フライアッシュコンクリートの 構造体強度補正值(S 値, SM 値) に関する調査研究

STUDY ON COMPENSATING VALUE (S, SM) OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE USING FLY ASH

船本憲治 ——— * 1 鄒 林琳 ——— * 2

Kenji FUNAMOTO ——— * 1 Rinrin SU ——— * 2

キーワード：
フライアッシュ, 構造体強度補正值, 気温, 養生温度,
フライアッシュセメント B 種, フライアッシュセメント C 種

Keywords:
Fly ash, Compensating value of compressive strength, Temperature,
Curing temperature, Fly ash cement (type-B), Fly ash cement (type-C)

According to the investigation of recent research thesis, this paper describes the compensation vale of compressive strength of concrete using fly ash. As the result, in case of fly ash cement (type-B), the compensation vale of compressive strength can apply the standard value of JASS5 on the safe side and the compensation vale of concrete with hot weather can be reduced from 6N/mm^2 to 3N/mm^2 . In case of fly ash cement (type-C), the compensation vale of compressive strength should use the standard value of fly ash cement (type-B) of JASS5 as a reference value.

1. はじめに

資源有効利用促進法の指定副産物であるフライアッシュ（以下、FA と略記）は、コンクリート混和材として、コンクリートの流動性の改善、単位水量の低減、水和熱の低減、長期強度の増進、アルカリシリカ反応抑制対策等の性能向上が認められ、従来から様々な用途で使用されている。また、最近では、地球温暖化に影響を及ぼす CO_2 排出量の削減の目的からもその有効利用が求められている。

そのような中、FA コンクリートの普及に合わせコンクリートの調合設計に関する多くの知見も得られつつあり、コンクリートの構造体強度補正值（S 値, SM 値）に関しては、日本建築学会より 2007 年に「FA を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説（以下、FA 指針と略記）」、2018 年に「鉄筋コンクリート工事標準仕様書・同解説（以下、JASS 5 と略記）」が発刊され、その標準値が示されている。なお、FA 指針は文献 1)~6)の実験結果から、JASS 5 は文献 7)の実験結果から標準値を求めている。

しかし、近年、暑中期間において FA を普通ポルトランドセメントの内割で 20%置換した構造体マスコンクリートは、長期材齢における強度の増進の鈍化が小さく、材齢 91 日の強度は材齢 28 日の管理材齢用供試体強度よりも大きくなる（即ち、 $_{28}\text{SM}_{91} < 0$ ）との報告⁸⁾がなされている。また、北陸および関西地区での実施工実験において、暑中期間における FA セメント B 種を使用したマスコンクリートの構造体強度補正值（ $_{28}\text{SM}_{91}$ ）は現行の標準値よりも小さい 0 あるいは 3N/mm^2 が望ましいとの報告^{9),10)}もなされている。

そこで、本論文では、FA コンクリートの構造体強度補正值（S 値, SM 値）に関する最近の文献を調査し、その標準値について考察を行った。なお、本論文では、FA を混和材として用いた場合もその混合比率に応じて FA セメント B 種および C 種と記述した。また、マスコンクリートは部材断面の最小寸法が 80cm 以上とした。

2. 日本建築学会標準仕様書等における FA コンクリートの構造体 強度補正值

構造体コンクリートの強度管理として、建築分野では構造体強度補正值が用いられている。構造体強度補正值 $_{\text{m}}\text{S}_{\text{n}}$ とは、コンクリートの品質基準強度からコンクリートの調合管理強度を求めるための補正值であり、標準養生した供試体の材齢 m 日における圧縮強度と構造体コンクリートの材齢 n 日における圧縮強度の差である。

FA コンクリートにおける構造体強度補正值の標準値を表 1 および表 2 に示す。日本建築学会からは 2007 年に FA 指針により標準値が示され、その後、2018 年に JASS 5 により標準値が示されている。なお、構造体強度補正值は、一般仕様のコンクリートの場合の S 値およびマスコンクリートの場合の SM 値が示されている。

3. FA コンクリートの構造体強度補正值に関する文献調査

3.1 調査方法

今回の文献調査は、日本建築学会のホームページの論文検索シス

表 1 FA 一般仕様コンクリートの構造体強度補正值 (S 値) の標準値

FAセメント 種別	日本建築学会 仕様書・指針	コンクリートの打込みから材齢28日までの期間の 予想平均気温 θ の範囲 (°C)				
B 種	JASS5-2018		$0 \leq \theta < 9$	$9 \leq \theta < 25$		$25 \leq \theta$
B, C 種	FA指針-2007	$2 \leq \theta < 4$	$4 \leq \theta < 9$	$9 \leq \theta < 16$	$16 \leq \theta < 25$	$25 \leq \theta$
$_{28}\text{SM}_{91} (\text{N/mm}^2)$		9	6	3	0	3

表 2 FA マスコンクリートの構造体強度補正值 (SM 値) の標準値

FAセメント 種別	日本建築学会 仕様書・指針	マスコンクリートの打込みから材齢28日までの期間の 予想平均養生温度 θ の範囲 (°C)			
B 種	JASS5-2018			$0 \leq \theta < 25$	$25 \leq \theta$
B, C 種	FA指針-2007			$2 \leq \theta$	
$_{28}\text{SM}_{91} (\text{N/mm}^2)$		9	6	3	6
B, C 種	FA指針-2007	$2 \leq \theta < 3$	$3 \leq \theta < 6$	$6 \leq \theta$	
$_{56}\text{SM}_{91} (\text{N/mm}^2)$		9	6	3	6

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)

²⁾ 西日本工業大学大学院工学研究科 大学院生

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

²⁾ Graduate Student, Nishinippon Institute of Technology

テムにより、まず、「フライアッシュ」かつ「構造体強度補正值」で8件の論文を抽出し、次に、「フライアッシュセメント」かつ「構造体強度補正值」で3件の論文を抽出し、高流動コンクリートの事例を除きすべての論文を選定した。

3.2 各文献の概要および実験結果

今回選定した文献8)~17)のFAコンクリートの調査を表3に示す。すべての調査において、セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、FAはJISⅡ種品を用いている。なお、文献8)~17)のうち、文献9), 10), 13), 17)は、平均気温または平均養生温度と構造体強度補正值（S値、SM値）の相関図が示されている。一方、その他の文献8), 11), 12), 14), 15), 16)にはその相関図が示されておらず、各文献の平均気温、標準養生供試験体強度、構造体91日コア強度、構造体強度補正值を表4に示す。

文献8)は、暑中環境で施工される構造体マスコンクリートの品質管理に関する研究論文であり、FAに関してはFAセメントB種の実験結果が得られている。その中で、材齢28日および標準養生供試験体強度およびコア強度（模擬柱 1m×1m）との関係図が記載されており、その図より₂₈SM₉₁を求めた。なお、今回の分析では、図示されている材齢7日までの気温より平均気温を求め、JASS5の検討事例に準じて+5℃したものを材齢28日までの平均養生温度とした。

文献9)は、北陸地区でのレディーミクストコンクリート工場での実験結果（FAセメントB種・模擬柱 1m×1m および簡易断熱供試体）であり、材齢28日までの平均養生温度と₂₈SM₉₁の相関図が記載されており、今回の分析ではその図を用いた。なお、この論文の纏めは、「暑中期間におけるFAセメントB種を用いたコンクリートの₂₈SM₉₁の値は0あるいは3N/mm²が望ましい」となっている。また、材齢91日においては簡易断熱供試体強度はコア強度より平均で1.4N/mm²低くなっているものの両者の強度はほとんど相違なかったとなっている。

文献10)は、関西地区でのレディーミクストコンクリート工場での実験結果（FAセメントB種・模擬柱 1m×1m 程度および簡易断熱供試体）であり、材齢28日までの平均養生温度と₂₈SM₉₁の相関図が記載されており、今回の分析ではその図を用いた（数値データ確認）。なお、この論文の纏めは、「夏期における₂₈SM₉₁の値は0と評価できる」となっている。また、材齢91日においては簡易断熱供試体強度はコア強度より平均で2N/mm²程度低くなっている。

文献11)は、国土交通省建築基準整備促進事業に伴い、各種混和材を用いた構造体コンクリートの圧縮強度に関する検討を行った論文であり、FAに関してはFAセメントB種およびC種の実験結果が得られている。その中で、夏期および標準期に関しては、材齢28日の標準養生供試験体強度および材齢91日のコア強度（模擬柱 1m×1m・模擬壁厚 0.2m・模擬床厚 0.2m）の値が表として記載されており、その表の値より₂₈S₉₁および₂₈SM₉₁を求めた。なお、今回の分析では、図示されているせき板存置期間までの積算温度より平均気温を求めその値を材齢28日までの平均気温と見なすとともに、JASS5の検討事例に準じて材齢28日までの平均気温に+5℃したものを材齢28日までの平均養生温度とした。一方、冬期に関しては、文献11)に引き続き構造体強度補正值を検討した文献12)に材齢と構造体強度補正值との関係図が記載されており、その図より₂₈SM₉₁を求めた。

文献13)は、関西地区の実施工例での実験結果（FAセメントB種・模擬柱 0.6m×0.6m）であり、材齢28日までの平均養生温度と₂₈S₉₁の相関図が記載されており、今回の分析ではその図を用いた。

文献14)は、九州地区の実施工例での実験結果（FAセメントB種・C種・C種超）であり、材齢28日および56日標準養生供試験体強度並びに材齢91日コア強度（模擬柱 1m×1m）の値が記載されており、その値より₂₈SM₉₁および₅₆SM₉₁を求めた。なお、図示されてい

表3 FAコンクリートの調査

文献	FAセメント種別	目標スランプ (cm)	W/C (%)	W/(C+FA) (%)	FA/(C+FA) (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤
						W	C	FA	S	G	
8)	B種	15	52	42	20	183	349	87	692	986	A E減水剤
9)	B種	18	46	38	17	184	402	82	624	985	A E減水剤
		18	52	43	17	178	344	70	701	985	
		18	60	50	17	172	286	58	777	985	
10)	B種	15	69	55	20	—	—	—	—	—	A E減水剤
		15	63	50	20	—	—	—	—	—	
		15	56	45	20	—	—	—	—	—	
11)	B種	18	75	60	20	180	240	60	864	923	A E減水剤
		18	59	47	20	170	290	72	835	923	高性能A E減水剤
		18	67	47	30	170	253	109	825	923	
13)	B種	15, 18	63	50	20	—	—	—	—	—	高性能A E減水剤
			56	45	20	—	—	—	—	—	
			50	40	20	—	—	—	—	—	
14)	B種	15	54	43	20	175	326	81	710	953	A E減水剤
	C種	15	55	41	26	177	322	113	671	953	
		12	66	46	30	157	239	103	728	1057	
	C種超	12	67	45	33	158	236	117	712	1057	
15)	C種超	12	75	42	44	151	201	156	557	556	A E減水剤
16)	C種超	12	65	44	33	155	237	118	717	1052	A E減水剤
		12	60	40	33	158	263	129	671	1060	
		12	60	40	33	158	263	129	671	1060	
17)	B種	15	55	44	20	180	327	82	668	980	A E減水剤
		15	63	50	20	175	280	70	769	944	
		15	69	55	20	173	252	63	837	913	
		15	60	44	27	180	299	110	659	980	
	C種	15	69	50	27	175	255	95	761	944	
		15	75	55	27	173	230	85	831	913	
		15	75	55	27	173	230	85	831	913	
		15	75	55	27	173	230	85	831	913	

* 複数工場使用の場合は代表的な事例とし、記載無しは「—」とした

表4 構造体強度補正值（S値、SM値）の実験結果

文献	FAセメント種別	部材	時期	材齢28日までの平均気温 (℃)	標準養生28日供試験体強度 (56日強度) (N/mm ²)	構造体91日コア強度 (N/mm ²)	₂₈ SM ₉₁ (₂₈ S ₉₁ (₅₆ SM ₉₁)) (N/mm ²)
8)	B種	柱	夏期	31.0	35.5	38.5	-3.0
11) 12)	B種	柱	標準期	15.0	36.2	36.2	0.0
				15.0	23.3	24.4	-1.1
			夏期	23.0	39.1	37.0	2.1
				23.0	20.3	26.1	-5.8
			冬期	4.5	—	—	2.5
				4.5	—	—	-1.5
		壁	標準期	15.0	36.2	34.5	1.7
				15.0	23.3	24.9	-1.6
			夏期	23.0	39.1	43.0	-3.9
				23.0	20.3	25.7	-5.4
		床	標準期	15.0	36.2	30.6	5.6
				15.0	23.3	20.6	2.7
			夏期	24.0	39.1	34.7	4.4
				24.0	20.3	21.4	-1.1
14)	C種	柱	標準期	15.0	30.8	32.0	-1.2
			夏期	23.0	34.3	38.8	-4.5
			冬期	4.5	—	—	2.5
			標準期	15.0	30.8	32.2	-1.4
		壁	夏期	23.0	34.3	40.3	-6.0
			標準期	15.0	30.8	26.0	4.8
			夏期	23.0	34.3	32.7	1.6
			冬期	10.0	41.9	47.0	-5.1
	C種超	柱	夏期	30.0	34.7	41.7	-7.0
			冬期	10.0	40.3	44.8	-4.5
			夏期	30.0	35.0	36.8	-1.8
			冬期	8.0	33.9	40.7	-6.8
15)	C種超	柱	夏期	25.0	28.0	38.6	-10.6
16)	C種超	柱	冬期	8.0	(37.9)	38.5	(-0.6)
				25.0	(32.9)	39.3	(-6.4)
				20.0	(36.1)	34.8	(1.3)
				5.0	(34.3)	37.2	(-2.9)
				8.0	(30.6)	31.7	(-1.1)
				8.0	(31.7)	36.0	(-4.3)

* 記載無しは「—」とした

る材齢 21 日までの気温より平均気温を求め、JASS 5 の検討事例に準じて+5℃したものを材齢 28 日までの平均養生温度とした。

文献 15)は、九州地区の実施工例での実験結果 (FA セメント C 種超) であり、材齢 56 日標準養生供試体強度および材齢 91 日コア強度 (模擬柱 1m×1m) とともに $_{28}SM_{91}$ の値が記載されていた。なお、今回の分析では、材齢 14 日までの気温が図示されておりその図より平均気温を求め、JASS5 の検討事例に準じて+5℃したものを材齢 28 日までの平均養生温度とした。

文献 16)は、九州地区の実施工例での実験結果 (FA セメント C 種超) であり、材齢 56 日標準養生供試体強度および材齢 91 日コア強度とともに $_{28}SM_{91}$ の値が記載されていた。なお、今回の分析では、図示されている材齢 28 日までの気温より平均気温を求め、JASS 5 の検討事例に準じて+5℃したものを材齢 28 日までの平均養生温度とした。

文献 17)は、レディーミクストコンクリート工場での実験結果 (FA セメント B 種および C 種・模擬柱 1m×1m および簡易断熱供試体) であり、材齢 28 日までの平均養生温度と $_{28}SM_{91}$ の相関図が記載されており、今回の分析ではその図を用いた (数値データ確認)。なお、この論文の纏めは、「暑中期における FA セメント B 種および C 種の $_{28}SM_{91}$ の値は 0 と評価でき、FA セメント C 種の場合の $_{28}SM_{91}$ の値は B 種の場合より小さい傾向にある」となっている。なお、材齢 91 日において簡易断熱供試体強度とコア強度には 1~2N/mm² 程度の差があり、簡易断熱供試体強度の場合の $_{28}SM_{91}$ の値は安全側の設計として 3N/mm² を加えた値で評価している。

4. 構造体強度補正值 $_{28}SM_{91}$ および $_{28}S_{91}$ の検討

4.1 FA セメント B 種を使用したマスコンクリートの $_{28}SM_{91}$

まず、FA セメント B 種における、現在の JASS 5 や FA 指針で採用されている現行データ (49 個) による、材齢 28 日までの平均養生温度とマスコンクリートの $_{28}SM_{91}$ の関係を図 1 に示す。なお、図 1 の FA 指針のデータは文献 1)~6)の実験結果 (24 個) を、JASS 5 のデータは文献 7)の実験結果 (25 個) を用いている。その結果、JASS5 の標準値は、すべてのデータを安全側で評価できているが、FA 指針の標準値は、一部、暑中期間 (平均養生温度 $\theta \geq 25^{\circ}\text{C}$) のデータが標準値を超過している。

次に、FA セメント B 種における今回のデータ (48 個) を図 1 のデータに追加したデータ (97 個) による、材齢 28 日までの平均養生温度とマスコンクリートの $_{28}SM_{91}$ の関係を図 2 に示す。なお、 $_{28}SM_{91}$ の標準値は、JASS 5 の標準値のうち暑中期間 (平均養生温度 $\theta \geq 25^{\circ}\text{C}$) の 6N/mm² を 3N/mm² へと低減し一律 3N/mm² とした値を今回提案値とした。その結果、今回追加したデータはすべて $_{28}SM_{91}$ が 3N/mm² 以下となっており、特に暑中期間で負の値が大きくなっている。従って、暑中期間の $_{28}SM_{91}$ の標準値を現行 JASS5 の 6N/mm² から中庸熟ポルトランドセメントと同じ 3N/mm² へと低減する方が暑中期間におけるセメントの水和熱を低減する目的からしても望ましいと考えられる。しかし、暑中期間において JASS5 のデータで今回提案値を超過するものも存在した。

そこで、実験データの超過確率を検討するために、図 1 における暑中期間 (平均養生温度 $\theta \geq 25^{\circ}\text{C}$) の $_{28}SM_{91}$ の度数分布を図 3 に示す。全 59 個のデータにおいて、 $_{28}SM_{91}$ の平均値は -4.21N/mm²、

図 1 平均養生温度とマスコンクリートの $_{28}SM_{91}$ の関係 (FA セメント B 種 : 現行データのみ)

図 2 平均養生温度とマスコンクリートの $_{28}SM_{91}$ の関係 (FA セメント B 種 : 今回データ含む)

図 3 マスコンクリートの $_{28}SM_{91}$ の度数分布 (FA セメント B 種 : 平均養生温度 $\theta \geq 25^{\circ}\text{C}$)

標準偏差 3.15N/mm² となっており、正規分布と仮定した場合、 $_{28}SM_{91} = 3\text{N/mm}^2$ を標準値とした時の不良率は約 1.1% となる。従って、暑中期間における $_{28}SM_{91}$ の標準値を現行 JASS5 の 6N/mm² から中庸熟ポルトランドセメントと同じ 3N/mm² へ低減しても問題ないと考えられる。

4.2 FA セメントB種を使用した一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$

まず、FA セメントB種における、現在のJASS5やFA 指針で採用されている現行データ（76 個）による、材齢 28 日までの平均気温と一般仕様のコンクリートの $_{28}S_{91}$ の関係を図 4 に示す。なお、図 4 のFA 指針のデータは文献 1)～6)の実験結果（28 個）を、JASS5 のデータは文献 7)の実験結果（48 個）を用いている。その結果、JASS5 および FA 指針の標準値は、一部、平均気温 $0 \leq \theta < 9^{\circ}\text{C}$ の範囲のデータが標準値を超過している。

次に、FA セメントB種における今回のデータ（22 個）を図 4 のデータに追加したデータ（98 個）による、材齢 28 日までの平均気温と一般仕様のコンクリートの $_{28}S_{91}$ の関係を図 5 に示す。なお、 $_{28}S_{91}$ の標準値は、JASS5 の標準値のうち暑中期間（平均養生温度 $\theta \geq 25^{\circ}\text{C}$ ）の 6N/mm^2 を 3N/mm^2 へと低減した値を今回提案値とした。

その結果、 $_{28}S_{91}$ は平均気温が高くなるほど小さい値となる傾向が得られ、暑中期間の $_{28}S_{91}$ の標準値を 6N/mm^2 から 3N/mm^2 へと低減する方が望ましいと考えられる。しかし、一部のデータで今回提案値を超過するものも存在した。なお、今回追加したデータの中では特に床の $_{28}S_{91}$ （▲）が大きい値となっているが、この床の $_{28}S_{91}$ が大きい値となった要因として、文献 11)、12)では、模擬床部材においてコンクリートの打込み上面から水分が逸散したことによる乾燥がコンクリートの強度発現および強度増進に影響を及ぼしたものと推察している。

そこで、実験データの超過確率を検討するために、図 5 における平均気温 $0 \leq \theta < 9^{\circ}\text{C}$ または $9 \leq \theta < 30^{\circ}\text{C}$ の場合の $_{28}S_{91}$ の度数分布を図 6 および図 7 に示す。

図 6 の平均気温 $0 \leq \theta < 9^{\circ}\text{C}$ の場合は、全 32 個のデータにおいて、平均値は 0.32N/mm^2 、標準偏差は 3.55N/mm^2 となっており、正規分布と仮定した場合、 $_{28}S_{91}=6\text{N/mm}^2$ を標準値とした時の不良率は約 5.5% となる。従って、不良率は僅かに 5% を超過するものの、平均気温 $0 \leq \theta < 9^{\circ}\text{C}$ における $_{28}S_{91}$ の標準値を現行 JASS5 の 6N/mm^2 としても問題ないと考えられる。次に、図 7 の平均気温 $9 \leq \theta < 30^{\circ}\text{C}$ の場合は、全 66 個のデータにおいて、 $_{28}S_{91}$ の平均値は -4.37N/mm^2 、標準偏差は 4.36N/mm^2 となっており、正規分布と仮定した場合、 $_{28}S_{91}=3\text{N/mm}^2$ を標準値とした時の不良率は約 4.7% となる。従って、平均気温 $9 \leq \theta < 30^{\circ}\text{C}$ における $_{28}S_{91}$ の標準値を今回提案値の 3N/mm^2 としても問題はないと考えられる。

図 4 平均気温と一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$ の関係（FA セメントB種：現行データのみ）

図 5 平均気温と一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$ の関係（FA セメントB種：今回データ含む）

図 6 一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$ の度数分布（FA セメントB種：平均気温 $0 \leq \theta < 9^{\circ}\text{C}$ ）

図 7 一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$ の度数分布（FA セメントB種：平均気温 $9 \leq \theta < 30^{\circ}\text{C}$ ）

図 8 平均養生温度とマスコンクリートの $_{28}S_{M91}$ の関係（FA セメントC種：今回データ含む）

4.3 FAセメントC種を使用したマスコンクリートの $_{28}S_{M91}$

FAセメントC種における現行データ(14個)に今回のデータ(21個)を追加したデータ(35個)による、材齢28日までの平均養生温度とマスコンクリートの $_{28}S_{M91}$ の関係を図8に示す。なお、 $_{28}S_{M91}$ の標準値は、参考値として、制定年が新しいJASS5(2018)のFAセメントB種の場合の標準値を併記するとともに、暑中期間の $6N/mm^2$ を $3N/mm^2$ へと低減した値も今回提案値として併記した。

その結果、今回のデータはすべて $_{28}S_{91}$ が $3N/mm^2$ 以下となっており、特に暑中期間(平均養生温度 $\theta \geq 25^\circ C$)で負の値が大きくなっている。従って、暑中期間での $_{28}S_{91}$ の標準値を現行JASS5のFAセメントB種の $6N/mm^2$ から $3N/mm^2$ へと低減する方が暑中期間におけるセメントの水和熱を低減する目的からしても望ましいと考えられる。

そこで、図8における平均養生温度 $\theta \geq 9^\circ C$ の場合の $_{28}S_{M91}$ の度数分布を図9に示す。全35個のデータにおいて、 $_{28}S_{M91}$ の平均値は $-1.8N/mm^2$ 、標準偏差は $5.10N/mm^2$ となっており、正規分布と仮定した場合、 $_{28}S_{M91}=3N/mm^2$ を標準値とした時の不良率は約17%となる。従って、 $_{28}S_{M91}=3N/mm^2$ は参考値とし、今後のデータの蓄積が必要と考えられる。ただし、至近のレディーミクストコンクリート工場での実機データ^{9),10),17)}および文献17)の「FAセメントC種の場合の $_{28}S_{M91}$ の値はFAセメントB種の場合より小さい傾向にある」との知見を考慮すると、 $_{28}S_{M91}=3N/mm^2$ を採用していく方が望ましいと思われる。

4.4 FAセメントC種を使用した一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$

FAセメントC種における現行データ(8個)に今回のデータ(4個)を追加したデータ(12個)による、材齢28日までの平均気温と一般仕様のコンクリートの $_{28}S_{91}$ の関係を図10に示す。なお、 $_{28}S_{91}$ の標準値は、参考値として、制定年が新しいJASS5(2018)のFAセメントB種の標準値を併記した。その結果、 $_{28}S_{91}$ は平均気温が高くなるほど小さい値となる傾向が得られ、暑中期間の $_{28}S_{91}$ の標準値を $6N/mm^2$ から $3N/mm^2$ へと低減する方が望ましいと考えられる。しかし、一部のデータで標準値を超過するものも存在した。なお、今回のデータでは特に床の $_{28}S_{91}$ (▲)が大きい値となっているが、この床の $_{28}S_{91}$ が大きい値となるのは、図5のFAセメントB種の場合と同様の傾向であり、その要因も、文献11),12)では、同様の要因を挙げている。

そこで、図10において材齢28日までの平均気温 $9 \leq \theta < 25^\circ C$ の場合の $_{28}S_{91}$ の度数分布を図11に示す。その結果、全12個のデータにおいて、 $_{28}S_{91}$ の平均値は $-2.25N/mm^2$ 、標準偏差は $7.09N/mm^2$ となっており、正規分布と仮定した場合、 $_{28}S_{91}=3N/mm^2$ を標準値とした時の不良率は約23%となる。従って、 $_{28}S_{91}=3N/mm^2$ は参考値とするのが望ましく、今後のデータの蓄積が必要と考えられる。

5. 構造体強度補正值 $_{56}S_{M91}$ の検討

FAセメントB種およびC種を使用したマスコンクリートの $_{56}S_{M91}$ のデータは、今回入手できていない。しかし、FAセメントC種超(FA置換率33~44%)の $_{56}S_{M91}$ は、文献14),15),16)により表4のようなデータが得られている。その結果、FAセメントC種超(FA置換率33~44%)の場合の $_{56}S_{M91}$ は、全6個の内、1つの値 $1.3N/mm^2$ を除くとすべて負の値となっている。

図9 マスコンクリートの $_{28}S_{M91}$ の度数分布
(FAセメントC種：平均養生温度 $\theta \geq 9^\circ C$)

図10 平均気温と一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$
の関係 (FAセメントC種：今回データ含む)

図11 一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$ の度数分布
(FAセメントC種：平均気温 $9 \leq \theta < 25^\circ C$)

6. 構造体強度補正值 $_{28}S_{Mn}$ ($n > 91$)に関する考察

FAコンクリートは材齢91日以降にもポズラン反応により強度増進が期待でき、文献12)では、マスコンクリートを対象とした模擬柱部材における構造体強度補正值 $_{28}S_{Mn}$ ($n=91, 182, 365$)の検討を行い、以下の知見が得られている。

FAコンクリートは、いずれの水結合材比および打込み時期においても、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比べて $_{28}S_{M91}$ からの $_{28}S_{M364}$ の低下量が全体的に大きくなる傾向が確認

され、この傾向は、打込み時期が冬期の場合に顕著であり、 $_{28}SM_{91}$ からの $_{28}SM_{364}$ の低下量は、FAセメントB種およびC種の場合で約 $20N/mm^2$ であった。そして、特に、材齢91日以降の強度増進が期待できるコンクリートにおいて、構造体コンクリート強度の保証材齢を延長することが可能であれば、構造体強度補正値を低減できると結論付けている。

7. まとめ

今回、FAコンクリートの構造体強度補正値（S値、SM値）に関する最近の文献を調査するとともに、その標準値について、現在のJASS 5やFA指針で採用されている現行データに今回のデータを追加して検討を行い、下記の知見が得られた。

- 1) FAセメントB種を使用したマスコンクリートの $_{28}SM_{91}$ は、暑中期間（平均養生温度 $\theta \geq 25^{\circ}C$ ）での現行JASS 5の $6N/mm^2$ から中庸熟ポルトランドセメントと同じ $3N/mm^2$ へと低減し、平均養生温度 $\theta \geq 0^{\circ}C$ の範囲で標準値をすべて $3N/mm^2$ としても問題はないと考えられる。また、この変更は、暑中期間におけるセメントの水和熱を低減する目的からしても望ましい。
- 2) FAセメントB種を使用した一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$ は、平均気温が高くなるほど小さい値となる傾向が得られ、その標準値は、暑中期間での現行JASS 5の標準値 $6N/mm^2$ から $3N/mm^2$ へと低減しても問題はないと考えられる。
- 3) FAセメントC種を使用したマスコンクリートの $_{28}SM_{91}$ は、今回追加したデータはすべて $3N/mm^2$ 以下になっており、特に暑中期間で負の値が大きい結果となった。一方、現在のFA指針で採用されている現行データに今回のデータを追加して検討した場合、前述のFAセメントB種と同じ一律 $3N/mm^2$ を標準値とすると不良率で多少問題がある結果となった。しかし、至近のレディーミクストコンクリート工場での実機データを考慮すると、標準値として $3N/mm^2$ を採用していく方が望ましいと思われる。
- 4) FAセメントC種を使用した一般仕様コンクリートの $_{28}S_{91}$ は、平均気温が高くなるほど小さい値となる傾向が得られ、その標準値は、暑中期間での現行JASS 5のFAセメントB種の標準値 $6N/mm^2$ から $3N/mm^2$ へと低減した方がよいと考えられる。しかし、現状ではデータが少なく、今後のデータ蓄積が必要と思われる。
- 5) FAセメントC種超（FA置換率33～44%）の $_{56}SM_{91}$ は、統計処理するまでのデータが得られていないが、現状、数例の実験データではほぼ負の値が得られている。

参考文献

- 1) 呉富栄：フライアッシュコンクリートの強度発現性の評価と調合設計への応用に関する研究、宇都宮大学博士学位論文、2005.3
- 2) 船本憲治：フライアッシュを使用したマスコンクリートの強度発現性およびその強度管理方法に関する一提案、コンクリート工学年次論文集、10-2、pp.1105-1110、2001
- 3) 日本建築学会：原子力発電所鉄筋コンクリート工事における品質管理に関する研究（フェーズⅣ）報告書、1989.3
- 4) 榊田佳寛、佐藤幸恵、中村成春、嵩英雄：低発熱形セメントを用いたコン

クリートの平均養生温度による強度補正値、日本建築学会構造系論文集、No.537、pp.7-12、2000.9

- 5) 榊田佳寛、嵩英雄、池内俊之、山崎庸行、中村成春：低発熱形セメントを用いた構造体コンクリートの強度発現性に関する研究、その3 強度補正値、日本建築学会学術講演梗概集（東北）、pp.805-806、2000.9
- 6) 榊田佳寛、佐藤幸恵、中村成春、嵩英雄：低発熱形セメントを用いたマスコンクリートの強度発現特性と調合強度の補正、日本建築学会構造系論文集、No.535、pp.7-12、2000.7
- 7) 佐藤幸恵、榊田佳寛：各種セメントを用いたコンクリートの構造体における強度発現と強度補正値、日本建築学会構造系論文集、第73巻、第630号、pp.1225-1232、2008.8
- 8) 小山智幸、湯浅昇、伊藤是清ほか6名：暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究 その6 柱試験体の強度性状、日本建築学会九州支部研究報告、第52号、pp.201-204、2013.3
- 9) 笠井浩、末永龍夫、阿部保彦、山崎康二ほか2名：フライアッシュセメントB種コンクリートの構造体強度補正値の検討（夏期における模擬試験体実験）、日本建築学会学術講演梗概集（近畿）、pp.239-240、2014.9
- 10) 峯秀和、小西勝介、笠井浩：フライアッシュⅡ種品を用いたコンクリートの構造体強度補正値（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
- 11) 大塚秀三、中田善久、榊田佳寛、佐藤幸恵ほか12名：各種結合材を用いた構造体コンクリートの圧縮強度管理の基準に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.141-174、2015.9
- 12) 大塚秀三、中田善久、榊田佳寛、野口貴文ほか4名：各種結合材を用いた構造体コンクリートの長期強度および構造体強度補正値に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.333-336、2016.8
- 13) 岡田裕、河合智寛、朝比奈俊和、山崎順二ほか2名：フライアッシュを混合したコンクリートの実施工への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp.535-538、2013.8
- 14) 本村一成、続博誉、秦野礼二、黒岩秀介ほか2名：C種相当のフライアッシュコンクリートの適用に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.429-432、2016.8
- 15) 武田康雄、津田智弘、奈良田雄二、黒岩秀介：フライアッシュ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、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.775-776、2015.9
- 16) 松尾集矢、宝口繁紀樹、石原義彦、笠井浩ほか2名：フライアッシュを大量に用いたコンクリート調合に関する試験検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.773-774、2015.9
- 17) 笠井浩、全振換：フライアッシュを用いたマスコンクリートの構造体強度補正値に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、pp.463-464、2018.9.

[2018年9月10日原稿受理 2018年12月19日採用決定]