

# 種々のセメントに廃コンクリート微粉を外割置換したモルタル の圧縮強度に関する一考察

日大生産工(院) ○奥主 謙太郎 安東 修一 日大生産工 鵜澤 正美

## 1. はじめに

コンクリート廃材の再利用技術の確立は循環型社会の実現に向けた喫緊の課題である。現在、コンクリート廃材の多くは路盤材としての利用がされており、セメント・コンクリートなどとしての同用途への利用は十分に進んでいない。コンクリート廃材における骨材分のリサイクルに関しては、日本産業規格において再生骨材として規定が整備されており制度的準備は整っている。しかし、再生骨材製造時に副次的に発生する廃コンクリート微粉（以下、RCPと略記）については、現時点での有効利用方法が確立されていない。

筆者らは、後述のボールミル混合による活性化処理を種々のコンクリート混和材へ適用し高付加価値化を試みている<sup>1,2)</sup>。本稿で報告するRCPに関しても活性化処理を行うことで普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに対し、RCPを添加しても圧縮強度が低下しないこと<sup>2)</sup>を明らかとした。

本研究は、RCPのコンクリート混和材としての利用方法を確立することを目的とし、先行研究で得られた知見をさらに拡張させたものである。具体的には、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いたモルタルに対し、ボールミル混合法により活性化したRCPおよびポゾラン反応性を有するシリカフュームを添加した場合のモルタルの物性に及ぼす影響について、圧縮強度試験により評価した。

## 2. 廃コンクリート微粉の調製法

本研究では、加熱すりもみ法を模擬した装置で作製したRCPを使用した。加熱すりもみ法は粗粉碎したコンクリート塊を電気炉内で大気中約300°Cで加熱を行う。これによりセメントベースト部の水和生成物が脱水し脆弱化することで骨材と微粉とに分けることができる方法である。本研究では、RCPのみを原料コンクリートから得る目

的であるため骨材の回収は行っていない。すなわち、コンクリートの材齢28日圧縮強度試験後の供試体廃材を原料コンクリートとしてジョークラッシャーで粗粉碎し、大気中での加熱後、チューブミルで粉碎しRCPを作製した。なお、本研究に供した微粉の粒径は0.15mm以下とした。原料コンクリートは複数の配合のものを使用しているが、いずれも使用セメントは普通ポルトランドセメント、材齢28日における呼び強度は42~51N/mm<sup>2</sup>であり、混練から3年ほど経過したものを使用している。

## 3. 廃コンクリート微粉の性状

RCPは一度硬化したコンクリートから得られているため、セメント硬化体および骨材微粉から構成されている。硬化コンクリートの配合推定法として、グルコン酸ナトリウム溶解処理によってRCP中のセメント量を求めた結果、セメントが40.3mass%含有されていることを確認した。また、XRDによる含有成分の解析結果よりセメント主要成分であるAliteの回折線は検出されなかったためAliteはほとんどが水和した状態にあると考えられた。XRFにより測定した主要組成を表-1に示す。ここでRCP中の酸化カルシウム分に着目し、窒素雰囲気下でのTG-DTAにより水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウム量を定量した。その結果、質量減少率を酸化カルシウムに換算するとそれぞれ6.44mass%, 17.88mass%であったことから酸化カルシウム分は合計で24.32mass%と計算された。表-1の酸化カルシウム総量から差し引くと、炭酸カルシウムおよび水酸化カルシウム

表-1 廃コンクリート微粉の主要組成

Chemical Composition (%)					
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ig.loss	others
50.48	17.54	3.96	2.51	22.02	3.49

Compressive Strength of Mortars with External Replacement of Various Cements  
by Recycled Concrete Powder

Kentarou OKUNUSHI, Shuichi ANDO and Masami UZAWA

以外の酸化カルシウム分、すなわち26.16mass%は他のセメント水和物や未水和のセメント鉱物分であると推定することができる。

#### 4. 活性化した廃コンクリート微粉およびシリカフューム添加モルタルの圧縮強度

##### 4.1 実験方法

###### (1) ボールミル混合法による活性化処理

ボールミル混合法の模式図を図-1に示す。本報におけるボールミル混合法とは、円筒型の容器内に試料、水酸化カルシウム飽和水溶液、上水道水、細骨材およびセラミックスボールを投入し2段式ボールミル回転架台を用いて混合を行う活性化方法である。混合時には容器内でセラミックスボール同士が衝突し混和材粒子はやや微粒子化される。それと同時に、非晶質シリカ成分は水酸化カルシウムとポゾラン反応し混和材の表面や投している細骨材の表面に水和生成物を担持させることを志向している。

筆者らの研究チームはボールミル混合法による活性化処理を種々の材料に適用し、コンクリート混和材として高付加価値化を試みている<sup>1), 2)</sup>。RCPに関しては、セメント成分の炭酸化によって生じた炭酸カルシウムと残余の主に非晶質シリカと思われる成分で被覆されていると推察している。この被覆層を改質し、粒子中に残存する未水和セメント鉱物分の水和反応を促進させることを目的として、従来とは異なる視点からボールミル混合法による活性化処理を適用した。その結果、添加している水酸化カルシウム飽和水溶液やRCPの含有する水酸化カルシウムおよび未水和セメント鉱物といったアルカリ分により、普通ポルトランドセメント使用時に初期材齢の圧縮強度が増進すること、圧縮強度阻害要因の低減となることを明らかとした<sup>2)</sup>。本研究においても、活性化の条件

は、青木ら<sup>1)</sup>の最適混合条件を参考にした。円筒容器は広口試薬瓶(直径73mm、高さ168mm、内容量500ml、低密度ポリエチレン製)、セラミックスボールの材質はアルミナであり、15mmを10個、13mmを5個とした。また、回転架台の回転数は30rpm、混合時間は1時間とした。さらに容器内の配合についてはRCPの質量比で水酸化カルシウム飽和水溶液50%、上水道水63%、細骨材45%とした

###### (2) 使用材料および配合

使用材料は、普通ポルトランドセメント(OPC、密度3.16g/cm<sup>3</sup>)、高炉セメントB種(BB)、シリカフューム(SF、密度2.3g/cm<sup>3</sup>、平均粒径0.15μm)、細骨材(S、JIS R 5201準拠品)、廃コンクリート微粉(RCP、BET比表面積5.46m<sup>2</sup>/g)、上水道水(W)、高性能減水剤(SP、ナフタレンスルフォン酸系)および水酸化カルシウム飽和水溶液(市販の水酸化カルシウムを溶解)である。なお、高炉セメントB種は普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末(GBFS、比表面積4220cm<sup>2</sup>/g、密度2.91g/cm<sup>3</sup>、石膏添加なし)を40mass%置換したものとした。容器内の配合を表-2、混練時の配合を表-3に示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の2水準であり、表-

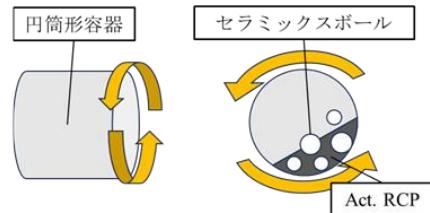


図-1 ボールミル混合の模式図

表-2 容器内の配合

RCP/C (%)	Components (g)			
	W	Sat. Ca(OH) <sub>2</sub> aq.	RCP	S
20	56.7	45	90	40.5

表-3 廃コンクリート微粉およびシリカフュームを添加したモルタルの配合

Symbol	W/C (%)	RCP/C (%)	SF/C (%)	Components(g)					SP (C × %)
				W	C OPC / BB	SF	RCP	Act. RCP	
OPC / BB			—		—				1350
SF3		—	3	225	13.5	—			1336.5
SF5			5		22.5				1327.5
RCP20			—		—				1259.2
RCP20-SF3	50	3	3	223.8	13.5	90			1245.7
RCP20-SF5		5	5		22.5				1236.7
Act. RCP20			—		—				1218.5
Act. RCP20-SF3		3	3	121.8	13.5	—	232.2		1205.0
Act. RCP20-SF5		5	5		22.5				1196.0

3中に示したSymbolの前に使用セメントの略称であるOPCあるいはBBをつけたものを各配合の名称とした。また、その他に水セメント比(W/C)は50mass%の1水準、RCP添加率(RCP/C)は0および20mass%の2水準、SF添加率(SF/C)は0、3および5mass%の3水準とした。RCPおよびSFはセメントの質量比で添加し、セメント質量一定で細骨材と置換した。

### (3) 供試体作製および圧縮強度試験

供試体の作製はJIS R 5201を参考にして行い、混練にはJISモルタルミキサーを用いた。型枠は40×40×160mmの角柱型として、供試体の成型後は20°C、相対湿度60%の室内で前置き養生を行い翌日に脱型を行った。脱型した供試体は試験材齢を7、14および28日として水中に投じた。供試体の圧縮強度試験はJIS R 5201附属書Cに準拠し、6点の平均値を圧縮強度とした。

## 4.2 実験結果

普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに対しRCPおよびSFを添加した場合の材齢による圧縮強度の変化を図-2に示す。OPC-RCP20はOPCと比較し、材齢7日および14日では同等の圧縮強度となったが、材齢28日ではOPCの約9割の圧縮強度となった。これは、RCPに加えSFを添加した水準においても同様の傾向となり、SFのポゼラン反応による圧縮強度改善効果は確認されなかった。続いて、ボールミル混合法により活性化したRCPがモルタルの圧縮強度に及ぼす影響を図-3に示す。前述の通り、OPC-RCP20は材齢14日以降に圧縮強度が低下するが、活性化したRCPを添加しているOPC-Act. RCP20は材齢7日においてOPCと比較して116%の圧縮強度を示し、材齢28日においてもOPCの圧縮強度を下回らなかった。また、図-4に示している活性化したRCPおよびSFを添加した場合の圧縮強度においても圧縮強度の増進が確認され、各要因は相加的に圧縮強度へ寄与していると推察される。

次に、高炉セメントB種を用いたモルタルにRCPおよびSFを添加した場合の材齢による圧縮強度の変化を図-5に示す。前報<sup>2)</sup>において、高炉セメントB種を用いたモルタルにRCPを添加した場合、RCPに含有する水酸化カルシウムおよび未水和のセメント鉱物分がアルカリ刺激として高炉スラグ微粉末に作用する<sup>3), 4)</sup>ことで、材齢28日では無添加と同等であるが、材齢7日における圧縮

強度が増進すると報告した。本研究のRCPのみを添加しているBB-RCP20においても前報と同様の結果が得られた。一方、SFを添加しているBB-RCP20-SF3およびBB-RCP20-SF5においてはBB-SF3およびBB-SF5と比較して材齢7日での圧縮強度増進に加え、材齢28日においても高い圧縮強度を発現した。続いて、ボールミル混合法により活性化したRCPがモルタルの圧縮強度に及ぼす影響を図-6に示す。前述の通り、材齢7日においてBB-RCP20はBBと比較して112%の圧縮強度となるが、活性化したRCPを添加しているBB-Act. RCP20は127%の圧縮強度を示した。しかし、材齢28日においては活性化の有無にかかわらず圧縮強度に大きな差は見られないため高炉セメントB種における活性化は材齢初期に有意な圧縮強度増進があるものの効果は限定的であることが判明した。また、図-7に示している活性化したRCPおよびSFを添加した場合の圧縮強度においては、BB-Act. RCP20の材齢7日以降で確認された圧縮強度の鈍化傾向が全体的に改善された。

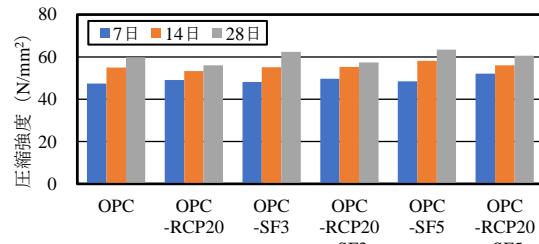


図-2 普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに  
対しRCPおよびSFを添加した場合の圧縮強度

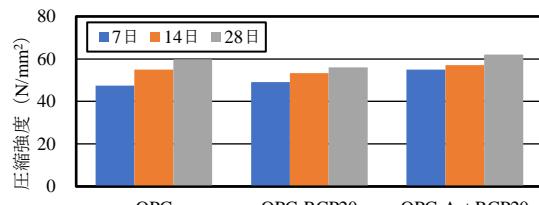


図-3 普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに  
対し活性化したRCPを添加した場合の圧縮強度

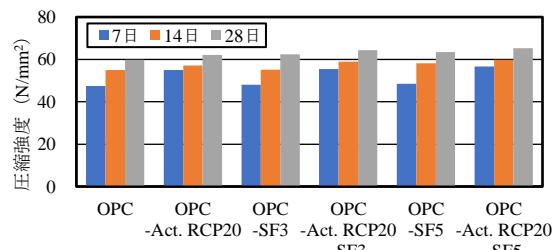


図-4 普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに  
対し活性化したRCPおよびSFを添加した場合の圧縮強度

ここで、未活性および活性化したRCPを20mass%，SFを0，3および5mass%添加した場合の材齢28日における圧縮強度を図-8に示す。なお、材齢7日BBの圧縮強度を100%として相対圧縮強度で表している。図-8よりRCPを添加しているBB-RCP20-SFおよびBB-Act. RCP20-SFでは、SF添加率を上げるにつれ、BB-SFと比較し大きく圧縮強度が増進する傾向が見られた。この傾向は普通ポルトランドセメントの場合では確認されなかった。前報<sup>2)</sup>では、RCPはアルカリ刺激として高炉スラグ微粉末へ作用していると報告しているが、本検討の結果からさらに高炉スラグ微粉末、SFおよびRCPを同時配合した場合においては、高炉スラグ微粉末へのアルカリ刺激に加えてSFのポゾラン反応との相乗的な効果を発現し、圧縮強度の増進に大きく寄与することが明らかとなつた。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに活性化したRCPおよびSFを添加した場合、活性化効果およびポゾラン反応は相加的に圧縮強度に寄与する。
- 2) 高炉セメントB種を用いたモルタルに活性化したRCPおよびSFを添加した場合、一様に圧縮強度が増進することが確認された。また、高炉セメントB種の場合のみ、未活性および活性化したRCPとSFの同時配合は相乗的に圧縮強度に寄与することが確認された。

## 謝辞

本研究は、JSPS科研費(24K15357、研究代表者：鶴澤正美)の交付を受けて実施したものであり、ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 青木康平、鶴澤正美、高活性化フライアッシュを用いたモルタルの圧縮強度発現に及ぼす諸条件の影響、無機マテリアル学会誌、Vol. 28 (2023) pp. 259-264
- 2) 奥主謙太郎、安東修一、鶴澤正美、活性化した廃コンクリート微粉のコンクリート混和材としての利用に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol. 47 No. 1 (2024) pp. 1482-1487

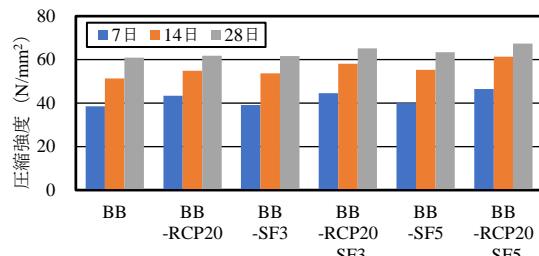


図-5 高炉セメントB種を用いたモルタルに対しRCPおよびSFを添加した場合の圧縮強度

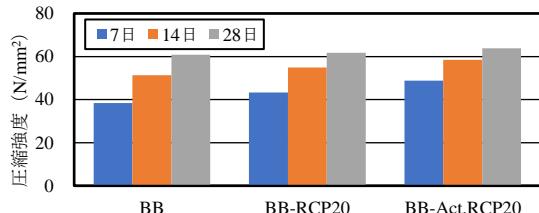


図-6 高炉セメントB種を用いたモルタルに対し活性化したRCPを添加した場合の圧縮強度

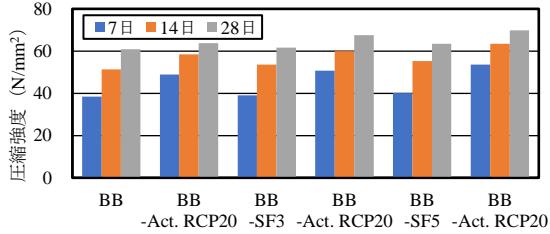


図-7 高炉セメントB種を用いたモルタルに対し活性化したRCPおよびSFを添加した場合の圧縮強度

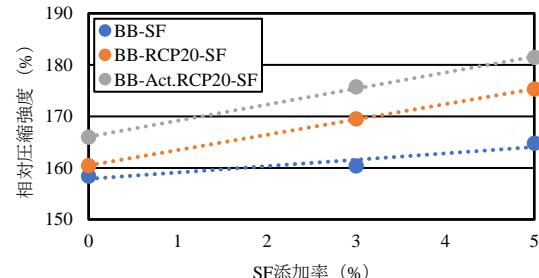


図-8 高炉セメントB種を用いたモルタルに活性化したRCPおよびSFを添加した場合の相対圧縮強度

ト工学年次論文集、Vol. 47 No. 1 (2024) pp. 1482-1487

- 3) 米澤敏男、坂井悦郎、鯉渕清、木之下光男、釜野博臣、エネルギー・CO<sub>2</sub>ミニマム(ECM)セメント・コンクリートシステム、コンクリート工学、Vol.48 No.9 (2010) pp.68-77
- 4) 蓮見孝志、池尾陽作、コンクリート塊から発生した微粉末を用いた高炉スラグーセッコウ系結合材の強度発現に及ぼす結合材の配合と養生温度の影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.70 No.1 (2016) pp.557-563