高炉セメントＢ種にフライアッシュⅡ種を混合した CO_2 低減型コンクリートの実用化

○中尾　陽一＊1　西郡　知之＊1　谷村　賢一郎＊1　新田　　稔＊2　山﨑　順二＊2

要旨：大阪兵庫地区の多くの生コン工場が常備している高炉セメント 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%混合したコンクリートの配合を計画し，実施工を目指した実機実験を行った。その結果，大阪兵庫地区で既に採用されている JIS 関係式(普通ポルトランドセメント+フライアッシュII種をセメントの内割りで 20%混合したコンクリート)の配合と比較した結果，全てにおいて差異はなく，更なる低炭素化が得られることを確認した。

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，凝結時間，
ブリーディング，静弾性係数，構造体強度補正値，コア強度，中性化

１．はじめに

これまで，カーボンニュートラルの実現に向けて主にゼネコンが主導となった環境配慮型コンクリートの開発・実用化が進められている。このような中，大阪広域生コンクリート協同組合で，環境配慮に資する取組みとして，2012 年に普通ポルトランドセメントにフライアッシュII種（以下，N+FA）をセメントの内割りで 10%および 20%混合した配合のコンクリートを標準化している。

この N+FA に加え，今回，更なる低炭素化を目指し，「生コン工場から提案できる低炭素型コンクリート」として，生コン工場が常備している高炉セメント B 種にフライアッシュII種（以下，BB+FA）をセメント質量の内割りで 20%混合したコンクリートの配合を計画し，室内実験および実機実験を実施した。本報では，「生コン工場から提案できる低炭素型コンクリート」を実現し，2025 年の大阪・関西万博での実装や大阪兵庫地区での標準化を目的として取り組んだ結果について報告する。

２．使用材料

本実験における使用材料を**表－1** に示す。実験を実施した生コン工場は，室内 1 工場（A 工場），実機 4 工場（B，C，D および E 工場）とした。

コンクリートに使用したセメント，練混ぜ水および骨材は各工場で常備している材料を使用した。フライアッシュ（以下，FA）は，JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）の規格を満足するフライアッシュII種（舞鶴産）を使用した。FA の品質を**表－2** に示す。また化学混和剤は，全ての配合において高性能 AE 減水剤を使用した。

３．コンクリートの配合

コンクリートの配合は，大阪兵庫地区にて採用されている JIS 関係式（N+FA20%，材齢 56 日）の標準配合を基にセメントを高炉セメント B 種に置換えた配合より，水結合材比を設定した。

＊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　㈱淺沼組

表－1　使用材料

名称	記号		種類・品質									
			A 工場		B 工場		C 工場		D 工場		E 工場	
セメント	C		高炉セメント B 種									
			N 社製 密度 3.02 g/cm³		U 社製 密度 3.04 g/cm³		T 社製 密度 3.04 g/cm³		U 社製 密度 3.04 g/cm³		N 社製 密度 3.02 g/cm³	
細骨材	S	S1	海砂 北九州産	S1:S2 50:50 質量比	砕砂 家島産	S1:S2 60:40 容積比	砕砂 津久見産	S1:S2 30:70 容積比	砕砂 北九州産	S1:S2 40:60 容積比	砕砂 相生産	S1:S2 50:50 容積比
		S2	砕砂 津久見産		砕砂 北九州産		砕砂 家島産		砕砂 赤穂産		砕砂 津久見産	
粗骨材	G	G1	砕石 1505 高槻産	G1:G2 55:45 質量比	砕石 2005 家島産	G1:G2 50:50 容積比	砕石 2010 家島産	G1:G2 50:50 容積比	砕石 2010 赤穂産	G1:G2 60:40 容積比	砕石 2010 津久見産	G1:G2 50:50 質量比
		G2	砕石 2010 高槻産		砕石 2005 津久見産		砕石 1505 家島産		砕石 1505 赤穂産		砕石 1505 津久見産	
混和材	FA		フライアッシュⅡ種　密度 2.25 g/cm³									
練混ぜ水	W		上澄水・地下水		上澄水・工業用水		上澄水・上水道水		上澄水・工業用水		上澄水・工業用水	
化学 混和剤	SP		高性能 AE 減水剤 （P 社）		高性能 AE 減水剤 （S 社）		高性能 AE 減水剤 （T 社）		高性能 AE 減水剤 （P 社）		高性能 AE 減水剤 （F 社）	

室内実験では，造成工事における調整池の耐圧底盤等への適用を目指した目標呼び強度 24～33 に相当する水結合材比で4種類の配合とし，目標スランプを 12±2.5cm，目標空気量は 4.5±1.5%として室内実験を行った。

実機実験においては，目標呼び強度を24，33および42に相当する水結合材比で3種類の配合とし，目標スランプを目標呼び強度 24 では 18±2.5cm，目標呼び強度33および42では21±2.0cmとした。目標空気量は，全ての目標呼び強度において4.5±1.5%とした。

室内および実機実験におけるコンクリートの配合を**表－3**に示す。

表－2　フライアッシュの品質

品　質			JIS A 6201 による規定値	試験値
二酸化けい素含有量		%	45.0 以上	63.7
湿分		%	1.0 以下	0.1
強熱減量		%	5.0 以下	2.2
密度		g/cm³	1.95 以上	2.23
粉末度	網ふるい方法 （45μm ふるい残分）	%	40 以下	5.6
	ブレーン法 （比表面積）	% %	2,500 以上	3,790
フロー値比		%	95 以上	110
活性度指数	%	材齢 28 日	80 以上	88
		材齢 91 日	80 以上	98

４．試験項目

室内および実機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と試験方法を**表－4**に示す。各種試験項目は，各 JIS などの試験方法に準拠して実施した。また，ブリーディング試験は，JCI-S-015（小型容器によるコンクリートのブリーディング試験方法）に基づいて内法寸法φ150×300mm のブリキ製型枠を使用した。

実機実験では，フレッシュコンクリートの試験項目の中でスランプ，空気量等について，コンクリート練混ぜから 120 分後まで 30 分間隔で経時変化の確認を合わせて実施した。

表－3　コンクリートの配合

工場	目標呼び強度	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水結合材比 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³) W	C	FA	S1	S2	G	SP (B×wt%)
A	24	12	4.5	51	45.9	165	259	65	406	406	982	0.175
	27			49	45.4	165	270	67	400	399	985	0.195
	30			46	44.5	165	287	72	387	386	990	0.200
	33			44	43.9	165	300	75	379	378	993	0.225
B	24	18		55	47.5	175	254	64	491	341	934	0.425
	33	21		47	47.7	180	306	77	472	328	891	0.45
	42			40	45.1	180	360	90	430	299	902	0.525
C	24	18		55	50.0	175	254	64	265	601	875	0.575
	33	21		47	50.3	180	306	77	257	578	833	0.60
	42			40	47.8	180	360	90	236	529	844	0.55
D	24	18		55	48.8	175	254	64	351	507	896	0.60
	33	21		47	49.5	180	306	77	340	494	846	0.65
	42			40	47.0	180	360	90	311	452	857	0.725
E	33	21		47	49.5	180	306	77	408	423	872	0.65

５．実験結果と考察

５．１　フレッシュコンクリート

(1)スランプおよび空気量

フレッシュコンクリートの性状及び試験結果は，室内実験および実機実験の全ての配合で目標値を満足し，実機実験の経時変化も問題のない結果が得られた。実機実験の目標呼び強度 33 における 4 工場のスランプおよび空気量の経時変化を**図－1** に示す。

(2)ブリーディングおよび凝結時間試験

B，C および D 工場で実施した目標呼び強度 24 におけるブリーディングおよび凝結時間試験の結果を**図－2** に示す。ブリーディング量は，3 工場ともに水密コンクリートで規定されている 0.3cm³/cm² を満足する結果であった。

凝結時間は，3 工場ともに養生温度と打重ね許容時間の関係 [1]で示されている 0.1N/mm² で再振動可能時間とされている 210 分を超える経過時間であった。

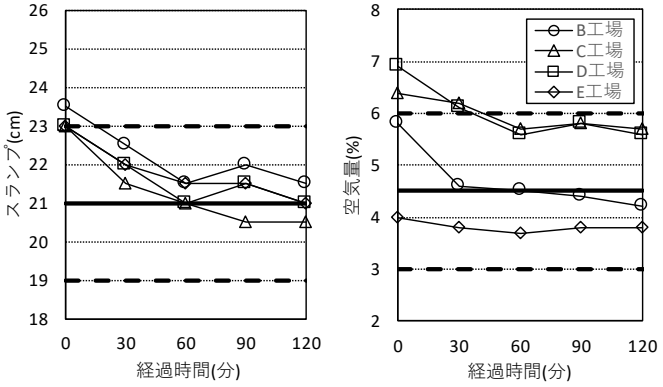
５．２　硬化コンクリート

(1)室内実験結果

室内実験で得た結合材水比と標準養生強度の関係を**図－3** に材齢と呼び強度比

表－4　各種試験項目および試験方法

試験項目		試験方法	室内	実機
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	○	○
	単位容積質量	JIS A 1116	－	○
	単位水量	ZKT-210	○	○
	ブリーディング	JCI-S-015	－	○
	凝結時間	JIS A 1147	－	○
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	○	○
	静弾性係数	JIS A 1149	－	○
	長さ変化率	JIS A 1129	－	○
	促進中性化	JIS A 1153	－	○



図－1　スランプ・空気量の経時変化

の関係を**図－4** に示す。**図－3** に示した結合材水比と標準養生強度の関係は，材齢 28 および 56 日ともに大阪兵庫地区で採用されている JIS 関係式（N+FA20%）と同様の強度発現であった。**図－4** に示した材齢と呼び強度比の関係は，材齢 28 日において 1.19 から 1.34（平均：1.24）であった。

(2) 実機実験結果

①圧縮強度発現と静弾性係数

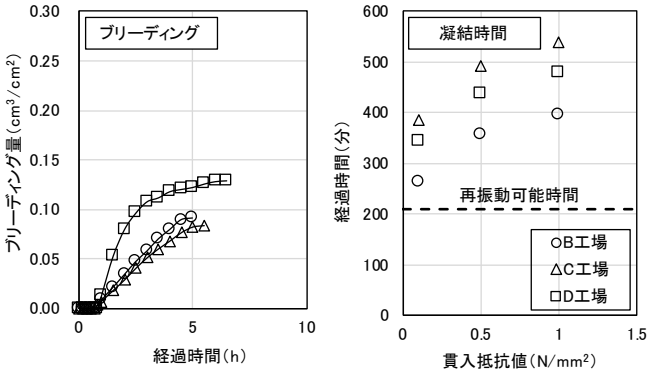
目標呼び強度 33 における 4 工場の標準養生の圧縮強度結果を**図－5** に示す。他の目標呼び強度も同様の結果であったが，高炉セメント B 種にフライアッシュを混合したコンクリートにおいても強度発現性は，一般のコンクリートと同様に問題はなかった。

図－6 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図中には，New RC 式（k_1=1.08，k_2=1.0，γ=2.3）を示している。New RC 式では，その他の骨材を用いる場合に k_1 は 1.0 としているが，ここでは，関西地区で提案[2]されている 1.08 としている。静弾性係数は，圧縮強度の増加に伴い，式による推定値と同様の傾向であった。

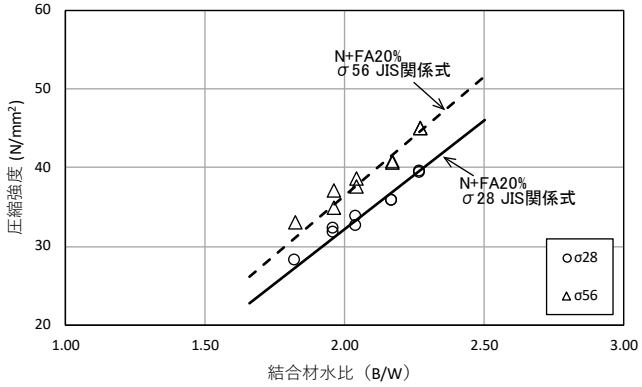
②実機実験で得た圧縮強度と採用式の関係

3 工場の実機実験で得た圧縮強度と大阪兵庫地区にて採用されている JIS 関係式（N+FA20%，材齢 56 日）との関係を**図－7** に示す。

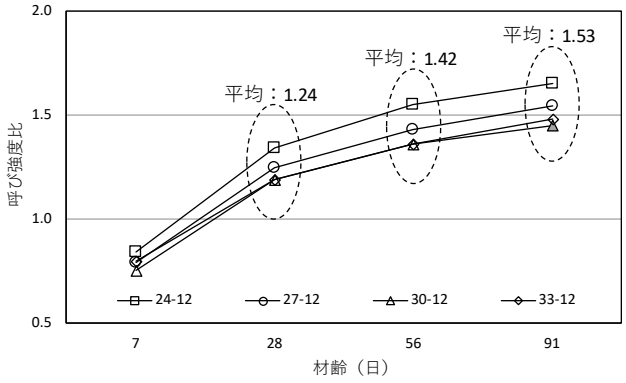
図－7 により，実機実験の圧縮強度を一次回帰直線式で表すと，信頼区間 95%以内となり，結合材水比と圧縮強度の関係は良好であった。また，**図－7** に N+FA20%における出荷実績を併記しているが圧縮強度は同等であり，JIS 関係式（N+FA20%，材齢 56 日）で高炉セメント B 種に置換えても問題がないことを確認できた。



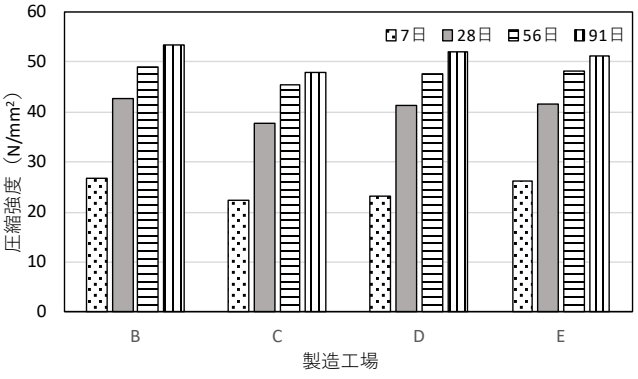
図－2　ブリーディングおよび凝結時間



図－3　結合材水比と標準養生強度



図－4　材齢と呼び強度比



図－5　目標呼び強度 33 における強度発現

③実機実験で得た圧縮強度とＳ値との関係

代表工場で作製した模擬体の 91 日コア強度と実機実験で得た 28 日標準水中強度の $_{28}S_{91}$ 値を**図－8** に示す。冬期期間における構造体強度補正値である 6N/mm² を満足する結果が得られた。

④コア強度と簡易断熱養生強度との関係

代表工場で作製した模擬体のコア強度と簡易断熱養生強度を用いて比較した結果を**図－9** に示す。

コア強度と簡易断熱養生強度には高い相関関係があり，構造体強度の判定に簡易断熱養生をした圧縮強度で判定しても問題がないことを確認できた。

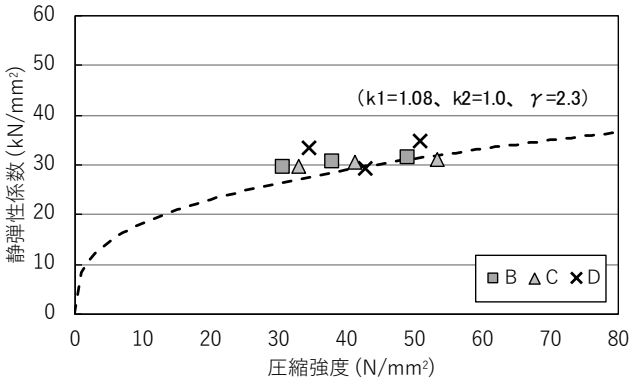
⑤促進中性化

代表工場で実施した促進期間 91 日までの促進中性化試験の結果を**図－10** に示す。全ての目標呼び強度において，中性化深さと促進期間には直線的な関係が認められ，BB+FA においても√t 則が成り立つことが確認できた。

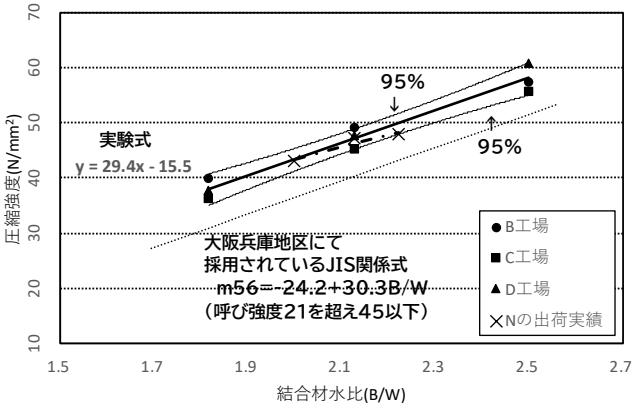
６．二酸化炭素排出量の削減効果

大阪広域生コンクリート協同組合の標準配合の中で，呼び強度 33 における普通，N+FA20%および BB+FA20%での二酸化炭素排出量の削減効果を試算したものを**図－11** に示す。

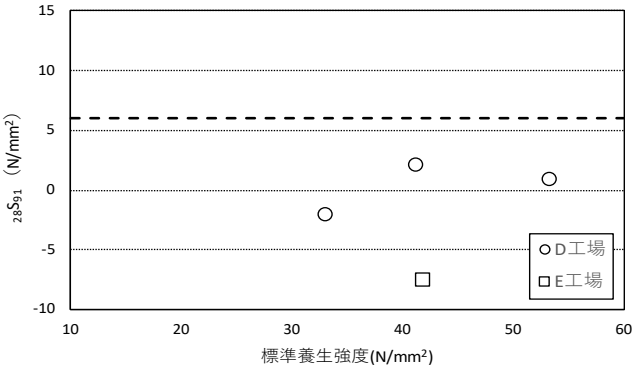
試算条件としてインベントリデータ [3] は，普通ポルトランドセメント：772kg-CO_2/t，高炉セメントＢ種：437kg-CO_2/t，フライアッシュ：29.0kg-CO_2/t を用いて算出した。BB+FA20%は，N+FA20%と同様の水結合材比としているが，今回の条件で普通と比較した場合に CO_2 排出量を約 50%削減出来ることが確認できた。



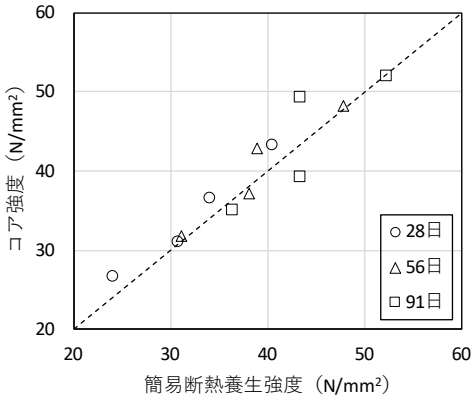
図－6　圧縮強度と静弾性係数の関係



図－7　実機実験で得た圧縮強度と N+FA 出荷実績との関係



図－8　標準養生強度とＳ値の関係



図－9　コア強度と簡易断熱養生強度の関係

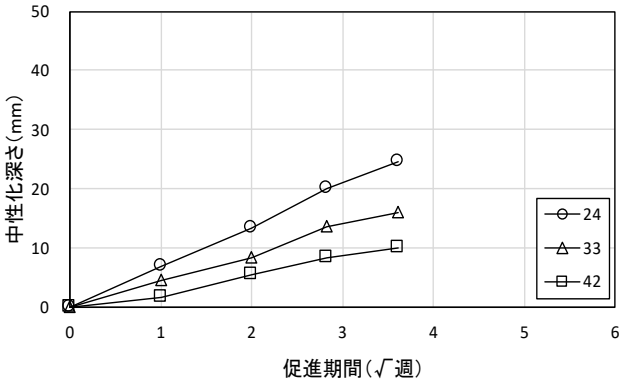
7．まとめ

(1) 高炉セメントB種にフライアッシュⅡ種をセメント質量に対する内割りで 20%混合した配合のコンクリートは，大阪兵庫地区にて既に採用されている JIS 関係式（N+FA20%，材齢 56 日）を用いて配合設計が可能であることが確認できた。

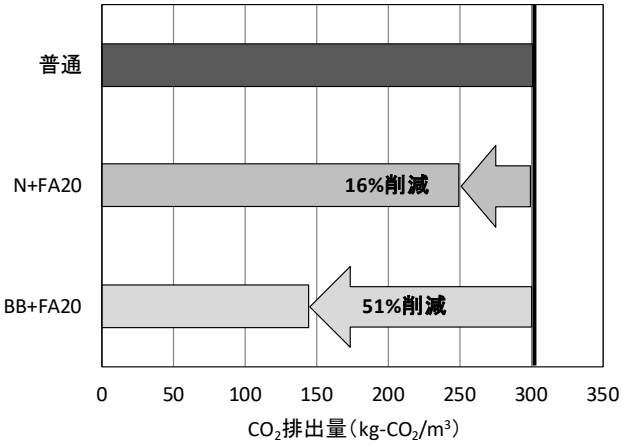
(2) フレッシュコンクリートの性状および試験結果は全ての目標呼び強度で目標値を満足し，120 分までの経時変化でも問題がないことを確認できた。また，各種養生の圧縮強度の強度発現性は，一般のコンクリートと同様の傾向であることが確認できた。

(3) 静弾性係数は，圧縮強度の増加に伴い，New RC 式により精度よく推定できることが確認できた。

(4) 実機実験の圧縮強度を一次回帰直線式で表すと，信頼区間 95%以内となり，結合材水比と圧縮強度の関係は良好であった。また，N+FA20%における出荷実績の圧縮強度を併記した結果、実機実験で得た BB+FA20%の圧縮強度は同等であることを確認できた。



図－10　中性化深さと促進期間の関係



図－11　二酸化炭素排出量の関係

(5) 模擬体の 91 日コア強度と実機実験で得た 28 日標準水中強度の $_{28}S_{91}$ 値は，冬期期間における構造体強度補正値である 6N/mm^2 を満足する結果が得られた。また，コア強度と簡易断熱養生強度には高い相関関係があり，構造体強度の判定に簡易断熱養生をした圧縮強度で判定しても問題がないことを確認できた。

謝辞　本研究の実施にあたり，(株)淺沼組技術研究所，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，p.279，2018.7
2) 岩清水隆他：関西地区におけるコンクリートのヤング係数の実態調査と構造設計におけるヤング係数設定方法の一提案，コンクリート工学，Vol.42，No.12，p.15-22，2004
3) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針〈案〉・同解説，p.164-165，2017.9