

# 論文 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

名古屋 智樹\*1・伊代田 岳史\*2

**要旨：**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 Two Stage Concrete（以下 TSC）は現地で容易に採取できる粗骨材を用いることで作製できる。しかし粗骨材を大量に利用することで、その品質に大きく影響を受ける可能性があると考えられる。そこで本研究は様々な粗骨材を用いた TSC の検討を目的とし、粗骨材が TSC に与える影響を確認したところ、その種類に依存せず圧縮強度や耐久性は同程度だが、普通コンクリートに比べ低い結果となった。そこで TSC の強度と耐久性を改善のため粗骨材界面の空隙の改質に着目し、C-S-H 系硬化促進剤や各種膨張材を用いたところ、生石灰系膨張材を用いることで強度と耐久性が改善した。

**キーワード：**TSC, 粗骨材, 圧縮強度, 粗骨材界面, C-S-H 系硬化促進剤, 膨張材, 透気係数, 空隙

## 1. はじめに

プレパックドコンクリートは 1967 年にコンクリート標準示方書に制定され、型枠に敷き詰めた粗骨材にセメント、細骨材、フライアッシュ、アルミニウム粉末で構成される注入モルタルを注入し骨材間を充填する特殊な工法のコンクリートである。その施工の特性から形状が複雑で従来のコンクリートでは施工が難しい箇所や水中コンクリート工事等で使用されたが、所定の材料を使用しなければならないことや日本中でレディーミクストコンクリートが普及したことから現在ではあまり使用されていない。

一方近年断面修復工事や耐震補強工事の需要が高まり、無収縮のグラウト材の材料開発が行われ、Two Stage Concrete（以下 TSC）が実現した。TSC とは事前に粗骨材を型枠に敷き詰め、骨材間をグラウト材で充填する様々なコンクリートの総称で、それぞれの TSC の名称はその施工方法が反映されている<sup>2)</sup>。プレパックドコンクリートも TSC に分類されるが、プレパックドコンクリートは注入用モルタルが膨張性を有すること、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ため、本研究では充填モルタルを用いた TSC を対象とした。TSC の打込み手順は図-1 に示すように型枠に粗骨材を敷き詰め、その後グラウト材を流し込み骨材間を充填する。本研究で用いるグラウト材はセメントと細骨材のプレミックス材を水と攪拌し作製した。

ここで TSC に用いるプレミックス材は袋で運搬でき、粗骨材を敷き詰めてグラウト材を流し込むだけで打込み可能であるため、現地にある粗骨材を利用できれば普通コンクリートを運搬できないような場所でも TSC が使

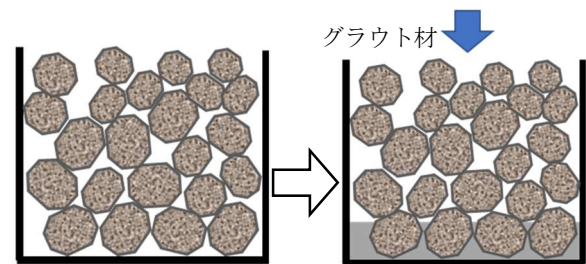


図-1 TSC の打込み手順

表-1 配合概要およびフレッシュ性状

| 種類  | 使用骨材  | W/B (%) | 単位水量 (kg/cm <sup>3</sup> ) | フレッシュ性状   |         |                |
|-----|-------|---------|----------------------------|-----------|---------|----------------|
|     |       |         |                            | スランプ (cm) | 空気量 (%) | グラウト材のフロー (mm) |
| 普通  | C-40  | 45      | 170                        | 10.5      | 2.5     | -              |
|     | RC-40 |         |                            | 13.5      | 3.8     | -              |
|     | バラスト  |         |                            | 15.5      | 3.4     | -              |
| TSC | C-40  | 45      | -                          | -         | -       | 310            |
|     | RC-40 |         | -                          | -         | -       | 310            |
|     | バラスト  |         | -                          | -         | -       | 307            |

用可能になると考える。

そこで本研究では様々な粗骨材を使用した TSC の検討を目的とし、現地調達が可能であると考えられる粒径が大きな粗骨材として砕石、解体コンクリートガラから製造される再生砕石、鉄道の廃棄バラストを用いて粗骨材が TSC に与える影響を確認するとともに、TSC と従来のコンクリートのどちらが粗骨材の影響を受けやすいかを比較した。また TSC の強度および耐久性を改善するために C-S-H 系硬化促進剤や各種膨張材を用いてその効果を確認した。

\*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻(学生会員)

\*2 芝浦工業大学 工学部先進国際課程(兼務 土木工学科) 教授 博士(工学) (正会員)

## 2. 粗骨材の種類がTSCに与える影響の検討

### 2.1 供試体概要

本検討に用いたコンクリートの配合概要を表-1に示す。TSCに使用するグラウト材は高炉スラグ微粉末の置換率が40%のもので、W/Bが45%となるように配合設計した。ここでTSCに用いるグラウト材は、プレミックス材が粉体で残存しないように水とよく攪拌し作製した。なお、TSCの粗骨材はグラウト材の充填性を確保するため、粗骨材粒径が10mm以下のものはカットし使用した。その後、型枠に粗骨材を敷き詰め、粗骨材の上面までグラウト材を流し込んだ。

本検討に用いる粗骨材の物性を表-2に示す。粗骨材は最大粗骨材寸法が40mmのもので、砕石(C-40)、再生粗骨材(RC-40)、鉄道破棄バラスト(バラスト)の3種を用いた。なおRC-40はJIS A 5023(再生骨材Lを用いたコンクリート)に規定されたコンクリート用再生骨材Lである。

また圧縮強度や耐久性を従来のコンクリートと比較するため、TSCに用いるグラウト材と同じ高炉スラグ微粉末の置換率が40%のコンクリート(以下、普通コンクリート)も作製した。

### 2.2 試験方法

#### (1) 圧縮強度試験

図-2に示すφ150mm×300mmの円柱供試体を作製し、7日間封緘養生を施し、試験を実施した。

#### (2) 透気試験

図-2に示す200mm×200mm×600mm供試体を作製後、材齢3日時に破線の位置からφ100mm×200mmの円柱のコアを採取し、水中養生を7日間実施した。養生後コア供試体をφ100mm×50mmとなるようにコンクリートカッターで切断した。その後コンクリートの空隙に含まれる水分を取り除くために40℃の乾燥炉で静置し、質量が恒量時に試験を実施した。なお恒量時の質量を絶乾質量とした。

また、コアの早期採取による影響はないものと考えた。

#### (3) 空隙率試験

透気試験で使用した絶乾状態の供試体を用いて試験を行った。供試体の空隙を水で満たすために所定の時間真空飽和処理を行い、飽水処理後に飽水重量を計測した。また飽水状態における水中での重量を水中重量とし、アルキメデス法を用いて以下の式で空隙率を算出した。

$$\text{空隙率(\%)} = \frac{\text{飽水重量} - \text{絶乾重量}}{\text{飽水重量} - \text{水中重量}} \times 100 \quad (1)$$

### 2.3 試験結果および考察

#### (1) 圧縮強度試験

図-3に各配合における圧縮強度試験の結果を示す。普通コンクリートはC-40を用いた供試体の圧縮強度が

表-2 粗骨材の物性

| 種類    | 表乾密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 絶乾密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率<br>(%) | 実積率<br>(%) |
|-------|------------------------------|------------------------------|------------|------------|
| C-40  | 2.56                         | 2.50                         | 2.23       | 58.3       |
| RC-40 | 2.39                         | 2.65                         | 5.03       | 58.2       |
| バラスト  | 2.68                         | 2.27                         | 1.21       | 58.1       |

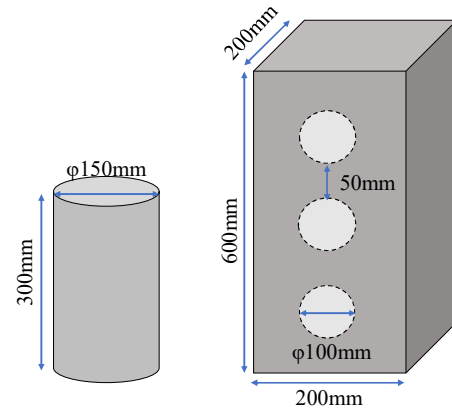


図-2 供試体寸法およびコア採取位置

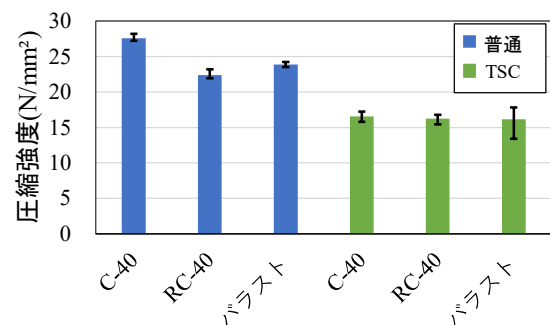


図-3 圧縮強度試験結果

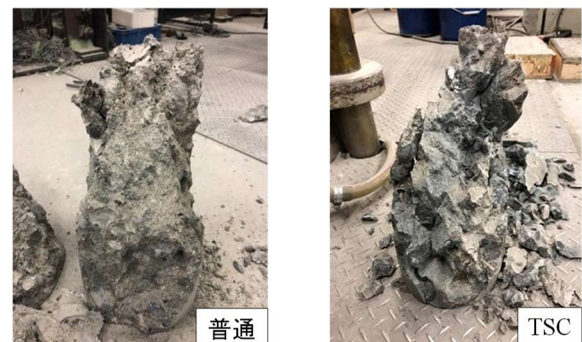


図-4 圧縮強度試験後の破壊形態

最も大きくなり、骨材種によって強度が異なったことから粗骨材の影響を受けると考える。一方、TSCはどの骨材においても普通コンクリートよりも圧縮強度は小さかったが、粗骨材の種類における圧縮強度に差は小さかった。そこで普通コンクリートとTSCの圧縮強度試験後の

破壊形態を観察し図-4に示す。普通コンクリートはペースト部が破壊しているのに対し、TSCは粗骨材界面に沿って破壊していた。これよりTSCは普通コンクリートよりも粗骨材界面が脆弱であると考えられる。そのためコンクリートの強度は粗骨材の種類によらず同程度となったと考えられる。

## (2) 透気試験

図-5に各配合における透気試験の結果を示す。普通コンクリートはRC-40を用いた供試体の透気係数が最も大きい。一方TSCはどの粗骨材でも普通コンクリートよりも透気係数が大きく、バラストを使用した供試体で透気係数が最も大きかったが、粗骨材の種類による透気係数の差は小さかった。

## (3) 空隙率試験

表-3に空隙率試験の結果を示す。アルキメデス法の性質上、骨材の吸水率が大きく影響していることから骨材の吸水率を考慮した吸水率補正值と単位モルタルあたりの空隙率を算出した。TSCは普通コンクリートよりも粗骨材の種類によらず吸水率補正を行った空隙率は小さくなった。これは普通コンクリートの作製時、締固めが不十分であったためではないかと考える。また普通コンクリート、TSCともにRC-40を用いた供試体の空隙率が最も大きかったが、これは粗骨材の吸水率が大きかったためだと考える。

## (4) 圧縮強度と透気係数

図-6に圧縮強度と透気係数の関係を示す。普通コンクリートは粗骨材の種類により、圧縮強度と透気係数が異なり、C-40を用いた供試体の圧縮強度が最も大きく、透気係数が小さいことが確認できた。一方TSCは普通コンクリートより圧縮強度は小さく、透気係数は大きくなったが、粗骨材の種類によらず同程度の圧縮強度となった。これよりTSCは従来のコンクリートよりも粗骨材の種類による影響を受けにくいと考える。

## 3. 空隙を改質するための検討

2で述べたようにTSCは粗骨材種類に依存せず、同等の圧縮強度で普通コンクリートよりも粗骨材の種類による影響は小さいと考えた。しかしTSCは粗骨材界面が普通コンクリートよりも脆弱であるため圧縮強度および物質移動抵抗性が小さいことと考えた。

そこでTSCの粗骨材界面の空隙を改質することで圧縮強度および耐久性を改善し、従来のコンクリートの強度や耐久性に近づけることが可能ではないかと考えた。既往の研究<sup>9)</sup>によりコンクリートの粗骨材界面の空隙を緻密にすることで圧縮強度と耐久性を改善すると報告されているC-S-H系硬化促進剤を用いた。また通常コンクリートの収縮抑制に使用される膨張材は水と反応するこ

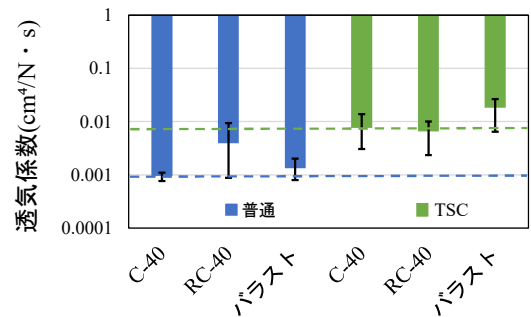


図-5 透気試験結果

表-3 空隙率試験結果

| 空隙率(%) | 普通   |       |      | TSC  |       |      |
|--------|------|-------|------|------|-------|------|
|        | C-40 | RC-40 | バラスト | C-40 | RC-40 | バラスト |
| 補正なし   | 10.2 | 12.7  | 10.8 | 7.5  | 12.7  | 7.4  |
| 吸水率補正值 | 9.4  | 11.0  | 10.4 | 6.2  | 9.8   | 6.7  |
| 単位モルタル | 14.4 | 18.2  | 15.3 | 14.8 | 23.3  | 15.9 |

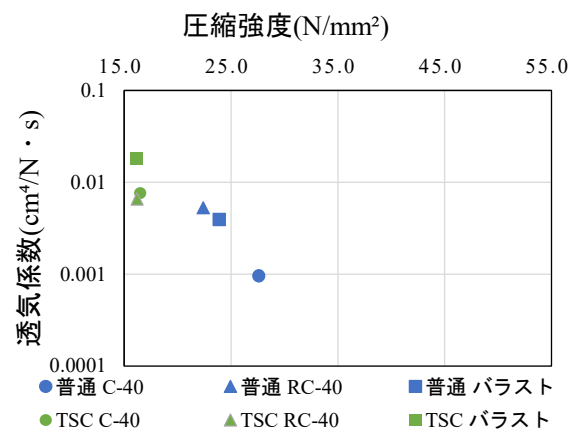


図-6 圧縮強度と透気係数の関係

表-4 配合概要及びフレッシュ性状

| 種類      | 添加材料 | W/B (%) | 添加量 (kg/cm³) | フレッシュ性状   |         |                |
|---------|------|---------|--------------|-----------|---------|----------------|
|         |      |         |              | スランプ (cm) | 空気量 (%) | グラウト材のフロー (mm) |
| TSC     | -    | 45      | -            | -         | -       | 312            |
| TSC+ACX | ACX  |         | W×5%         | -         | -       | 282            |
| TSC+EX1 | EX1  | 44      | 20           | -         | -       | 299            |
| TSC+EX2 | EX2  |         | 20           | -         | -       | 293            |
| TSC+EX3 | EX3  |         | 20           | -         | -       | 288            |
| TSC+BB  | BB   |         | 20           | -         | -       | 292            |
| 普通      | -    | 45      | -            | 11.5      | 5.6     | -              |

とでセメント水和物が生成されるが、この水和物がペースト中の空隙や粗骨材界面に形成される空隙を緻密にすることで圧縮強度と耐久性を改善できるのではないかと考え、各種膨張材も用いて検討を行った。

## 3.1 供試体概要

本検討に用いたコンクリートの概要とフレッシュ性状を表-4 に示す。使用する粗骨材は最大粗骨材寸法が20mm の碎石（表乾密度 2.70g/cm<sup>3</sup>，吸水率 0.26%）を用いて，2.1 と同様に TSC には粒径が 10mm 以下の粗骨材はカットしてから使用した。また W/B は 45%になるように配合設計した。C-S-H 系硬化促進剤（ACX）は単位水量 W×5%（kg）添加した。また膨張材はエトリンガイト系膨張材（EX1），複合系膨張材（EX2），生石灰系膨張材（EX3）の 3 種類を用いて，それぞれ 20kg/m<sup>3</sup>添加した TSC を作製した。通常膨張材を添加する際はセメントと置換するが，TSC はプレミックス材を用いるためセメントのみを置換することは不可能である。そこで比較のため膨張材を添加した際の W/B を求め，この W/B と同等になるよう TSC に使用したセメントと同一配合の高炉セメント B 種（以下 BB）を膨張材と同じ分量の 20kg/m<sup>3</sup>で添加した TSC を各種膨張材の添加した TSC の比較対象とし，混和材料の効果を確認する。また 2.1 と同様にスラグ置換率 40%の普通コンクリートを比較のため作製した。なお本検討では同一供試体で圧縮強度・耐久性を検討するため，各配合にて図-8 に示す供試体を用いた。混和材料の添加によるグラウト材のフローが少し低下したが，充填性に問題は確認されなかった。

### 3.2 試験方法

#### (1) 圧縮強度試験

図-7 の破線の位置から φ100×200mm の円柱のコアを材齢 3 日で採取し，試験に用いた。コア採取後 28 日間水中養生を実施し，試験を行った。

#### (2) 透気試験

圧縮試験と同様に φ100×200mm の円柱のコアを材齢 3 日で採取後，水中養生を 28 日施したコア供試体の両端 50mm をコンクリートカッターで切断し，表面部の φ100×50mm のものを供試体として用いた。

#### (3) 空隙率試験

2.2(3)と同様に，透気試験終了後の試験体を用いて空隙率を算出した。

### 3.3 試験結果および考察

#### (1) 圧縮強度試験

図-8 に圧縮強度試験の結果を示す。TSC に ACX を添加することで圧縮強度は大きくなった。膨張材を添加した TSC では EX3 を添加することで圧縮強度が大きく改善し，普通コンクリートよりも圧縮強度が大きくなることが確認できた。また BB を添加しても圧縮強度は大きくなった。

#### (2) 透気試験

図-9 に透気試験の結果を示す。ACX を添加することにより TSC の透気係数は大きく改善した。膨張材を添加した TSC は膨張材の種類によらず透気係数が改善さ

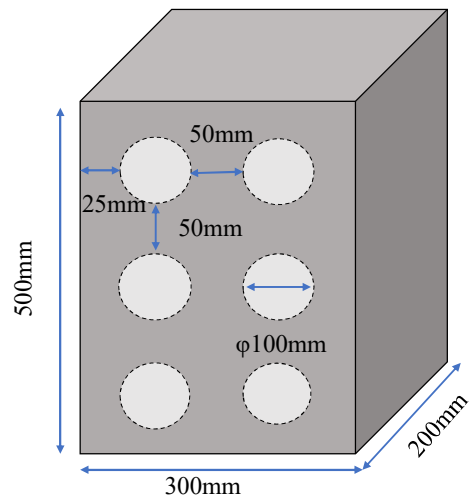


図-7 供試体寸法およびコア採取位置

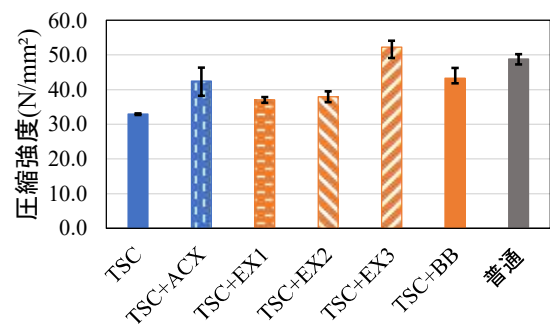


図-8 圧縮強度試験結果

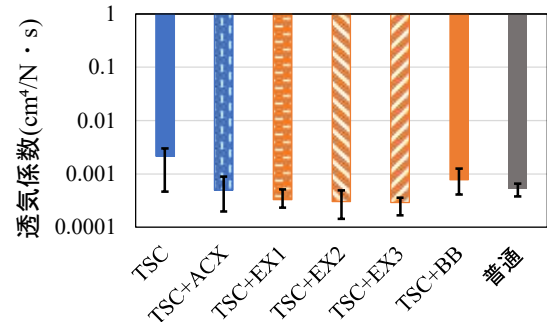


図-9 透気試験結果

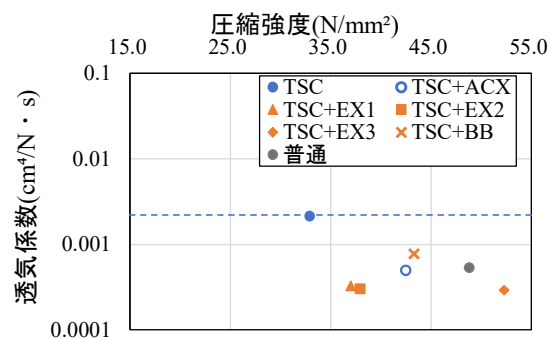


図-10 圧縮強度と透気係数の関係

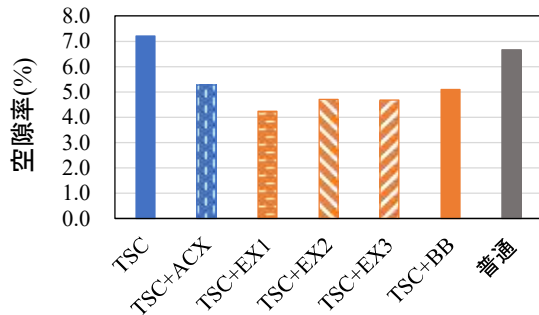


図-11 空隙率試験結果

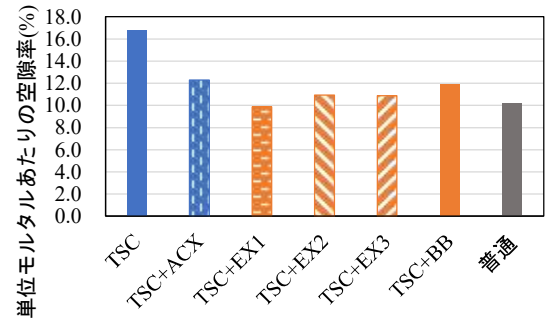


図-13 単位モルタルあたりの空隙率

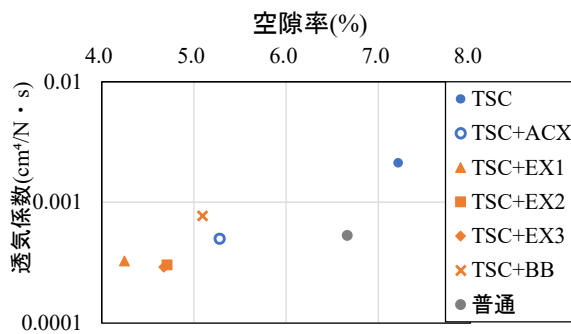


図-12 空隙率と透気係数の関係

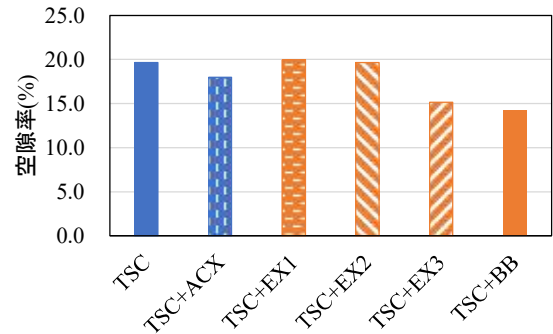


図-14 モルタルの空隙率

れ、同程度となることが確認できた。またいずれの混和材料を添加しても透気係数は普通コンクリートと同程度となった。

### (3) 圧縮強度と透気係数

圧縮強度と透気係数の関係を図-10 に示す。図より TSC+ACX, TSC+EX3, TSC+BB は圧縮強度と透気係数のどちらも改善し、TSC+EX3 は普通コンクリートよりも圧縮強度が大きく、透気係数が小さくなった。一方 TSC+EX1, TSC+EX2 の圧縮強度は改善されなかったが透気係数は小さく、異なる傾向が確認できた。これはモルタルマトリックス部の空隙が粗骨材界面の空隙を改質したためではないかと考えられる。

### (4) 空隙率試験

図-11 に空隙率試験の結果を示す。TSC に ACX を添加することで空隙率は大きく改善された。また膨張材は種類によらず空隙率は改善され、同程度の空隙率となった。いずれの混和材料を用いても普通コンクリートより空隙率が小さくなった。

また空隙率と透気係数の関係を図-12 に示す。TSC に ACX, 各種膨張材, BB を添加すると空隙率の減少に伴い、透気係数も小さくなるという傾向が確認できた。これは従来のコンクリートと同様の傾向でガスが空隙を通過していると考えられる。

### (5) 単位モルタルあたりの空隙率

上で述べたように C-S-H 系硬化促進剤や各種膨張材、

BB を添加したことで空隙率が小さくなり、透気係数が改善した。そこで減少した空隙が骨材界面なのか、モルタルマトリックスなのかを検討するためにコンクリート硬化体から粗骨材を除いた単位モルタルあたりの空隙率を算出した。ここで、TSC 中の空隙は粗骨材界面またはマトリックスに存在すると考え、単位モルタルあたりの空隙率はコアの空隙率をコア中に含まれるモルタルの割合で除すことで算出し、粗骨材界面の空隙とマトリックス部の空隙が含んだものとした。

単位モルタルあたりの空隙率を図-13 に示す。ACX を添加することで単位モルタルあたりの空隙率は改善された。また膨張材は種類によらず添加することで単位モルタルあたりの空隙率は同程度となった。BB を添加しても同様に改善した。よって C-S-H 系硬化促進剤、各種膨張材、BB を添加することで粗骨材界面の空隙とマトリックス部の空隙を改質できたと考える。

### (6) モルタルの空隙率

(3) で述べたように圧縮強度と透気係数の関係において混和材料により圧縮強度と透気係数のどちらも改善したものや透気係数のみ改善したもので異なる傾向が確認できた。しかしながら、粗骨材界面の空隙のみを計測することは不可能である。そこで TSC のマトリックス部の空隙率を計測するために、3.1 のコンクリートと同一配合のモルタル供試体を作製した。供試体作製後、28 日間水中養生を実施し、空隙率を計測した。

モルタルの空隙率試験の結果を図-14 に示す。ACX, EX1, EX2 は添加しても空隙率はTSC と同程度であった。一方で, EX3, BB を添加することで空隙率は小さくなった。よって ACX, EX1, EX2 は粗骨材界面の空隙は改質したがマトリックス中の空隙は改質しなかったと考える。一方 EX3, BB は粗骨材界面の空隙とマトリックス中の空隙を改質したと考える。よって TSC のマトリックス部の空隙を減少させることが圧縮強度の改善の要因ではないかと考える。

#### 4. まとめ

本研究より得られた知見を以下に記す。

- (1) TSC の圧縮強度は普通コンクリートよりも小さいが、粗骨材の種類に依存しない。
- (2) 圧縮強度試験時の破壊形態について、普通コンクリートはペースト部が破壊したのに対し、TSC は粗骨材界面に沿って破壊した。
- (3) TSC の物質移動抵抗性は粗骨材の種類に依存しないが、普通コンクリートよりも低い結果となった。
- (4) TSC に C-S-H 系硬化促進剤を添加することにより圧縮強度と物質移動抵抗性のどちらも改善された。
- (5) 膨張材の種類により TSC に及ぼす影響は異なり、エトリンガイト系膨張材と複合系膨張材は物質移動抵抗性のみを改善し、生石灰系膨張材は圧縮強度と物質移動抵抗性のどちらも改善し普通コンクリート以上の値となった。
- (6) 高炉セメント B 種を添加すると圧縮強度と物質移動抵抗性のどちらも改善する。

- (7) TSC のマトリックス部の空隙を減少させることにより圧縮強度を改善することができるのではないかと考える。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[施工編]，土木学会，pp.374-389，2013.3
- 2) M.F. Najjar, A.M. Soliman, M.L. Nehdi : Critical overview of two-stage concrete: Properties and applications, Construction and Building Materials, Vol.62, pp.47-58, Jul.2014
- 3) 森野奎二，山口典良，内藤幸雄：各種岩石骨材とセメントペーストとの付着性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.2, pp.93-96, 1980
- 4) 加藤佳孝，魚本健人：構成材料の空間的特性を考慮したコンクリートの有効拡散係数の予測モデル，コンクリート工学論文集，Vol.16, No.1, pp.11-21, 2005
- 5) 加藤佳孝，西村次男，魚本健人：骨材周囲の遷移帯厚さおよび空隙率の簡易算定手法の提案，セメント・コンクリート論文集，No.63, pp.308-315, 2009
- 6) 深澤英将，杉山知巳，伊代田岳史：コンクリートの内部構造が C-S-H 系硬化促進剤に与える影響の検討，土木学会第 74 回年次学術講演，2019