

# コンクリートスラッジを有効活用した環境配慮型 TSC に関する研究

内藤 雄也<sup>\*1</sup>, 白石 真由奈<sup>\*2</sup>, 伊代田 岳史<sup>\*3</sup>

## A Study of Environmentally Friendly TSCs that Makes Effective Use of Concrete Sludge

Yuya NAITO<sup>\*1</sup>, Mayuna SHIRAIISHI<sup>\*2</sup> and Takeshi IYODA<sup>\*3</sup>

**要旨：** 戻りコンから発生するコンクリートスラッジは、現状として生コンへの有効活用が困難であり、廃棄物として処分されている。本研究では特殊コンクリートである Two Stage Concrete (TSC) にスラッジを使用することで有効活用を目指した。その結果、スラッジをグラウト材に結合材置換して使用することで、適切なフレッシュ性状を確保することができた。また、建設廃材や戻りコン由来の材料を TSC の粗骨材として使用することを検討した。作製したスラッジ活用型グラウト材と粗骨材で TSC を作製し、強度・環境面から環境配慮型 TSC の評価を行った。

**キーワード：** コンクリートスラッジ, グラウト材, TSC, 有効活用, 環境配慮型材料

### 1. はじめに

型枠に粗骨材を敷き詰め、グラウト材で骨材間を充填することでコンクリートとする特殊な工法を Two Stage Concrete (以下 TSC) と呼ぶ。TSC はグラウト材のプレミックス化による材料運搬の容易化や粗骨材の現地調達により、従来の工法によるアジテータ車を用いた資材運搬が困難な場所でもコンクリートが作製できる。プレパックドコンクリートも TSC に分類されるが、施工時に注入管を用いて下からモルタルを注入するコンクリートである。しかし、本研究では注入管を用いずにグラウト材を流し込んだため、プレパックドコンクリートではなく TSC と表記した。既往の研究により、TSC を実現するためのグラウト材のフレッシュ性状は、流動性かつ粘性が必要であること<sup>1)</sup>、TSC の強度は粗骨材の種類に依存せず、遷移帯の影響が大きいこと<sup>2)</sup>が示された。

一方で、生コン工場から発生するコンクリートスラッジ (以下スラッジ) の発生量は、全国のコンクリート総生産量の約 1% 程度であり、年間で約 100 万 m<sup>3</sup> となっている。スラッジ水から微粒分を取り除いた上澄み水は練混ぜ水として使用することができるが、スラッジのほとんどは、脱水し固形状のスラッジケーキにしたのち、産業廃棄物として処分される。スラッジケーキの処分は環境に負荷がかかり、また処分場は未来永劫確保されているものではないため、早急なスラッジの有効活用が重要となっている。



図-1 模擬スラッジケーキ (写真)

さらに、世界的にカーボンニュートラル (CN) を目指す取り組みが進められる中、高炉スラグ微粉末 (GGBS) 等の混和材を大量に使用するなど CN を目指したコンクリートの開発が進められている。

以上のことから、本研究ではスラッジを有効活用し、GGBS を使用したグラウト材の作製を検討した。また、TSC の粗骨材は環境負荷低減のために再生砕石と、さらにスラッジケーキと戻りコンクリート (以下戻りコン) を混合して作製した砕石をそれぞれ用いて環境配慮型 TSC の実現を目指した。

### 2. スラッジを使用したグラウト材

#### 2.1 使用材料および配合

本研究では、スラッジケーキの硬化を抑制するため、安定剤を使用した模擬スラッジケーキ (図-1) を作製した。セメント種類は 普通ポルトランドセメ

\*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科社会基盤学専攻 修士課程

\*2 オリエンタル白石 (株) 技術本部技術研究所 研究員

\*3 芝浦工業大学工学部 教授 土木工学課程担当

表-1 グラウト材配合

|       | W/B<br>(%) | Water<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Cement<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Sand<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Sludge<br>(Sand×%) | ASK<br>(B×%) | SP<br>(B×%) | CSA<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------|------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------|-------------|-----------------------------|
| Case1 | 55         | 443                           | 786                            | 806                          | 0                  | 0.25         | 1.0         | 20                          |
|       |            |                               |                                | 725.4                        | 10                 |              |             |                             |
|       |            |                               |                                | 644.8                        | 20                 |              |             |                             |
|       |            |                               |                                | 564.2                        | 30                 |              |             |                             |
|       | W/B<br>(%) | Water<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Cement<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Sand<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Sludge<br>(Sand×%) | ASK<br>(B×%) | SP<br>(P×%) | CSA<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| Case2 | 55         | 443                           | 786                            | 725.4                        | 10                 | 0.25         | 1.5         | 20                          |
|       |            |                               |                                | 644.8                        | 20                 |              |             |                             |
|       |            |                               |                                | 564.2                        | 30                 |              |             |                             |
|       |            |                               |                                |                              |                    |              |             |                             |
|       | W/P<br>(%) | Water<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Cement<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Sand<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Sludge<br>(B×%)    | ASK<br>(B×%) | SP<br>(P×%) | CSA<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| Case3 | 55         | 443                           | 786                            | 806                          | 0                  | 0.25         | 1.0         | 20                          |
|       |            |                               | 707.4                          |                              | 10                 |              |             |                             |
|       |            |                               | 628.8                          |                              | 20                 |              |             |                             |
|       |            |                               | 550.2                          |                              | 30                 |              |             |                             |

Cement : OPC, BB, BC の 3 種類をそれぞれ使用 B : Cement+CSA, P : B+sludge

ント (OPC) に加え、環境負荷低減を目的として OPC と GGBS を混合したセメント (BB, BC) をそれぞれ使用した。また、グラウト材の流動性を向上させるため、高性能減水剤 (SP) を使用し、材料分離抵抗性を向上させるために粉末増粘剤 (ASK) を使用し、既往の研究<sup>3)</sup>より、グラウト材に膨張材を添加することで、骨材界面の空隙を緻密化することが分かっているため、膨張材 (CSA) を使用した。

グラウト材の配合を表-1 に示す。また、使用した結合材・細骨材の物性を表-2 に示す。本研究では、3 つの Case ごとにグラウト材料を作製した。Case1 は、模擬スラッジケーキを細骨材置換した。Case2 も同様に細骨材置換しているが、SP の添加量を増加した。この時、スラッジを使用していないグラウト材のフレッシュ試験は実施しなかった。Case3 は、模擬スラッジケーキを結合材置換した。既往の研究<sup>1)</sup>より、W/(B or P)=55%とした。ここで、P はセメント、CSA、模擬スラッジケーキの総和とする。模擬スラッジケーキには少量の水分が含まれているため、含水率を測定し単位水量を調整した。

## 2.2 試験項目

本研究では、既往の研究<sup>1)</sup>に基づいて、作製したグラウト材の流動性と粘性の確認のために、JP 漏斗試験とミニスランプフロー試験を行った。グラウト材のフレッシュ試験フローを図-2 に示す。

JP 漏斗試験について、本研究では、グラウト材が漏斗内に留まった場合は不適切なグラウト材と判断した。

表-2 使用した結合材・細骨材の物性一覧

| 種類  |                                                                            | 品質                                                                                             |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 結合材 | OPC                                                                        |                                                                                                |
|     | 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup><br>比表面積 : 3200 cm <sup>2</sup> /g              |                                                                                                |
|     | 試製BB<br>GGBS置換率<br>50%                                                     | OPC                                                                                            |
|     |                                                                            | 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup><br>比表面積 : 3200 cm <sup>2</sup> /g                                  |
|     | 製品BC<br>GGBS置換率<br>約65%                                                    | GGBS                                                                                           |
|     |                                                                            | 密度 : 2.91 g/cm <sup>3</sup><br>比表面積 : 4060 cm <sup>2</sup> /g<br>石こう添加 : 有                     |
|     | 密度 : 2.97 g/cm <sup>3</sup><br>比表面積 : 3920 cm <sup>2</sup> /g<br>石こう添加 : 有 |                                                                                                |
| 細骨材 | 山砂                                                                         | 最大粒径 : 1.2 mm<br>表乾密度 : 2.59 g/cm <sup>3</sup><br>絶乾密度 : 2.53 g/cm <sup>3</sup><br>吸水率 : 2.33% |

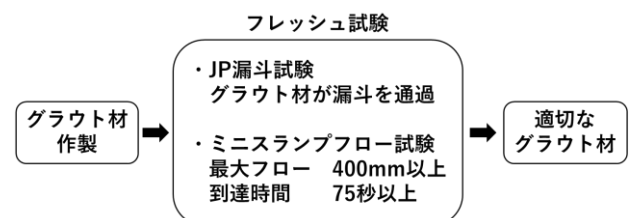


図-2 グラウト材フレッシュ試験フロー

ミニスランプフロー試験について、JIS A 1171 に準拠し、グラウト材の最大フロー値と最大フロー値に到達する時間を計測した。また、既往の研究<sup>1)</sup>より最大フロー値が 400mm 以上、最大フロー値に到

達する時間が 75 秒以上であるものを適切なグラウト材と判断した。

## 2.3 フレッシュ試験結果および考察

グラウト材のフレッシュ試験結果を図-3、図-4、図-5 にそれぞれ示す。ここで、スラッジを使用していないグラウト材は全てのセメント種類の場合でも適切なフレッシュ性状であることが確認された。

図-3 より、スラッジを細骨材置換することにより、JP 漏斗試験ではグラウト材の残留が確認され、ミニスランブフロー試験では最大フローが低下し、不適切なグラウト材となるものが多く確認された。フレッシュ試験結果から、グラウト材の粘度が高くなり、流動性が低下していることが確認された。

図-4 より、SP の添加量を増加させることにより、ミニスランブフロー試験での最大フローが大きくなり、Case1 よりも流動性が向上したことが確認された。しかし、スラッジの置換率が高くなるにつれ、流動性が低下していることが確認された。これは、スラッジを細骨材置換することによって微粒分が増加し、グラウト材の流動性が低下したためであると考えられる。

図-5 より、スラッジを結合材置換した場合、スラッジの置換率の違いによる最大フローや到達時間の変化は小さくなり、全ての配合で適切なグラウト材と判断することができた。これは、結合材置換の場合、スラッジの置換率によるグラウト材の全体の粒度分布の変動が小さいためであると考えられる。以上のことから、スラッジを結合材置換することによって、スラッジを有効活用することができ、環境に配慮したグラウト材として使用することができると考えられる。

## 3. 環境配慮型 TSC の作製

### 3.1 使用材料および配合

2 章において、適切なフレッシュ性状を有するグラウト材と判定された配合のうち、BB および BC に対しスラッジを 20% 結合材置換したグラウト材 (BB20C, BC20C) を用いた環境配慮型 TSC の物性を評価した。

TSC に使用する粗骨材は、建設廃材由来の再生砕石 (RC40) とスラッジケーキと戻りコンを混合させることによって作製した再生砕石 (SRC40) を使用した。SRC40 の製造工程を図-6 に示す。また、使用した粗骨材 (プレウエッティング後) を図-7 に示す。

グラウト材の充填性を向上させるために、粗骨材径 10mm から 40mm のみを使用した。図-8 に使用した粗骨材の粒度分布を示す。また、表-3 にそれぞれの砕石の物理的性能を示す。SRC40 は RC40 と比

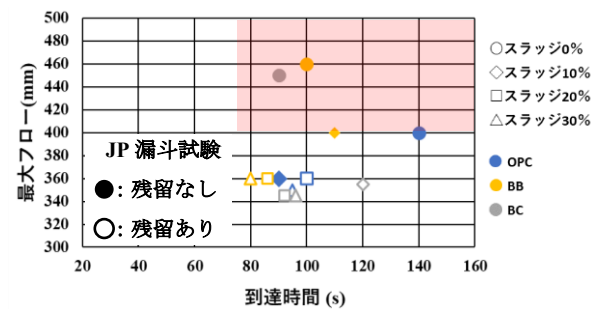


図-3 フレッシュ試験結果 (Case1)

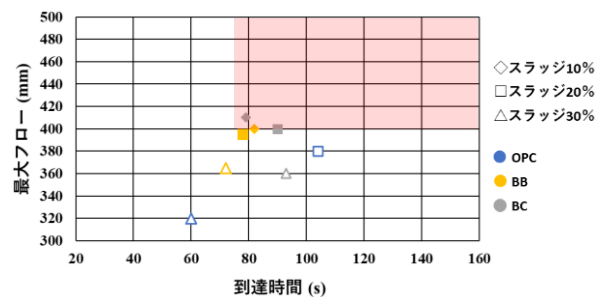


図-4 フレッシュ試験結果 (Case2)

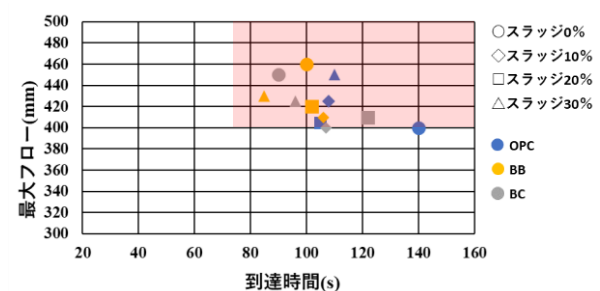


図-5 フレッシュ試験結果 (Case3)

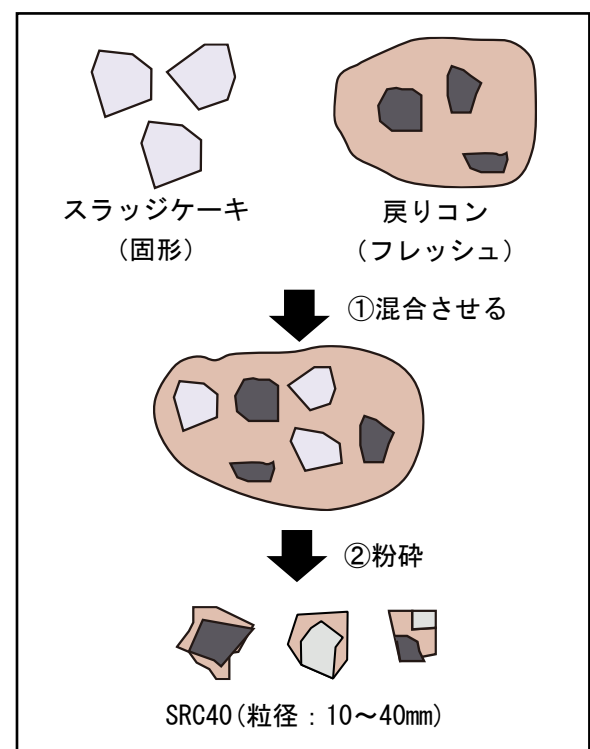


図-6 SRC40 の製造工程

較すると、密度が小さく吸水率や空隙率が高いことが確認された。本研究で作製した TSC の使用材料を表-4 に示す。

### 3.2 粗骨材のプレウェットニング

気乾状態の RC40 を使用した TSC は豆板や気泡の残留が確認された (図-9 左)。これは、吸水率の高い RC40 がグラウト材の水を吸収することによりグラウト材の流動性が低下したと考えられる。よって、RC40 をプレウェットニングした。プレウェットニングの方法は、粗骨材を 48 時間飽水させ、ウェスで粗骨材を拭いて表乾にした状態で TSC の粗骨材として使用した。プレウェットした粗骨材で TSC を作製すると、豆板や気泡の残留が改善された (図-9 右)。よって、本研究において、SRC40 も吸収率が高いことから、RC40 と同様にプレウェットニングを行った後に TSC の粗骨材として使用した。

### 3.3 試験概要

図-10 に TSC の作製から試験までのフローを示す。200×300×300mm の型枠を作製し、プレウェットニングした粗骨材を型枠に敷き詰めた。その後、グラウト材を上から流し込んだ。この時、型枠の隅 1 点からグラウト材を充填させた。充填後は締め等を実施しなかった。

材齢 3 日の試験体から  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱コアを採取した。コア採取後、28 日間標準水中養生し、JIS A1108 に準拠して圧縮強度試験を実施した。また、別の円柱コアを用いて高さ 50mm 程度のサイズに切断した供試体を作製し、アルキメデス法による空隙率試験を行った。

### 3.4 試験結果

#### (1) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-11 に示す。既往の研究より、モルタルにおいて、スラッジを結合材置換すると曲げ・圧縮強度が共に低下する傾向があった<sup>4)</sup>。しかし、本研究では RC40 を使用した TSC はセメントの種類やスラッジの有無に関わらず一定の圧縮強度になることが確認された。TSC の強度はグラウト材の強度に依存せず、流動性と粘性を確保した適切なフレッシュ性状であれば TSC の強度を確保できるからであると考えられる。よって、グラウト材のスラッジの置換率を変えて TSC を作製した場合においても同等の圧縮強度になることが期待される。

また、SRC40 を使用した TSC において、RC40 と比較すると圧縮強度の低下が確認された。TSC の圧縮強度は粗骨材の種類に依存せず、先ほどの結果から、スラッジを使用したグラウト材を使用した場合も TSC の圧縮強度に影響がない。以上を踏まえ、圧縮強度が低下した理由は、SRC40 にはスラッジが含

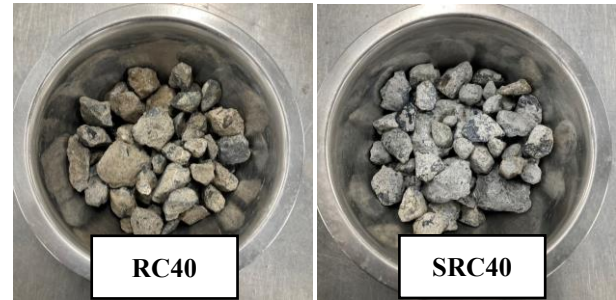


図-7 使用した粗骨材

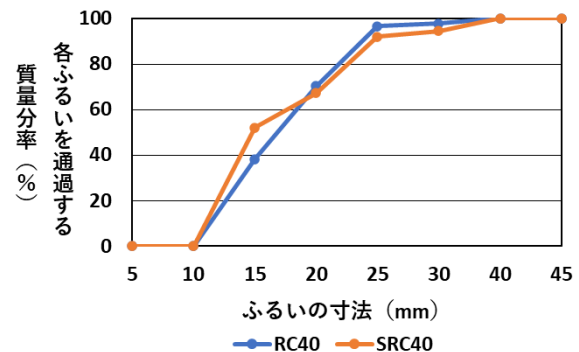


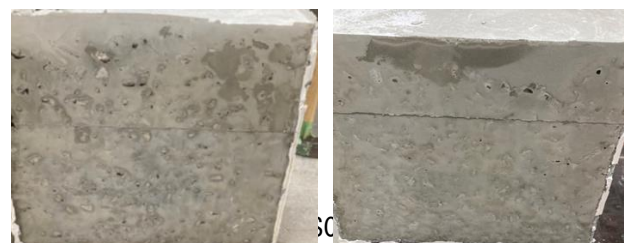
図-8 使用した粗骨材の粒度分布

表-3 使用した粗骨材の物理的性能

| 骨材種類  | 表乾密度<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 絶乾密度<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 吸水率<br>(%) | 空隙率<br>(%) |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------|------------|
| RC40  | 2.41                               | 2.26                               | 6.51       | 14.7       |
| SRC40 | 2.13                               | 1.95                               | 9.25       | 18.1       |

表-4 TSC 作製時に使用した材料

| 配合名         | グラウト材  |               | 粗骨材   |
|-------------|--------|---------------|-------|
|             | セメント種類 | スラッジ置換率 (%)   |       |
| BB-RC40     | BB     | 0             | RC40  |
| BC-RC40     | BC     |               |       |
| BB20C-RC40  | BB     |               |       |
| BC20C-RC40  | BC     | 20<br>(結合材置換) | SRC40 |
| BB20C-SRC40 | BB     |               |       |
| BC20C-SRC40 | BC     |               |       |



(左: プレウェットニングなし 右: あり)

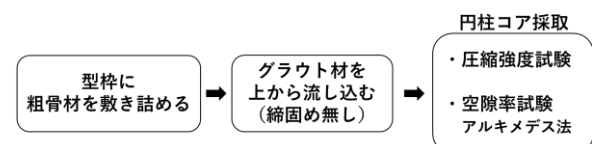


図-10 TSC の作製から試験までのフロー

まれているため、粗骨材とグラウト材との付着強度が低下したのではないかと考えられる。また、SRC40は硬化後すぐに破碎処理を施したため、原骨材との付着強度が RC40 よりも劣り、SRC40 を使用した TSC の圧縮強度が低下したと考えられる。

## (2) 空隙率試験結果

空隙率試験結果を図-12 に示す。RC40 を使用した TSC に着目すると、スラッジを使用したグラウト材で TSC を作製すると空隙率が高くなることが確認された。これは、グラウト材にスラッジを使用することによって、硬化後のグラウト材の空隙率が高くなるからであると考えられる。しかし、図-11 および図-12 より TSC の空隙率による圧縮強度の変化は確認されなかった。よって、硬化後のグラウト材の空隙率による TSC の圧縮強度は影響されないと考えられる。

また、SRC40 を使用した TSC は RC40 と同様に空隙率が高いことが確認された。同様の空隙率にもかかわらず、図-11 より TSC の圧縮強度が変化したことから、粗骨材とグラウト材の付着強度が RC40 と比べて SRC40 は低かったと考えられる。

## 4. 環境配慮型 TSC の評価

本研究で作製した TSC の環境性を評価するために、土木学会のインベントリデータ<sup>5)</sup>を元にコンクリート 1m<sup>3</sup>あたりの CO<sub>2</sub> 排出量と副産物の使用量を算出した。また、比較として普通コンクリート（セメント種 BB）も同様に算出した。

図-13 にコンクリート 1m<sup>3</sup>あたりの CO<sub>2</sub> 排出量を示す。本研究で作製した TSC はスラッジや再生砕石を使用することによって CO<sub>2</sub> 排出量を削減することができた。

また、図-14 にコンクリート 1m<sup>3</sup>あたりの副産物の使用量を示す。本研究では副産物として GGBS、スラッジ、再生砕石が挙げられる。普通コンクリートは、一般にスラッジや再生骨材を使用しないため、わずかな量の副産物が使用されているが、環境配慮型 TSC の場合は、大量に副産物を使用できることが確認できた。CO<sub>2</sub> 排出量のみならず、再資源化の観点からも TSC は優れていると考える。

さらに、本研究で作製した TSC の 1m<sup>3</sup>あたりの使用材料量と再資源化率を表-5 に示す。ここで、本研究における再資源となる材料は GGBS・スラッジ・RC40 とした。表-5 より、TSC の再資源化率は 57.7% であり、使用材料量の半分以上が再資源化できた。

しかし、GGBS を使用しない場合、セメント量が TSC1m<sup>3</sup>あたり 520kg 程度となることが確認された。

これに関しては GGBS を使用し、スラッジを有効

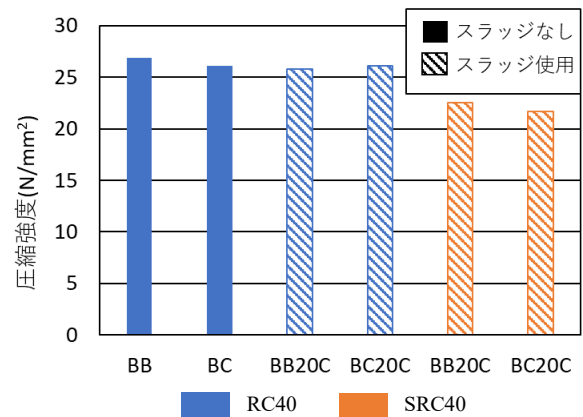


図-11 TSC 圧縮強度試験結果

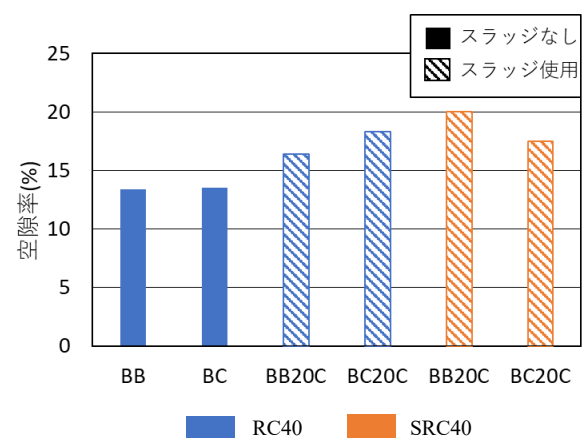


図-12 TSC 空隙率試験結果

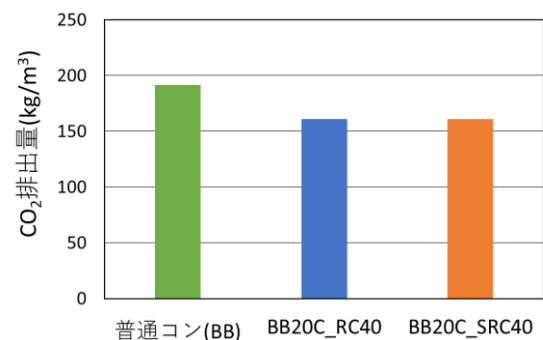


図-13 コンクリート 1m<sup>3</sup>あたりの CO<sub>2</sub> 排出量

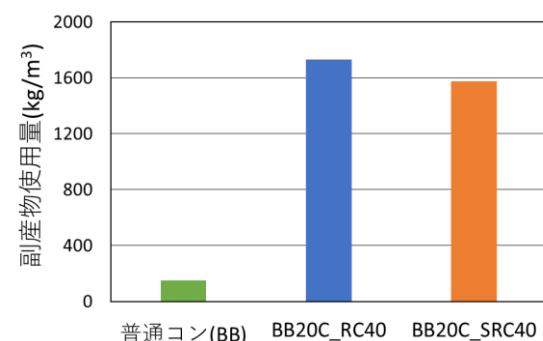


図-14 コンクリート 1m<sup>3</sup>あたりの副産物使用量

表-5 TSC1m<sup>3</sup>あたりの使用材料量と再資源化率

| TSC配合名     | TSC1m <sup>3</sup> あたりの使用材料量 (kg) |        |            |      |            |             |      | 再資源化率<br>(%) |
|------------|-----------------------------------|--------|------------|------|------------|-------------|------|--------------|
|            | Water                             | Cement | GGBS       | Sand | Sludge     | RC40        | 合計   |              |
| BB20C_RC40 | 358                               | 260    | <b>260</b> | 650  | <b>130</b> | <b>1338</b> | 2996 | <b>57.7</b>  |

再資源となる材料：GGBS・Sludge・RC40

活用することでセメントの使用量を大幅に削減できると考えられる。

今後は再生細骨材を使用したグラウト材や、粗骨材を炭酸化して TSC に使用することによって、より廃材の再利用や CN に大きく貢献できる TSC を作製できると考えられる。

また、練混ぜ水はスラッジ水や上澄み水の使用を検討したい。スラッジ水は、生コン工場のみならず、現場で発生する洗い水からも発生すると考えられる。洗い水を TSC の練混ぜ水として再利用することで、さらに環境に配慮した TSC を作製することができると考えられる。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) スラッジを使用したグラウト材について、スラッジを細骨材置換するとグラウト材の流動性が低下したが、結合材置換することにより、TSC のための適切なフレッシュ性状をもつグラウト材を作製することが可能であることが確認された。
- (2) スラッジの有効活用のために、スラッジケーキと戻りコンを混合させることによって再生碎石を作製することができた。
- (3) 吸水率の高い粗骨材を TSC として使用する場合、プレウェットングすることで TSC の外観が改善されることが確認できた。
- (4) 環境配慮型 TSC を作製したところ、RC40 を使用することでスラッジを使用していないグラウト材と同等の圧縮強度を確保することができた。

- (5) SRC40 を TSC の粗骨材として使用すると、粗骨材に含まれるスラッジの影響によって粗骨材とグラウト材の付着強度が低くなり、TSC の強度が低下した可能性が示唆された。
- (6) CO<sub>2</sub>排出量の削減や廃棄物を大量に使用することができ、また再資源化率の高い環境に配慮した TSC を作製することができた。
- (7) TSC を作製する際、結合材の使用量が多いが、GGBS を使用し、またスラッジを有効活用することでセメントの使用量を大幅に削減できることが確認された。

## 参考文献

- 1) 野口優理香, 興水理咲, 伊代田岳史：環境配慮型 TSC の検討~環境負荷を低減したグラウト材の開発に向けて~, 第 77 回セメント技術大会, pp.286-287, 2023
- 2) 澁谷亜香里, 大塚朝陽, 伊代田岳史：再生碎石や廃棄鉄道用バラストを活用したプレパックドコンクリートの検討, 第 73 回セメント技術大会, pp.52-53, 2019
- 3) 名古屋智樹, 伊代田岳史：従来のコンクリートと同程度の強度や耐久性を有する Two Stage Concrete の実現に向けた一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp989-994, 2021
- 4) 貫井光男, 川島靖, 西堀英治：建設廃材の生コンスラッジの有効利用に関する研究, 第 19 回廃棄物学会研究発表会, 2008
- 5) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.62, コンクリートの環境負荷評価(その 2), pp.39, 2004