

# 高炉セメント B 種にフライアッシュ II 種を混合した 低炭素型コンクリートの基礎物性の検討

○中尾 陽一\*1 谷村 賢一郎\*1 新田 稔\*2 山崎 順二\*2 峯 秀和\*3

**要旨：**大阪兵庫地区の生コン工場では、高炉セメント B 種にフライアッシュ II 種をセメント質量の内割りで 20%混合した低炭素型コンクリートを標準化している。今後のさらなる低炭素化を目的に、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の検討を行った。その結果、フレッシュコンクリートは一般的なコンクリートと同等の性状が得られることが分かったが、圧縮強度の発現性が遅れることや中性化が早くなる等の課題が見つかった。なお、低炭素化については、普通ポルトランドセメント使用時と比較して CO<sub>2</sub> の削減率が 55%程度となることが分かり、低炭素型コンクリートとしての適用性を見いだすことができた。

**キーワード：**低炭素型コンクリート，高炉セメント B 種，フライアッシュ II 種，圧縮強度，中性化，長さ変化，凍結融解抵抗性，二酸化炭素排出量

## 1. はじめに

大阪兵庫地区の生コン工場では、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%混合したコンクリート（以下、BB+FA20%という）の配合を標準化している。

今回、大阪兵庫生コンクリート工業組合リサイクル検討 WG では、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）の基礎物性を検討するために室内実験を実施した。

## 2. 使用材料

室内実験の使用材料を表-1 に示す。セメントおよび骨材は、工場で標準化しているものとし、練混ぜ水は工業用水とした。

化学混和剤は高性能 AE 減水剤とし、AE 剤は一般的に使用されているものを使用した。FA については、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ものを使用した。

表-1 使用材料

記号	名称	種類(商品名)	生産者・産地	備考
C	セメント	高炉セメントB種	UM社	密度3.04g/cm <sup>3</sup>
FA	混和材	フライアッシュ II 種	K社	密度2.25g/cm <sup>3</sup>
W	水	工業用水	大阪市	---
S1	細骨材	砕砂	兵庫県西島産	S1:S2=60:40
S2		石灰石砕砂	福岡県北九州産	(容積比)
G1	粗骨材	砕石2005	兵庫県西島産	G1:G2=50:50
G2		石灰石砕石2005	大分県津久見産	(容積比)
SP	化学混和剤	高性能AE減水剤	S社	---
AE		空気量調整剤	B社	---

\*1 大阪兵庫生コンクリート工業組合 リサイクル検討 WG \*2 (株)浅沼組  
\*3 (株)関電パワーテック

### 3. コンクリートの配合

室内実験の配合を表-2に示す。コンクリートの配合は, 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%配合とし, No.11~13はFA置換率を30%とした。設計スランプは, No.1~2を15cm, No.3~13を18cmとし, 設計空気量は4.5%とした。

また, 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フレッシュコンクリートの良好な性状が得られるように適宜調整することとした。

表-2 コンクリートの配合

No	W/C (%)	W/B (%)	設計スランプ (cm)	FA置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )										
						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	--			18	0%	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	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	478	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			

### 4. 試験項目および試験方法

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 等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。

### 5. フレッシュコンクリートの試験結果

表-4にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。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。また, 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る。

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。

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。

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	試験条件	
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101	設計±2.5cm
	スランプフロー	JIS A 1150	-----
	空気量	JIS A 1128	設計±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	-----
	塩化物含有量	JASS 5T-502	0.3kg/m <sup>3</sup> 以下
	単位容積質量	JIS A 1116	-----
	単位水量	ZKT-210	設計±10kg/m <sup>3</sup> 以下
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生 材齢7, 28, 56, 91日
	中性化	JIS A 1153	-----
	長さ変化	JIS A 1129-2	-----
	凍結融解	JIS A 1148(A法)	-----

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

No	W/C (%)	W/B (%)	設計スランブ (cm)	FA置換率 (%)	フレッシュコンクリートの試験結果								
					スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	CT (°C)	外気 (°C)	塩化物 (kg/m <sup>3</sup> )	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単重 (kg/m <sup>3</sup> )	
1	72	--	15	0	16.0	27.0	5.0	25	31	0.03	178.0	2.271	
2	63	--			15.0	25.0	4.2	25	31	0.04	177.5	2.280	
3	57	--			17.0	28.5	4.1	25	31	0.04	177.1	2.301	
4	55	--	18.0		29.5	4.9	25	32	0.04	176.1	2.284		
5	50	--	18.0		29.5	5.0	25	32	0.03	176.9	2.279		
6	44	--	17.0		27.0	4.3	25	32	0.03	176.8	2.308		
7	40	--	17.0		27.5	4.0	26	32	0.03	179.0	2.321		
8	63	50	18		20	18.5	34.0	5.3	26	31	0.02	167.2	2.244
9	55	44				17.5	29.0	4.8	26	31	0.03	172.5	2.261
10	50	40				17.0	27.0	4.9	26	31	0.03	170.4	2.264
11	72	50		30		19.0	33.5	4.8	25	32	0.02	170.4	2.249
12	63	44				16.5	27.0	4.9	25	32	0.03	174.2	2.243
13	57	40				19.5	33.5	5.6	26	32	0.03	176.5	2.233

6. 硬化コンクリートの試験結果

6. 1 圧縮強度

FA 置換の有無による同一セメント水比と圧縮強度の関係を図-1 に示す。また、同一結合材水比と圧縮強度の関係を図-2 に示す。同一セメント水比と同一結合材水比ともに材齢 28 日までは、BB と同様の傾き（ポルトランドセメント量の違いによる強度の差はあるが強度発現は同様の傾向）で、材齢 56 日では、BB+FA20%および BB+FA30%と BB の傾きが異なることが分かる。

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と同一水結合材比との圧

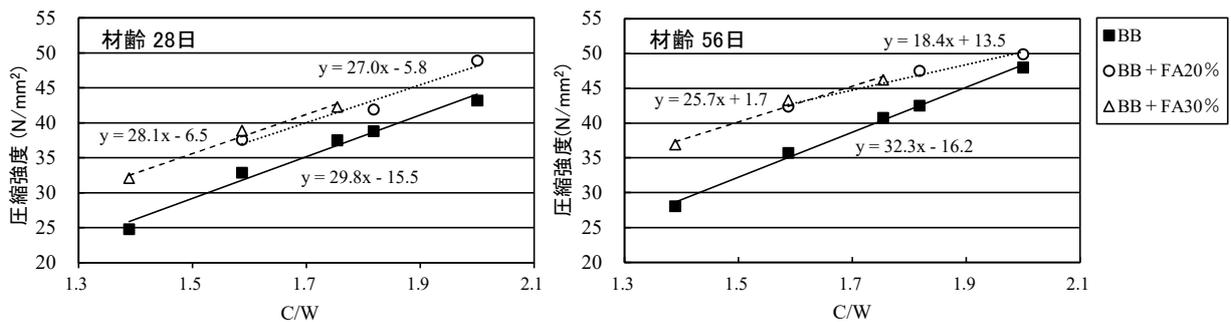


図-1 同一セメント水比と圧縮強度の関係

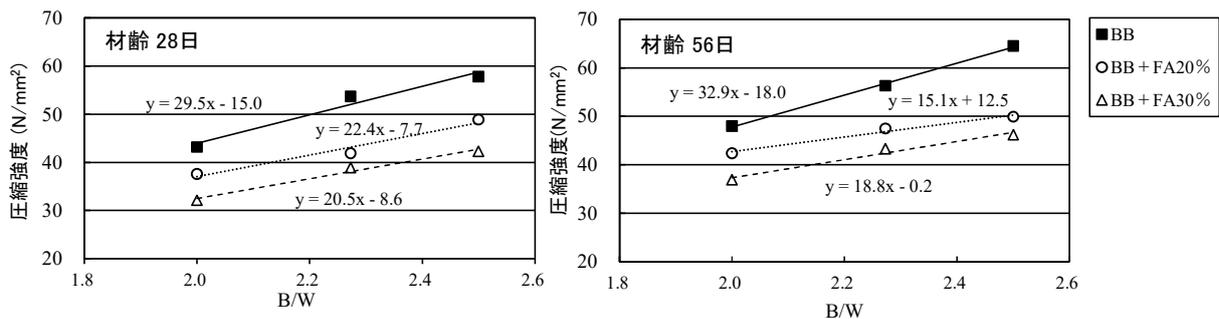


図-2 同一結合材水比と圧縮強度の関係

縮強度の関係を図-3に示す。

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。

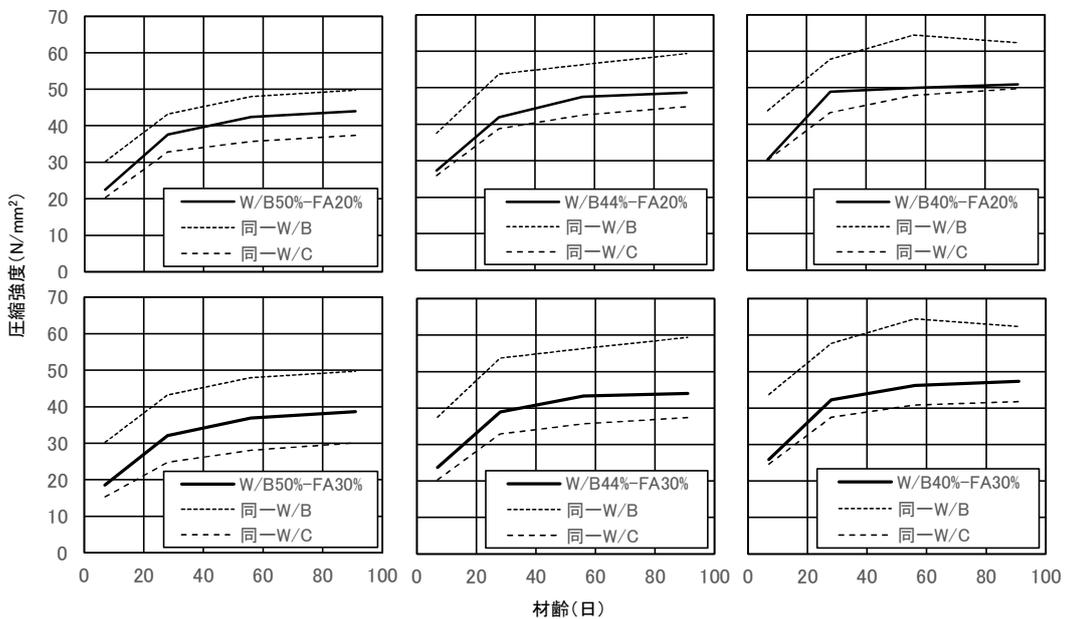


図-3 BB+FA20%, BB+FA30%とFA置換率0%におけるW/CとW/Bの圧縮強度との関係

また、図-4に材齢と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、FA置換率0%を基準とした場合の各材齢において、BB+FA20%で約-1.14%およびBB+FA30%で約-1.31%の圧縮強度の低下が認められる。FA置換率が大きくなるに従って、圧縮強度の差も大きくなる傾向が認められる。

## 6.2 中性化

図-5に材齢と促進中性化深さの関係を示す。BB, BB+FA20%およびBB+FA30%の配合の中性化深さを比較すると、水結合材比が大きいほど、また、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る。

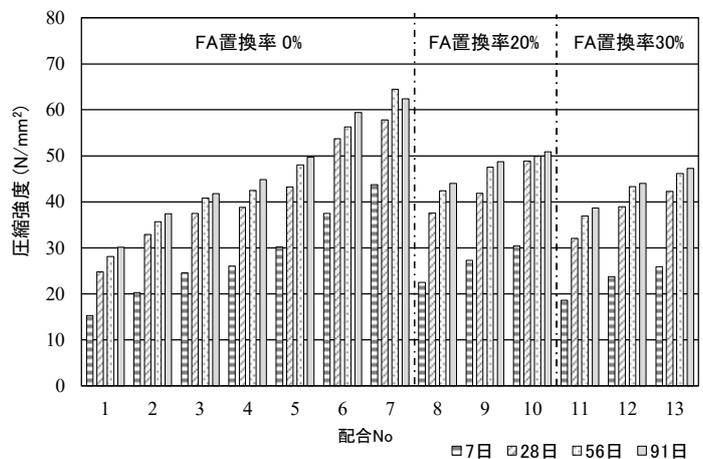


図-4 材齢と圧縮強度の関係

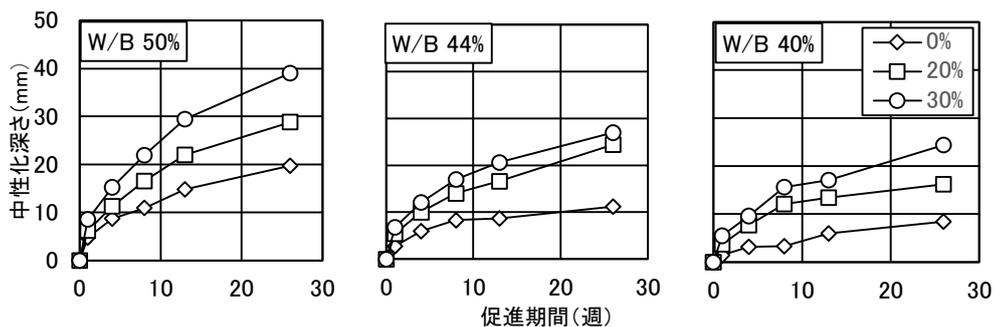


図-5 材齢と促進中性化深さの関係

### 6. 3 長さ変化

乾燥材齢 182 日における長さ変化率を図-6 に示す。長さ変化率は、FA の混入量および結合材水比に係わらず、概ね 490~560 であった。

### 6. 4 凍結融解抵抗性

凍結融解 300 サイクルにおける相対動弾性係数の関係を図-7 に示す。W/B44%配合では、FA を使用した配合のほうが相対動弾性係数は低い傾向となった。また、BB+FA20%および BB+FA30%においても、概ね相対動弾性係数は 80%であることが分かった。

### 7. CO<sub>2</sub> 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%の配合のCO<sub>2</sub>排出量を模式図に表したものを図-8 に示す。

なお、CO<sub>2</sub> 排出量の比較用配合として、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。

CO<sub>2</sub> 排出量を試算したインベントリデータ<sup>1), 2)</sup>は、普通ポルトランドセメントでは 788.6(kg-CO<sub>2</sub>/t)、高炉セメント B 種では 458.1(kg-CO<sub>2</sub>/t)、フライアッシュでは 19.6(kg-CO<sub>2</sub>/t)として試算した。また、結合材以外の使用材料の CO<sub>2</sub> 排出量は小さく、今回は結合材のみの CO<sub>2</sub> 排出量で比較を行った。

BB+FA20%配合の No.8, 9, 10 の CO<sub>2</sub> 削減率は 48%~49%程度、BB+FA30%配合の No.11, 12, 13 の CO<sub>2</sub> 削減率は約 54%~55%程度となることが分かった。

### 8. 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) 同一セメント水比と同一結合材水比ともに材齢 28 日までは、BB と同様の傾きで、材齢 56 日では、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

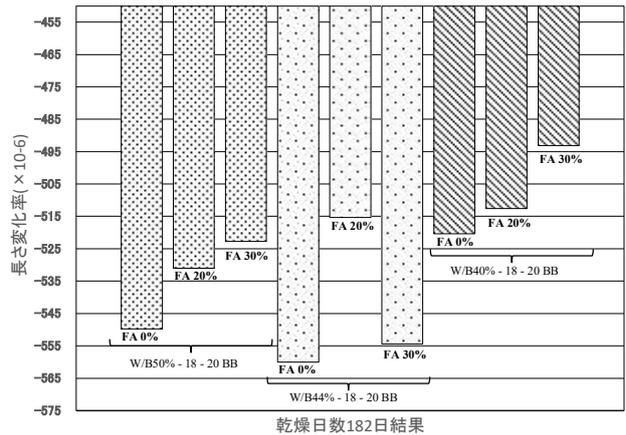


図-6 乾燥材齢 182 日における乾燥収縮率

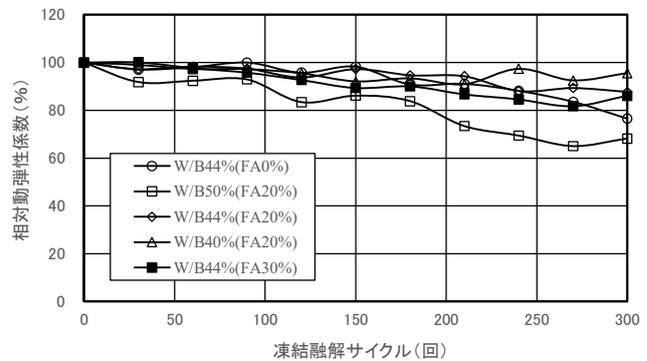


図-7 凍結融解サイクルと相対動弾性係数との関係

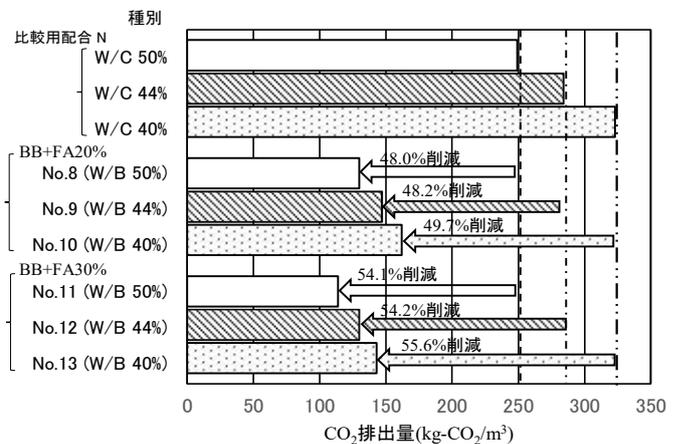


図-8 CO<sub>2</sub> 排出量の模式図

た傾向がみられた。

(4) 圧縮強度は、FA 置換率 0%を基準とした場合の各材齢において、BB+FA20%で約-1.14%およびBB+FA30%で約-1.31%の圧縮強度の低下が認められる。FA 置換率が大きくなるに従って、圧縮強度の差も大きくなる傾向が認められた。

(5) FA 置換率が大きくなるにつれ強度低下があることから圧縮強度を FA 置換率 0%と同等にするには、ポゾラン反応を活性化するためにアルカリ刺激剤等で FA の効果を高める必要があると思われる。

(6) 強度発現性については、外気（室内）温度・コンクリート温度や単位ポルトランドセメント量の影響など複数要因が考えられる。今後、各種物性試験と併せて引き続き検証するものとする。

(7) 中性化では、BB、BB+FA20%および BB+FA30%の配合の中性化深さを比較すると、水結合材比が大きいほど、また、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。

(8) 長さ変化では、乾燥材齢 182 日における長さ変化率は、FA の混入量および結合材水比に係わらず、概ね 490～560 であった。

(9) 凍結融解抵抗性では、W/B44%配合では、FA を使用した配合のほうが相対動弾性係数は低い傾向となった。また、BB+FA20%および BB+FA30%においても、概ね相対動弾性係数は 80%であることが分かった。

(10) CO<sub>2</sub> 排出量・削減率は、BB+FA20%配合の No.8, 9, 10 の CO<sub>2</sub> 削減率は 48%～49%程度、BB+FA30%配合の No.11, 12, 13 の CO<sub>2</sub> 削減率は約 54%～55%程度となることが分かった。

**謝辞** 本研究の実施にご協力を頂きました、(株) 浅沼組技術研究所、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、実験工場の皆様および関係各位にはここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) セメント協会：セメントの LCI データの概要 2023
- 2) 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，2024.03