

環境配慮型吹付けコンクリートの開発

ーフライアッシュと早強ポルトランドセメント併用配合の 品質・施工性評価ー

Development of Low-Carbon Sprayed Concrete - Evaluating the Quality and Constructability of Concrete Mixtures Incorporating Fly Ash and High-Early-Strength Portland Cement -

御器谷直子* 齋藤隆弘* Biswas Rajib Kumar* 廣中哲也**

要 旨

建設分野ではカーボンニュートラル実現に向け、コンクリートの低炭素化に向けた取り組みが進められている。著者らは、セメントの一部を産業副産物であるフライアッシュで置換し、早強ポルトランドセメントと併用することで、環境負荷の低減、初期強度および施工性の確保を両立した「環境配慮型吹付けコンクリート」の開発に取り組んでいる。一般にフライアッシュによる置換は初期強度の低下を招き、特に冬季の低温環境下ではその影響が顕著となる。そこで、本研究では早強ポルトランドセメントの速やかな水和反応を活用し、初期強度の向上を図った。また通年施工を想定し、夏季および冬季で実機吹付け試験を実施した。その結果、冬季ではトンネル支保工として必要な初期強度を確保し、夏季では懸念されるポンプ圧送性を確保した。さらに、はね返り率を低減するとともに、CO₂排出量を削減できることを確認した。

キーワード：山岳トンネル、高強度吹付けコンクリート、フライアッシュ、低炭素

1. まえがき

建設分野ではカーボンニュートラルの実現に向けて、コンクリートの低炭素化が重要な課題である。コンクリートの材料であるセメントの製造時には多量のCO₂が排出される。また、山岳トンネルの施工においては大量のコンクリートが使用される。2000 年前後にセメントの一部代替材料としてフライアッシュを利用した吹付けコンクリート（EP ショット工法）^{1) 2)}が開発された。当時、本工法は、主として産業副産物の有効利用を目的としていたが、近年ではセメント使用量の低減による CO₂ 排出量削減に資する技術として再評価されている。

一方、吹付けコンクリートの使用材料および施工条件も変化している。セメントの水和を促進する急結剤に含まれる薬剤が劇物指定され、従来技術の見直しが必要になった。さらに、ずい道等建設工事における粉じん規制は、段階的に強化されている。これらの状況を踏まえ、低粉じん化および作業環境改善の観点から、アルカリフリーの液体急結剤の適用が進んでおり、材料体系および施工条件の両面から従来技術の再検証が必要となっている。

また、トンネル支保工である吹付けコンクリートには掘削後の地山を早期に支保するため、速やかな強度発現が求められる。一方でセメントの一部をフライアッシュで置換することで初期強度の発現性の低下が懸念される。特にフライアッシュの反応性が低下する低温環境下ではその影響が顕著となる。

そこで本研究では、フライアッシュを活用した低炭素化とトンネル支保工として必要な初期強度の確保を両立させることを目的として、早強ポルトランドセメントを併用した「環境配慮型吹付けコンクリート」を考案した。また、当該配合の通年施工性を確認するため、夏季および冬季に実機吹付け試験を実施し、フレッシュ性状、初期強度、圧縮強度、はね返り率を評価した。さらに、CO₂ 排出量についても整理し、本配合の適用可能性を検討した。

2. フライアッシュと早強ポルトランドセメントの併用効果

2.1 セメントの水和反応に及ぼす効果

フライアッシュは、シリカ（SiO₂）とアルミナ

* 技術本部技術研究所土木研究グループ ** 技術本部技術研究所

(Al_2O_3) を主成分とする混和材であり、セメントの水和反応によって生成した水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) と反応して、カルシウムシリケート水和物 (C-S-H) を生成する。これはポゾラン反応と呼ばれ、反応速度が緩やかなため、長期的に硬化体組織の緻密化が図られ、強度が増進する。一方、セメントの一部をフライアッシュで置換した場合、セメントの反応量が少ないこと、およびフライアッシュの反応速度が緩やかであることから、初期強度が低下しやすい。特に、低温環境下では、セメントおよびフライアッシュの反応性が低下するため、その影響が顕著となる。これに対し、初期強度の発現に寄与するケイ酸三カルシウム (C_3S) の含有量が多い早強ポルトランドセメントを併用することで、 C_3S による水合反応が速やかに進行し、C-S-H や $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成が促進されるため、初期強度を補完できる可能性がある。

2.2 フライアッシュの物理的効果

吹付けコンクリートに着目すると、フライアッシュはセメントと比較して密度が小さく、単位容積あたりの粉体量およびペースト量を増加させるため、粘性が増加する。粘性の増加は、吹付け時の付着性を高め、はね返り率の低減に有効であると考えられる。

3. 実機吹付け試験概要

3.1 試験条件

環境配慮型吹付けコンクリートの通年における施工性および強度特性を確認するため、夏季および冬季で実機吹付け試験を実施した。試験ケースは、試験温度、フライアッシュの置換率およびセメントの種類をパラメータとして設定した。試験温度は、夏季 (約 30°C) および冬季 (約 10°C) の2条件とした。

3.2 使用材料および配合

本試験で使用した材料を表-1に示す。結合材には、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントおよびフライアッシュを使用した。細骨材は、夏季試験では糸魚川産姫川水系砂 (S1) を使用した。冬季試験では夏季試験で使用した細骨材を確保することが困難であったため、妙高市濁川水系砂 (S2) に変更した。なお、冬季試験では、細骨材の変更に伴いコンクリートのフレッシュ性状を調整するため、夏季試験とは異なる高性能減水剤を使用した。急結剤には、近年の作業環境改善の動向を踏まえ、粉体助剤 (AF2) 併用型のアルカリ

フリーの酸性液体急結剤 (AF1) を用いた。

各フライアッシュの密度、比表面積、化学成分、強熱減量等の物性を表-2に示す。フライアッシュには、同じ発電所産のコンクリート用フライアッシュ JIS II 種相当品 (FA1、FA2) を使用した。

示方配合を表-3に示す。示方配合は、高強度吹付けコンクリートの標準的な配合を参考に、水結合材比 42%、単位結合材量 $450\text{kg}/\text{m}^3$ 、液体急結剤添加率 7%および粉体助剤添加率 5%の一定とし、スランプの目標値は、フライアッシュによる粘性の増加を考慮して $22\pm 2\text{cm}$ とした。目標スランプを満足するように、夏季試験および冬季試験の使用細骨材の違いに応じて細骨材率ならびに高性能減水剤の種類および添加率を調整した。フライアッシュ置換率およびセメントの種類は、室内試験における急結剤添加前のコンクリート (以下、ベースコンクリート) の圧縮強度試験結果に基づいて決定した。

表-1 使用材料

材料	種類	記号	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	N	密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3320\text{cm}^2/\text{g}$
	早強ポルトランドセメント	H	密度 $3.14\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $4510\text{cm}^2/\text{g}$
フライアッシュ	JIS 灰 II 種	FA1	密度 $2.28\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3540\text{cm}^2/\text{g}$
		FA2	密度 $2.23\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3950\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	糸魚川産姫川水系砂	S1	表乾密度 $2.61\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率 2.75 吸水率 1.97%
	妙高市濁川水系砂	S2	表乾密度 $2.57\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率 2.89 吸水率 2.51%
粗骨材	糸魚川産6号碎石	G	表乾密度 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率 5.95 吸水率 1.46%
混和剤	高性能減水剤	Ad1	ポリエチレングリコール系高分子化合物、密度 $1.04\text{g}/\text{cm}^3$
		Ad2	ポリエチレングリコール系高分子化合物 (保持系)、密度 $1.04\text{g}/\text{cm}^3$
急結剤	酸性液体急結剤	AF1	水溶性アルミニウム塩系 密度 $1.31\text{g}/\text{cm}^3$
	粉体助剤	AF2	カルシウムサルフォアルミネート系、密度 $2.94\text{g}/\text{cm}^3$

表-2 フライアッシュの物性

種類	密度 (g/cm^3)	SiO_2 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	比表面積 (cm^2/g)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)	
							28 日	91 日
JIS II 種規格値*)	1.95 以上	45.0 以上	1.0 以下	5.0 以下	2500 以上	95 以上	80 以上	90 以上
FA1	2.28	66.6	0.1 未満	2.7	3540	109	93	104
FA2	2.23	60.0	0.1	2.5	3950	108	85	99

*) コンクリート用フライアッシュ JIS A 6201

表-3 示方配合

配合名		スランプ (cm)	水結合 材比 (%)	FA 置換率 (%)	空気量 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m³)										急結剤 (kg/m³)	
							W	N	H	FA1	FA2	S1	S2	G	Ad1	Ad2	AF1	AF2
夏季 試験	N100FA0S	22±2	42	0	0	60	189	450	—	—	—	1047	—	711	5.9	—	31.5	22.5
	N80FA20S			20			189	360	—	90	—	1030	—	700	4.5	—	31.5	22.5
	H70FA30S			30			189	—	315	135	—	1020	—	693	5.9	—	31.5	22.5
冬季 試験	N100FA0W			0	3.0	55	189	450	—	—	—	—	902	766	—	7.65	31.5	22.5
	N80FA20W			20			189	360	—	—	90	—	887	750	—	7.65	31.5	22.5
	H70FA30W			30			189	—	315	—	135	—	876	742	—	7.65	31.5	22.5

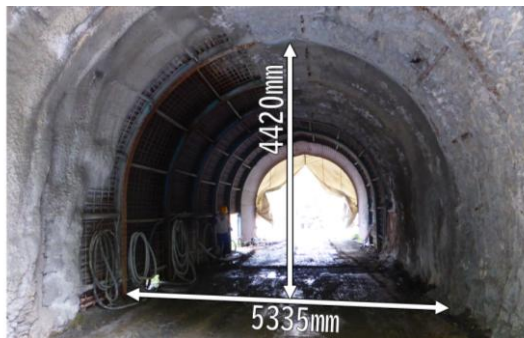
3.3 実機吹付け試験概要

吹付け試験は、所定の試験条件下で実機吹付け設備を用いて実施した。写真－１に模擬トンネル（高さ 4.4m、内空幅 5.3m）の坑内状況を、図－１に吹付け設備を示す。ベースコンクリートはレディーミクストコンクリート工場で製造し、アジテータ車で試験場所に運搬した。到着後、フレッシュ性状試験を実施し、圧縮強度試験用の供試体采取了。ベースコンクリートは吐出量 $10\text{m}^3/\text{h}$ で距離 15m をポンプ圧送し、吹付け機先端のノズル手前において圧縮空気により液体急結剤および粉体助剤を添加した後、トンネルの半断面に吹き付けた。

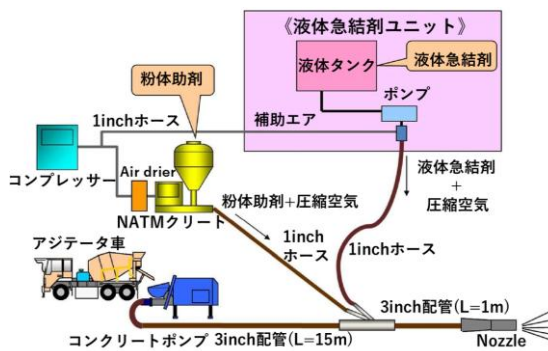
3.4 試験項目および試験方法

表－４に試験項目および試験方法を示す。本試験の試験項目および試験材齢は、高速道路会社の施工管理基準における高強度吹付けコンクリートの品質管理項目および強度規定値を参考³⁾に設定した。同基準では、高強度吹付けコンクリートの強度として、材齢 3 時間で $2\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、材齢 24 時間で $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、材齢 28 日で $36\text{N}/\text{mm}^2$ 以上と規定されている。本試験では、吹付け前のベースコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度に加え、吹付け後の初期強度、圧縮強度およびはね返り率を試験項目とし、規定値との比較を行った。また、材齢 7 日および 91 日の圧縮強度を測定し、強度発現性および長期強度の確認を行った。

フレッシュ性状試験としては、スランプ、空気量およびコンクリート温度を測定した。



写真－１ 模擬トンネルの坑内



図－１ 吹付け設備

初期強度試験では、吹付けコンクリートを幅 50cm、長さ 50cm、高さ 30cm のコア用型枠に吹き付け、測定材齢（3 時間、24 時間）まで現場養生した後、空気圧式ピン貫入試験を実施し、推定圧縮強度を算出した。材齢 7 日以降の圧縮強度試験では、ベースコンクリートは直径 10cm、高さ 20cm の円柱型枠に打ち込み、吹付けコンクリートはコア用型枠に吹付けた。吹付けコンクリートについては、コア採取が可能となる強度を確保するため、材齢 5 日まで現場養生した後にコアを採取した。ベースコンクリートについても、吹付けコンクリートと同一の温度履歴となるよう、材齢 5 日まで現場養生した。その後、ベースコンクリートおよび吹付けコンクリートは、夏季試験では測定材齢まで標準養生（ 20°C 水中）とし、冬季試験では測定材齢まで現場封緘養生を継続した。なお、ベースコンクリートおよび吹付けコンクリートの圧縮強度試験は材齢 7 日、28 日、91 日で実施した。

表－４ 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
フレッシュ性状試験	スランプ試験	・ JIS A 1101 「コンクリートのスランプ試験方法」に準拠 ・ 目標値： $22 \pm 2\text{cm}$
	空気量試験	・ JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）」に準拠
	温度	・ JIS A 1156 「コンクリートの温度測定方法」に準拠
強度試験	初期強度	・ NEXCO 試験法 726 「空気圧式ピン貫入試験」に準拠 ・ 測定材齢：3 時間、24 時間 ・ 養生条件：現場養生 ・ 規定値：3 時間 $2\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、24 時間 $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
	ベースコンクリートの圧縮強度	・ JIS A 1132 「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠 ・ JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠 ・ 供試体寸法： $\Phi 100\text{mm} \times h 200\text{mm}$ ・ 測定材齢：7、28、91 日 ・ 養生条件：円柱供試体を作製し、コア強度試験用供試体と同一条件で養生。夏季は 5 日間現場養生後に標準養生。冬季は 5 日間現場養生後も現場養生（材齢 28 日までの平均温度 6°C ）。
	吹付けコンクリートの圧縮強度	・ JSCE-F 561 「吹付けコンクリート（モルタル）の圧縮強度試験用供試体の作り方（案）」に準拠し、パネル型枠に吹き付けて作製 ・ JIS A 1107 「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠 ・ コア寸法： $\Phi 50\text{mm} \times h 100\text{mm}$ ・ 測定材齢：7、28、91 日 ・ 養生条件：夏季は吹付け後、5 日間現場養生、その後コアリングし、標準養生（ 20°C 水中）。冬季は吹付け後、5 日間現場養生。その後コアリングし、現場養生（材齢 28 日までの平均温度 6°C ）。 ・ 規定値：28 日 $36\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
コンクリートの温度履歴測定		・ 吹付けたコンクリートおよびベースコンクリートの温度を測定
はね返り率試験		・ 土木学会基準 JSCE-F563 「吹付けコンクリート（モルタル）のはね返り率試験方法『実構造物による吹付け』」に準拠

冬季試験ではコンクリートの温度履歴の測定を実施した。ベースコンクリートおよび吹付けコンクリートの温度履歴は、幅 50cm、長さ 50cm、高さ 30cm のコア用型枠の中心部に熱電対を設置して計測した。養生は、初期強度試験の試験体と同条件で行った。

はね返り率試験では、トンネルの床に 1 辺 5m 程度のシートを敷き、トンネル半断面に幅 2m で吹き付けた。吹付け終了後、シート上にはね返った材料を集めて質量を測定し、その質量を吹付けに用いたコンクリートの総質量で除して百分率で表し、はね返り率を算出した。

4. 試験結果

4.1 フレッシュ性状試験

ベースコンクリートのフレッシュ性状試験の結果を表 5 に示す。いずれの配合もスランプ 22±2cm の範囲に収まっていることを確認した。コンクリート温度は、夏季 30～33℃、冬季 11～13℃、外気温は、夏季 28～33℃、冬季 8～16℃であり、それぞれの季節条件を反映して実施できた。高性能減水剤を適切に調整することで、フライアッシュの置換率やセメントの種類によらず、安定したフレッシュ性状を確保できた。また、圧送時に顕著な脈動や閉塞が見られなかったことから、通年で安定した圧送性を有することを確認した。

4.2 強度試験

a. 初期強度試験

図 2 に夏季および冬季における吹付けコンクリートの初期強度試験結果を示す。冬季の材齢 3 時間から材齢 24 時間において、普通ポルトランドセメントをフライアッシュで 20%置換した N80FA20W は、他の配合と比較してやや強度が低下した。これは、フライアッシュ置換に伴うセメント量の減少により初期の水和反応が低下するとともに、低温環境と材齢初期においてフライアッシュの反応が十分に進行しないためと考えられる。一方で、フライアッシュ置換率 30%の H70FA30W は冬季においても置換なしの N100FA0W と同等の強度を発現した。早強ポルトランドセメントと急結剤により、フライアッシュ置換と低温による反応速度の低下を効果的に補完したと考えられる。これらの結果から、すべての配合で高強度吹付けコンクリートの初期強度の規定値を満たし、掘削直後の地山の安定に必要な支保としての性能を有することを確認した。

b. 圧縮強度

図 3 に夏季および冬季における吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。いずれの配合も冬季に比べて、夏季の方が圧縮強度が大きいことから、温度依存性があり、フライアッシュの置換率が高い配合ほどその影響が顕著であった。夏季環境下では、すべての配合において、高強度吹付けコンクリートの材齢 28 日圧縮強度

の規定値 36 N/mm²を満足した。一方、冬季環境下における H70FA30W では、低温によるフライアッシュの反応性低下の影響により、材齢 28 日圧縮強度は 32.3 N/mm²となり、規定値をわずかに下回った。しかしながら、材齢 91 日では、材齢 28 日から 91 日までの強度増加率が約 1.2 倍となり、39.6N/mm²の圧縮強度が得られたことから、長期的な強度発現が確認された。これは、

表 5 ベースコンクリートのフレッシュ性状試験結果

	配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)	外気温 (℃)
夏季 試験	N100FA0S	23.5	5.9	31	30
	N80FA20S	22.5	2.9	33	33
	H70FA30S	24.0	1.6	30	28
冬季 試験	N100FA0W	23.0	1.2	12	13
	N80FA20W	21.0	1.0	13	16
	H70FA30W	20.0	1.3	11	8

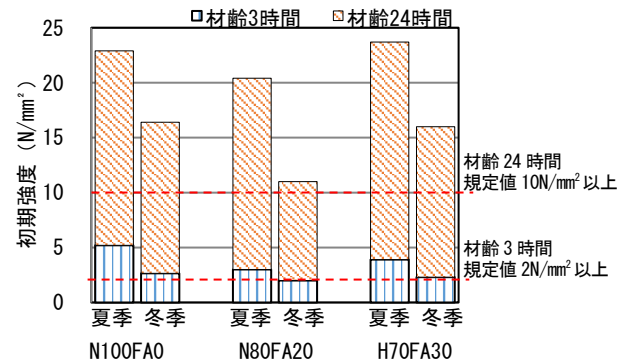


図 2 夏季および冬季の初期強度試験結果

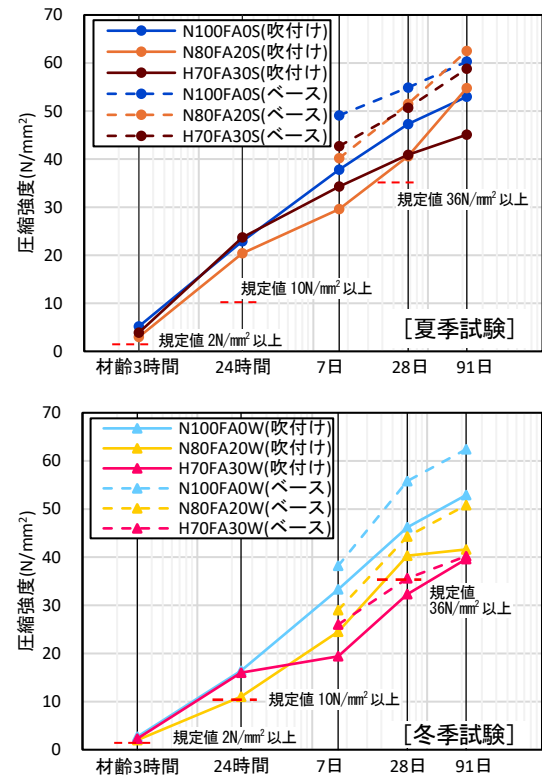


図 3 夏季および冬季の強度試験結果

フライアッシュのボゾラン反応が継続することにより、低温環境下においても長期的に組織の緻密化が進行したためと考えられる。また、冬季環境下において高強度吹付けコンクリートの材齢 28 日圧縮強度の規定値を満足するためには、ベースコンクリートの水結合材比の低減、単位セメント量の増加および単位水量の低減等により強度発現性を向上させた冬季配合の採用が有効であると考えられる。

4.3 冬季の温度履歴と積算温度による初期強度評価

写真-2 に冬季におけるコンクリートの温度履歴の測定状況を、図-4 に吹付けコンクリートの温度履歴を示す。いずれの配合でも急結剤の添加により、吹付け直後から 10℃程度の急激な温度上昇が確認された。普通ポルトランドセメントを使用した N80FA20W の吹付けコンクリートは、ピーク温度に到達後、温度を保持することなく低下した。一方、早強ポルトランドセメントを使用した H70FA30W は、試験時の気温の影響により、普通ポルトランドセメントを使用した N100FA0W および N80FA20W より吹付け前のコンクリート温度が約 2℃低かった。吹付け後は他の配合に比べて高温状態を長時間維持した。これは、早強ポルトランドセメントの速やかな水和反応と急結剤の併用によって発熱が維持されたためと推察される。

図-5 に圧縮強度と積算温度の関係を示す。コンクリートの積算温度は式(1)⁴⁾により算出した。任意の定数 α は、コンクリートの吹付け前のコンクリート温度より -11 とした。

$$M = \Sigma (\theta + \alpha) \cdot t \quad \text{式(1)}$$

ここに、M：積算温度 (°C・h)、t：時間 (h)、

θ ：コンクリート温度 (°C)、 α ：任意の定数 (-11)

積算温度と圧縮強度の関係から、圧縮強度を推定する回帰式を式(2)に示す。

$$\sigma(t) = 0.1281M - 2.086 \quad \text{式(2)}$$

ここに、 $\sigma(t)$ ：時間 t での圧縮強度 (N/mm²)

本式における決定係数 R^2 は 0.99 であり、良好な相関関係が得られた。吹付けコンクリートにおいても、積算温度を用いることで、配合条件が異なる場合であっても、強度発現を定量的かつ高精度に評価できることを確認した。したがって、積算温度による評価は低温環境下における初期強度管理の指標として有効であると考えられる。

4.4 はね返り率試験

はね返り率試験の実施状況を写真-3、各配合のはね返り率試験結果を図-6に示す。粉体急結剤を用いた一般的な吹付けコンクリートのはね返り率は 20～30%⁵⁾ である。一方、セメントのみの配合 (N100FA0S、N100FA0W) のはね返り率は 14.4～15.3% となり、液体急結剤を使用することで、はね返りが低減したといえる。フライアッシュの置換率が大きいほど、はね返り率は小さくなり、夏季の H70FA30S で 10.8%、冬季の



写真-2 温度履歴の測定状況

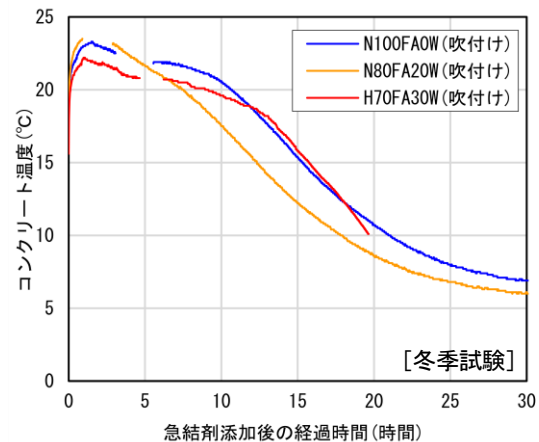


図-4 冬季の吹付けコンクリートの温度履歴

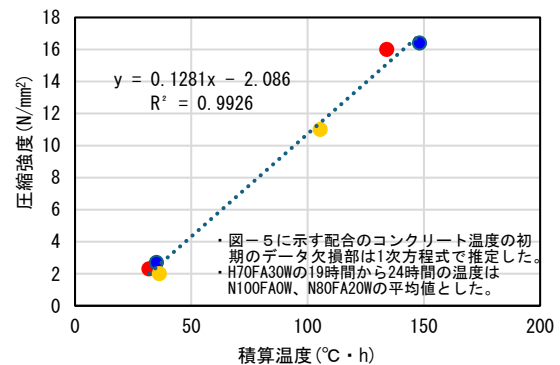


図-5 圧縮強度と積算温度の関係



写真-3 はね返り試験状況

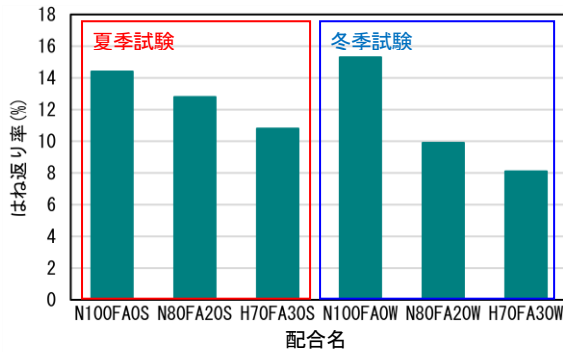


図-6 はね返り率試験結果

H70FA30W で 8.1%まで低減した。これは、フライアッシュの使用により単位体積あたりの粉体量およびペースト量が増加し、吹付け時の付着性が向上したためと考えられる。

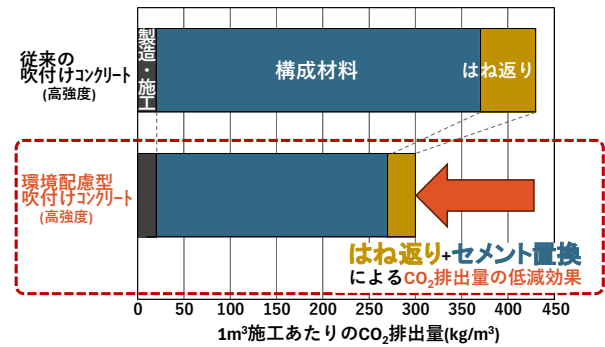
5. CO₂ 排出量削減効果

はね返りによる材料ロスを考慮したコンクリート 1m³あたりの CO₂ 排出量を図-7 に示す。H70FA30S 配合について、各種材料のインベントリデータ⁹⁾と消費燃料をもとに、CO₂ 排出量を算出した。セメントのみの配合 (N100FA0S) と比較して、フライアッシュ 30%置換配合 (H70FA30S) では、吹付け前の 1m³ あたりで CO₂ 排出量を約 100kg/m³削減できた。さらに出来形として 1m³を確保するために必要な吹付け量は、N100FA0S では 1.2m³、H70FA30S では 1.1m³の吹付けが必要であることから、出来形 1m³あたりの CO₂排出量で比較すると、約 130kg/m³の削減となった。

6. まとめ

本研究では、セメントの一部をフライアッシュで置換し早強ポルトランドセメントを併用した環境配慮型吹付けコンクリートを用いて、模擬トンネルでの実機吹付け試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- i. 低温環境下では、セメントに早強ポルトランドセメントを使用することで初期強度の不足を補完でき、冬季においてもトンネル支保工として必要な初期強度を確保できた
- ii. 圧縮強度試験の結果、フライアッシュの置換率を高めた配合においても材齢の経過に伴う長期的な強度増進が確認された
- iii. 吹付けコンクリートの温度履歴から、早強ポルトランドセメントと急結剤の併用により発熱が促進・維持されることを確認し、積算温度と初期強度の間には高い相関が認められた
- iv. はね返り率については、フライアッシュの置換率

図-7 コンクリート 1m³あたりの CO₂ 排出量

が増加するに伴い低減する傾向が認められ、早強ポルトランドセメント使用のフライアッシュ置換率 30%配合 (H70FA30) では夏季 10%、冬季 8%程度まで低減できた

- v. CO₂ 排出量の試算結果より、本配合はセメント使用量の削減およびはね返り率低減の効果により、従来配合と比較して約 30%の CO₂ 排出量削減が可能であることを確認した

7. あとがき

本研究では、フライアッシュと早強ポルトランドセメントを併用した環境配慮型吹付けコンクリートは気温条件に左右されず安定した施工性と必要な強度性能を確保できるとともに、トンネル施工における環境負荷低減に有効であることを確認した。今後は、現場適用に向けて、施工条件に応じた施工性および品質管理方法について検討を進める予定である。最後に、本試験の実施にご協力いただいた関係各位に感謝する。

【参考文献】

- 1) 澄川 健、寺本丈夫、斉藤 直、樋野和俊、松田敦夫、「石炭灰原粉を用いたトンネル吹付けコンクリートの試験施工」、土木学会第 54 回年次学術講演会、V-488、1999.9
- 2) 西田啓二、松田敦夫、斉藤 直、安野孝生、村田和郎、井上直樹、西江寛次、清水顕誠、「3 種類の石炭灰原粉を用いた湿式吹付けコンクリートの特性」、土木学会第 57 回年次学術講演会、V-489、2002.9
- 3) 東日本、中日本、西日本高速道路会社、「トンネル施工管理要領」、2024
- 4) 土木学会、「2023 年制定コンクリート標準示方書 [施工編：施工基準]」、p.144、2023
- 5) 土木学会、「121 コンクリートライブラリー吹付けコンクリート指針 (案) [トンネル編]」、p.31、2005
- 6) 土木学会、「コンクリート技術シリーズ コンクリートの環境負荷評価 (その 2)」、p.39、2004