

自己充填コンクリートを用いた覆工の自動化に関する研究（その5）

－低炭素型自己充填コンクリートの検討－

Study of automatic lining construction using Self-Compacting Concrete (Part 5) - Study on Low-carbon Type Self-compacting Concrete for Tunnel Lining-

キーワード

トンネル覆工, 自己充填コンクリート
圧入, 均質性, フライアッシュ, 低炭素

小山 広光*, 藤原 正佑*, 弘光 太郎**

橋本 紳一郎***, 山本 武志****

研究概要

本研究では、「自己充填覆工構築システム」で使用する「低炭素型自己充填コンクリート配合」について検討を行った。検討の結果、フライアッシュをセメントに高置換した自己充填コンクリート配合は、一般的なトンネル覆工コンクリートと同程度のCO₂排出量で、初期材齢も含め同等以上の強度発現性を有しており、生産性向上とCO₂排出量抑制を同時に達成することが可能であることを確認した。また、圧入実験の結果から、フライアッシュの高置換により自己充填コンクリートの材料分離抵抗性および均質性が向上することが確認された。

1 はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリート施工の省力化および品質向上を目的として、筆者らは自己充填コンクリートを用いる「自己充填覆工構築システム」を開発している¹⁾。本システムは、スライドセントル中央部下端に設置した圧入口から自己充填コンクリートを型枠内に圧入し、パイプレータによる振動締め固めおよびスライドセントル内での配管切替えを行わずにコンクリートをトンネル天端まで充填させるものであり、これまでに実物大施工実験と現場適用によりシステムの妥当性および覆工の品質に問題がないことを確認している²⁾。

一方、自己充填コンクリートは高い充填性能を確保するために多量の結合材を必要とし、結合材をセメント単味とした場合は一般的なトンネル覆工コンクリートよりも製造時のCO₂排出量が増大する。結合材の一部をフライアッシュ等の混和材で置換することによりCO₂排出量を抑制できるが、初期強度発現性の低下により施工サイクルが遅延し、トンネル覆工の生産性低下が懸念される。

上述の背景より、「自己充填覆工構築システム」における生産性を確保しつつCO₂排出量を抑制する、フライアッシュを用いた低炭素型自己充填コンクリート配合について検討を行った。さらに、トンネル覆工を模擬した圧入実験を行い、フライアッシュの高置換が自己充填コンクリートの品質におよぼす影響を確認した。

2 低炭素型自己充填コンクリート配合の検討

2.1 実験概要

コンクリートの練混ぜは一軸パン型ミキサーを使用し、1バッチあたりの練混ぜ量は30リットルとした。表-1に実験で検討したコンクリート配合および使用材料を示す。自己充填コンクリート配合は、自己充填覆工構築システムに必要なスランプフロー600±100mm、空気量4.5±1.5%、自己充填ランク3³⁾を目標値に設定した。セメント単味の自己充填コンクリート配合(SCC)の結合材量を一定として、フライアッシュを100, 120, 140kg/m³置換した低炭素型配合(SCC-FA100, SCC-FA120, SCC-FA140)のフレッシュ性状を確認した。材齢16, 19, 22, 24時間の脱型時、および28, 91日の標準養生の供試体で確認し、一般的なトンネル覆工で用いられる21-15-20BBの配合との強度発現性の比較を行った。

2.2 実験結果および考察

図-1に既往の文献⁴⁾を参考に算出した各コンクリート配合のCO₂排出量を示す。検討した低炭素型自己充填コンクリート配合のCO₂排出量は、高炉セメントB種単味の場合の7割程度に抑制され、最もフライアッシュ使用量の多いSCC-FA140においては21-15-20BBとほぼ同等のCO₂排

* 技術センター 土木研究部, ** 北陸支店, *** 千葉工業大学, **** 電力中央研究所

表-1 コンクリート配合および使用材料

配合名	W/C (%)	W/(C+FA) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
				W	C	FA	S1	S2	G	Ad	SP	AE
21-15-20BB	60.6	60.6	46.4	166	274	-	336	523	1005	1.92	-	0.008
SCC	41.5	41.5	49.2	170	410	-	332	516	884	-	5.95	0.008
SCC-FA100	53.2	40.2	48.7	165	310	100	324	505	884	-	5.13	0.053
SCC-FA120	56.9	40.2	48.5	165	290	120	322	502	884	-	5.13	0.078
SCC-FA140	61.1	40.2	48.3	165	270	140	319	497	884	-	5.13	0.103

C : 高炉セメント B 種 (密度3.04g/cm³)

FA : フライアッシュ II 種 (密度2.22g/cm³, 比表面積3580cm²/g, 強熱減量2.7%)

S1 : 山砂 (表乾密度2.58g/cm³, 粗粒率2.50)

S2 : 砕砂 (表乾密度2.69g/cm³, 粗粒率3.10)

G : 砕石2005 (表乾密度2.68g/cm³, 粗粒率6.61, 実積率60.4%)

Ad : AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体)

SP : 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系) AE : AE 剤 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)

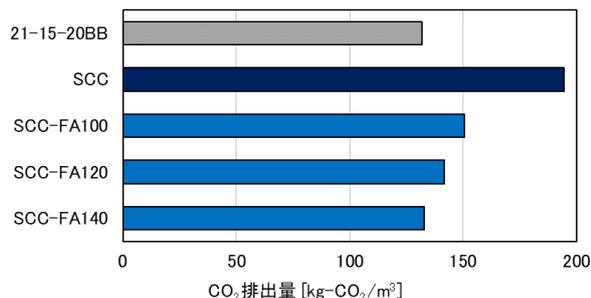


図-1 各配合の CO₂ 排出量

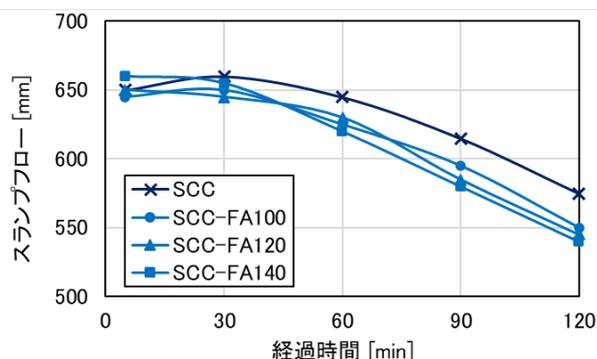
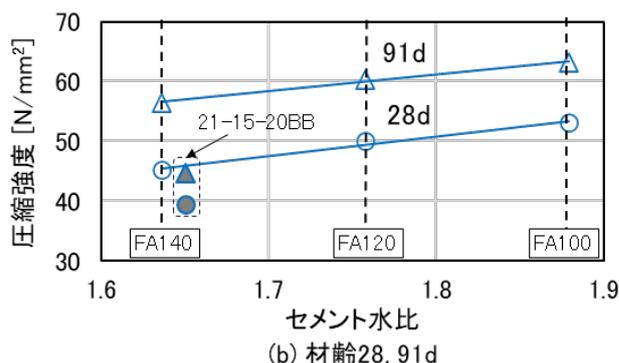
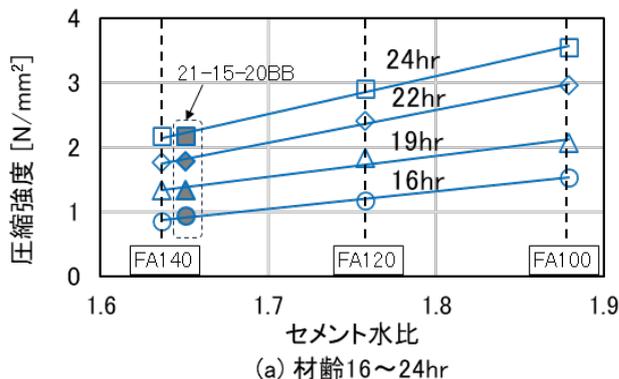


図-2 スランプフローの経時変化



(b) 材齢28, 91d



(a) 材齢16~24hr

図-3 セメント水比と強度の関係

出量となる。

いずれの自己充填配合においても設定したフレッシュ性状を満足し、コンクリートの粘性に大幅な違いは認められなかった。図-2に各自己充填コンクリート配合のスランプフローの経時変化を示す。フライアッシュを用いた配合は、SCC に比べ SP の量が少なくなるため、スランプフローの経時保持性はやや小さい傾向になるが、フライアッシュ置換率による経時保持性の違いは認められず、いずれの配合も120分後においても設定値を満足した。フライアッシュの使用量が多いほど空気量の設定値を満足するための AE 剤使用量は大きくなる傾向となり、高性能 AE 減水剤の使用量の調整により所定の流動性および充填性を得ることが可能であることを確認した。

図-3(a), (b)にそれぞれの材齢におけるセメント水比と圧縮強度の関係を示す。フライアッシュを用いた自己充填コンクリート配合は、いずれの材齢においてもセメント

水比と圧縮強度の相関性が高く、既往の文献⁵⁾と同様にフライアッシュ置換率が高くなるほど圧縮強度は小さくなる傾向にあった。最もフライアッシュ使用量の多い SCC-FA140の圧縮強度は、材齢24時間以内において21-15-20BB とほぼ同等であり、材齢28日以降では材齢が経つにつれ21-15-20BB との差は大きく異なった。

したがって、フライアッシュを100~140kg/m³置換した低炭素型自己充填コンクリートは、当該システムに必要なフレッシュ性状を有し、一般的なトンネル覆工コンクリートと同等以上の強度発現性を有することが確認された。

3 模擬型枠による圧入実験

3.1 実験概要

表-2に圧入実験に使用したコンクリート配合および使用材料を示す。自己充填配合は、単位セメント量410kg/m³

表-2 コンクリート配合および使用材料

配合名	W/(C+FA) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
			W	C	FA	S1	S2	G	SP
C380	44.7	50.3	170	380	-	603	270	884	2.95
C410	41.5	49.6	170	410	-	587	262	884	6.27
C310-FA100	41.5	48.6	170	310	100	563	252	884	5.02
C270-FA140	41.5	48.1	170	270	140	553	247	884	5.13

C : 普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm³) FA : フライアッシュII種(密度2.22g/cm³)
 S1 : 山砂(表乾密度2.58g/cm³) S2 : 砕砂(表乾密度2.69g/cm³)
 G : 砕石2005(表乾密度2.68g/cm³)
 SP : 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体)

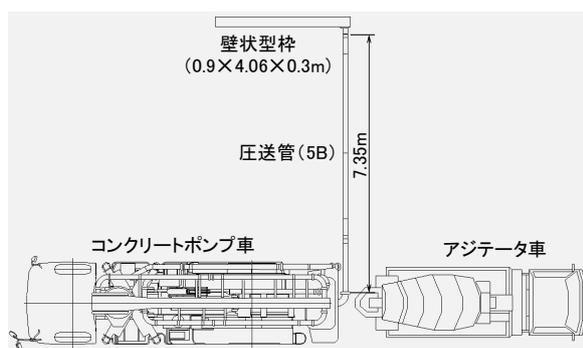


図-4 圧入実験の概要図

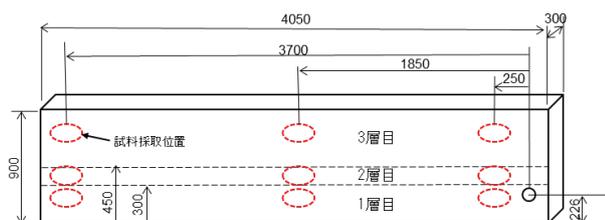


図-5 壁状型枠の形状

の自己充填配合(C410)を対比に、自己充填ランク3を確保できる最低セメント量の380kg/m³(C380)、100kg/m³および140kg/m³をフライアッシュに置換した配合(C310-FA100, C270-FA140)の計4配合において圧入実験を行った。コンクリートは近隣の生コン工場にて1バッチ1.5m³で製造し、アジテータ車で運搬した。事前の試験練りと当日のコンクリート温度からスランプフローを550±50mm、空気量を4.5±1.5%と設定した。

図-4に圧入実験の概要図、図-5に壁状型枠の形状を示す。壁状型枠(高さ0.9m、長さ4.06m、幅0.3m)の片側端部付近に圧入口を配置し、コンクリートポンプ車に圧送管(5B管)を接続してアジテータ車から荷卸した自己充填コンクリートを型枠内へ圧入した。型枠の片面にアクリル樹脂製の透明型枠を配置し、コンクリートの充填状況を確認した。

型枠に充填された自己充填コンクリートの品質におよぼす影響を確認するため、JIS A 1112に従いフレッシュコンクリートの洗い分析試験を行い、コンクリートの均質性を評価した。洗い分析試験に用いた試料は、コンクリートの打上がり高さが0.3m、0.45mおよび天端付近まで到達し

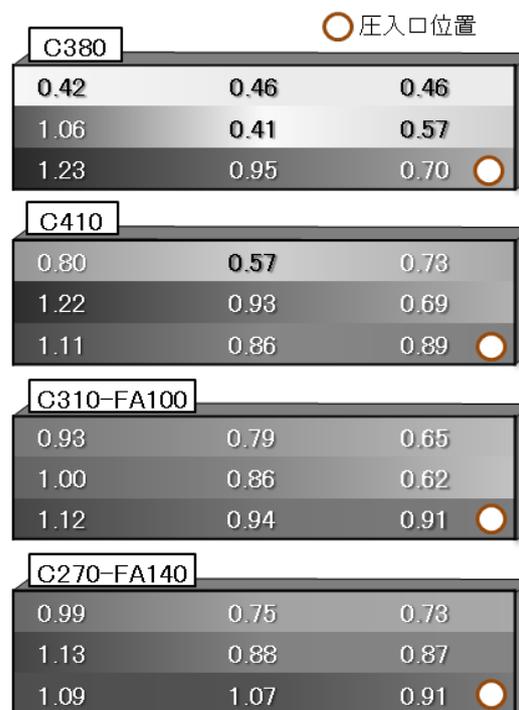


図-6 壁状型枠内の粗骨材量比率

た際に圧送を一時停止し、それぞれ圧入口から0.25m、1.85m、3.70mの水平距離の位置(図-5の赤破線)で採取した。採取した試料からコンクリート中の単位粗骨材量を測定し、配合における単位粗骨材量を1とした測定値の割合を粗骨材量比率として、それぞれの値を算出した。

また、締固めを必要とする高流動コンクリートの分離抵抗性評価として用いられる⁹⁾、ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験(JSCE-F701)、および加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験(JSCE-F702)を併せて行い、それぞれの自己充填コンクリート配合の材料分離抵抗性を評価した。なお、試料はアジテータ車から荷卸したものを使用した。

3.2 実験結果および考察

図-6は各自己充填配合における壁状型枠内の粗骨材量比率を、型枠側面の模式図に示したものである。いずれの配合においても、圧入口側および打上がり高さが高い場合ほど粗骨材量比率の値は小さくなる傾向にあった。C380においては上層部の値はいずれも0.5未満であり、C410においても0.6未満の値が確認された。図-7に各配合における

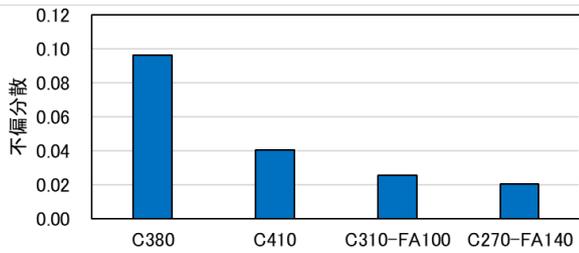


図-7 各配合における粗骨材量比率の不偏分散

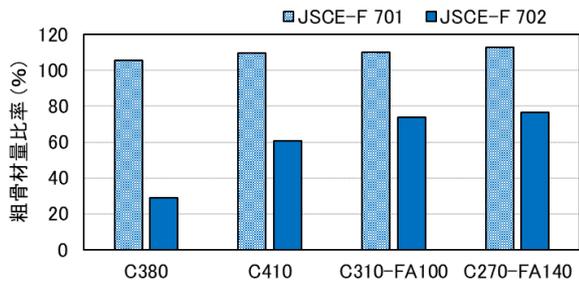


図-8 各評価試験の粗骨材量比率

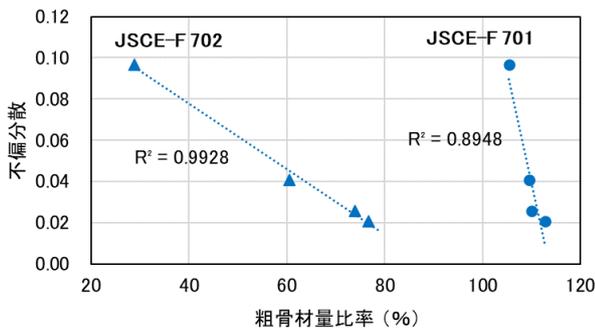


図-9 各試験の粗骨材量比率と不偏分散の関係

粗骨材量比率の不偏分散を示す。不偏分散の値は C380が最も大きく、C310-FA100および C270-FA140は C410よりも小さい値となり、フライアッシュの置換量が大きいほど小さくなる傾向にあった。

図-8に JSCE-F701および JSCE-F702の各試験から算出された、各配合における粗骨材量比率 (JSCE-F701は B 室上部の値) を示す。JSCE-F701においてはあまり明確ではなかったものの、いずれの粗骨材容積比においても C270-F140, C310-F100, C410, C380の順で大きい傾向にあり、単位結合材量が多く、フライアッシュ置換量が多いほど材料分離抵抗性が高いことが確認された。結合材量の増加あるいは密度の低いフライアッシュの使用により結合材容

積が増大し、コンクリートの粘性が増加したためと考えられる。

図-9に各試験から算出された粗骨材量比率と、圧入実験の粗骨材量比率の不偏分散の関係を示す。いずれの粗骨材量比率においても不偏分散との相関性は高く、JSCE-F702の場合は特に相関性が高いことが確認された。よって、JSCE-F702の材料分離抵抗性評価により、自己充填覆工構築システムに使用するコンクリートの均質性の推察が可能であることが示唆された。

上記の結果から、フライアッシュを使用した低炭素型自己充填コンクリートは、セメント単味よりも材料分離抵抗性および圧入後の均質性は高く、覆工の品質向上に効果的であると考えられる。

4 おわりに

本検討において確認された結果を以下にまとめる。

- (1) フライアッシュを用いた低炭素型自己充填コンクリートは、セメント量を低減させ、一般的なトンネル覆工コンクリートと同等以上の強度発現性を有することから、生産性を確保しつつ CO₂排出量を抑制することが可能であるといえる。
- (2) フライアッシュを用いた低炭素型自己充填コンクリートは、セメント単味よりも材料分離抵抗性が高く、圧入により構築される覆工の均質性は向上することから、フライアッシュの置換は覆工コンクリートの品質向上に効果的であると考えられる。

参考文献

- 1) 弘光太郎, 藤原正佑, 小山広光, 小野知義: 自己充填コンクリートの圧入によるトンネル覆工構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.334-339, 2023.7
- 2) 小山広光, 弘光太郎, 村松賢一, 橋本紳一郎: センترل下端からの圧入によるトンネル覆工の省力化—国道418号 足瀬トンネル—, コンクリート工学, Vol.61, No.10, pp.910-915, 2023.10
- 3) 土木学会: 2023年制定コンクリート標準示方書 [施工編: 施工標準], pp.158-166, 2023.5
- 4) 土木学会: コンクリートの環境負荷評価 (その2), コンクリート技術シリーズ 62, pp.39-40, 2004.9
- 5) 福留和人, 石川嘉崇, 大即信明, 西田孝弘: フライアッシュを高置換したコンクリートの強度発現に及ぼす NaCl の効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.187-192, 2013.7
- 6) 土木学会: 2023年制定コンクリート標準示方書 [施工編: 目的別コンクリート], pp.246-251, 2023.5