

7. 高炉セメントにフライアッシュを 30%混合した環境配慮型コンクリートの検討

Consideration of environmentally friendly concrete with 30% fly ash mixed into blast furnace cement

新田 稔*¹ 山崎 順二*²

要 旨

2050 年のカーボンニュートラルの達成に向けて、高炉セメント B 種にフライアッシュをセメント質量の内割りで 20%混合した環境配慮型コンクリートの実用化を大阪兵庫生コンクリート工業組合リサイクル検討 WG と当社の技術連携により各種の実験を 2020 年から実施し、同組合の 30 工場が標準化している。今後のさらなる環境性への適用を視野に、フライアッシュをセメント質量の内割りで 30%混合したコンクリートの検討を行った。本報では、この検討において実施した室内実験の結果について述べる。

キーワード：環境配慮型コンクリート／高炉セメント B 種／フライアッシュ／低炭素性／資源循環性／CO₂排出量

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラルの達成に向けて、高炉セメント B 種にフライアッシュ II 種（以下、FA という）をセメントの内割りで 20%混合した環境配慮型コンクリート（以下、BB+FA20%という）の実用化を大阪兵庫生コンクリート工業組合リサイクル検討 WG と当社の技術連携により各種の実験を 2020 年から実施し、同組合の 30 工場が標準化している。

建築分野では、2022 年に日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説「JASS5 鉄筋コンクリート工事」¹⁾が改正され、構造体および部位・部材の要求性能として環境性が追加された。この環境性は、資源循環性、低炭素性および環境安全性の 3 つで構成されており、この中でも資源循環性および低炭素性は、コンクリートに使用する構成材料ごとの種類やその組合せによって達成される性能を 4 つの等級に分けている。今後、コンクリートの生産者または施工者は、設計図書で要求された環境性（等級）に応じた環境配慮型コンクリートを製造・施工する必要性が生じる事と考えられる。

このような背景の中、さらなる環境性への適用を視野に、フライアッシュ II 種をセメント質量の内割りで 30%混合したコンクリート（以下、BB+FA30%という）の検討を行った。

本報では、この検討において実施した室内実験の結果について報告する。

2. 使用材料

室内実験における使用材料を表-1 に示す。セメント、練混ぜ水および骨材は、室内実験を実施した工場で標準化しているものとした。FA は、JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）の規格値を満足した舞鶴産のフライアッシュ II 種を使用した。

また、化学混和剤はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤とし、AE 剤は一般的なコンクリートに使用されているものを使用した。

3. コンクリートの調査

室内実験の調査を表-2 に示す。コンクリートの調査は、No.1～7 を FA 置換率 0%のベースコンクリート、No.8～10 は BB+FA20%調査とし、No.11～13 は FA 置換率を 30%とした。目標スランプは、No.1～2 を 15±2.5cm、No.3～13 を 18±2.5cm とし、目標空気量は全ての調査において 4.5±1.5%とした。

また、単位水量は 175kg/m³一定とし、単位粗骨材かさ容積は室内実験を実施した工場の社内規格を基に設定した。化学混和剤は、工場の実績を参考に良好なフレッシュコンクリートの性状が得られるように適宜調整することとした。

4. 試験項目および試験方法

室内実験で行ったフレッシュコンクリートと硬化コンクリートの試験項目および試験方法を表-3 に示す。室内実験は、JIS A 1138（試験室におけるコンクリートの作り方）に準じて行い、各種試験項目は JIS などの試験方法に準拠して実施した。

スランプおよび空気量試験の許容差は、JIS A 5308 の規格値により合否判定を行った。

*¹ 東京本店建築部 品質管理室 兼 技術研究所 建築材料研究グループ

*² 技術研究所長

表-1 使用材料

記号	名称	物性など
C	高炉セメント B 種	密度 3.04g/cm ³
FA	フライアッシュ II 種	密度 2.25g/cm ³
W	工業用水	—
S1 ^{*1}	砕砂	表乾密度 2.58g/cm ³
S2 ^{*1}	石灰石砕砂	表乾密度 2.69g/cm ³
G1 ^{*2}	砕石 2005	表乾密度 2.62g/cm ³
G2 ^{*2}	石灰石砕石 2005	表乾密度 2.70g/cm ³
SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物
AE	空気量調整剤	アニオン系界面活性剤

*1 S1:S2=60:40 (容積比)

*2 G1:G2=50:50 (容積比)

表-3 各種試験項目および試験方法

試験項目		試験方法	備考
フレッシュ コンクリート	スランプ	JIS A 1101	----
	空気量	JIS A 1128	----
	コンクリート 温度	JIS A 1156	----
	塩化物含有量	JASS 5T-502	0.3kg/m ³ 以下
	単位容積質量	JIS A 1116	----
	単位水量	ZKT-210	175±10 kg/m ³ 以下
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	----
	長さ変化率	JIS A 1129-2	----
	中性化	JIS A 1153	----
	凍結融解	JIS A 1148(A 法)	----

表-2 コンクリートの調合

No	W/C (%)	W/B (%)	目標 スランプ (cm)	FA 置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								
						C	FA	W	S1	S2	G1	G2	SP	AE
1	72	--	15	0%	51.3	243	--	175	556	386	447	460	2.55	2.0A
2	63	--			49.8	278	--	175	531	369	453	467	2.92	1.5A
3	57	--			48.5	307	--	175	509	354	459	473	3.01	2.0A
4	55	--			48.0	318	--	175	502	349	460	474	2.99	3.5A
5	50	--			46.8	350	--	175	481	335	464	478	3.01	4.0A
6	44	--			44.8	398	--	175	450	313	469	483	3.26	4.5A
7	40	--			43.4	438	--	175	427	297	472	486	3.64	6.0A
8	63	50	18	20%	46.1	280	70	175	469	326	464	478	3.01	22A
9	55	44			44.0	318	80	175	435	302	469	483	3.26	24A
10	50	40			42.5	350	88	175	412	286	472	486	3.64	29A
11	72	50		30%	45.7	245	105	175	461	321	464	473	3.01	32A
12	63	44			43.6	279	119	175	429	298	469	483	3.26	36A
13	57	40			42.0	307	131	175	404	281	472	486	3.64	43A

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

	W/C (%)	W/B (%)	目標 スランプ (cm)	FA 置換率 (%)	スランプ (cm)	スランプ フロー(cm)	空気量 (%)	CT (℃)	塩化物 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積質量 (kg/m ³)
No											
1	72	--	15	0	16.0	27.0	5.0	25	0.03	178.0	2.271
2	63	--			15.0	25.0	4.2	25	0.04	177.5	2.280
3	57	--			17.0	28.5	4.1	25	0.04	177.1	2.301
4	55	--	18.0		29.5	4.9	25	0.04	176.1	2.284	
5	50	--	18.0		29.5	5.0	25	0.03	176.9	2.279	
6	44	--	17.0		27.0	4.3	25	0.03	176.8	2.308	
7	40	--	18		20	17.0	27.5	4.0	26	0.03	179.0
8	63	50		18.5		34.0	5.3	26	0.02	167.2	2.244
9	55	44		17.5		29.0	4.8	26	0.03	172.5	2.261
10	50	40		17.0		27.0	4.9	26	0.03	170.4	2.264
11	72	50	30	30	19.0	33.5	4.8	25	0.02	170.4	2.249
12	63	44			16.5	27.0	4.9	25	0.03	174.2	2.243
13	57	40			19.5	33.5	5.6	26	0.03	176.5	2.233

5. 実験結果と考察

5. 1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4 に示す。スランプは、FA の置換率が変化しても大きく変化しないことが分かる。空気量については、FA の置換率が大きくなるに従って空気量調整剤の添加率も大きくなる傾向が認められた。

なお、適切な添加率で空気量調整剤を使用することにより、目標空気量は調整することができる。

また、その他のフレッシュコンクリートの試験も規格値を

満足する結果であった。

5. 2 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度

FA 置換率別の結合材水比(B/W)と圧縮強度の関係を図-1 に示す。また、BB+FA20%およびBB+FA30%と FA 置換率 0%における同一水セメント比(W/C)および同一水結合材比(W/B)との圧縮強度の関係を図-2 に示す。材齢 28 日では、圧縮強度は異なるが FA 置換率に関わらず同様の傾きを示したが材齢 56 日では異なる傾きを示し、B/W が大きいほど強度増進が小さ

くなった。この傾向は、図-2 においても同様であり本実験においては、FA のポズラン反応による材齢 28 日以降の長期の強度増進が小さく、FA が圧縮強度に寄与していないといった傾向がみられた。この傾向の原因は定かではないが、ポズラン反応を高めるためにアルカリ刺激効果のあるものを添加するなど今後の検討が必要と考えられる。

(2) 中性化

材齢と促進中性化深さの関係を図-3 に示す。中性化深さと促進期間には直線的な関係が認められ、BB と BB+FA20%および BB+FA30%の調査の中性化深さを比較すると、水結合材比が大きいほど、FA の置換率が高いほど、コンクリートの中性化の進行が早くなる傾向が認められた。

(3) 長さ変化

測定材齢と長さ変化率の関係を図-4 に示す。長さ変化率は、FA 置換率および水結合材比に係わらず、概ね $490 \sim 560 \times 10^{-6}$ であった。

(4) 凍結融解抵抗性

FA 置換率 20%および 30%の凍結融解サイクルにおける相対動弾性係数を図-5 に示す。相対動弾性係数は、W/B50%(BB+FA20%)が 70%を下回ったが、それ以外は FA 置換率に係わらず、相対動弾性係数が 80%以上であった。

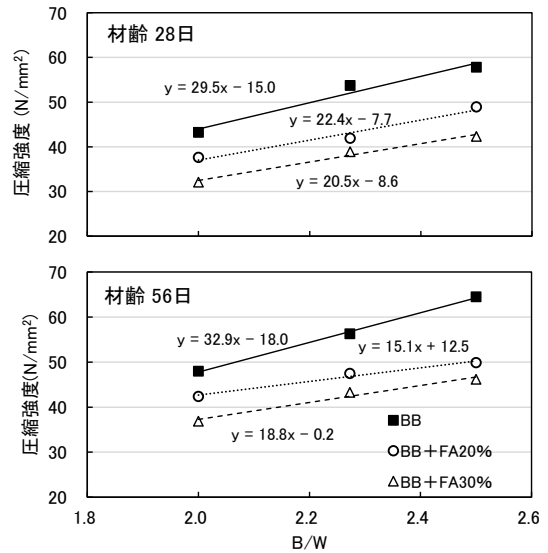


図-1 結合材水比と圧縮強度の関係

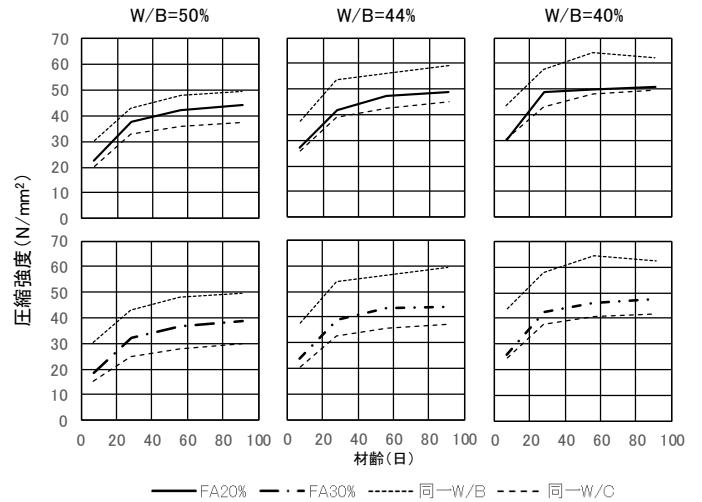


図-2 BB+FA20%・30%と

同一 W/C および W/B ベースコンクリートの圧縮強度との関係

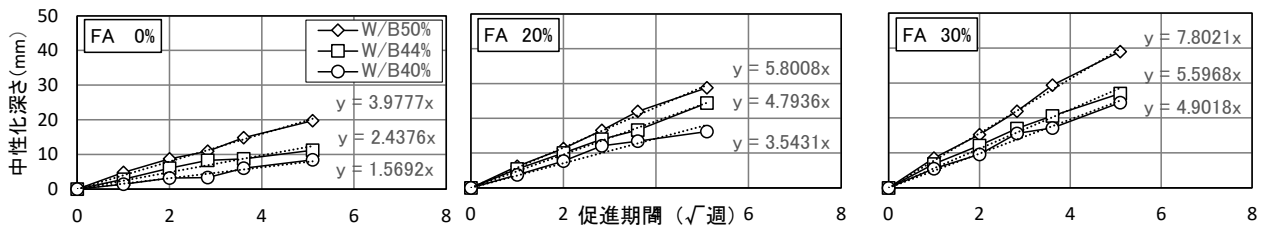


図-3 材齢と促進中性化深さ

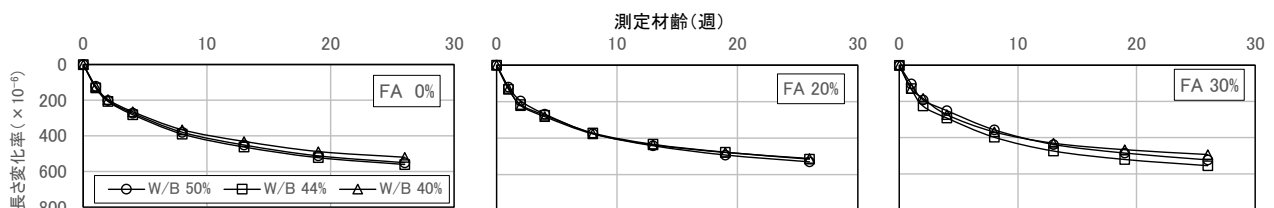


図-4 測定材齢と長さ変化率の関係

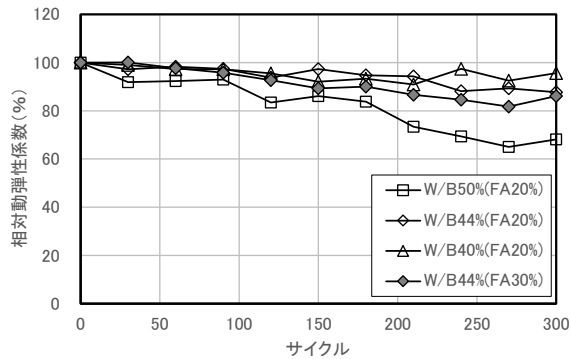


図-5 FA 置換率と相対動弾性係数

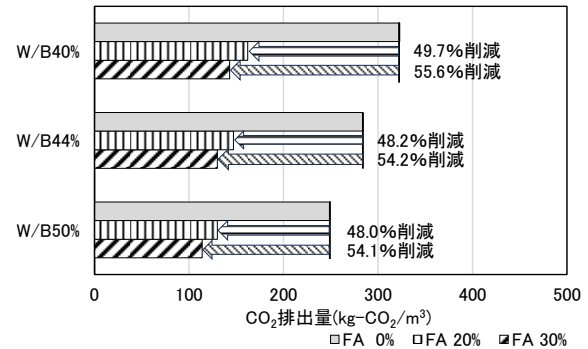


図-6 FA 置換率と CO₂ 排出量

6. CO₂ 排出量・削減率

室内実験で、実施した No.8～13 の FA 置換率 20%～30% の調合における CO₂ 排出量と BB+FA20% の同一 W/B に相当する呼び強度のベースコンクリートにおける CO₂ 排出量の関係を図-6 に示す。

なお、CO₂ 排出量の比較用ベースコンクリートは、大阪広域生コンクリート協同組合の普通ポルランドセメントを使用した標準配合とした。

CO₂ 排出量を試算したインベントリデータ^{2), 3)}は、普通ポルランドセメントでは 788.6(kg-CO₂/t)、高炉セメント B 種では 458.1(kg-CO₂/t)、フライアッシュでは 19.6(kg-CO₂/t) として試算した。また、結合材以外の使用材料の CO₂ 排出量は小さいため、今回は結合材のみの CO₂ 排出量で比較を行った。ベースコンクリートの CO₂ 排出量に対して、BB+FA20% の CO₂ 削減率は 48%～49% 程度、BB+FA30% の CO₂ 削減率は約 54%～55% 程度となることが分かった。

7. まとめ

- (1) スランプは、FA 置換率が 0～30% と変化しても性状は大きく変わらないことが分かった。
- (2) 空気量については、FA の置換率が大きくなるに従って空気量調整剤の添加率も大きくなる傾向が認められた。なお、適切な添加率で空気量調整剤を使用することにより、目標空気量を調整できると考える。
- (3) 圧縮強度は、BB+FA20% と BB+FA30% とともに圧縮強度は異なるが材齢 28 日目までは BB と同様の傾きとなったが、材齢 56 日目では、BB+FA20% および BB+FA30% と BB の傾きが異なることが分かった。本実験においては、FA のポズラン反応による材齢 28 日以降の長期強度の増進が小さく、FA が強度に寄与していないといった傾向がみられたため、圧縮強度に FA が寄与するには、ポズラン反応を活性化するためにアルカリ刺激効果あるものを添加する必要があると思われる。

(4) 中性化は、中性化深さと促進期間には直線的な関係が認められ、BB と BB+FA20% および BB+FA30% の調合の中性化深さを比較すると、水結合材比が大きいほど、FA の置換率が大きいほど、コンクリートの中性化の進行が早くなる傾向が認められた。

(5) 長さ変化率は、FA 置換率および水結合材比に係わず、概ね $490 \sim 560 \times 10^{-6}$ であった。

(6) 凍結融解抵抗性は、相対動弾性係数が W/B50% (BB+FA20%) は 70% を下回ったが、それ以外は FA 置換率に係わず、相対動弾性係数が 80% 以上であった。

(7) CO₂ 排出量・削減率は、BB+FA20% で 48%～49% 程度、BB+FA30% で約 54%～55% 程度となることが分かった。

【謝 辞】 本研究の実施にあたり、大阪兵庫生コンクリート工業組合リサイクル検討ワーキンググループおよび実験工場として参画いただきました工場の皆様のご協力を頂きました。関係各位にはここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，pp.178-183，221-230，2022.11
- 2) セメント協会：セメントの LCI データの概要 2023
- 3) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，pp.61，2024.03