フライアッシュⅡ種 (JASS5 M-401) を使用したコンクリートの調合設計に関する考察

STUDY ON MIX PROPORTION DESIGN FOR CONCRETE USING FLY ASH (TYPE-II (JASS5 M-401))

船本憲治 — * 1

キーワード:

フライアッシュ, フライアッシュⅡ種, JASS5 M-401, セメント置換, 細骨材補充, フライアッシュ量, 調合設計

Keywords:

Fly ash, Fly ash (type-II), JASS5 M-401, Cement substitution, Fine aggregate substitution, Fly ash content, Mix proportion design

Kenji FUNAMOTO — * 1

In this study, I investigated the mix proportion of ready mixed concrete using fly ash for buildings. As a result, I obtained the useful information for mix proportion of concrete using fly ash of type-II (JASS5 M-401). As methods of using fly ash, the four methods (cement substitution, fine aggregate substitution, cement and fine aggregate substitution, unit FA amount constant method) are used. This paper describes the purpose of use and mix proportion design method for each of the four methods.

1. はじめに

フライアッシュ (以下, FA) は, コンクリートのワーカビリティの改善, 単位水量の低減, 水和熱の低減, ポズラン反応による長期強度の増進などが期待でき, さらに, アルカリシリカ反応抑制対策としての効果も期待されている。

そのような中, FAの使用法は, 本会のFAコンクリート指針 (以下, FA指針)¹⁾では, 水和熱抑制などを目的にセメントの一部をFAで置換える内割方式と細骨材の粒度調整などを目的にその一部をFAで置換える外割方式があるが, 近年, その両者を組み合わせセメント内割と外割を併用する方法²⁾も用いられている。また, 単位FA量を例えば120kg/m³一定とするようなコンクリートの調合方法³⁾も実用化され, 様々な調合が存在している。

一方, 使用するFAは, 本会の鉄筋コンクリート工事標準仕様書 (JASS5) (以下, JASS5)⁴⁾では, 結合材として用いる場合はJASS5 M-401 (結合材として用いるFAの品質基準) に適合するものを, 結

合材として用いない場合 (骨材の微粒分補給) はJISのⅡ種またはⅣ種に適合するものを用いることになっている。しかし, 現状では, FAの安定供給の理由から, JASS5 M-401に適合するFAが結合材として用いる場合と用いない場合の両方で使用される場合が多い。なお, JASS5 M-401に適合するFAは, 一般に流通しているFAであり, 品質はJISⅡ種を満足している。

そこで, 今回, FAコンクリートにおける使用用途別調合の分析を行うとともに, 日本国内の指針・仕様書の現状を整理し, FAⅡ種 (JASS5 M-401) を使用したコンクリートの調合設計に関する考察を行った。なお, 本会のFA指針は現在改定作業中であるが, 十数年使用されている現行指針での実態を纏め今後のFAの有効利用に活用することは有益であり, 一部, 最新知見も考察に反映した。

2. FAコンクリートにおける使用用途別調合の分析

実構造物におけるFAコンクリートの調合は, 文献1), 5)~14)を

図1 FAコンクリートにおける各調合毎の単位FA量と単位セメント量の関係

*1 西日本工業大学デザイン学部建築学科 教授・博士 (工学)
(〒803-8787 福岡県北九州市小倉北区室町1-2-11)

*1 Prof., Nishinippon Institute of Technology, Dr. Eng.

表 2 FA コンクリートの調査実績（3 成分混合除く）

N0	建物用途	使用目的	Fc 呼び 強度 N/mm ²	ス ラ ン プ フ ロ ー cm	ス ラ ン プ フ ロ ー cm	ベ ー ス セ ン ト	FA 種別	W/B %	W/C %	FA/ (C+FA) %	C kg/m ³	FA kg/m ³	備考	N0	建物用途	使用目的	Fc 呼び 強度 N/mm ²	ス ラ ン プ フ ロ ー cm	ス ラ ン プ フ ロ ー cm	ベ ー ス セ ン ト	FA 種別	W/B %	W/C %	FA/ (C+FA) %	C kg/m ³	FA kg/m ³	備考
1	事務所 躯体	マス コン	21	18	—	N	Ⅱ	54	—	18	269	59	文献5)	32	事務所地下躯体	高 流 動	27	—	53	N	Ⅱ	45	—	29	290	120	大分物件
2			27	12	—	N	Ⅱ	49	—	8	331	29		33	住居 躯体		(52)	—	55	N	Ⅱ	35	—	25	360	120	福岡 物件
3			29	12	—	N	Ⅱ	52	—	18	265	58		34			(49)	—	55	N	Ⅱ	37	—	26	335	120	
4			29	12	—	N	Ⅱ	47	—	8	352	31		35			(46)	—	55	N	Ⅱ	39	—	28	311	120	
5			24	12	—	N	Ⅱ	52	—	18	283	62		36			42	—	60	N	Ⅱ	37	—	20	369	92	
6	原子力発電所 躯体		33	18	—	N	Ⅱ	44	—	20	302	75	文献6)	37	複合施設 躯体	C F T	60	—	60	N	Ⅱ	29	—	20	490	122	文献12)
7			33	12	—	N	Ⅱ	46	—	20	281	70		38			60	—	65	L	Ⅱ	28	—	8	539	50	
8			33	12	—	N	Ⅱ	48	—	20	284	71		39			(53)	—	65	N	Ⅱ	35	—	20	400	100	文献13)
9			44	15	—	M	Ⅱ	39	—	18	332	75	文献7)	40			事務所躯体	(24)	15	—	N	Ⅱ	—	54	4	321	
10	変電所地下躯体		30	21	—	N	Ⅱ	45	—	26	288	101	文献8)	41	レディーミクス トコンクリート 工場出荷実績	細 骨 材 補 充	(18)	8	—	N	Ⅱ	—	64	4	256	12	
11	火力発電所 地下躯体	24	15	—	N	Ⅱ	56	—	20	250	63	文献9)	42	(27)			18	—	N	Ⅱ	—	52	4	352	14		
12		24	15	—	N	Ⅱ	55	—	30	219	94		43	(21)			18	—	N	Ⅳ	—	60	19	305	70		
13		21	15	—	N	Ⅱ	55	—	45	175	143		44	(24)			18	—	N	Ⅳ	—	55	17	337	68		
14	原子力発電所 躯体	41	10	—	M	Ⅱ	41	—	20	320	80	文献10)	45	(27)			18	—	N	Ⅳ	—	50	16	360	68		
15		29	12	—	N	Ⅱ	54	—	20	246	62		46	(27)			18	—	N	Ⅱ	—	55	9	333	33	文献1)	
16		複合施設 躯体	30	15	—	N	Ⅱ	43	—	30	285	122	文献11)	47			(27)	8	—	H	Ⅱ	—	54	9	315		32
17	30		15	—	N	Ⅱ	43	—	30	260	111	48		(27)			8	—	BB	Ⅱ	—	55	9	291	29		
18	レディーミクス トコンクリート工場 出荷実績	(33)	18	—	N	Ⅱ	43	—	15	363	64	文献1)	49	(24)			15	—	BB	Ⅱ	—	58	9	299	30		
19		(30)	18	—	N	Ⅱ	45	—	15	332	59		50	(21)			8	—	BB	Ⅱ	—	65	12	227	30		
20		(27)	18	—	N	Ⅱ	49	—	15	311	55		51	(27)			18	—	N	Ⅳ	—	50	11	362	45		
21		(24)	18	—	N	Ⅱ	50	—	15	314	56		52	(24)			18	—	N	Ⅳ	—	55	19	313	73		
22		(33)	18	—	—	Ⅱ	45	—	26	288	101		53	(24)			15	—	BB	Ⅳ	—	53	18	306	68		
23		事務所 躯体	27	15	—	N	Ⅱ	47	—	20	318	80	文献14)	54	住居 躯体	細 骨 材 補 充 + マス コン	(40)	18	—	N	Ⅱ	—	41	3	415	15	福岡 物件
24	30		15	—	N	Ⅱ	44	—	20	313	78	55		(36)			18	—	N	Ⅱ	—	44	4	387	15		
25	24		15	—	N	Ⅱ	50	—	20	278	69	56		(33)			18	—	N	Ⅱ	—	46	4	370	15		
26	住居 躯体	(30)	18	—	N	Ⅱ	48	—	20	302	75	福岡物件	57	(30)			18	—	N	Ⅱ	—	47	4	394	15		
27		(27)	18	—	N	Ⅱ	52	—	20	276	69		58	(30)			12	—	N	Ⅱ	53	75	44	201	156	文献16)	
28	火力発電所躯体	33	—	60	N	Ⅱ	37	—	40	283	186	文献9)	59	火力発電所 躯体	(24)		12	—	N	Ⅱ	46	66	33	244	120	文献17)	
29	レミコン工場実績	(46)	—	65	N	Ⅱ	36	—	30	330	141	文献1)	60		(27)		12	—	N	Ⅱ	41	59	32	281	135		
30	石炭サイロ躯体	36	—	65	N	Ⅱ	33	—	30	350	150	文献14)	61		(30)		12	—	N	Ⅱ	47	67	33	236	117	文献18)	
31	事務所地下躯体	27	—	60	N	Ⅱ	38	—	26	339	121	大分物件	62		(33)		15	—	N	Ⅱ	44	55	26	322	113		

表 1 FA コンクリートの使用用途別の調査実績

使用用途	ス ラ ン プ フ ロ ー	ス ラ ン プ フ ロ ー	ベ ー ス セ ン ト	FA 種別	FA セメント 置換率	FA 砂容積 置換率	C+FA	単位 C量	単位 FA量
	cm		cm	種別	%		kg/m ³		
	12 ～21	—			8 ～45	—	308 ～427	175 ～363	29 ～143
マスコン	12 ～21	—	N M	II	8 ～45	—	308 ～427	175 ～363	29 ～143
高流動	—	53 ～65	N	II	25 ～40	—	410 ～500	283 ～360	120 ～186
C F T	—	60 ～65	N L	II	8 20	—	461 ～612	369 ～539	50 ～122
細骨材 補充	8 ～18	—	N BB	II IV	—	⁴ 9～12 16～20	257 ～430	227 ～415	12 ～73
細骨材 補充+ マスコン	12 ～15	—	N	II	20 30	^{2.5} 5 10	353 ～435	201 ～322	113 ～156

基に、(1) FA 内割調合（マスコンクリート・鋼管充填コンクリート（CFT））、(2) FA 外割調合（高流動コンクリート・細骨材補充コンクリート）に分類し文献 15）で分析がなされている。そこで、今回はそれに文献 2）、16）、17）、18）の(3)FA 内外割調合（細骨材補充マスコンクリート）を追加し、FA コンクリートにおける単位 FA 量と単位セメント量の関係を図 1 に示す。なお、図 1 において原点から放射状の実線は FA 置換率（FA/(C+FA)）が一定の線であり、右下がりの破線は粉体量（C+FA）が一定の線である。

次に、図 1 を基に、FA コンクリートの使用用途別に各調合の分析を行ったものを表 1 に示す。なお、図 1 の元となった各 FA コン

クリートの調査実績は表 2 の通りである。また、使用されている FA は一部を除き JIS II 種品であり、この II 種品は一般に流通してきた現在の規格の JASS5 M-401 相当品である。

3. FA コンクリートに関する日本国内の指針・仕様書

3.1 単位セメント量または単位結合材量

FA コンクリートに関する指針・仕様書による単位セメント量または単位結合材量の最小値を表 3 に示す。

JASS5 の最小単位セメント量は 270 kg/m³ であり、FA 指針の細骨材補充の場合の最小単位セメント量も JASS5 と同じである。一方、FA 指針のセメント置換の場合の最小単位結合材量は 290kg/m³ となっている。

一方、公共建築工事標準仕様書（2016）では、最小単位セメント量は JASS5 と同じ 270 kg/m³ であるが、FA をセメント置換する場合、「水セメント比の制限等により、強度上必要なセメント量を超えてセメントを使用する場合、その超えた部分を、セメント全量の 10% の範囲で FA I 種又は II 種に置換えることができる」とされている。また、「圧送が困難な場合には、FA II 種又は IV 種を混合することができるが、この場合は、単位セメント量を減じない」となっている。

3.2 水セメント比（W/C）または水結合材比（W/B）

FA コンクリートに関する指針・仕様書による水セメント比（W/C）または水結合材比（W/B）の最大値を表 4 に示す。なお、ここで N

表 3 単位セメント量・単位結合材量の最小値(kg/m³)

指針・仕様書	公共建築工事 標準仕様書 (2016)	JASS5 (2018)	FA指針 (2007)	
			セメント置換	細骨材補充
単位セメント量	270	270	—	270
単位結合材量	—	—	290	—

表 4 水セメント比(W/C)・水結合材比(W/B)の最大値(%)

指針・仕様書		公共建築工事 標準仕様書 (2016)		JASS5 (2018)			FA指針 (2007) 〔 〕はW/B	
		N, 混 合セメン トA種	混合セ メントB種	N	混合セ メントA種	混合セ メントB種	セメント 置換	細骨材 補充
計画供 用期間 の級	超長期	65	60	55	—	—	—	—
	長期			65	65	60	[45]	50
	標準						[50]	55
	短期・一般						[60]	65

表 5 アルカリシリカ反応抑制のための FA 置換率(%)

または単位 FA 量(kg/m³)

指針・仕様書	JASS5 (2018)	FA指針 (2007)
FA置換率	15%以上	15%以上 (セメント置換)
単位FA量	—	80kg/m³以上 (細骨材補充)

は普通ポルトランドセメントである。

FA 指針における W/C または W/B の最大値は、計画供用期間の級（短期・標準・長期）で区分され設定されているが、JASS5 および公共建築工事標準仕様書では区分はない。なお、JASS5 および FA 指針では超長期の級での混合セメントの使用は認められていない。

一方、住宅の品質確保の促進に関する法律では、劣化対策等級とかぶり厚さの組合せにより、水セメント比 50%以下、55%以下、60%以下が定められているが、「FA セメントを用いる場合は混和物 (FA) を除いて水セメント比を算出する」と明記されている。

3.3 アルカリシリカ反応抑制のための FA 置換率または単位 FA 量

アルカリシリカ反応抑制のための FA 置換率または単位 FA 量を表 5 に示す。

FA 置換率 15%以上は、国土交通省通達によるものであり、JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) にも反映されている。なお、FA 指針では、16 章のアルカリシリカ反応抑制対策として FA を用いるコンクリートで「FA I 種または II 種をポルトランドセメントと置換して使用する場合は置換率を 15%以上とし、FA II 種または IV 種を細骨材の一部と置き換えて使用する場合は単位量を 80kg/m³ 以上とする」となっている。

4. FA の使用目的別の種類と置換率

FA 指針では、FA の使用目的別の種類が表 6 のように示されている。なお、FA をセメントの一部として使用する場合は I 種または II 種を用い、FA を細骨材の一部と置換してもしくはセメントの添加に使用する場合は II 種または IV 種を用いるとなっている。

一方、土木学会より平成 11 年にコンクリートライブラリー94 として発刊された「FA を用いたコンクリートの施工指針 (案)」では、FA の使用目的別の種類と置換率が表 7 のように示されている。なお、FA 置換率は 10～40%の範囲となっている。

表 6 FA の使用目的別の種類 (日本建築学会)

使用目的	FA種類		
	I 種	II 種	IV 種
単位水量の低減	◎	◎	○
流動性の増大と粘性の確保	◎	◎	○
乾燥収縮ひび割れの抑制	◎	◎	◎
水和熱の低減	◎	◎	—
細骨材の粒形・粒度が不良な場合の品質改善	○	◎	◎
アルカリシリカ反応抑制対策	◎	◎	○

表 7 FA の使用目的別の種類と置換率(土木学会)

使用目的	FA種類			
	I 種	II 種	III 種	IV 種
流動性の向上	10～40%	10～30%	—	—
水和熱抑制による温度上昇の抑制	—	20～30%	20～30%	20～30%
アルカリシリカ反応の抑制	15～40%	15～30%	15～30%	25～30%
耐硫酸塩性の向上	10～40%	10～30%	10～30%	—
耐海水性 (塩害含む) の向上	10～40%	10～30%	10～30%	—
高流動化	20～40%	20～30%	—	—
高強度化	10～30%	—	—	—

5. FA コンクリートの調査設計方法の分類

FA コンクリートの調査設計に関する FA の使用方法としては、現在、一般的に下記の 4 つの手法が用いられている。

- (1) セメント置換 (A 種、B 種、C 種、C 種超)
- (2) 細骨材補充 (容積置換率 2.5～20%)
- (3) (1)と (2) の併用
- (4) 単位 FA 量一定 (20, 60, 80, 120kg/m³)

使用する FA は、JASS5 および FA 指針では、結合材として用いる場合は本会で規定している JASS5 M-401 (結合材として用いる FA の品質基準) に適合するものを、結合材として用いない場合 (骨材の微粒分補給) は JIS の II 種または IV 種に適合するものを用いることになっている。しかし、現状では、一般に流通している JASS5 M-401 (JIS II 種) に適合する FA が結合材として用いる場合と用いない場合の両方で使用されている。

そこで、コンクリートの調査設計に関する以下の検討は、FA はすべて JASS5 M-401 に適合する FA とし、FA 置換率もセメント置換と細骨材補充の両者の FA を加えた FA 置換率 (FA/(C+FA)) (質量) を指標とし、従来の FA コンクリートに関する FA 置換率別の知見を用いてコンクリートの性能の考察を行った。

6. FA コンクリートの調査設計方法の検討

6.1 FA 置換率 (セメント置換、細骨材補充、

セメント置換および細骨材補充) による方法

FA を使用したコンクリートの調査設計の指標としては、従来から FA 置換率 (FA/(C+FA)) が用いられており、FA セメント A 種、B 種、C 種に相当する調査が使用されている。そこで、調査種類として FA-A 種、FA-B 種、FA-C 種、FA-C 種超毎に、前述の図 1 および表 1 を参考に、FA II 種 (JASS5 M-401) を使用したコンクリートの調査とその使用目的および調査設計指標を表 8 に示す。

FA-A 種は、FA 置換率が 5～10%、単位 FA 量が 13～44kg/m³である。FA の主要な使用目的は、細骨材補充混和材として細骨材の粒形・粒度が不良な場合の品質改善を行うものであり、その結果、コンクリートの流動性改善が図れている。また、調査設計指標の構造体強度補正値 S 値および耐久設計基準強度 Fd は、JASS5 に準拠し

表 8 FA 置換率(FA/(C+FA))毎のコンクリートの調合とその使用目的および調合設計指標 (JASS5 M-401 使用)

調合 種類	FA置換率 FA/(C+FA) (%)	単位量 (kg/m ³)		水結合材 比* W/(C+FA) (%)	水セメント 比* W/C (%)	FAの主な使用目的				調合設計指標		
		FA	C			流動性 改善	水和熱 抑制	アルカリシカ 反応抑制	高流動	構造体強度 補正值 S 値	耐久設計 基準強度 Fd	
FA-A種	5～10	13～44	240 ～ 400	38～67	43 ～71	○				普通ポルトランドセメントと同値		
FA-B種	10～20	27～100		34～64		△	○	○	JASS5, FA指針			
FA-C種	20～30	60～171		30～57		△	○	○	○	FA指針		
FA-C種超	30～45	103～327		23～50		△	○	○	○	実験にて検証		
* W=170kg/m ³ と仮定												

表 9 単位 FA 量一定毎のコンクリートの調合とその使用目的および調合設計指標 (JASS5 M-401 使用)

調合種類	単位量 (kg/m³)		FA置換率 FA/(C+FA) (%)	FA セメント 種別	水結合材 比* W/(C+FA) (%)	水セメント 比* W/C (%)	FAの主な使用目的				調合設計指標		
	FA	C					流動性 改善	水和熱 抑制	アルカリシカ 反応抑制	高流動	構造体強度 補正值 S 値	耐久設計 基準強度 Fd	
FA-20	20	240 ～ 400	5～8	A種	40～65	43 ～71	○				普通ポルトランドセメントと同値		
FA-60	60		13～20	B種	37～57		△	○	○		JASS5, FA指針		
FA-80	80		17～25	B種, C種	35～53		△	○	○				
FA-120	120		23～33	C種, C種超	33～47		△	○	○	○	FA指針（実験にて検証）		
* W=170kg/m³と仮定													

普通ポルトランドセメントと同じ値を用いることができると考えられる。

FA-B種は、FA置換率が10～20%、単位FA量が27～100kg/m³である。FAの主要な使用目的は、セメントの水和熱の低減、アルカリシリカ反応抑制対策である。また、調合設計指標の構造体強度補正值S値および耐久設計基準強度Fdは、JASS5およびFA指針に準拠してFAセメントB種の値を使用することができる。なお、構造体強度補正值S値に関しては、最近の研究において暑中期の構造体強度補正值はJASS5の標準値6N/mm²から3N/mm²へと小さくできるとの報告¹⁹⁾もなされている。

FA-C種は、FA置換率が20～30%、単位FA量が60～171kg/m³である。FAの主要な使用目的は、セメントの水和熱の低減、アルカリシリカ反応抑制対策、高流動対応である。また、調合設計指標の構造体強度補正值S値および耐久設計基準強度Fdは、JASS5には記載が無いがFA指針に準拠してFAセメントC種の値を使用することができる。なお、構造体強度補正值S値に関しては、最近の研究において暑中期の構造体強度補正值はJASS5の標準値6N/mm²から3N/mm²へと小さくできるとの報告^{18),20)}もなされている。

FA-C種超は、FA置換率が30～45%、単位FA量が103～317kg/m³である。FAの主要な使用目的は、セメントの水和熱の低減、アルカリシリカ反応抑制対策、高流動対応である。しかし、調合設計指標の構造体強度補正值S値および耐久設計基準強度Fdは、JASS5やFA指針に記載が無く、既往の実験結果等^{16),17),18)}を参考にして事前実験により求めておく必要がある。

6.2 単位 FA 量一定による方法

最近、単位FA量を例えば120kg/m³一定とするようなコンクリートの調合方法²⁾も実用化されている。そこで、単位FA量一定の値は、レディーミクストコンクリート工場実用化されている実績等を考慮し20kg/m³、60kg/m³、80kg/m³、120kg/m³の4ケースとし、

調合種類FA-20、FA-60、FA-80、FA-120毎に、前述の図1および表1を参考に、FAⅡ種(JASS5 M-401)を使用したコンクリートの調合とその使用目的および調合設計指標を表9に示す。

FA-20は、FA置換率が5～8%でFAセメントA種相当である。FAの主要な使用目的は、細骨材補充混和材として細骨材の粒形・粒度が不良な場合の品質改善を行うものであり、その結果、コンクリートの流動性改善が図れている。また、調合設計指標の構造体強度補正值S値および耐久設計基準強度Fdは、JASS5に準拠し普通ポルトランドセメントと同じ値を用いることができると考えられる。

FA-60は、FA置換率が13～20%でFAセメントB種相当であり、FAの主要な使用目的は、セメントの水和熱の低減およびアルカリシリカ反応抑制対策である。また、FA-80は、FA置換率が17～25%でFAセメントB種またはC種相当であり、FAの主要な使用目的は、アルカリシリカ反応抑制対策およびセメントの水和熱の低減である。FA-60およびFA-80における調合設計指標の構造体強度補正值S値および耐久設計基準強度Fdは、JASS5およびFA指針に準拠して使用することができる。

FA-120は、FA置換率が23～33%でFAセメントC種相当またはC種超相当であり、FAの主要な使用目的は、高流動のための粉体確保およびセメントの水和熱の低減並びにアルカリシリカ反応抑制対策である。なお、調合設計指標の構造体強度補正值S値および耐久設計基準強度Fdは、JASS5には記載が無いが、FA置換率30%以下ではFA指針に準拠することができる。しかし、FA置換率30%超に関しては既往の実験結果等^{16),17),18)}を参考にして事前実験により求めておく必要がある。

6.3 セメント有効係数Kによる方法

FAコンクリートにおける発熱特性、強度発現特性、中性化抵抗性等を下式のFAのセメント有効係数Kで評価し調合設計に用いる方法が考えられる。

$$C_{eq} = C + K \times FA \cdots \cdots \cdots (1)$$

C_{eq} : 等価セメント量 (kg/m³) , K : セメント有効係数

C : 単位セメント量 (kg/m³) , FA : 単位 FA 量 (kg/m³)

強度における FA のセメント有効係数 K は、 FA 指針の解説において、標準養生では単位ポルトランドセメント量が多くなるほど大きく、単位ポルトランドセメント量 250～450kg/m³ の場合、材齢 28 日で約 0.25～0.55、材齢 91 日で約 0.60～0.95 となっている。しかし、1m 角の模擬柱部材試験体における同一環境（暑中期・標準期）かつ同一箇所（中央部・外周部）のコア強度に関して、 FA を使用しない場合でセメント水比との相関を求め、その相関式により FA コンクリートにおける FA の強度寄与率 K 値（材齢 91 日）を算出すると、その K 値は打込み温度が高くなるほど大きくなるとの報告²¹⁾もある。

発熱特性における FA のセメント有効係数 K は、単位ポルトランドセメント量が多くなるほど大きくなり、打込み温度 20～30℃において、単位ポルトランドセメント量 200～370kg/m³ で $K=0.45\sim0.67$ 程度であるとの報告²²⁾もある。

中性化抵抗性における FA のセメント有効係数 K は、養生期間が長いほど大きくなり、セメント量が少ない場合に小さくなる傾向があり、下式の提案がなされている²³⁾。

$$\left\{ \frac{W}{(C+FA)} \right\} \times \left\{ \frac{FA}{(C+FA)} \right\}^{0.25} \leq 0.35 \text{ の場合}$$

$$K=0.30 \text{ (屋外暴露)}, K=0.20 \text{ (屋内暴露)}$$

$$\left\{ \frac{W}{(C+FA)} \right\} \times \left\{ \frac{FA}{(C+FA)} \right\}^{0.25} > 0.35 \text{ の場合}$$

$$K=0 \text{ (屋外および屋内暴露)}$$

上記のように FA のセメント有効係数 K に関して様々な検討がなされている。しかし、 FA コンクリートにおける強度発現特性、発熱特性、中性化抵抗性等を FA のセメント有効係数 K で評価し調査設計に用いる方法は、まだデータが少なく、今後の研究が望まれる。

7. まとめ

今回、 FA コンクリートにおける使用用途別調査の分析を行うとともに、日本国内の指針・仕様書の現状を整理し、 FA II 種 (JASS5 M-401) を使用したコンクリートの調査設計に関して考察を行い、下記の知見が得られた。

- 1) セメント置換と細骨材補充の両者の FA を加えた FA 置換率 $(FA/(C+FA))$ (質量) を指標とし、 FA セメント A 種、B 種、C 種、C 種超に相当する調査毎に、コンクリートの使用目的および調査範囲を明らかにするとともに、調査指標（構造体強度補正值 S 値、耐久設計基準強度 F_d ）の求め方を示した (図 1, 表 8)。
- 2) 単位 FA 量 20kg/m³, 60kg/m³, 80kg/m³, 120kg/m³ 一定とした FA -20, FA -60, FA -80, FA -120 毎に、コンクリートの使用目的および調査範囲を明らかにするとともに、調査指標（構造体強度補正值 S 値、耐久設計基準強度 F_d ）の求め方を示した (図 1, 表 9)。
- 3) FA コンクリートにおける強度発現特性、発熱特性、中性化抵抗性等を FA のセメント有効係数 K で評価し調査設計に用いる方法は、多少のデータは蓄積されているがまだデータが少なく、今後の研究が望まれる。

参考文献

- 1) 日本建築学会: FA を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説, 2007
- 2) 船本憲治: FA をセメント内外割で多量に使用したコンクリートの調査設計に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北), pp.145-146, 2018.9
- 3) 船本憲治ほか 3 名: FA をスラリーとして 120kg/m³ セメント外割使用した高強度・高流動コンクリートの強度発現および発熱特性, Cement Science and Concrete Technology, No.69, pp.319-326, 2016.3
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート工事標準仕様書・同解説 (JASS5), 2018
- 5) 倉富五夫ほか 4 名: 流動化剤を用いたコンクリートの品質管理, セメント・コンクリート, No.440, pp.40-49, 1983.9
- 6) 中村和行ほか 6 名: 鉄筋コンクリート構造物の長期健全性モニタリングに関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), pp.1109-1112, 1999.9
- 7) 尾崎昌彦ほか 3 名: コンクリートの長期物性モニタリング試験, 日本建築学会技術報告集, 第 13 号, pp.9-14, 2001.7
- 8) 伊藤憲治ほか 5 名: FA を用いたコンクリートの建物基礎への適用, 日本建築学会学術講演梗概集 (北陸), pp.723-728, 2002.8
- 9) 船本憲治ほか 2 名: 石炭火力発電所から生産される FA および FA コンクリートの品質変動, コンクリート工学誌, Vol.41, No.6, pp.55-60, 2003.6
- 10) 清原一彦ほか 1 名: 保護仕上げ塗装の長期暴露試験結果, コンクリート工学誌, Vol.41, No.9, pp.49-53, 2003.9
- 11) 黒田泰弘ほか 3 名: FA コンクリートの大規模建築工事への適用, 日本建築学会学術講演梗概集 (北陸), pp.715-722, 2010.9
- 12) 渡辺健治ほか 3 名: $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ の高流動コンクリートを用いた高さ 104m の CFT 圧入工事, コンクリート工学誌, Vol.36, No.10, pp.26-30, 1998.10
- 13) 初村繁輝ほか 3 名: 外割で FA を用いるコンクリートによる床のひび割れ低減対策の検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), pp.665-666, 2008.9
- 14) 土木学会: 循環型社会に適した FA コンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー132, 2009.12
- 15) 船本憲治: 実構造物における FA コンクリートの計画調査に関する実態調査, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 38 号, pp.1-4, 2012.2
- 16) 武田康雄ほか 3 名: FA を積極的に使用したコンクリートの建築物基礎への適用, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), pp.775-776, 2015.9
- 17) 石原義彦ほか 3 名: FA を大量に用いたコンクリート調査に関する試験検討, コンクリート工学年次論文集, pp.115-120, Vol.37, No.1, 2015
- 18) 本村一成ほか 4 名: C 種相当の FA コンクリートの適用に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), pp.429-432, 2016.8
- 19) 峯秀和ほか 2 名: FA II 種品を用いたコンクリートの構造体強度補正值 (S 値) の実機実験 (標準期・夏期), 日本建築学会学術講演集 (中国), pp.179-180, 2017.8
- 20) 笠井浩ほか 1 名: FA を用いたマスコンクリートの構造体強度補正值に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.463-464, 2018.9
- 21) 船本憲治: 高温環境下の高強度・高流動コンクリートにおける FA の強度寄与率および構造体強度補正值に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.117-122, 2018
- 22) 船本憲治: FA のセメント有効係数に基づいた FA コンクリートの特性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.105-110, 2016
- 23) 土木学会: 循環型社会に適した FA コンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー132, 2009

[2019 年 1 月 25 日原稿受理 2019 年 3 月 25 日採用決定]