

論文 環境配慮型 Two Stage Concrete の実現に向けたグラウト材と骨材の提案

野口 優理香*1・内藤 雄也*2・伊代田 岳史*3

要旨：世界的な脱炭素社会実現のために、地産地消を目指す新たなコンクリートの開発が必要不可欠である。本研究では環境負荷を配慮して運搬などの削減を考慮した TSC の提案を行う。環境配慮型 TSC のために、環境負荷低減できるグラウト材の開発ならびに骨材種類の影響を検討した。その結果、高炉スラグ微粉末を大量に利用し練混ぜ水に上澄水を用いたグラウト材を提案するとともに、再生砕石に二酸化炭素を吸収させた骨材を利用することで、その実現の可能性を提示できた。

キーワード：TSC, 高炉スラグ微粉末, 再生骨材, 上澄水, 膨張材

1. はじめに

地球温暖化対策として、世界的にカーボンネットゼロを目指す取り組みが進められている。日本においても、2050 年に二酸化炭素などの温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡し、排出量を実質ゼロにするカーボンニュートラル社会を実現すると宣言したことから、コンクリート業界においても様々な取り組み^{たとえば 1)}が実施されてきている。コンクリートの原料であるセメント製造では、大量の二酸化炭素を排出することが知られており、高炉スラグ微粉末などの産業副産物を大量にセメントに置換するなどして、二酸化炭素排出量を削減することが望まれる。一方で、コンクリート構造物は従来から中性化が構造物劣化の問題とされてきたが、裏を返せば二酸化炭素を取り込む能力があるということであり、この炭酸化の能力を最大限利用する必要があると考える。

コンクリート業界は地産地消で構築する必要があるため、できるだけ材料や製品の運搬が少ないコンクリートの開発が望ましいと考える。そのためには現地で打込むコンクリートの総ボリュームの 7 割を占める骨材の運搬をできるだけ削減できることが望ましいと考える。また、レディーミクストコンクリート工場からの運搬も二酸化炭素排出の負荷になると考える。そこで、現地にて調達可能な骨材を用いて製造可能なコンクリートを普及させることは、カーボンニュートラルへの一助となると考えた。そこで、図-1 に示すように現地にて調達した骨材を敷き詰めてプレミックスのグラウト材を流し込むことで硬化体を作製できる Two Stage Concrete (TSC) に着目した。

TSC のメリットとして、グラウト材を袋で運搬することによる、材料運搬の容易さ及び現地調達骨材の使用が大きい。これにより、例えば離島や山間部での部材、

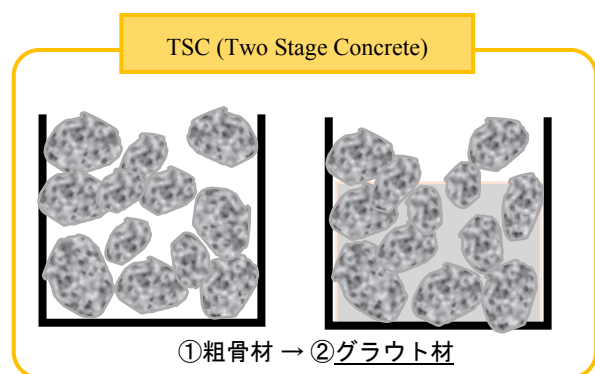


図-1 TSC 概要

また耐震補強工事や断面修復工事への適用も可能であると考え。一方で、TSC の性質上、骨材とグラウト材との界面が脆弱になることも想定され²⁾、強度や耐久性などへの懸念も存在する。そのため構造物の要求性能を把握して用いることが必要不可欠となる。

本研究においては、用いるグラウト材および骨材の両者において、環境配慮可能となる TSC を開発することを目指す。そこで環境負荷低減型のグラウト材の開発ならびに骨材種類の影響を把握することで、将来的に CO₂ 吸収した骨材を用いた TSC の実現に向けての検討を行う。

2. 環境配慮したグラウト材の開発

グラウト材は環境に配慮した材料で作製されるべきであると同時に、TSC の物理的性質を担保するために充填性を確保する必要がある。そのために、グラウト材には流動性、均一性、粘性が必要である。

2.1 要求性能を満たすための材料設計

環境に配慮したグラウト材の開発のために、環境負荷

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 社会基盤学専攻 (学生会員)

*2 芝浦工業大学 工学部 土木工学科

*3 芝浦工業大学 工学部 教授 博士 (工学) (正会員)

低減に寄与するセメント代替材料を利用することが必要である。本検討は大量置換が可能な高炉スラグ微粉末を利用した。また、レディーミクストコンクリート工場におけるコンクリートミキサーや運搬車などの洗浄排水から骨材を除去したスラッジを含む水の利用も検討の余地がある。本検討ではそのうちの回収水³⁾の中でも、スラッジ固形分を含まない上澄水を使用した。上澄水はセメントから溶出した水酸化カルシウム等を多く含む高アルカリの溶液だが、JIS A 5308 ではコンクリート用の練混ぜ水として、使用して良いとされている。本検討に使用した練混ぜ水の Ca^{2+} 濃度を表-1 に示す。また、グラウト材の配合選定をするにあたり、表-2 に示す様々な材料、配合で検討した。環境負荷低減材料として、高炉スラグ微粉末を 0~70%置換したセメントを用いた。強度レベルと流動性を変化させるために、W/C を 45~70%、および S/C を 0.2~1.0 と設定した。環境負荷低減に寄与する材料を用いるほか、流動性向上のために高性能減水剤を 0.0~2.0 (C×%)、材料分離抵抗性向上のために粉体増粘剤を 0.0~1.0 (C×%)、そして骨材界面の空隙の緻密化のために膨張材を 0~20 (kg/m³) 添加した。細骨材はグラウト材の充填性向上のために 1.2mm ふるいを通過したもの³⁾を用いた。なお、比較用として市販の高流動・無収縮グラウト材を使用した(市販 G)。これらを組み合わせた計 52 配合で試験を実施した。

2.2 試験項目

(1) スランプフロー試験

グラウト材の粘性、均一性を評価するために、JIS A 1171 に準拠し、グラウト材のスランプフロー（以下フロー値）と最大フロー値への到達時間を計測した。また、スランプフロー試験後に 5 分間グラウト材を静置し、その後目視にて材料分離が確認された場合には、均一なグラウト材ではないと判断した。

(2) JP 漏斗試験

グラウト材の粘性、流動性を評価するために、JSCE-F 531-2018 に準拠し、グラウト材の流下時間を計測した。なお、グラウト材が漏斗を全て流下したか否かを「全て通りきる」「一部通りきる」「途中で留まる」「材料分離」の四段階で区分分けした。

(3) ブリーディング率及び膨張率試験

グラウト材の水和収縮が大きいと骨材との界面が大きくなることが想定される。そこで、ノンブリーディングタイプのグラウト材の使用または骨材間の空間を減少させるために膨張材を添加した。この効果を評価するために、ブリーディング率及び膨張率試験を実施した。試験は JSCE-F 522-2018 「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率及び膨張率試験方法（ポリエチレン袋方法）（案）」に準拠して実施した。

表-1 練混ぜ水の Ca^{2+} 濃度

練混ぜ水	Ca^{2+} 濃度 (ppm)
水道水	41.5
上澄水	870

表-2 グラウト材の検討に使用した材料と配合

環境負荷低減	セメント種類	N, BB 相当(BB), BC 相当 (BC)
	練混ぜ水	水道水, 上澄水
	W/C (%)	45~70
	S/C	0.2~1.0
流動性付与	高性能減水剤	0.0~2.0 (C×%)
粘性付与	粉体増粘剤	0.0~1.0 (C×%)
強度耐久性向上	膨張材	0~20 (kg/m ³)
市販グラウト材		無収縮タイプ (市販 G)
計		52 配合

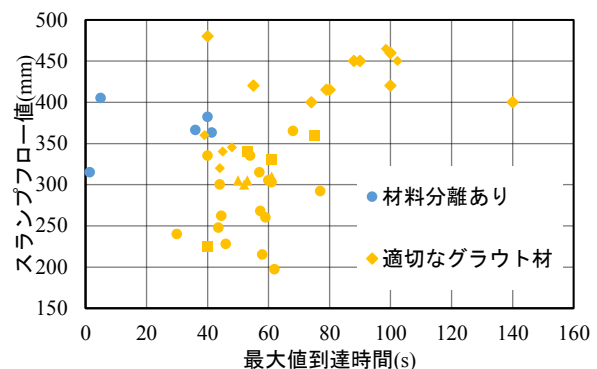


図-2 スランプフロー試験結果

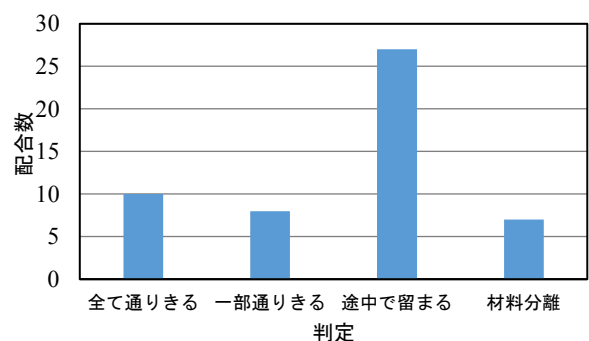


図-3 JP 漏斗試験

2.3 フレッシュ試験結果

(1) スランプフロー試験

スランプフロー試験の結果を図-2 に示す。材料分離を確認したものは、図中に示した。分離が確認できないグラウト材でも、配合によりスランプフローが異なることが確認できた。また同程度のフロー値においても、最大フロー到達時間には違いが認められた。

(2) JP 漏斗試験

JP 漏斗試験の結果を図-3 に示す。設定した全配合の中で、途中で留まらずに「すべて通り切る」配合は全部で 10 配合であった。

(3) ブリーディング率及び膨張率試験

スランプフロー試験と JP 漏斗試験ともに、W/C=50%, s/c=1.0, 高性能減水剤を 0.25(C×%), 粉体増粘剤を 1.0(C×%), 膨張材を 20(kg/m³)添加し、水道水を用いたグラウト材のうち、GGBS 置換率が 0,50,70%の配合 (N, BB, BC) と、GGBS 置換率が 70%であり上澄水を練混ぜ水として使用した配合 (上澄 BC70) を適切と判断し、これらのグラウト材と市販のグラウト材 (市販 G) を用いて試験を実施した。試験結果を図-4 に示す。N, BB, BC70 では膨張材を添加したことにより、膨張が確認された。一方で、上澄水を使用した上澄 BC70 と市販 G では膨張が確認できなかった。上澄 BC70 では膨張材を添加しているのにも関わらず、膨張が確認できなかったことから、水和収縮と膨張材の効果が打ち消されたと考えられるが、原因は今後検討予定である。

3. TSC 製造におけるグラウト材の性能評価

フレッシュ試験で適切と判断したグラウト材を表-3 に示す。これらを用いてグラウト材硬化体及び TSC を製造し、各種試験を実施することでグラウト材の評価を行った。

3.1 試験概要

TSC 試験体概要を図-5 に示す。ここでの検討においては、粗骨材には環境負荷低減を考慮するために、解体コンクリート塊を破碎して製造した再生砕石を使用した。再生砕石のうち、グラウト材の充填性向上を目的に、10mm のふるいに留まる骨材径 10~40mm を使用し、450×200×300mm の供試体を作製した。

(1) 圧縮強度試験

材齢 3 日の試験体から φ100×200mm のコア供試体を採取後、材齢 28 日まで標準水中養生を施した後、JIS A 1108 に準拠し、圧縮強度試験を実施した。

なお、別途グラウト材のみで φ50×100mm の試験体を作製し、同様の養生を施したうえでグラウト材硬化体の強度を計測し、比較を行った。

(2) 空隙率試験

コア供試体から 40×40×10mm 程度の破片を採取し、アルキメデス法により下記の式(1)により、空隙率を算出した。

$$\text{空隙率}(\%) = \frac{\text{放水質量} - \text{絶対乾重量}}{\text{放水質量} - \text{水中質量}} \cdot 100 \quad (1)$$

3.2 試験結果

(1) 圧縮強度試験

グラウト材および TSC コアの圧縮強度試験結果を図-6 に示す。まず、グラウト材硬化体における圧縮強度

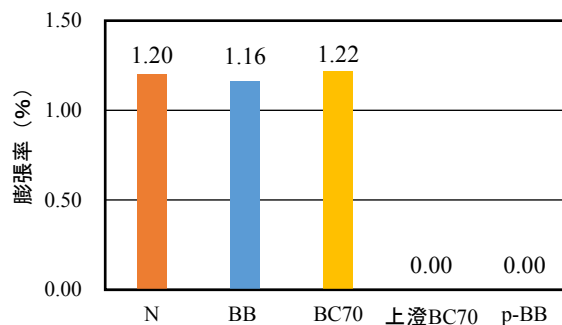


図-4 膨張率試験

表-3 適切と判断したグラウト材配合

配合名	W/C (%)	フロー値(mm)	最大値到達時間(s)
N	50	415	79
BB		400	74
BC65		480	40
BC70		450	90
上澄 BC65		450	88
上澄 BC70		420	100
市販 G	—	465	99

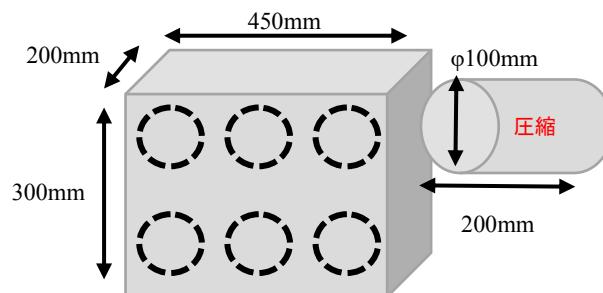


図-5 TSC 試験体概要

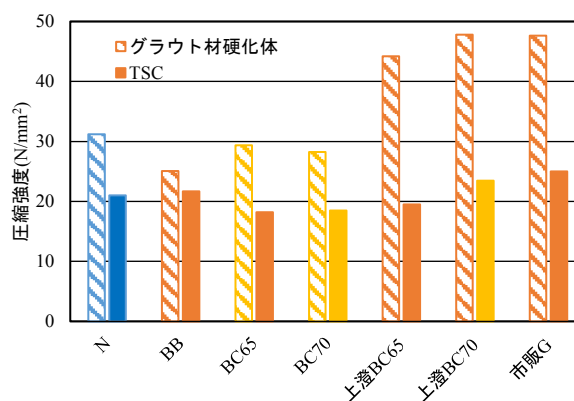


図-6 グラウト材硬化体と TSC コアの圧縮強度

を比較すると、使用したセメントなどにより圧縮強度には大きな差が認められた。一方でこれらのグラウト材を用いて作製した TSC の圧縮強度を比較すると、配合に依らず概ね同程度となった。このことから、グラウト材の圧縮強度は TSC の圧縮強度に影響を与えないことが分かった。

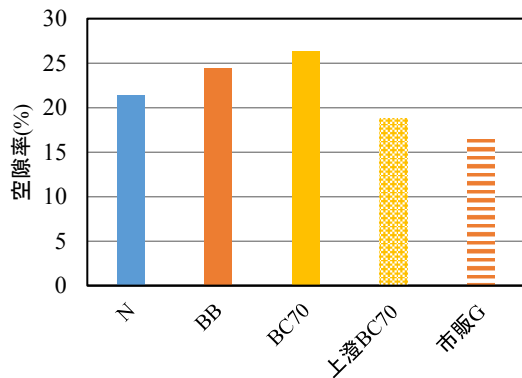


図-7 TSC の空隙率試験結果

(2) 空隙率試験

空隙率試験結果を図-7 に示す。高炉スラグ微粉末の置換率が高いものほど空隙率が大きくなっていることが確認できた。一方で上澄 BC70 においては練り混ぜ水以外は同一の配合である BC70 と比較して空隙率が小さい結果となった。上澄水にはセメント粒子や骨材などの微粒分が水道水と比較して多く含まれていると考えられ、これらがグラウト材の粘性を大きくし、空気量を減らすことが考えられる。このことから練り混ぜ水に上澄水を用いたことで、TSC にした際に空隙を埋める作用が働いたと考えられるが原因は今後検討する予定である。

(3) コア供試体の表面

(1)において TSC 強度の相違が認められなかった原因を確認するために、採取したコア供試体の中から上澄 BC70 と上澄 BC65 試験体のコア表層の様子を写真-1 で確認した。両者ともにグラウト材と粗骨材界面との間に空気が確認されたが、写真右に示す上澄 BC65 では上澄 BC70 と比較して特に大きな空隙が目視にて確認された。

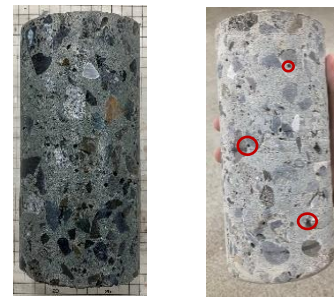


写真-1 採取したコア供試体
(左:上澄 BC70, 右:上澄 BC65)

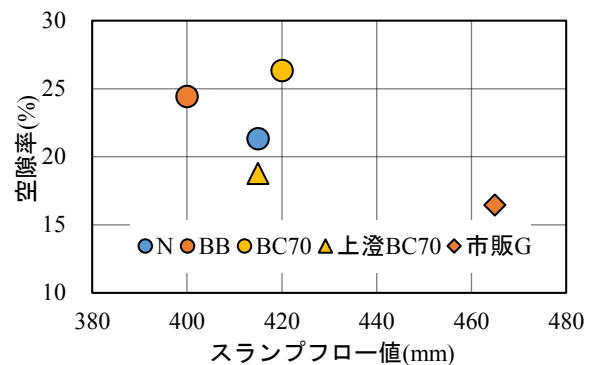


図-8 空隙率とスランプフロー値

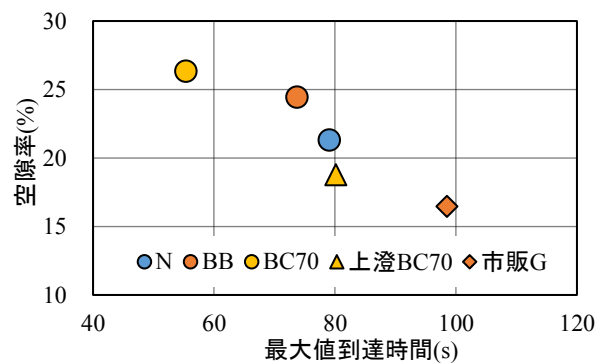


図-9 空隙率と最大値到達時間

3.3 TSC の性能とフレッシュ性能の関係

グラウト材のフロー値およびフロー値の最大到達時間と TSC の空隙率との関係を図-8, 9 に示す。全ての配合においてフロー値が大きいほど、またフロー値の到達時間が長いほど空隙率が低くなる傾向が認められた。これは型枠内にグラウト材を充填する際には流動性が必要であり、同時に型枠内や骨材間の空気を排出するためには、粘性を持ち動き続ける性能が必要であることを示唆している。そこで適切なグラウト材の選定のために、グラウト材のフレッシュ性能、TSC 試験体の各種試験結果から適切なグラウト材の規準の設定をする。先に示した図-8 と図-9 から空隙率をできるだけ小さく抑えるために、図-10 にスランプフロー値と最大値到達時間の関係を示した。これより、一定以上のスランプフロー値と最大値到達時間を持つグラウト材が適切と判断された。スランプフロー試験にて材料分離をせず、JP 漏斗試験で漏斗をすべて通り切った配合の最低条件がスランプフロー値 400mm 以上、最大到達時間が 75mm 以上で

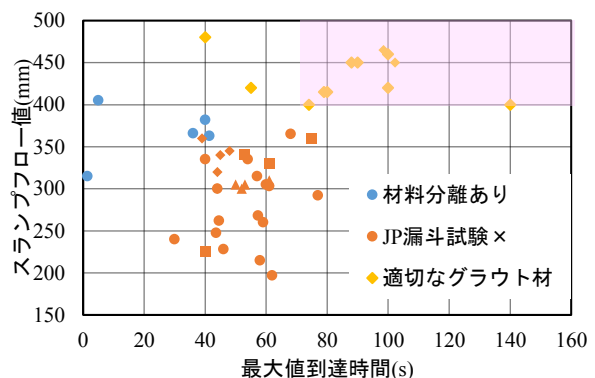


図-10 スランプフロー値と最大値到達時間

あったため、これらの条件を満たすグラウト材が適切であると設定した。そこで、本検討の範囲であれば TSC の作製に適切なグラウト材はスランプフローが 400mm 以上のグラウト材を使用することで流動性の確保、また、フロー値到達時間を 75 秒以上と設定することで粘性を

持ち動き続ける能力の確保が可能となるといえる。

4. TSC における骨材種類おける物性への影響⁵⁾

4.1 異なる骨材種類による TSC

3 章において適切なグラウト材の範囲を提案した。この適切なグラウトを用いて TSC を製造した場合における、異なる骨材種類において発揮される TSC の物性への影響を把握する必要がある。コンクリートは基本的にマトリックスおよび骨材強度に依存して物性が確定すると思われる。TSC においても骨材の強度が TSC の強度にどの程度影響を与えるかを把握するために、異なる骨材を用いた検討を以下に行った。

(1) 試験概要

骨材には普通骨材 (C-40)、鉄道軌道からの廃棄バラスト、および路盤材として用いられる建設廃材の再生砕石 (RC-40) の 3 種類を用いた。これは、現地にて調達できるような骨材種類の違いを明確に比較するためである。本検討ではできるだけ再生砕石のような破碎しただけで使用するような廃材を利用できるように考えたことから、粗骨材の最大寸法を 40mm と設定した。圧縮強度のためには、φ150×300mm の鋼製型枠に粗骨材を敷き詰め、その後グラウト材を注入し TSC を製造した。なおグラウト材には、2, 3 章で使用した市販のグラウト材を用いた。また市販のグラウト材には膨張材の添加は無いことを確認している。

(2) 試験結果と考察

粗骨材種類を変化させた圧縮強度試験結果を図-11 に示す。なお、ここでは比較のために通常の打込みを行ったコンクリートも記載する。通常のコンクリートでは、粗骨材の種類によって圧縮強度に大きな差が見られた。これは従来から言われている通り、コンクリートの強度が粗骨材の強度に依存するためであると考えられる。つまり、ここでは C-40、バラスト、RC-40 の順に骨材強度が高いと想像できる。一方、TSC では粗骨材種類によって圧縮強度に大きな差は確認できない。つまり骨材の種類に依存しない強度発現であるといえる。そこで、圧縮強度試験後の破壊形態を写真-2 で確認した。通常のコンクリートでは骨材が破壊されているものも確認できるが、TSC では骨材が露出していることが確認できる。つまり骨材の界面にて破断していることから、TSC は粗骨材種類に依らず、骨材とグラウト材の間に存在する骨材界面部分が脆弱であることから、骨材種類に依存しないで圧縮強度が一定になったと考えられる。以上のことから、本研究で用いた骨材種類では、TSC は通常のコンクリートより粗骨材による影響を受けにくく、実際に TSC の使用が想定されるコンクリートの運搬が困難な地域においても、粗骨材の現地調達ができる

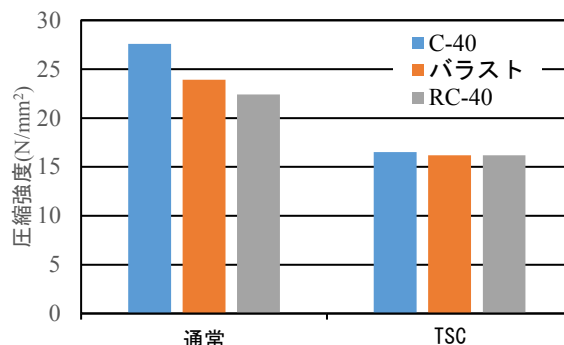


図-11 粗骨材種類の違いによる通常および TSC の圧縮強度比較

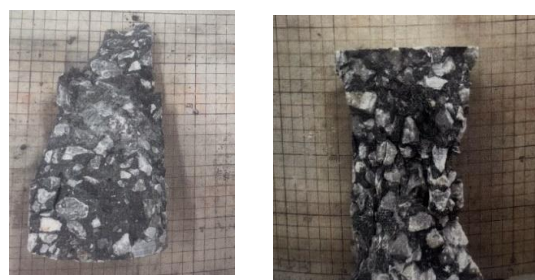


写真-2 破壊形態 (左：通常 C, 右：TSC)

表-4 使用配合

種類	混和材料		W/B (%)
	混和剤	膨張材	
TSC	—	—	45
	ACX	—	
	—	EX1	44
	—	EX2	
通常	—	EX3	45
	ACX	—	

ことが推察された。

4.2 TSC における骨材界面の改善方法

(1) 試験概要

前述のように TSC に存在する骨材とグラウト材の間の界面部分を改善する方法を検討した。グラウト材が膨張または界面を緻密にできる方法を検討する。その方法としてグラウト材に表-4 に示すように硬化促進剤と各種膨張材を添加することを検討した。まず、化学混和剤である C-S-H 系硬化促進剤 (ACX) を用いることで、コンクリート中の骨材界面を改善する⁶⁾との報告があることから使用を検討した。次に膨張材としてエトリンサイト系膨張材 (EX1)、複合系膨張材 (EX2)、生石灰系膨張材 (EX3) の 3 種類を用いた。また、比較用に通常コンクリートを用いた。使用した骨材は砕石骨材 (最大寸法 20 mm) とし、グラウト材の充填性向上のために粗骨材粒形 10mm 以下の粗骨材は除外した。試験体は 300×200×500mm の角柱試験体を作製した。

(2) 試験結果

圧縮強度試験結果を図-12 に示す。まず、ACX (C-S-H 系硬化促進剤) を添加することで通常のコンクリート同様、TSC の強度は増進した。ただし、その効果は通常のコンクリートよりも大きかったが、大幅な改善にはつながらなかった。次に異なる 3 種類の膨張材を添加した TSC の圧縮強度は無添加と比較して強度増進した。また 3 種類のうちでは EX3 が最も高い強度が得られた。一方で EX1 と EX2 を添加した TSC の強度は同程度となり強度の改善効果は小さかった。このことから、膨張材を添加することにより TSC 骨材界面を改善し、強度を高めることができること、また EX3 が利用したグラウト材に適していることが分かった。これは、このグラウト材が高炉スラグ微粉末の割合が高いため、生石灰膨張材が効果的であるといえる。

4.3 TSC 用の骨材について

これまでの検討で TSC の圧縮強度が粗骨材種類に依存しないことから、環境配慮した TSC を達成するためには、現地に調達可能な解体コンクリート塊を破碎しただけの再生砕石に予め二酸化炭素を吸収させた骨材が使用できるのではないかと考える。これまで筆者らのグループでは、低品質再生骨材に二酸化炭素を吸収させることで付着モルタル部が緻密化し、骨材物性を改質することを提案⁸⁾している。さらに改質した再生骨材を用いた再生骨材コンクリートは、未改質再生骨材コンクリートより、強度や耐久性が向上することを報告⁸⁾している。このようなことから、TSC の使用を想定する場所では、現地の解体コンクリート塊に二酸化炭素を吸収させてから TSC とすることで、粗骨材の運搬を極力省略し、さらに環境負荷低減が可能となること、カーボンニュートラル社会への貢献も考えられる。今後は、改質再生砕石での TSC の検討およびそれらを用いた場合の二酸化炭素削減効果なども検討していく予定である。

5. 結論

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) グラウト材には流動性と粘性を持ち動き続ける能力が必要であり、JP 漏斗試験とスランプロー試験を併用することで適切なグラウト材の選定ができる。
- (2) スランプロー値と空隙率、スランプローの到達時間と空隙率には相関が確認できた。したがって TSC に適切なグラウト材はスランプローが 400mm 以上、到達時間が 75 秒以上である必要がある。
- (3) TSC の物理的性質を満足し、環境負荷低減に寄与するためには、上澄水を使用し、高炉セメント C 種相当のグラウト材を使用することが適している。
- (4) 本研究の範囲では、TSC の圧縮強度は粗骨材種類に

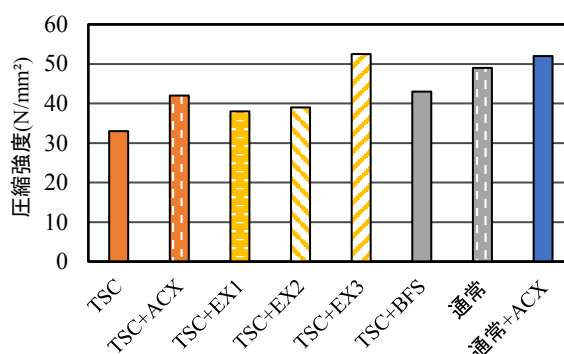


図-12 圧縮強度試験結果

依存しないと考えられる。これは TSC の粗骨材界面が脆弱であることに起因すると考えられる。これを解消するためには膨張材などの併用により、界面を埋めることで TSC 強度の向上も検討可能である。

参考文献

- 1) 取違剛, 森泰一郎, 小島正朗: 革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発: CUCO-Carbon Utilized Concrete, コンクリート工学, Vol.61, No.6, pp.520-527, 2010
- 2) 澁谷亜香里, 大塚朝陽, 伊代田岳史: 再生砕石や廃棄バラストを使用したプレパックドコンクリートの適用性の検討, 土木学会第 74 回年次学術講演, 2019
- 3) 岩永豊司: スラッジ水の有効活用と環境への配慮, コンクリート工学, Vol.48, No.9, 2010
- 4) 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, 2023
- 5) 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, pp.989-994, 2021
- 6) 深澤英将, 杉山知巳, 伊代田岳史: C-S-H 系硬化促進剤によるコンクリート中の空隙改質メカニズムの解明, 第 73 回セメント技術大会, 2019
- 7) 名古屋智樹, 伊代田岳史: 事前に粗骨材を敷き詰めたコンクリートの骨材界面の改善方法の検討, 第 74 回セメント技術大会, 2020
- 8) 湯屋蓮, 松田信広, 小島正朗, 伊代田岳史: 低品質再生骨材コンクリートの強度および耐久性向上を目的とした複数の改質方法の効果と改質メカニズムの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, pp.994-999, 2022