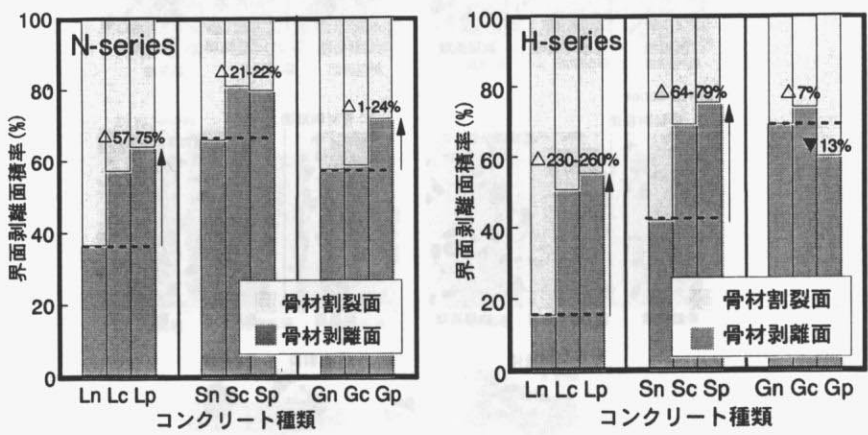


図6.5.8 コンクリート破断面の骨材剥離部分面積率

(3) 改質処理が骨材界面剥離効果に及ぼす影響

図6.5.9に骨材界面剥離効果と水セメント比の関係を、図6.5.10に骨材界面剥離効果と粒形判定実積率の関係を示す。骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける骨材種類、改質処理種類、水セメント比と相関する骨材界面剥離効果の特徴が明らかになる。

改質処理による骨材界面剥離効果は、コンクリート破断面の骨材剥離面積率を利用して、式(6.5.3)により定量化される。

$$Ri = (Sc - Sn) / Sn \times 100 \quad \cdots \text{式(6.5.3)}$$

ここに Ri : 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) (%)

骨材界面剥離効果と水セメント比の関係については、碎石であるL-seriesおよびS-seriesの場合は改質処理に因らず、水セメント比の減少に比例して界面剥離効果が増大しており、骨材界面がモルタルおよび骨材に対して相対的に脆弱化する結果、界面にひび割れが優先的に形成され、骨材界面破断モードとなる性質が反映されたといえる。砂利であるG-seriesの場合は、水セメント比の減少に比例して骨材界面剥離効果が増加する効果の程度は小さく、物理処理のように骨材とペーストとの機械的まざつ力を薄膜により低減させる場合には、逆に効果が低下する現象が現れることが確認された。

骨材界面剥離効果と粒形判定実積率の関係については、普通強度(N)の場合は骨材の粒形が良好になるのに比例して、改質処理方法に因らず骨材界面剥離効果は低下するといえるが、その変化率は緩やかで

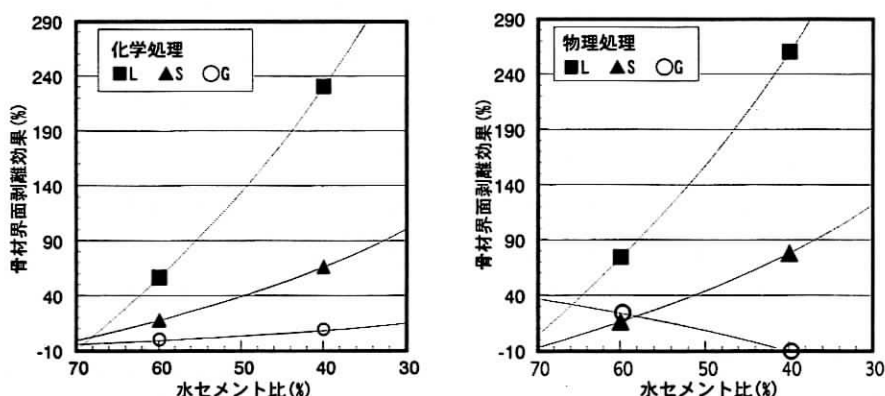


図6.5.9 骨材界面剥離効果と水セメント比の関係

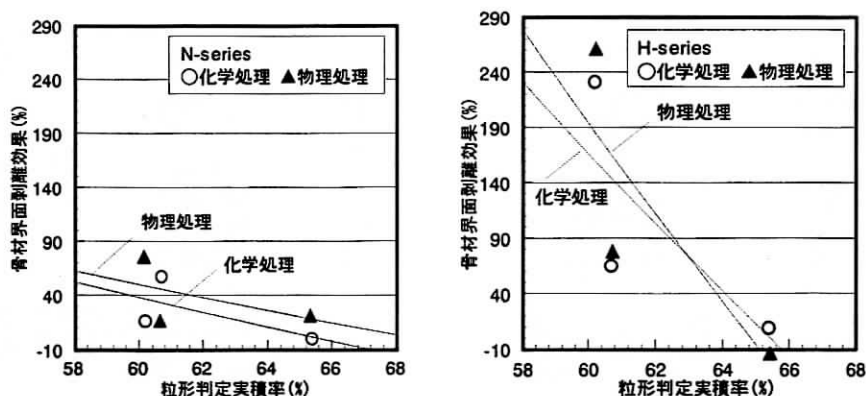


図6.5.10 骨材界面剥離効果と骨材形状の関係

あるといえる。一方、高強度(H)の場合は、骨材粒形が良好になるのに比例して骨材界面剥離効果は大きく減少し、逆に粒形が粗い場合は効果が大きく得られることが明確に示された。

以上より、図 6.5.11 において、骨材の改質処理の影響を考慮したコンクリートのひび割れ発生・伝播機構を想定することが可能になる。点線の囲み部分は、図 6.5.6 および図 6.5.7 の破断面構成で示された碎石シリーズおよび砂利シリーズにおけるひび割れ発生・伝播機構に該当する部分である。

無処理(図左)で粒形の良い骨材(図左)を選定したコンクリートの場合、マトリックス相対強度が1未満である場合、クラックトラッピング効果(A)および部分的なクラックディフレクション効果(B)が作用する状態が、マトリックス相対強度が1の場合、クラックトラッピング効果(A)および明確なクラックディフレクション効果(B)が作用する状態が、そしてマトリックス相対強度が1より大の場合、骨材クラックによる骨材破断モード(C)となる状態が形成される。一方、無処理(図左)で粒形の悪い骨材(図右)を用いた場合は、マトリックス相対強度が1未満である場合、クラックトラッピング効果(A)が作用する状態が、マトリックス相対強度が1の場合、骨材クラックによる骨材破断モード(C)となる状態が、そしてマトリックス相対強度が1より大の場合も、骨材破断モード(C)となる状態が形成される。

これに対し、改質処理(図右)を施した粒形の良い骨材(図左)を用いた場合は、マトリックス相対強度が1未満である場合、クラックトラッピング効果(A)および部分的なクラックディフレクション効果(B)が作用する状態が、マトリックス相対強度が1の場合、クラックトラッピング効果(A)およびクラックディフレクション効果(B)が作用する状態が、そしてマトリックス相対強度が1より大の場合、骨材クラックによる骨材破断モード(C)とはならずクラックディフレクション効果(B)が作用する状態が形成される。また粒形の悪い骨材(図右)を用いた場合は、マトリックス相対強度が1未満である場合、クラックトラッピング効果(A)に伴うクラックディフレクション効果(B)が部分的に作用する状態が、マトリックス相対強度が1の場合、クラックトラッピング効果(A)に伴うクラックディフレクション効果(B)が作用する状態が、そしてマトリックス相対強度が1より大の場合、クラックトラッピング効果(A)に伴うクラックディフレクション効果(B)が強く作用する状態が形成される。

以上により、骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおいて、骨材の改質処理による骨材界面剥離効果が最も期待でき、原骨材が回収しやすくなる調合条件とは、マトリックス部分が高強度であり、かつ粗骨材の粒形判定実積率が小さい碎石骨材を使用する場合であると結論づけられる。

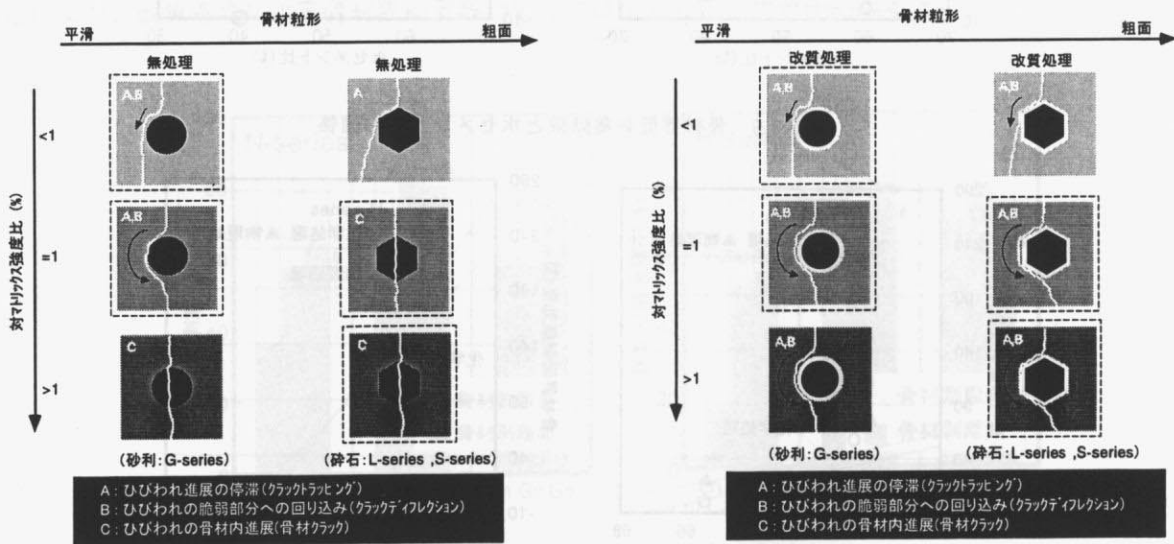


図 6.5.11 骨材の改質処理によるコンクリートのひび割れ発生機構(左：無処理 右：改質処理)

(4)改質処理が骨材回収性に及ぼす影響

表6.5.3に再生粗骨材の品質(シリーズⅠ)を、図6.5.13に比重選別法・目視抽出法による原骨材回収率(シリーズⅠ)を示す。再生骨材の原料となるコンクリートは、シリーズⅠおよびシリーズⅡともに、力学特性の検討で使用したものと同様である。

再生粗骨材の密度・吸水率および原骨材回収率試験(シリーズⅠ)の結果について示す。再生骨材は、1次破碎として改良型ジョークラッシャーを用いた破碎(破碎部に設置されるストッカーにより破碎物が一定時間滞留し繰り返し圧縮を受ける機構)、2次破碎としてボールミルを用いて擦り揉み処理を行った後に、振動ふるいによる微粒分のスクリーニングを施して、5-20mm範囲の再生粗骨材を抽出し密度・吸水率の測定を行った。結果、全試料を通じて、無処理の場合と比較した改質処理を施したコンクリートから得られる再生粗骨材は、吸水率が小さく密度が大きくなる傾向を示した。しかしながら再生粗骨材中には、原骨材およびモルタル付着骨材以外のモルタル硬化体なども含まれるため、このような評価方法では、骨材界面剥離効果の反映度は不明瞭であると考えられた。

上記内容を踏まえ、再生粗骨材に対し、振動ふるいを用いた比重選別により分級を行なった後に、目視観察法によりモルタル付着量が完全にゼロである原骨材粒子のみを抽出し、再生粗骨材に含まれる原骨材の質量割合を原骨材回収率として定義しその値を求めた。その結果、普通強度(N)における改質処理を施した場合の原骨材回収率は、L-seriesでは6-36%増加し、S-seriesでは10-25%増加し、G-seriesでは12-21%増加することが確認された。高強度(H)においては、L-seriesでは6-29%増加し、S-seriesでは2-33%増加したが、G-seriesでは3-6%低下することが確認された。碎石シリーズは、強度要因に関わらず原骨材回収率が増加する傾向があり、特に化学処理の増加割合が顕著であったが、これは骨材界面剥離面積率や骨材界面剥離効果の結果を反映しており、原骨材を回収するための有効な手法であることが改めて確

表6.5.3 再生粗骨材の品質 (シリーズⅠ)

普通強度 (N)				高強度 (H)			
種類	密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	原骨材回収率 (%)	種類	密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	原骨材回収率 (%)
Ln	2.49	1.89	54.1	Ln	2.56	1.50	67.0
Lc	2.62	0.50	90.5	Lc	2.65	0.36	87.0
Lp	2.62	1.16	60.2	Lp	2.59	1.03	71.6
Sn	2.48	1.73	52.0	Sn	2.50	1.21	56.5
Sc	2.57	1.13	77.6	Sc	2.55	1.05	85.4
Sp	2.52	1.18	62.3	Sp	2.56	1.13	57.1
Gn	2.46	2.52	55.1	Gn	2.49	1.75	79.3
Gc	2.49	1.68	76.3	Gc	2.54	1.56	77.7
Gp	2.48	1.86	67.8	Gp	2.50	1.85	74.0

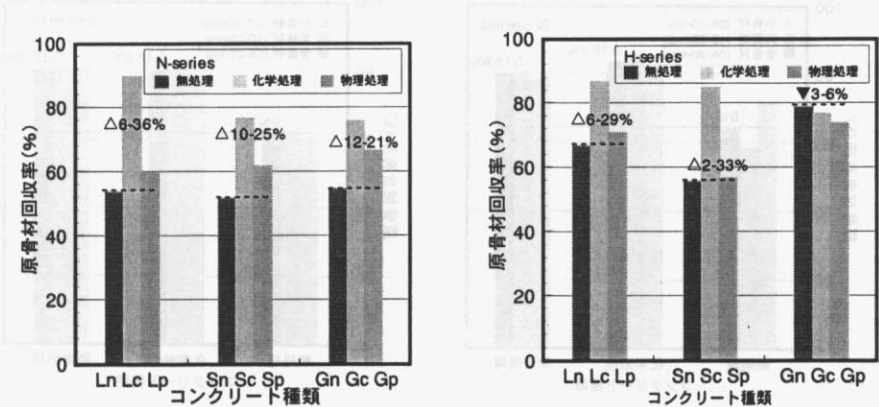


図6.5.13 比重選別法・目視抽出法による原骨材回収率(シリーズⅠ)(左: 普通強度 右: 高強度)

認められたといえる。一方、砂利を使用した場合は、その効果は現れにくく、特に高強度の場合は骨材回収率に差が認められなくなった。

図6.5.14に塩酸溶解法による原骨材含有率(シリーズⅡ)を示す。通常、再生骨材の品質を評価するためには、密度・吸水率の基本指標に加え、再生骨材を酸性溶液に浸漬し、付着ペーストを溶解した残分である原骨材含有率を指標とする場合がある。しかしこの試験にはいくつか問題があり、その事例として、第1に、再生粗骨材の原骨材含有率を求める場合、溶解後残分にモルタル硬化体中の細骨材重量が加算され含有量が過大評価される点、第2に、酸性溶液で骨材自身が溶解し含有量が過小評価されるため、骨材の種類によっては実験に適用できない点、第3に、試料容量およびペースト強度により浸漬時間が大きくばらつき、溶解レベルに差異が生じる点などである。

従って本研究では、耐酸性度が強く一定の改質処理効果を発現するとされた硬質砂岩碎石を原骨材とした S-series を対象に、塩酸溶解法による 5-20mm 粗骨材の原骨材含有率を求め、改質処理による骨材回収性を補足的に調査した。なお得られる結果には、第1の問題の影響が反映されるといえる。結果は、普通強度(N)の場合、改質処理により原骨材含有率が 16-19%程度増加し、高強度(H)の場合は 18-19%程度増加したため、改質処理により原骨材回収性が向上するコンクリートであることが改めて確認できた。なお、改質処理方法および水セメント比による影響は小さくなる傾向があったが、これは、処理状態とコンクリートの材料特性が影響することに加え、第1の問題におけるモルタル硬化体およびモルタル付着骨材粒子などに含有する細骨材や粗骨材破砕物による重量増加が影響したことも十分に考えられる。

以上、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの骨材回収性について検討した。コンクリートの定義を「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原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ようなコンクリート」とし、それを実現可能にする条件を明らかにすることを目的とした検討を行ったが、最終的にその条件は、マトリックス部分が高強度であり、かつ碎石を使用する場合であることが明らかにされたといえる。

碎石骨材を使用した高強度コンクリートは、現在および将来における高耐久化を可能とするコンクリートとして主要な材料と認められながらも、一般的には高品質再生骨材を回収することが逆に最も困難となるため、高強度化に伴う力学特性と骨材回収性に内在するトレードオフの関係は、一般的な手法では改善性を期待することは困難である。骨材回収型リサイクル指向コンクリートでは、力学的に過度な低下を生じないように原骨材の改質処理を施し、かつ高品質な再生骨材を回収可能にするため、地球環境問題解決の優先度が高い昨今においては、本手法はコンクリート構成材料の材料保存性の確保を前提とした上で完全リサイクルを実行するために、極めて有効な手法になると考えられるのである。

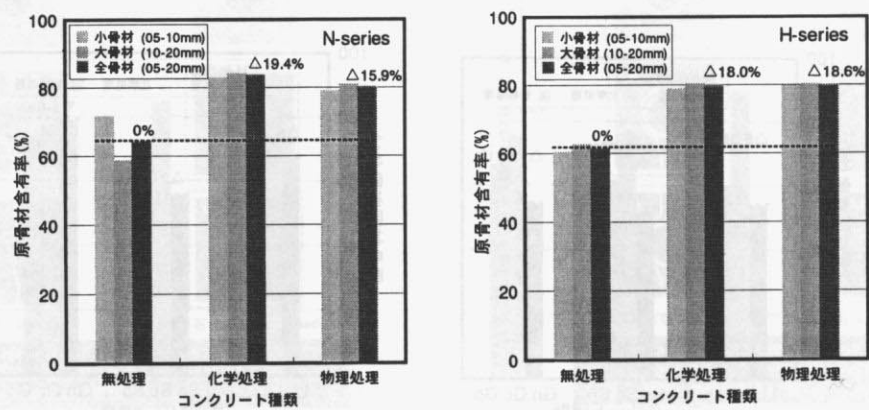


図6.5.14 塩酸溶解法による原骨材含有率(シリーズⅡ)

6.5.4 まとめ

本節では、骨材回収型リサイクル指向コンクリートのリサイクル性評価を検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) コンクリート破断面における表面粗さは、骨材界面剥離効果により、ひび割れが骨材界面に進展する結果、粗く評価される傾向があり、それは砕石を使用したコンクリートに顕著である。
- 2) コンクリート破断面における原骨材剥離面積率は、砂利を使用したコンクリートの場合、改質処理の有無による差は同程度になるのに対し、砕石を使用したコンクリートの場合は、改質処理の場合、特性値が大きくなる傾向があり、その程度は低水セメント比ほど顕著となる。
- 3) 骨材界面剥離効果の水セメント比依存性により、モルタルが高強度化し、骨材と同等の強度を保持する場合、骨材界面は骨材およびモルタル部分対して相対的に脆弱となり、破壊進展領域は界面近傍に優先的に形成され骨材界面剥離が生じやすくなる。従って、高強度コンクリートの場合、改質処理を施すことで簡便な破碎技術により付着ペーストの少ない高品質再生骨材を回収可能になる。
- 4) 骨材界面剥離効果の骨材粒形依存性により、骨材が砂利である場合、骨材界面の機械的かみ合わせが小さいため、改質処理の有無に関わらずひび割れ面が骨材界面に優先的に形成される傾向があり、骨材が砕石である場合、骨材界面の機械的かみ合わせが大きいため、無処理試料は、骨材界面剥離が困難になるが、改質処理試料は、骨材界面剥離効果が保持される結果、ひび割れ面が骨材界面に優先的に形成される状態が保持される。
- 5) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートは、無処理の場合と比較して簡便な破碎装置で品質の良い再生骨材を製造することが可能になり、その傾向は高強度砕石コンクリートの場合に効果が顕著になる。

6.6 第6章のまとめ

本章では、ペースト界面との易分解を可能にする骨材の検討、コンクリートの基礎的性質、破壊特性、およびリサイクル性評価を通じて、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの実証化を検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 骨材とペースト界面との易分解を可能にするには、表面平滑化により界面における物理的なかみ合わせに伴う付着を低減する物理処理法と、骨材界面における水和反応の抑制により水和に伴う付着を低減する化学処理法が有効であり、界面付着力の低減に関わる骨材界面剥離効果を期待することができる。なおその効果はセメント水和の安定期を超えても十分に発現するいえる。
- 2) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートは、改質処理骨材の骨材界面剥離効果により、圧縮強度等の弾性限界における力学特性が若干低下する傾向があるが、セメントマトリックスの高強度化および横補強筋の導入により強度低減を抑制することが可能である。
- 3) 骨材界面剥離効果は水セメント比依存性があり、水セメント比の低下に伴い、骨材界面の脆弱部が骨材およびマトリックスに対し相対的に低強度となり、ひび割れが骨材界面に優先的に形成されて効果が増大する。
- 4) 骨材界面剥離効果は骨材粒形依存性があり、骨材の粒形が優れる場合は、骨材界面の機械的なかみ合わせが小さいため、改質処理の有無に関わらずひび割れは骨材界面に優先的に形成されるのに対し、粒形が悪い場合、通常は骨材界面の機械的なかみ合わせが大きく骨材形状に起因するかみ合わせ力が保持されボンドクラックは発生しにくくなるが、改質処理の場合、骨材界面に優先的にひび割れが進展する性質が保持される結果、剥離効果も増大する。
- 5) 骨材界面剥離効果に関して、水セメント比と骨材粒形の性質に起因して、ひび割れの骨材界面への回り込み現象により破壊が延性的になる場合、破壊エネルギーの低下率が緩和する傾向がある。
- 6) 骨材界面剥離効果が効果的に作用するコンクリートは、簡便な破碎装置により、無処理の場合と比較して品質の良い再生骨材を製造することが可能になり、その傾向は高強度で碎石を使用したコンクリートの場合に顕著に現れる。
- 6) 材料保存性がある骨材回収型－完全リサイクルコンクリートはセメント回収型－完全リサイクルコンクリートにおける製造量に関わる問題を解消することが可能であり、需要量に応じて相補的に使用することにより、ライフサイクル設計の基盤となるリサイクル設計においてレベルサイクルによる更新形態を永続的に確保するコンクリート構造物が生産可能になり、順逆工程統合生産システムを導くことが期待できる。

第6章の参考文献

- [1] 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
- [2] 建設省建設技術総合開発プロジェクト,「建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発」概要報告書,建設省,(財)国土開発技術研究センター,1999
- [3] 平成 8-12 年度日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業報告書:ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発(代表 長滝重義),2001
- [4] 機能性コンクリートに関する調査研究報告書,日本建築学会関東支部材料施工専門研究委員会,1999
- [5] F.Tomosawa and T.Noguchi :Towards Completely Recyclable Concrete, Concrete Technology Towards the Century of Environment, Proceeding of International Workshop Hakodate, Integrated Design and Environmental Issues in Concrete Technology, E & FN SPON, pp.263-272, 1996
- [6] 後藤建太郎,橘高義典,小野山貫造,塚本剛史:コンクリート工学年次論文集,vol.21,No.1,pp.107-108,1999
- [7] 川上英男:粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究(その1),日本建築学会論文報告集,第 166 号,1969
- [8] 小阪義夫,谷川恭雄,太田福男:コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響 第 1 報 モデル解析法による検討,日本建築学会論文報告集,第 228 号,pp.1-11,1975
- [9] 国府勝郎,飛坂基夫:高強度コンクリートと骨材,コンクリート工学,vol.2,No.2,p.17,1990
- [10] 高強度な粗骨材の使用がコンクリートのダクティリティに及ぼす影響について,セメント技術年報,No.42,pp.399-402,1988
- [11] 柳橋邦生,小島正朗,神山行男,米沢敏男:高品質再生コンクリートの研究—フレッシュコンクリートの経時変化と実構造物への適用—,日本建築学会学術講演梗概集 A-1,pp.1043-1044,2000
- [12] 石倉武,友澤史紀,他:高品質再生骨材の製造技術に関する開発(その1),日本建築学会学術講演集, pp.1094-1096, 1995
- [13] 島裕和,立屋敷久志,橋本光一,西村祐介:加熱すりもみ法によるコンクリート塊からの高品質骨材回収の LCA 評価,コンクリート工学年次論文集,vol.23,No.2,pp.67-72,1991
- [14] Cornelissen, H.A.W, Hordijk, D.A. and Reinhardt, H.W.: Experiment and Theory for the Application of Fracture Mechanics to Normal and Lightweight Concrete, In Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, Ed. By F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers B.V.6, pp.565-575, 198
- [15] Otsuka, K.: Detection of fracture process zone in concrete by means of X-ray with contrast medium, Fracture mechanics of concrete structures, Proceedings of the First Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp.485-490, 1992
- [16] 牧廣,小坂田篤:プラスチックフォームハンドブック(初版),NDC578.48,1973
- [17] 白鳥正樹,三好俊郎,松下久雄共著:数値破壊力学,実教出版,1980
- [18] 50 FMC Draft Recommendation: Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985
- [19] V.C.Li, C.Chan and C.K.Y.Leung:Experimental Determination of the Tension-softening Relations for Cementitious Composites, Cement and Concrete Research, Vol.17, pp.441-452, 1987
- [20] F.H.Wittmann, K.Rokugo, E.Bruhwieler, H.Mihashi and P.Simonin: Fracture Energy and Strain Softening of Concrete as Determined by means of Compact Tension Specimens, Materials and Structures, Vol.21, pp.21-32, 1988
- [21] V.E.Saouma, J.J.Broz, E.Bruhwieler and H.L.Boggs: Effect of Aggregate and Specimens Size on Fracture Properties of Dam Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering(ASCE), Vol.3, No.3, 1991
- [22] 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—,1999
- [23] 吉岡研三,武田寿一,竹本靖:鉄筋コンクリート部材のせん断強度に関する実験的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集,1971
- [24] 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説,1990
- [25] 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説,1997
- [26] RILEM Repor:Fracture Mechanics of Concrete Structures. Edited by Elfgren.L., Chapman and Hall, 1986
- [27] ACI Committee 446 State-of-Art report:Fracture Mechanics of Concrete:Concepts, Models and Determination of Material Properties, 1991
- [28] G.V.Guinea, M.Elices and J.Planas: Stress Intensity Factors for Wedge-Splitting Geometry, Int.J.of Fract.81, pp.113-124, 1996

- [29] 橘高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.453, pp.15-25, 1993
- [30] 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, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985
- [31] Li,V.C., Chan,C.M. and Leung,C.K.Y.: Experimental Determination of the Tension Softening Relations for Cementitious Composites, Cement and Concrete Research, Vol.17, No.3, pp.441-452, 1987
- [32] Rice,J.R.: Crack Front Trapped by Arrays of Obstacles: Solution Based on Linear Perturbation Theory, in Analytical, Numerical and Experimental Aspects of Three Dimensional Fracture Process, AMD-91, ASME, pp.175-184, 1988
- [33] Faber, K.T. and Evans, A.G., "Crack Deflection Processes - I. Theory", Act a Metal, Vol.31, No.4, pp.565-576, 1983
- [34] 堀井秀之: フラクチャープロセスゾーン問題とコンクリート・岩石・セラミックスに対する破壊力学の体系化, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.309-320, 1989
- [35] 橘高義典: 引張破壊のモデル化と破壊力学パラメータ, コンクリート工学, Vol.37, No.9, pp.25-28, 1999
- [36] Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P.E.: Analysis of Crack Formation and Crack Growth of Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research, Vol.6, No.6, pp.773-782, 1976
- [37] 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, 1987
- [38] 橘高義典: 引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp.17-24, 1995
- [39] 中村成春, 橘高義典, 上村克郎: 高強度コンクリートの混合モード破壊に及ぼす粗骨材の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp.25-35, 1995
- [40] Wang, Y., Li, V.C. and Backer, S.P.: Experimental Determination of Tensile Behavior of Fiber Reinforced Concrete, ACI Materiala Journal, Vol.87, No.5, pp.461-468, 1990
- [41] 橘高義典, 上村克郎, 中村成春: ハイパーコンクリートの靱性評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.7-16, 1996
- [42] 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, 第 426 号, Vol.14, pp.203-212, 1991
- [43] Roelfstra, P.E. and Wittmann, F.H.: Numerical Method to Link Strain Softening with Failure of Concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, Elsevier Science Publishers, edited by Wittmann, F.H., pp.163-175, 1986
- [44] H.Tada, P.C.Paris and G.R.Irwin: The Stress Analysis of Cracks Handbook, Second Edition, Paris Productions Incorporated, pp.2-16, Appendix B, 1985
- [45] G.V.Guinea, M.Elices and J Planas: Stress Intensity Factors for Wedge-splitting Geometry, International Journal of Fracture, 81, pp.113-124, 1996
- [46] 橘高義典, 高橋仁智: 破壊力学手法によるひび割れ分散を考慮した軽量繊維補強コンクリートパネルの曲げ解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.541, pp.37-42, 2001