

## 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

日大生産工(院) ○石井謙太郎 日大生産工 鶴澤正美

### 1. はじめに

大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会から脱却し循環型社会に転換するため、我が国では2000年に制定された循環型社会形成推進法の<sup>1)</sup>に基づき、循環型社会形成推進基本計画を策定し資源の効率的・循環的な利用について種々の試みがされている。このような状況において産業廃棄物発生量の約1割を占めるコンクリート塊は年間3690万t<sup>2)</sup>排出されているが、再資源化および縮減化率は99.3%であり主に再生クラッシュランとしてほぼ全量がリサイクルされていることを鑑みると、廃棄物の有効利用の観点からは優れている。しかしこの利用方法は、今後新規の道路工事の減少により再生クラッシュランの需要は縮小、高度経済成長期に建設された構造物が耐用年数を終え解体されるものが増加することが予測されていることから<sup>3)</sup>、循環型社会の構築のためには廃コンクリートは骨材およびセメントとして新たにコンクリートに循環させる水平リサイクルが望ましいと考える。骨材のリサイクルについては再生骨材として2005年に日本産業規格に制定され現在まで改正がなされており準備は整っている。その一方で骨材のリサイクル時に発生する廃コンクリート微粉についてはセメントの試製<sup>4)</sup>や無機微粉末の代替<sup>5)</sup>として試みがなされているが大量使用法は未だ確立されていない。廃コンクリート微粉は、製造時に二酸化炭素を排出したセメントの硬化体であり、微粉からは一切の二酸化炭素を排出しないカルシウム資源である。この廃コンクリート微粉の利用方法の確立はカーボンニュートラル・リサイクルにも大きく貢献することができる技術でもある。

本研究の目的は、コンクリート廃材から加熱すりもみ法によって作製したセメント含有微粉、すなわち廃コンクリート微粉を有効活用することで一度コンクリートとして利用されたセメント分の再利用技術の確立をすることにある。

### 2. 試料の調整法

本研究では、加熱すりもみ法を模擬した装置で得られた廃コンクリート微粉(以下、RCPと略記)を使用した。加熱すりもみ法の詳細を図-1に示す。加熱すりもみ法は粗粉碎したコンクリート塊を電気炉で大気中300℃加熱を行う。これによりセメントペースト部のケイ酸カルシウム水和物が脱水し脆弱化することで骨材と微粉とに分級することができる方法である。この方式により得られた再生細骨材および再生粗骨材はHクラスであり、想定される用途として特に制限がないため天然骨材と同様に使用することができ

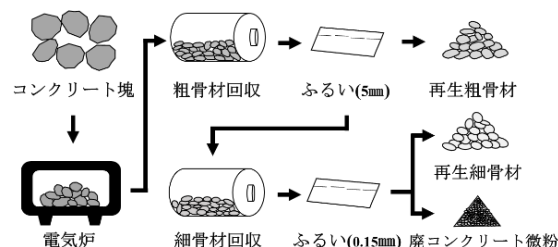


図-1 加熱すりもみ法のフロー図<sup>6)</sup>

る。本研究では、RCPを得る目的であるため骨材の回収は行っていない。すなわち普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの圧縮強度試験後の供試体廃材を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形は0.15mm以下のものを使用している。

### 3. 実験方法

#### 3.1 廃コンクリート微粉を添加したモルタルの圧縮強度増進性

##### (1) 概要

RCPをコンクリート混和材として使用した場合のモルタルの物性を確認するため、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添加し圧縮強度試験を実施した。

##### (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(C、密度3.16g/cm<sup>3</sup>)、高炉セメントB種(BB)、JIS標準砂(S：セメント協会強さ試験用)、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)および高性能減水剤(Sp、ポリカルボン酸系)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、石膏添加なし)を40%置換し使用した。配合は表-1に示す。以降、各配合の名称はsymbolの通りとする。水結合材比(W/B)は50%の1水準、廃コンクリート微粉添加率(RCP/B)は0、10、30および40%の4水準とした。なお、廃コンクリート微粉は結合材の質量比で添加し、結合材質量一定でJIS標準砂と置換した。

##### (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℃、相対湿度60%の室内で前置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。

### 3.2 活性化処理を行った廃コンクリート微粉添加モルタルの圧縮強度増進性状

#### (1) 概要

ボールミル混合により活性化された RCP を添加したモルタルの圧縮強度試験を実施し、活性化処理による圧縮強度増進性状の差異について検討した。

#### (2) ボールミル混合による活性化処理について

ボールミル混合とは、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、JIS 標準砂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使用し混合を行う活性化方法である。ボールミル混合による活性化処理では、セラミックスボール同士の衝突により混和材粒子が微粒子化される。それと同時に、メカノケミカル反応を生じさせ微粒子化された混和材の表面および、投入している JIS 標準砂の表面にケイ酸カルシウム水和物を担持させることを志向している。筆者ら研究チームは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>8)9)</sup>。これまでの研究成果としては、フライアッシュの最適活性化処理方法を固液比率、水量、砂量、セラミックスボールの材質、セラミックスボールの直径や個数の組み合わせ、混合時間および回転架台の回転数の7 項目を試行錯誤的に組み合わせ、最適化した上でボールミル混合によって起こる圧縮強度発現のメカニズムおよび水和特性の要因について明らかとした。この中で、フライアッシュの活性化がセメント中の Alite の水和反応を促進するという結果を得ているため、セメント含有微粉である RCP は活性化の可能性を有する。そこで、本研究では青木らの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<sup>9)</sup>から最適混合条件を参考にして実験を行った。円筒容器は広口試薬瓶(直径73mm、高さ168mm、内容量500ml の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%、JIS 標準砂45%とした。

#### (2) 使用材料および配合

使用材料は、前節 3.1(2)に加えて水酸化カルシウム飽和水溶液(関東化学社製、鹿一級試薬を溶解)を用いた。ボールミル混合における容器内の配合は表-2、混練時の配合は表-3 に示す通りである。ここで、表-3 における RCP-S とは表-2 の配合でボールミル混合した後の RCP スラリーである。水セメント比(W/C)は50%の1 水準、RCP 添加率(RCP/C)は0、20%の2 水準として、未処理の RCP を添加したモルタルは Untreated、RCP-S を添加したものは Treated と

表-1 RCP 添加モルタルの配合

| Symbol   | RCP/B<br>[mass%] | Components [g] |       |       |       |        |     |
|----------|------------------|----------------|-------|-------|-------|--------|-----|
|          |                  | W              | B     |       | RCP   | S      | Sp  |
|          |                  |                | C     | GBFS  |       |        |     |
| N        | -                | 225.0          | 450.0 | -     | -     | 1350.0 | -   |
| N-RCP10  | 10               | 224.0          |       |       | 45.0  | 1260.0 | 1.0 |
| N-RCP30  | 30               | 223.5          |       |       | 135.0 | 1215.0 | 1.5 |
| N-RCP40  | 40               | 223.0          |       |       | 180.0 | 1170.0 | 2.0 |
| BB       | -                | 225.0          | 270.0 | 180.0 | -     | 1350.0 | -   |
| BB-RCP10 | 10               | 224.0          |       |       | 45.0  | 1260.0 | 1.0 |
| BB-RCP30 | 30               | 223.5          |       |       | 135.0 | 1215.0 | 1.5 |
| BB-RCP40 | 40               | 223.0          |       |       | 180.0 | 1170.0 | 2.0 |

表-2 ボールミル混合における容器内の配合

| RCP/C<br>[mass%] | Components [g] |                              |      |      |
|------------------|----------------|------------------------------|------|------|
|                  | W              | sat. Ca(OH) <sub>2</sub> aq. | RCP  | S    |
| 20               | 56.7           | 45.0                         | 90.0 | 40.5 |

表-3 活性化した RCP を添加したモルタルの配合

| Symbol    | RCP/C<br>[mass%] | Components [g] |       |      |       |        |     |
|-----------|------------------|----------------|-------|------|-------|--------|-----|
|           |                  | W              | C     | RCP  | RCP-S | S      | Sp  |
| N         | -                | 225.0          | 450.0 | -    | -     | 1350.0 | -   |
| Untreated | 20               | 224.0          |       | 90.0 | -     | 1260.0 | 1.0 |
| Treated   |                  | 122.3          |       | -    | 232.2 | 1219.5 |     |

表記した。

#### (4) 供試体作製および圧縮強度試験

供試体の作製はJIS R 5201 を参考にして行った。RCP-S はスラリー状であるためボールミル混合後の広口試薬瓶を混練水で洗浄し供した。以降の実験手順は、前節 3.1(3)と同様である。

### 3.3 活性化処理を行った廃コンクリート微粉添加モルタルの耐海水性

#### (1) 概要

ボールミル混合により活性化された RCP を添加したモルタルの耐海水性試験を実施し、活性化処理による耐海水性の差異について検討した。

#### (2) 実験方法

供試体は圧縮強度試験と同様の配合のものをを用い、型枠はφ50×100mm の円柱型とした。供試体の耐海水試験は、JSCE-G572-2013 を参考にし、28 日間の水中共養生が終了した供試体の底面以外をエポキシ樹脂(コニシ株式会社、金属・コンクリート用ボンド E250)で覆い、硬化させた後に濃度10mass%の塩化ナトリウム水溶液(関東化学社製、特級試薬を溶解)に投じ、28 日間浸漬させた。その後、供試体を簡易軽量携帯型コンクリートカッターで乾式割裂を行い、断面に0.1mol/L の硝酸銀溶液(関東化学社製、鹿一級試薬を溶解)を噴霧する、硝酸銀噴霧法により塩分浸透深さを測定した。なお、塩分浸透深さは3 本ずつ計測を行い、その平均を測定値とした。

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 廃コンクリート微粉の性状

廃コンクリート微粉は加熱すりもみ法により一度硬化したコンクリートから得られているため、セメントの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求めた結果、セメント量が 40.3mass% 残存していることを確認した。また、XRD において炭酸カルシウムおよび水酸化カルシウムのピークは検出されたが、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非晶質の形態で残存していると推定している。XRF により測定した主要組成を表-4 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 による質量減少量から水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウム量を定量した。その結果より、酸化カルシウムに換算すると水酸化カルシウム由来は 6.4mass%、炭酸カルシウム由来は 17.9mass% であったことから酸化カルシウム分は合計で 24.3mass% と計算された。表-4 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以外の酸化カルシウム分、すなわち 26.1mass% は非晶質化したセメント分であると推定することができる。

### 4.2 廃コンクリート微粉を添加したモルタルの圧縮強度増進性

普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに RCP を 10%、30% および 40% 添加した場合の材齢における圧縮強度を図-2 に示す。RCP 添加率と圧縮強度増進性状に相関関係はなく、RCP を添加したものはセメントの水和反応を阻害し材齢 28 日における N の圧縮強度の約 9 割まで低下した。

続いて、高炉セメント B 種を用いたモルタルに RCP を 10%、30% および 40% 添加した場合の材齢における圧縮強度試験結果を図-3 に示す。高炉セメント B 種の場合も RCP 添加率と圧縮強度増進性状に相関関係は見られなかったが、材齢 28 日においても BB と比較し BB-RCP40 は 5% の圧縮強度増進があり、セメントの水和反応を阻害することはなかった。以上の検討から RCP をコンクリート混和材として添加する場合には、高炉スラグ微粉末と供することで圧縮強度増進となることが判明した。この理由として、高アルカリ雰囲気により RCP 中の非晶質セメント分が活性化されたことも一因ではないかと考える。既往研究より、高炉スラグ微粉末はセメントの水和反応を促進させること<sup>10)</sup>、初期材齢においてのモルタル中の高アルカリ雰囲気はセメント中の Alite の水和反応率の向上に寄与すること<sup>11)</sup> が明らかとされている。したがって、高炉セメント B 種を用いたモルタルに RCP を添加した場合は、結合材であるセメント中の Alite の水和反応が促進されたことにより細孔溶液中が高アルカリ雰囲気となり RCP の非晶質セメントの水和反応率が向上したと推察する。

表-4 XRF 結果

| Chemical Composition | CaO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Others |
|----------------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|
| Content rate [%]     | 50.48 | 17.54            | 3.96                           | 2.51                           | 25.51  |

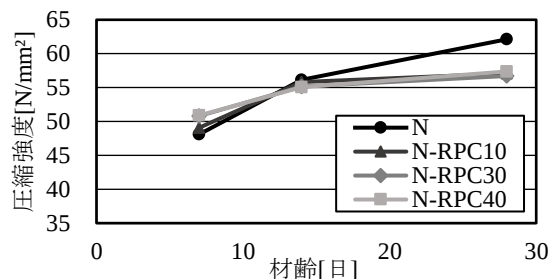


図-2 RCP 添加モルタルの圧縮強度 (N)

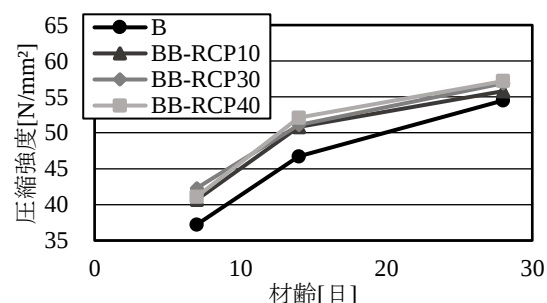


図-3 RCP 添加モルタルの圧縮強度 (BB)

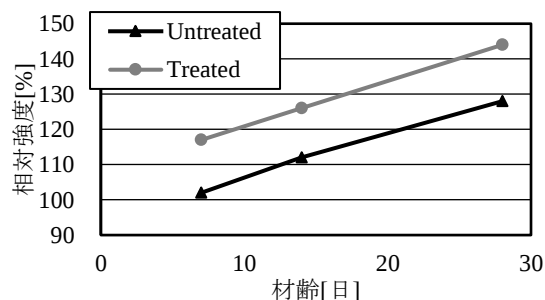


図-4 活性化 RCP 添加モルタルの圧縮強度

### 4.3 活性化処理を行った廃コンクリート微粉添加モルタルの圧縮強度

活性化された RCP を 20% 添加したモルタルの圧縮強度試験結果を図-4 に示す。なお、図-4 は RCP 無添加の N の材齢 7 日の圧縮強度を基準として相対強度(%)で示したものである。Treated は Untreated と比較して材齢 7 日で有意な圧縮強度増進を確認した。これは、ボールミル混合時に RCP 中の非晶質化したセメントの水和反応が促進され、初期材齢からケイ酸カルシウム水和物が生成されたことにより生じたと考える。前節 4.2 において、既報より初期材齢の高アルカリ雰囲気はその後の Alite の水和率の向上に寄与することが明らかとされていると述べた。本研究で行った活性化処理では RCP、水酸化カルシウム飽和水溶液、上水道水および JIS 標準砂を広口試験瓶に投入しボールミル混合を行っている。そのため、高アルカリ雰囲気下でのメカノケミカル反応により RCP 中の非晶質セメントの水

和反応が促進され、圧縮強度が増進したと考える。

#### 4.4 活性化処理を行った廃コンクリート微粉添加モルタルの耐海水性

活性化された RCP を 20% 添加したモルタルの塩分浸透深さを図-5 に示す。塩分浸透深さは N が 9.0mm のところ Untreated および Treated は 7.0mm, 6.8mm であり RCP の添加により耐海水性は向上したが活性化処理による有意な差は認められなかった。これは、RCP の添加により塩化物イオンの固定化能力が向上したためであると推察する。既往の研究より、普通ポルトランドセメントを使用した場合には、塩素の固定化能力が低いと自由塩化物イオンが濃度勾配により内部へ浸透する。一方、高炉スラグ微粉末などアルミを含有する混和材を使用した場合には、アルミにより塩化物イオンがフリーデル氏塩等の水和物に取り込まれ固相塩素となることで耐海水性が向上する<sup>12)</sup>と報告されている。本研究に供した RCP には表-4 よりアルミを含有していることを確認している。そのため、活性化処理の有無にかかわらず耐海水性が向上したことは RCP 中のアルミが塩化物イオンをフリーデル氏塩として固定化したためだと推察されるが今後更なる実験と詳細な分析が必要である。

#### 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 RCP を添加した場合は、RCP がセメントの水和反応を阻害し圧縮強度が低下する。
- 2) 高炉セメント B 種を用いたモルタルに廃コンクリート微粉を添加した場合は、測定した全材齢において圧縮強度が増進した。これは、高炉スラグの高アルカリ雰囲気により RCP 中の非晶質 Alite が活性化されたためだと推察される。
- 3) ボールミル混合により活性化した RCP をモルタルに添加することで普通ポルトランドセメントを用いた場合においても、無添加のモルタルと同等の圧縮強度が得られる。
- 4) RCP を添加したモルタルでは、RCP 中のアルミにより塩化物イオンがフリーデル氏塩として固定化されることで耐海水性が向上する。
- 5) 廃コンクリート微粉は高炉セメント B 種との利用および普通ポルトランドセメント使用時においてもボールミル混合により活性化処理することでコンクリート混和材としての利用が可能であると示された。

#### 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。

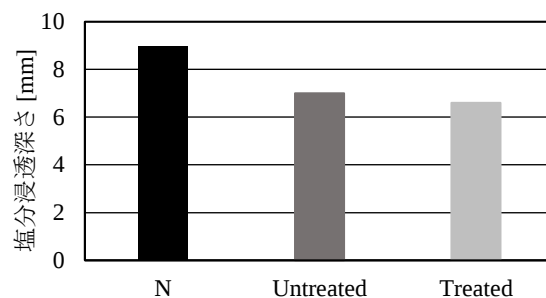


図-5 活性化 RCP を添加したモルタルの塩分浸透深さ

#### 参考文献

- 1) 環境省, 第五次循環型社会形成推進基本計画, (2024) <https://www.env.go.jp/content/000243000.pdf> (参照 2024-10-16)
- 2) 国土交通省, 平成 30 年度建設副産物実態調査結果, (2020) <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001334705.pdf> (参照 2024-10-16)
- 3) 渋谷和俊, 小川秀夫, 三本木満, 鈴木健介, 再生路盤材の需要バランスの予測, 土木学会第 63 回年次学術講演会, (2008) pp. 131-132.
- 4) 小嶋芳行, 安江任, 荒井康夫: コンクリート廃材から再生セメントの試製, 石膏と石灰, Vol.1993, No.244, (1993) pp.153-163.
- 5) 黒田泰弘, 片山行雄: 廃コンクリート微粉末混合セメントを用いたモルタル・コンクリートの研究, セメント・コンクリート論文集, No.64, (2010) pp.537-544.
- 6) 島裕和, 鴻巣一巳, 橋本光一, 古賀康男: 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技術の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, (2000) pp. 1093-1098.
- 7) 横山滋, 藤本泉, 高野豊: 硬化コンクリートの配合推定方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, (1992) pp.661-666.
- 8) 青木康平, 鶴澤正美: 高活性化フライアッシュ含有モルタルの圧縮強度特性とその増進メカニズムの解明, 無機マテリアル学会誌, Vol.29, (2022) pp.132-139.
- 9) 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, (2021) pp.259-264.
- 10) 佐川孝広, 門間英悟: 高炉スラグ高含有セメントの水和反応と空隙構造特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, (2018) pp.195-200.
- 11) Sandrine Garraut and Andre Nonat, Hydrated Layer Formation on Tricalcium and Dicalcium Silicate Surfaces: Experimental Study and Numerical Simulations, Langmuir, Vol. 17, (2001) pp. 8131-8138.
- 12) 松崎晋一朗, 豊村恵理, 伊代田岳史: 高炉セメントの塩化物イオン固定化特性に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, (2011) pp.797-802.