

# 論文 マイクロ波加熱方式を用いた表面改質骨材の完全回収および有効利用に関する研究

崔 希燮\*1・北垣 亮馬\*2・野口 貴文\*3

**要旨:** 本研究では、骨材の表面を無機質微粉末で改質した骨材を用いたコンクリートの力学的性能および分離・回収性能を定量的に検討するため、改質骨材コンクリートの圧縮強度、割裂引張強度、マイクロ波加熱による骨材界面部の温度特性検討、水銀圧入による空隙分布測定、TG-DTA によるセメントペーストの化学的変化、骨材回収率測定実験を行った。その結果、原粗骨材周りを高密度ペーストでコーティングすることが遷移帯を強化し、コンクリートの微細ひび割れの抑制および力学的性能の向上が図れることを確認した。また、マイクロ波加熱によって改質骨材コンクリートの微細ひび割れ発生および水和物の分解反応が発生し、空隙量の増加およびセメントペーストの脆弱化が生じ、効果的に再生粗骨材が回収できることを確認した。

**キーワード:** 無機質表面改質骨材、遷移帯、マイクロ波加熱、コーティング、脆弱化、再生粗骨材回収

## 1. はじめに

建設業界から排出される廃棄物は全産業における最終処分量の約 2 割を占め、今後もその排出量は増加すると予測されていることから、建設産業が環境問題において担う役割は極めて大きい。特にコンクリート廃棄物に対する関心は高く、近年はコンクリート廃棄物を路盤材として利用することで高い再資源化率<sup>1)</sup>を維持している。しかし、今後の道路建設の減少や、高度経済成長期に多量に建設されストックされた構造物から発生するコンクリート塊の増加、最終処分場の逼迫というコンクリート廃棄物を取り巻く様々な問題を鑑みると、路盤材として利用されているコンクリート塊をコンクリート用骨材として再利用する必要がある。このような状況のもと、コンクリート廃棄物から製造される再生骨材の普及に向けて、JIS が整備されるなど、コンクリートを取り巻くリサイクルシステムは大きく前進しつつある。しかし、現在の加熱すりもみ式再生処理<sup>2)</sup>などの高度処理技術<sup>3)</sup>を要する逆工程には、エネルギーやコストの増大、微粉末の処理など課題が多いことが明らかとなっている。一方、簡易処理の場合には、再生骨材の品質低下によるコンクリート性能の低下が顕著である。つまり、再生骨材の製造に要するエネルギー削減と再生骨材の品質確保というトレードオフ関係を両立させることは非常に困難な状況である。従って、コンクリートの打込み当初から骨材リサイクルを念頭に置いた未然防止型の技術を導入することによって、低エネルギーで高品質な骨材リサイクルを実現する技術の確立が求められている。

## 2. マイクロ波加熱方式を用いた表面改質骨材の完全回収の技術概要

上記の背景に対し、本研究の目的は、図-1 に示すマイクロ波加熱を利用した骨材回収型完全リサイクルコンクリート技術の開発を行うことである。この技術は、予め骨材の表面に高誘電率を有する酸化鉄 ( $Fe_2O_3$ ) をバインダーでコーティングし、建設物解体後の再生骨材製造時に、この骨材界面部分をマイクロ波によって選択的に加熱・脆弱化させること<sup>4)</sup>で、低エネルギーで高品質な骨材を回収し、骨材の完全リサイクル化を実現するものである。この技術を適用することで、再生骨材製造におけるエネルギー消費量の削減と再生骨材の品質確保というトレードオフ関係を克服し、さらに、骨材表面のコーティング層に骨材とセメントマトリクス間の機械的摩擦力および化学的結合力の向上を可能にする改質材料(ポゾラン材料など)を加え、コンクリートの弱部とされる遷移帯を改善し、コンクリートの力学特性の向上を実現するものである。これが実現すれば、コンクリート強度の向上と骨材回収性能の向上という別のトレードオフ関係をも克服可能な技術となる。

したがって、本研究ではセメントマトリクスと物理的・化学的性質が同じ無機質材料のみを用い、粗骨材の分離・回収可能な骨材表面改質技術の適用性検討を目指す。特に、粗骨材表面の遷移帯部分を高密度のセメントペースト被覆によって改善することとし、遷移帯部分とセメントマトリクスとの間の **Micro-crack** の発生抑制および改質骨材コンクリートの力学的性能向上を目指す。また、構造物解体の時、高品質再生骨材を回収するため、誘電材料が混入された無機質表面改質骨材の製造・マイ

\*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻大学院生

\*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻講師

\*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻准教授

修士(工学) (正会員)

博士(工学) (正会員)

博士(工学) (正会員)

クロ波加熱によって骨材の表面を無機質微粉末で改質したコンクリートにおける粗骨材回収性能向上を目指す。

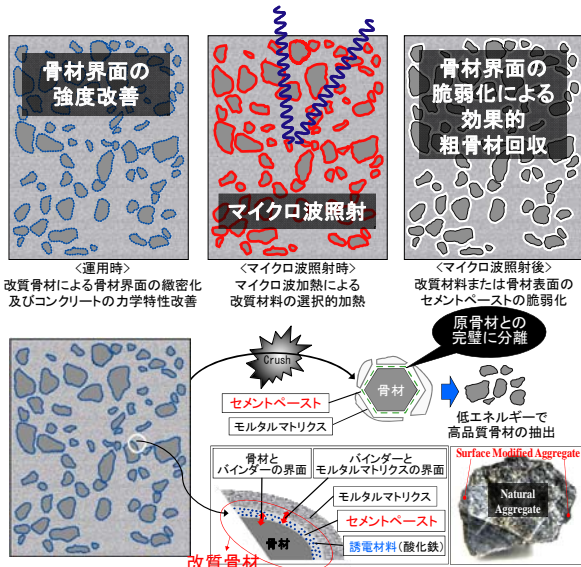


図-1 マイクロ波加熱による表面改質骨材回収の概念図

### 3. 無機質表面改質骨材コンクリートの性能検討

#### 3.1 実験概要

一般骨材を使ったコンクリートは、図-2のように、一般的にセメント、水、粗骨材、細骨材で構成されるが、改質骨材コンクリートは原骨材の表面をセメントペーストでコーティングするため、図-2のように改質ペースト部分を調合設計に反映する。その時、一般調合の目標性能（スランプ、強度など）およびコストと等しいパフォーマンスをためには、自由水の量、粗骨材量、W/Cなどを考慮しなければならない。したがって、一般骨材コンクリートと同一の調合をするためには、改質材がコーティングされた粗骨材の量を増加させ、粗骨材にコーティングされた改質ペーストの量を現場調合のセメント量と水量から除けばよく、そうすることで、一般骨材コンクリートと改質骨材コンクリートのセメント・水・原骨材の量は等しくなる。また、既往の研究<sup>5)</sup>では原骨材とセメントマトリクスの付着力向上のための仕上げ粉末工程において、改質骨材を表乾状態とすることが困難、作業工程が複雑、長い製作時間を必要とするなどの問題点が指摘されている。

本実験では、無機質表面改質骨材を用いたコンクリートの力学的性能および分離・回収性能の定量的な検討のために、まず上記の概念に基づき調合設計を行い、既往の無機質改質骨材の問題点を改善するため、仕上げ粉末工程の除去および改質骨材の製作方法の変更を行い、実験を行った。無機質材料によって表面改質処理を行った改質ペーストのW/CとコンクリートのW/Cを30%とし、高強度条件における改質骨材コンクリートの改質効果

を確認しようとした。改質骨材コンクリートの実験項目として、強度改善効果の確認のための圧縮強度および割裂引張強度の測定、ならびに、最終的な骨材回収性能の確認のためのマイクロ波加熱時の温度分布測定、およびマイクロ波加熱後の細孔空隙量、TG-DTAによるセメントペーストの脆弱化特性および骨材回収率の測定を行った。本実験で使用した粗骨材は全て硬質砂岩碎石（表乾密度 2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.70%、粗粒率 6.71）であり、表面改質ペーストおよびコンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、細骨材には陸砂（表乾密度：2.58g/cm<sup>3</sup>、吸水率：2.21%、粗粒率：2.67）を利用した。表面改質材およびコンクリートの調合をそれぞれ表-1 および表-2 に示す。改質骨材コンクリートの実験水準を表-3 に示す。

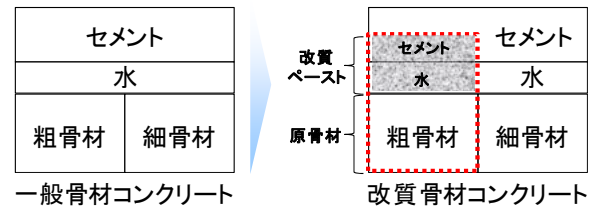


図-2 コンクリートの構成材料の比率

表-1 表面改質材の調合(原骨材 1kg 製造基準)

W/C	水	セメント	酸化鉄	混和剤	フロー
30%	21g	70g	70g	C×1.9%	30cm

表-2 コンクリートの調合

種類		一般骨材	改質骨材
W/C	(%)	30	30
Gmax	(mm)	20	20
空気量	(%)	3.0±1.5	3.0±1.5
細骨材率	(%)	41	41
単位結合材量 (kg/m <sup>3</sup> )	W	170	149.6
	C	566.7	502.1
	S	666	666
	G	973	1120
	混和剤 (SP8HU)	C*0.5%	C*0.7%

表-3 改質骨材コンクリートの実験水準

実験水準	3日	7日	28日
圧縮強度	O	O	O
割裂引張強度	O	O	O
マイクロ波加熱	-	-	O
水銀圧入	-	-	O
TG-DTA	-	-	O
骨材回収率	-	-	O

#### 3.2 圧縮・割裂引張強度および考察

本実験においては、圧縮強度試験は JIS A 1108 「コン

クリートの圧縮強度試験方法」, 割裂引張強度試験は JIS A 1113 「コンクリートの割裂引張強度試験方法」によって測定し, 図-3 および図-4 に改質骨材コンクリートの圧縮強度および割裂引張強度の試験結果を示す。圧縮強度については, 改質骨材コンクリートは一般骨材コンクリートに比べ, 材令 3 日, 7 日および 28 日すべてにおいて 10%前後の強度増加を示した。また, 割裂引張強度の場合には, 材令 7 日と 28 日で 7.4%の改善効果を示した。これらは, 一般コンクリートの脆弱部である遷移帯を高密度ペーストでコーティングされたことともに, 酸化鉄の粒子寸法・形状による機械的摩擦力の増大により, 改質ペーストとセメントマトリクス間の物理・化学的付着力が増加したため, 改質骨材コンクリートの強度が改善されたものと判断される。このような結果は写真-1 の一般骨材コンクリートと改質骨材コンクリートの割裂引張試験で生じた破断面の形状を観察することによって推測することができ, 一般骨材コンクリートは多くの部分で骨材表面において破壊する現象を示したが, 改質骨材コンクリートは割裂時に発生させたひび割れが原骨材を貫通した状態であることが観察された。

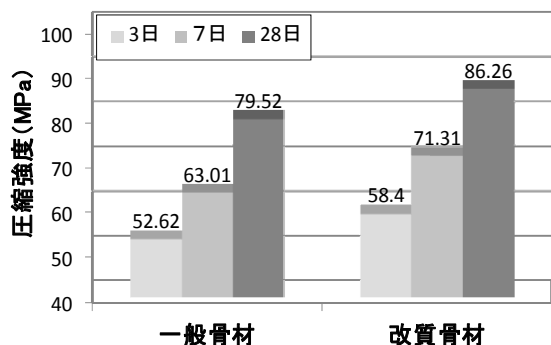


図-3 圧縮強度の比率

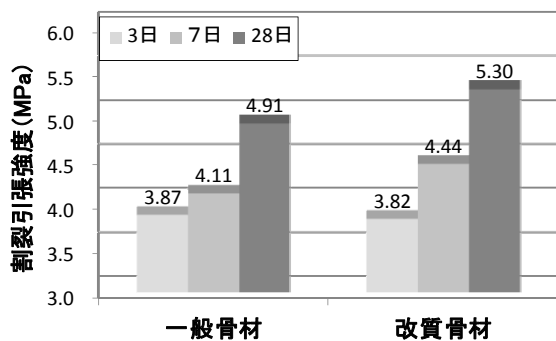


図-4 割裂引張強の比率

### 3.3 マイクロ波加熱による改質骨材の昇温特性

本実験においては, マイクロ波加熱による改質ペーストおよび改質骨材コンクリートの温度上昇特性を把握するため, 周波数 2.45GHz 高周波出力 1800W で, 加熱時間を 0, 60, 120, 180, 240 秒として試験体の加熱を行い, 一般骨材コンクリートと改質骨材コンクリートの表面

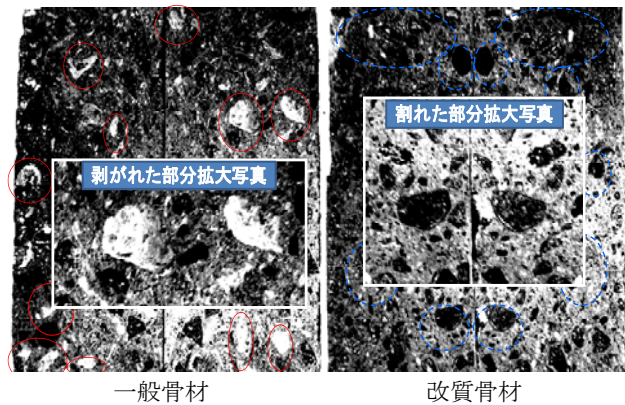


写真-1 コンクリートの破断面の比較

部およびコンクリート内部の骨材界面部の温度上昇特性を比較した。試験体は, 図-5 のように, コンクリート表面部測定用  $\phi 50 \times 100(\text{mm})$  試験体を製作し, また, マイクロ波加熱による骨材界面部測定をため,  $\phi 50 \times 100(\text{mm})$  の中央部切断試験体を用い, 予備試験の際に加熱中に爆裂が起きたことから, 安全面も考慮し,  $40^\circ\text{C}$  乾燥を十分行った後に加熱を行った。加熱後, サーモグラフィを用いて即座に撮影した時の最高温度で各コンクリートの温度上昇特性を評価した。図-6~図-10 の横軸は, 試験体の横長さである 50mm と 100mm であるが, 赤外線温度測定の際, 放射熱のため温度範囲により領域上での多少の誤差はあり得る。

マイクロ波による加熱実験の結果, 図-6 のように, 一般骨材コンクリート試験体では, 60 秒で約  $120^\circ\text{C}$ , 120 秒で約  $230^\circ\text{C}$ , 180 秒で約  $300^\circ\text{C}$  の温度を示した。一方, 改質骨材コンクリートは, 図-7 のように 60 秒で約  $170^\circ\text{C}$ , 120 秒で約  $270^\circ\text{C}$ , 180 秒で約  $370^\circ\text{C}$  程度の温度を示し, 一般骨材コンクリートより改質骨材コンクリートの方がマイクロ波加熱効果が高いことを確認した。

また, 各コンクリート内部の骨材界面温度分布では, 図-8 のように一般骨材コンクリートは試験体の表面(外部)と内部の骨材界面の温度分布がほぼ類似の傾向を示した。しかし, 図-9 の改質骨材コンクリートでは, 試験体の表面温度に比べて骨材界面は約  $100^\circ\text{C}$  程度高い温度を示した。これは改質ペーストに誘電材料として混入された酸化鉄が発熱したことによると判断される。また, 図-10 は一般骨材と改質骨材の骨材界面の温度差を示しているが, 改質骨材は加熱時間 180 秒で約  $100^\circ\text{C}$  程度一般骨材に比べ温度が高くなる結果を示した。

### 3.4 空隙量の変化による改質骨材コンクリートの脆弱化特性

セメント系物質は水和物, ゲル水, 自由水で構成される多孔体であるため, 高温環境下においてセメント系物質は脱水および水和物の分解による空隙構造の変化と化学的变化を伴い, これは細孔分布や細孔構造特性で把握することができる。

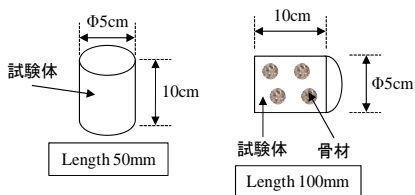


図-5 試験体の模式図

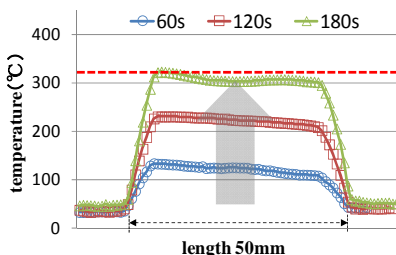


図-6 一般-温度特性(外部)

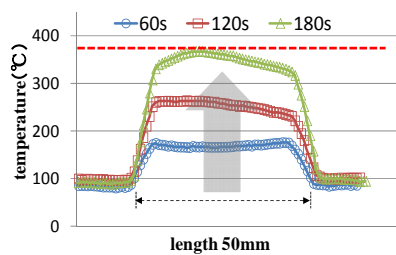


図-7 改質-温度特性(外部)

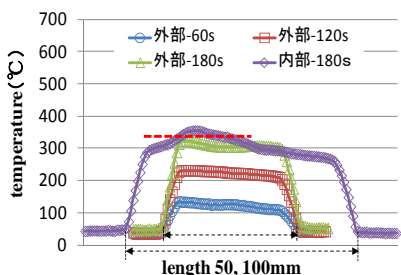


図-8 一般-内部と外部の温度特性

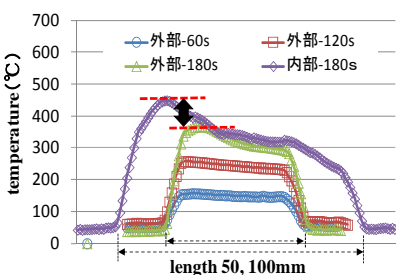


図-9 改質-内部と外部の温度特性

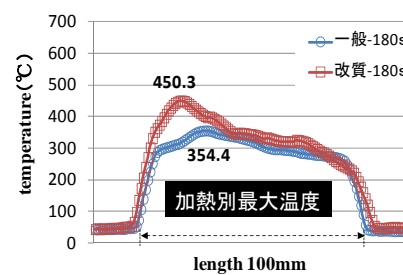


図-10 一般と改質の温度特性 (内部)

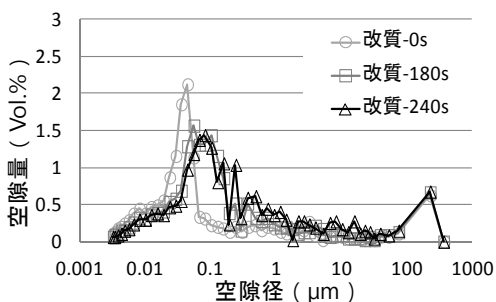


図-11 改質-空隙量比較

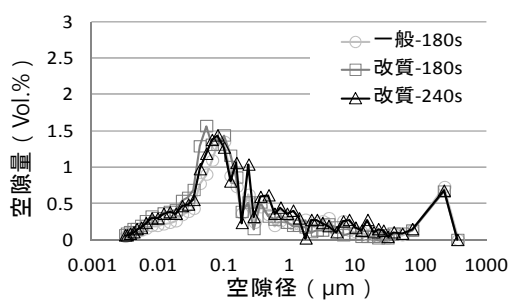


図-12 一般&改質-空隙量比較

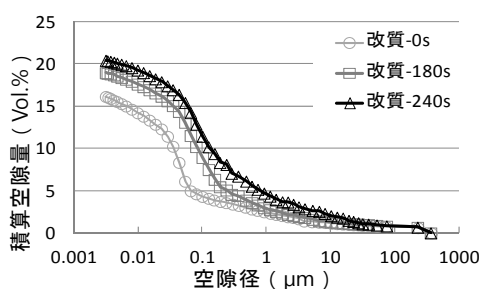


図-13 改質-積算空隙量比較

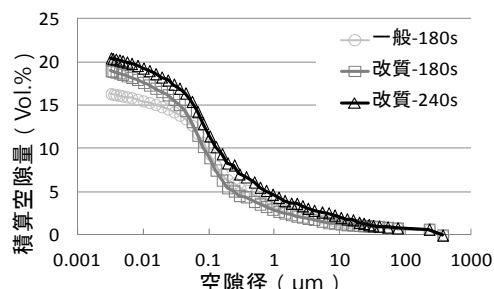


図-14 一般&改質-積算空隙量比較

図-11～図-14 は水銀圧入法を利用して一般骨材コンクリートと改質骨材コンクリートのマイクロ波加熱による空隙構造変化を示したものであるが、試験体はコンクリートからセメントペーストが相当部分張り付いている骨材部分を採取して実験を行った。

実験結果、図-11のように、マイクロ波加熱の時、誘電材料である酸化鉄が混入された改質骨材からの熱伝導による温度増加によって総空隙量の増加および細孔径分布のピークが空隙量が大きい方に移動する現象が見られた。特に、マイクロ波による加熱時間が180秒以

上では、 $0.05\mu\text{m}$ 以下の空隙が減少し、 $0.05\sim 0.1\mu\text{m}$ の範囲に存在していた空隙がマイクロ波加熱によって $0.1\mu\text{m}$ 以上の空隙に移動することとともにその量も増加する現象を示した。また、図-12と図-13のように、積算空隙量もマイクロ波加熱によって漸進的に増加した。また、図-11と図-13のように、加熱時間180秒の一般骨材コンクリートの空隙量と比較すると、改質骨材コンクリートの方が発生した空隙量は多かった。一般的に加熱によるコンクリートの空隙率増加は、水和物の分解によると考えられ、空隙率の増加に伴う遷移帯および骨材

近傍のセメント硬化体の脆弱化が進むと考えられる。したがって、マイクロ波加熱における改質骨材コンクリートの空隙増加はコンクリートの微細ひび割れの発生<sup>6)</sup>とゲルおよび化学的に結合したC-S-H系水和物および水酸化カルシウムが分解され、結合水が蒸発した結果であると考えられる。

### 3.5 TG-DTAによる改質骨材コンクリートの脆弱化特性

一般的にコンクリートが高温に露出されると化学構成と物理的構成が変わる。110°C以上の温度ではケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の結合水の脱水反応が発生するとともに、骨材の熱膨張が生じる。それらは内部応力を発生させ、300°C以上の温度でコンクリートにひび割れを発生させる<sup>6)</sup>。

本実験では、加熱前後の改質骨材と一般骨材の周辺コンクリートの粉末を用い、25°Cから1000°CまでTG-DTAを用いて熱分析を行った。温度上昇速度は50~400°Cまでは20°C/min、400~1000°Cまでは10°C/minで設定し、緩衝気体として窒素ガスを投入した。また、TG-DTAの基準物質としてはアルミナ粉末を用いた。

その結果、図-15~図-17に示すように、加熱後の試料の場合、DTA曲線に急激な吸熱量が見える温度区間は420~500°Cであり、この区間が水和反応によって生成されたCa(OH)<sub>2</sub>が脱水を生じながら吸熱する区間である。図-15の加熱しない改質骨材の試験体は200°Cまでは毛細管水およびゲル水の蒸発による吸熱区間が現れ、420~500°C区間ではCa(OH)<sub>2</sub>の分解による強い吸熱ピークが発生し、吸熱反応によって試料の重量は大きく減少する傾向を示した。しかし、図-16および図-17の加熱時間180秒と240秒の改質骨材を用いたコンクリートでは、マイクロ波加熱による再生骨材近傍のCa(OH)<sub>2</sub>の

分解は既に完了しているため、重量減少量および吸熱量が加熱しない試験体と比べて幾分少なくなることを確認した。また、図-18および図-19の一般骨材試料の場合、マイクロ波加熱による試験体の温度上昇が400°Cに到達しなかったため、Ca(OH)<sub>2</sub>の分解による吸熱ピークおよび重量減少は加熱前後においても類似の傾向を示した。以上より、改質骨材コンクリートにマイクロ波加熱を行う場合、誘電材料である酸化鉄の発熱によって改質ペーストと改質骨材界面のモルタル部分は400°C以上に加熱され、水酸化カルシウムの分解反応によるセメントペーストの脆弱化が相当部分進行されたと判断される。

### 3.6 骨材回収率実験

本実験においては、一般骨材コンクリートと改質骨材コンクリートをマイクロ波によって0、60、120、180秒間加熱し、一般骨材と改質骨材の再生粗骨材回収率を比較した。加熱終了後、ジョークラッシャーを用いて、簡易破砕を行った。ジョークラッシャーで破砕後、5mm以上の粗骨材分をロサンゼルス試験機を利用して、簡易的にすりもみを行い、モルタル分の除去を行った。なお、すりもみ媒体には、平均直径46.8mmの鋼球12個(総重量約5kg)を利用し、回転数は333回転とした。また、再生粗骨材回収率は表-4に示すように定義した。

表-4 再生粗骨材の回収率に関する定義

<p>原骨材 : コンクリートに含まれる粗骨材 誘電体被覆改質処理骨材においては、処理前の原骨材重量を原骨材とした。</p> <p>再生粗骨材 : すりもみ処理された5mm以上のもの (粗骨材+細骨材+セメントペースト)</p> <p>*再生骨材回収率 = 再生粗骨材 / 原骨材</p>
--

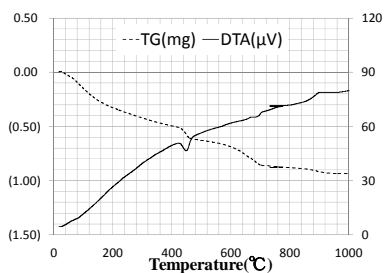


図-15 改質-0sec

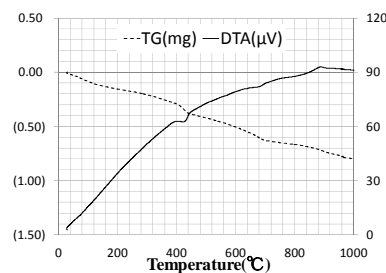


図-16 改質-180sec

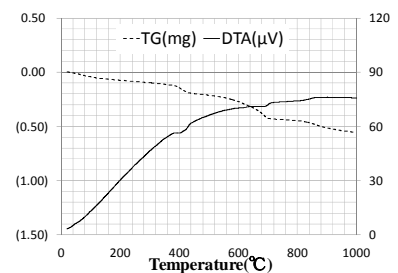


図-17 改質-240sec

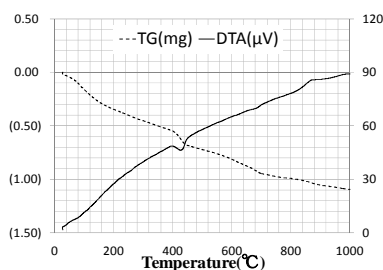


図-18 一般-0sec

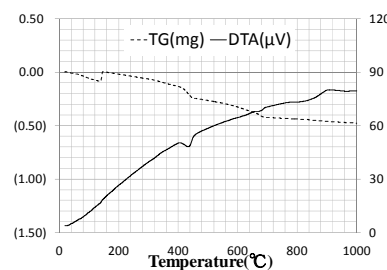


図-19 一般-180sec

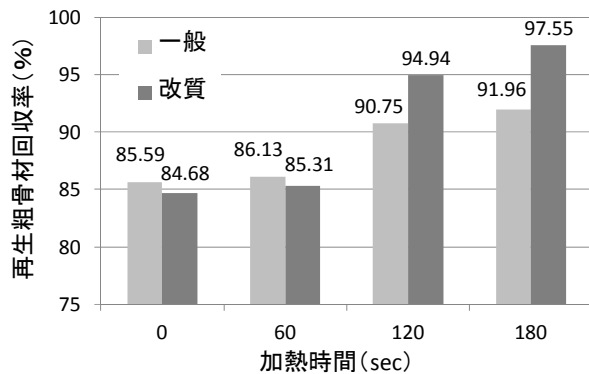


図-20 各骨材の再生粗骨材回収率

その結果、図-20のようにマイクロ波加熱時間0秒と60秒では改質骨材の再生粗骨材回収率は一般骨材と比べ少し低かったが、これは改質骨材とセメントマトリクス間の高密度ペーストのコーティングによる付着力向上であると推測される。しかし、加熱時間120秒と180秒では、各々約4~6%程度、改質骨材の方が再生粗骨材回収率が高くなった。加熱時間120秒の場合、一般骨材では過熱によるセメントペーストの脆弱化温度である300℃に到達しなかったが、改質骨材ではほぼ300℃に到達し、この時点から一般骨材と改質骨材の再生粗骨材回収率に差が発生したと判断される。また、加熱時間180秒の場合には、加熱時間120秒の場合よりもいっそう、改質骨材の再生粗骨材回収率は一般骨材より高い値を示し、その値は97.55%であった。特に、加熱180秒では、ほぼ100%に近い再生粗骨材回収率を示しており、マイクロ波加熱によって改質骨材表面に存在する誘電材料の発熱が効果的であったものと判断される。

#### 4. まとめ

本研究では、マイクロ波加熱方式を用いた表面改質骨材の完全回収および有効利用の技術開発に関する実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) コンクリートの脆弱部である遷移帯を無機質材料である高密度セメントペーストでコーティングさせ、遷移帯部分とセメントマトリクス間の微細ひび割れの発生抑制による改質骨材コンクリートの圧縮強度および引張強度の改善などの力学的性能向上を確認した。
- 2) 選択的加熱が可能なマイクロ波加熱を通じ、改質骨材コンクリートは、コンクリートの表面部と骨材界面部の温度差が約100℃以上発生されることから、このような結果はマイクロ波加熱によって改質骨材に混入された酸化鉄が効果的に発熱されたと判断される。

- 3) 誘電材料である酸化鉄が混入された改質骨材コンクリートをマイクロ波で加熱した時、一般骨材コンクリートに比べ優秀な温度上昇特性を示した。特に、加熱時間180秒以上では最高温度が400℃以上を示し、コンクリートの微細ひび割れ発生および水和物の脱水反応によって空隙量が増加され、水酸化カルシウムが分解され、結局、セメントペーストの脆弱化および強度が低下することを確認した。
- 4) 加熱時間180秒のマイクロ波加熱によって回収された再生粗骨材に含まれるペーストおよび細骨材は約2.5%程度であり、原骨材に近い再生粗骨材が極めて高く回収され、高品質な再生粗骨材であることが明らかになった。また、目視観察において再生粗骨材の大部分はセメント分が付着していない原骨材であることを確認した。つまりマイクロ波加熱によって、誘電体を含むバインダーが脆弱化され再生粗骨材が効率的に回収されていることを示している。

本実験の結果より、無機質材料を用いた表面改質骨材の力学的性能向上およびマイクロ波加熱による効果的な再生粗骨材回収が可能であると考えられる。しかし、以後、本技術を実際の現場に適用するため、一般強度調査に無機質表面改質骨材を適用した定量的な調査設計および力学的性能と長期耐久性の評価に関する研究が必要である。

#### 参考文献

- 1) Hendriks, Ch.F. and Janssen, G.M.T. : Construction and demolition waste-general process-, HERON, Vol.46, No.2, pp.79-88, 2001
- 2) 柳橋邦生：高品質再生細骨材の製造技術に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.1217-1222, 2003
- 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, pp.106-109., 1999
- 4) 辻埜真人：マイクロ波加熱技術を利用した骨材回収型完全リサイクルコンクリート技術に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，東京大学学位論文，2007
- 5) 崔希燮，飯田康介，北垣亮馬，野口貴文：マイクロ波を利用した骨材回収型完全リサイクルコンクリート技術に関する研究-無機質系材料を利用した改質被覆骨材の基礎的力学性能の評価について，第65回セメント技術大会，第1218号，2011
- 6) 安部武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：高温における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第515号，pp.163-168., 1999