

報告 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

石原 義彦^{*1}・宝口 繁紀^{*2}・稲富 敬^{*3}・笠井 浩^{*4}

要旨：フライアッシュ（FA）は，CO₂削減や資源の有効利用の観点から有効な建設材料である。本報告では火力発電所建物地下躯体工事のマットスラブ基礎に FA を大量に用いたコンクリート調合の適用に向け，普通ポルトランドセメントの内割 30%を FA に置換し，さらに外割で FA 細骨材置換率を変化させた調合を試験的に検討した。その結果，内割 30%+外割 2.5%置換 FA 調合は単位水量や粘性が小さくフレッシュ性状が良好であった。また冬期の模擬部材試験による $s_{6S_{91}}$ は，0N/mm² 以下で日本建築学会 FA 指針の標準値よりも低減できる可能性があることや温度応力解析の結果，有害なひび割れの発生が小さいことを確認できた。
キーワード：フライアッシュ，環境配慮，内割り置換，外割り置換，構造体強度補正值

1. はじめに

石炭火力発電所から排出されるフライアッシュは，二酸化炭素（CO₂）排出量の削減や資源の有効利用の観点から，地球環境負荷低減に資する有効な建設材料である。

一般にフライアッシュは普通ポルトランドセメントの内割 15～20%を混入したフライアッシュセメント B 種相当を用いたコンクリートによる適用事例は多いが，内割 30%のフライアッシュセメント C 種相当にさらに細骨材置換でフライアッシュ混和材を大量に用いたコンクリートの建築工事への適用事例は比較的少ない。

本報告では，建物地下躯体工事のマットスラブ基礎コンクリートへの適用を対象に，なるべく多くのフライアッシュを用いた調合を得るために室内試験や実機試験によるフライアッシュコンクリートの調合検討，構造体強度補正值 m_{Sn} 値の検討および温度応力解析によるひび割れの検討を行った結果について述べる。

2. 要求品質

本フライアッシュ（以下 FA）コンクリートの要求品質を表 - 1 に示す。FA コンクリートは，普通ポルトランドセメントに混和材ならびに細骨材の一部として FA を使用する。また粗骨材の最大寸法は 40mm であるため JIS A 5308 によると，JIS 認証を受けられるコンクリートの呼び強度の最大値は 30 となる。なお，日本建築学会 FA 指針¹⁾（以下 FA 指針）に従い FA 置換率は 20%を超えるが，かぶり厚さを 20mm 増すことで，耐久設計基準強度

表 - 1 要求品質

粗骨材最大寸法 (mm)	設計基準強度 (N/mm ²)	耐久設計基準強度 (N/mm ²)	呼び強度	W/B (%)	FA 内割 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位ポルトランドセメント量 (kg/m ³)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)
40	24	24	30 以下	50 以下	30	185 以下	235 以上	12または 15	4.5

は割増しをしないものとしている。単位ポルトランドセメント量の最小値は FA 指針の単位結合材量 290 kg/m³ から算出した。上記 290 kg/m³ は FA セメント B 種相当（内割 20%）における単位結合材量と考えられる。したがって，290 kg/m³ の 80%を単位ポルトランドセメント量の最小値として 235 kg/m³ と設定した。

3. 室内試験における FA コンクリートの調合検討

3.1 試験目的

本試験では，要求品質を満足した中でなるべく多くの FA を用いた調合を得ることを目的に，内割 30%のフライアッシュセメント C 種相当に 細骨材容積置換率で 2.5，5 および 10%と変化させた時の FA コンクリートのフレッシュ性状や圧縮強度の把握の検討を行った。

3.2 試験計画

(1) 試験概要

試験要因を表 - 2 に示す。

実際に供給を行う可能性がある生コン 3 工場を選定し，FA を細骨材容積の外割置換で 3 水準変化させた。水結合材比（W/B）は，結合材水比（B/W）と圧縮強度の関係式を得るために 3 水準とした。スランブは 2 水準である。化学混和剤の種類は 2 種類とした。

(2) 使用材料・調合

使用材料を表 - 3 に，調合の例を表 - 4 に示す。使用材料のうち，FA は 3 工場ともに，K 電力 R 発電所の

表 - 2 試験要因

工場名	FA外割置換率 (%)	W/B (%)	目標スランブ (cm)	化学混和剤の種類
O工場	2.5	40	12	・AE減水剤 (高機能タイプ) ・AE減水剤
S工場	5	50	15	
A工場	10	60		

*1 九州電力(株)新大分発電所建設所 土木建築グループ (正会員)

*2 九州電力(株)新大分発電所建設所 土木建築グループ 課長 (正会員)

*3 九州電力(株)新大分発電所建設所 土木建築グループ

*4 鹿島建設(株)技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 博士 (工) (正会員)

種品を用いている。細骨材は山砂 7 : 海砂 3 の混合砂である。粗骨材は工場によって産地が異なるが砕石 4020 と砕石 2005 を混合したものである。混和剤は、単位セメント量の 1% に固定し、夏期に試験練を行ったため、遅延形を採用している。空気量調整剤はメーカーが推奨する標準使用量の範囲で練上り時における目標スランプ、空気量を満足するように適宜調整している。

(3) 試験項目および方法

試験項目および方法を表 - 5 に示す。コンクリートの目標値は練上り時におけるスランプ 12 cm または 15 cm、空気量 4.5% である。また、各調合について目視により粘性を評価している。判定は 4 段階とし、粘性「大」の判定は、粘性が強く施工上問題があることを意味する。なお、粘性が「大以下」では施工は可能で、既往文献²⁾の粘性による変形の差の模式図を参考とした。なお、粘性「中」は粘性が「大」と「小」の中間を意味する。

3.3 試験結果および考察

何れの調合も目標スランプおよび空気量を満足したものが得られた。O 工場のコンクリート温度は 27 ~ 31、S 工場が 26 ~ 28 および A 工場が 26 ~ 27 の範囲であった。特に O 工場は試験室内の環境温度が設備的に制御できないため、その他の工場よりもコンクリート温度がやや高い傾向を示した。W/B40% および 50% のフレッシュコンクリートの粘性の評価を表 - 6 に示す。表中の () は FA 総量を示している。これより、FA 細骨材容積置換率 2.5、5% の W/B40% のスランプ 15 cm における AE 減水剤高機能タイプ (HAE) と AE 減水剤 (AE) を比較すると、HAE の粘性は小 ~ 中 であるが、AE の粘性は中 ~ 大 x であった。W/B50% の場合は、HAE の粘性は全て小 であったが、AE の粘性は小 ~ 中 であった。これより、同一スランプの場合 HAE の調合の方が、AE よりも粘性が小さい傾向にあると思われる。

W/B40% および 50% の FA 細骨材容積置換率と FA 総量の関係を図 - 1 に示す。この図は S 工場におけるスランプ 12 cm と 15 cm の HAE の調合の例である。なお、図中の楕円囲みは、粘性評価を示している。これより、FA 細骨材容積置換率が増加するほど、FA 総量も大きくなるが、スランプ 12 cm と 15 cm では FA 総量は大差ない傾向にある。さらに、両スランプ共に FA 細骨材容積置換率が 5% 以下であれば粘性は小さく良好なフレッシュコンクリートが得られることを示している。

材齢 56 日における結合材水比 (B/W) と圧縮強度の関係を図 - 2 に示す。工場別にみると、S 工場の圧縮強度がその他工場よりも 3N/mm² 程度大きい傾向にあった。これは、単位水量や骨材強度の違いが一因していると思われる。また、FA 細骨材容積置換率 2.5% と 5% の違いでは、圧縮強度の顕著な差は認められない。

表 - 3 使用材料

工場	材料	種類	銘柄、物性など
O工場	セメント	普通ポルトランドセメント	T社製:密度3.16g/cm ³
	混和剤	フライアッシュ 種	K電力 R発電所 密度2.34g/cm ³ 、比表面積4080cm ² /g、強熱減量1.7%
	細骨材	混合砂(山砂7:海砂3)	山砂:大分市片島、海砂:佐伯市蒲江町、 表乾密度2.59g/cm ³ 、吸水率1.98%、粗粒率2.65
	粗骨材	砕石2005(G1)	大分市片島+大朝町久原 表乾密度2.64g/cm ³ 、吸水率0.65%、実積率61.0%
		砕石4020(G2)	大朝町久原 表乾密度2.64g/cm ³ 、吸水率0.86%、実積率61.1%
	練混ぜ水	上水道水	
S工場	混和剤	AE減水剤(高機能タイプ)	F社製遅延形
		AE減水剤	F社製遅延形
		空気量(AE)調整剤	F社製(一般用)
	セメント	普通ポルトランドセメント	T社製:密度3.16g/cm ³
A工場	混和剤	フライアッシュ 種	K電力 R発電所 密度2.34g/cm ³ 、比表面積4080cm ² /g、強熱減量1.7%
	細骨材	混合砂(山砂7:海砂3)	山砂:大分市片島、海砂:佐伯市蒲江町、 表乾密度2.59g/cm ³ 、吸水率1.71%、粗粒率2.65
	粗骨材	砕石2005(G1)	大分市片島+津久見市上青江 表乾密度2.67g/cm ³ 、吸水率1.01%、実積率60.2%
		砕石4020(G2)	大朝町久原+津久見市上青江 表乾密度2.68g/cm ³ 、吸水率0.51%、実積率60.4%
	練混ぜ水	工業用水	
	混和剤	AE減水剤(高機能タイプ)	F社製遅延形
A工場		AE減水剤	F社製遅延形
		空気量(AE)調整剤	F社製(フライアッシュ用)
	セメント	普通ポルトランドセメント	T社製:密度3.16g/cm ³
	混和剤	フライアッシュ 種	K電力 R発電所 密度2.34g/cm ³ 、比表面積4080cm ² /g、強熱減量1.7%
	細骨材	混合砂(山砂7:海砂3)	山砂:大分市片島、海砂:佐伯市蒲江町、 表乾密度2.58g/cm ³ 、吸水率2.32%、粗粒率2.69
	粗骨材	砕石2005(G1)	大分市河原内 表乾密度2.63g/cm ³ 、吸水率1.24%、実積率58.2%
	砕石2005(G2)	大分市片島 表乾密度2.64g/cm ³ 、吸水率1.28%、実積率59.1%	
	砕石4020(G3)	大分市大字澤田 表乾密度2.72g/cm ³ 、吸水率0.36%、実積率59.5%	
練混ぜ水	工業用水		
混和剤	AE減水剤(高機能タイプ)	F社製遅延形	
	AE減水剤	F社製遅延形	
	空気量(AE)調整剤	F社製(フライアッシュ用)	

表 - 4 調合の例 (W/B50% の場合)

工場	W/B (%)	化学混和剤の種類	目標スランプ (cm)	FA細骨材置換率 (%)	単位水量 (kg/m ³)									FA総量 (kg/m ³)
					C	C内割り FA30%	W	S	S内割り FA	G1	G2	G3		
O工場	50	AE減水剤(高機能タイプ)	12	2.5	211	91	151	759	19	526	526		110	
				5	210	90	150	746	35	526	526	125		
				10	213	91	152	671	68	542	542	159		
			2.5	220	94	157	754	16	517	517	110			
			5	217	93	155	741	35	517	517	128			
			10	220	94	157	663	68	534	534	162			
	50	AE減水剤	15	2.5	224	96	160	741	16	517	517	112		
				5	227	97	162	712	33	517	517	130		
				10	239	103	171	609	61	534	534	164		
			2.5	202	86	144	774	19	547	535	105			
			5	204	88	146	746	35	547	535	123			
			10	210	90	150	663	68	564	551	158			
S工場	50	AE減水剤(高機能タイプ)	12	2.5	209	89	149	769	19	539	527	108		
				5	211	91	151	741	35	539	527	126		
				10	217	93	155	668	65	556	543	158		
			2.5	214	92	153	754	16	539	527	108			
			5	218	94	156	720	35	539	527	129			
			10	228	98	163	556	63	556	543	161			
	A工場	50	AE減水剤(高機能タイプ)	12	2.5	217	93	155	723	16	379	254	434	109
					5	217	93	155	705	33	385	257	440	126
					10	223	95	159	650	65	385	257	441	160
				2.5	225	97	161	712	16	379	254	434	113	
				5	225	97	161	694	33	380	254	435	130	
				10	231	99	165	642	65	380	254	435	164	
50		AE減水剤	15	2.5	235	101	168	684	16	380	254	435	117	
				5	239	103	171	653	31	380	254	435	134	
				10	239	103	171	653	31	380	254	435	134	

表 - 5 試験項目および方法

試験項目	方法	目標値または判定値
スランプ	JIS A 1150	15または12 ± 2.5cm
空気量	JIS A 1128	4.5 ± 1.5%
コンクリート温度	JIS A 1123	5 ~ 35
粘性	目視による	大: x
		中:
粘性	目視による	大:
		小:
圧縮強度	JIS A 1108	F _c 24N/mm ²

FA 細骨材容積置換率と単位水量の関係を図 - 3 に示す。図中の細骨材容積置換率 0% の単位水量は、各生コン工場が内割 30% 調合を JIS 取得時に室内試験で採用したものの (記号) である。これより、O 工場や S 工場の単位

表 - 6 フレッシュコンクリートの粘性評価

工場名	混和剤種類	W/B (%)	スランブ (cm)	FA細骨材置換率 (%)		
				2.5	5	10
O工場	AE高機能タイプ	50	12	(110)	(125)	× (159)
			15	(110)	(128)	× (162)
			15	(112)	(130)	× (164)
	AE減水剤	40	12	(134)	(149)	× (176)
			15	(139)	(153)	× (181)
AE減水剤	15	(144)	× (156)	混練不可		
S工場	AE高機能タイプ	50	12	(105)	(123)	× (158)
			15	(108)	(126)	× (158)
			15	(108)	(129)	× (161)
	AE減水剤	40	12	(129)	(148)	× (174)
			15	(133)	(150)	× (179)
AE減水剤	15	(136)	× (154)	混練不可		
A工場	AE高機能タイプ	50	12	(110)	(126)	(160)
			15	(113)	(130)	(164)
			15	(117)	(134)	混練不可
	AE減水剤	40	12	(136)	(152)	(181)
			15	(141)	(155)	(186)
AE減水剤	15	(147)	× (163)	混練不可		

水量はFAを2.5%あるいは5%細骨材容積置換することで0%調合よりも単位水量を低減する傾向にある。特にFA2.5%は5%よりも単位水量が小さい傾向にあることやHAEの単位水量はAEよりも低減することがわかった。

4. 実機試験におけるFAコンクリートの調査検討

4.1 試験目的

室内試験で検討した基本調合から得られた呼び強度の調合について各工場で使用している実機ミキサを用いて経時によるスランブや空気量の変化などフレッシュコンクリート性状を把握すると共に、FA細骨材容積置換率と化学混和剤種類の選択を目的に検討を行った。

4.2 試験計画

(1) 試験概要

試験要因を表 - 7 に示す。

各工場別に、FA細骨材容積置換率2種類、呼び強度2種類、化学混和剤2種類の組み合わせとした。なお、目標スランブは、単位結合材料を少なくした方が温度ひび割れの低減の面から有効であること、および図 - 1 のFA総量や表 - 6 の粘性の結果も鑑み、12 cmを採用している。また目標空気量は4.5%である。

(2) 使用材料・調合

使用材料は表 - 3 と同じである。調合は一例としてO工場のもを表 - 8 に示す。

(3) 試験項目および方法

試験項目および方法は表 - 5 と同様である。なお、経時変化試験については、アジテータ車にコンクリートを3m³積み、練混ぜ直後、30分、60分にスランブ、空気量、コンクリート温度を測定した。圧縮強度は現場荷卸し時間相当の30分で供試体を採取した。供試体は標準養生とし材齢7、28および56日とした。

4.3 試験結果および考察

フレッシュコンクリートの試験結果を表 - 9 に示す。

この結果をもとに、経時とスランブまたは空気量の関係の一例を示したのが図 - 4 である。これより、経時と

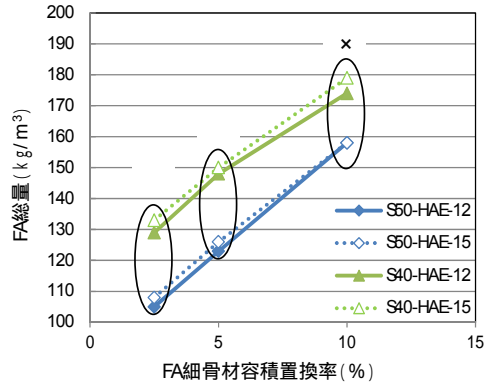


図 - 1 FA細骨材置換率とFA総量の関係

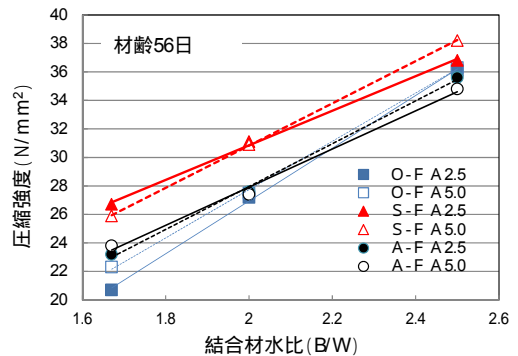


図 - 2 結合材水比と圧縮強度の関係

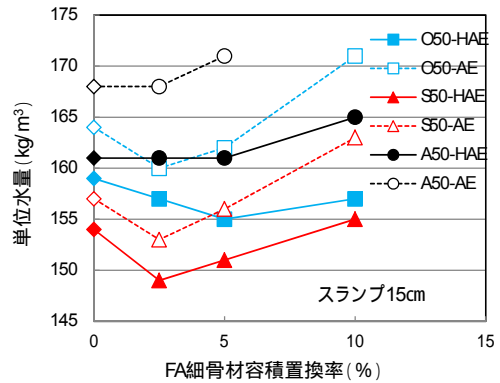


図 - 3 FA細骨材置換率と単位水量の関係

表 - 7 実機試験の実験要因

工場名	FA細骨材容積置換率 (%)	呼び強度	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	化学混和剤の種類
O工場	2.5	24	12	4.5	・AE減水剤 (高機能タイプ)
S工場	5.0	27	12	4.5	・AE減水剤
A工場	5.0	27	12	4.5	・AE減水剤

表 - 8 調合の一例 (O工場)

工場名	呼び強度	W/B (%)	化学混和剤の種類	目標スランブ (cm)	FA細骨材置換率 (%)	単位量 (kg/m³)							FA総量 (kg/m³)
						C	C内割りFA30%	W	S	S内割りFA	G1	G2	
O工場	24	45.8	AE減水剤 (高機能タイプ)	12	2.5	237	102	155	717	16	527	525	118
						234	100	153	710	33	527	525	133
						263	113	158	671	16	530	530	129
						265	113	157	663	30	533	530	143
	27	42.1	AE減水剤	12	5.0	244	104	160	717	16	517	514	120
						279	119	168	611	28	530	530	147
						281	121	165	642	14	525	522	135
						322	138	172	531	26	538	538	164

共にスランブまたは空気量は減少する傾向を示している。O工場でのスランブにおいて、HAEは、練上りから経時60分の差は0~1.0cmでほとんどロスがない。一方、AEの場合は、両者の差が1.0~4cmとロスが大き

い。表 - 9 より他の工場を見ると，S 工場の呼び強度 27-FA2.5%の HAE において，練上り時のスランプが 12.0 cmで，最大スランプロスが 4 cmであった。スランプが 4 cmもロスすると，AE では単位水量など調合の見直しが必要となる可能性があるが，HAE は混和剤の添加量を調整すればスランプを調整できるため，HAE の採用が有効であると判断した。

経時 60 分後のコンクリートの粘性評価およびスランプを表 - 10 に示す。これより，O 工場の AE は経時 60 分後の粘性は×で施工上からも問題があると評価し，HAE の調合の粘性の方がよいと評価した。A 工場も粘性のランクは異なるが，同様の評価であった。一方，S 工場では，呼び強度 27 の AE の粘性は HAE よりも小さく O 工場や A 工場とは反対の評価であった。以上のことから上述と同様に，HAE の採用が有効であると判断した。また，FA 細骨材容積置換率 2.5%と 5%については今回の実機試験では経時変化や粘性の差異がほとんどなかった。したがって模擬部材試験においては，室内試験の図-3 の結果より単位水量が最も少なくなる 2.5%を採用することとした。なお，表 - 10 において粘性評価とスランプ値との関係は認められなかった。

各工場別の圧縮強度を図 - 5 に示す。呼び強度 24 の管理材齢 56 日の圧縮強度は 32.8 ~ 33.3N/mm²，呼び強度 27 の場合は 34.3 ~ 36.7N/mm²であった。

5. 模擬部材試験による mSn 値の検討

5.1 試験目的

FA 内割 30%に FA 細骨材容積置換 2.5%を用いたコンクリートの構造体強度補正値 mSn 値の検討を目的に模擬部材試験を実施した。

5.2 試験計画

(1) 使用材料・調合

使用材料は表 - 3 と同一である。ただし冬季に試験を行ったため，化学混和剤は標準形を用いている。調合は表 - 8 の呼び強度 24 と 27 の FA 細骨材容積置換率 2.5%である。化学混和剤は両調合共に HAE を使用した。

(2) 模擬部材試験の詳細

模擬部材の詳細を図 - 6 に示す。模擬部材は基礎マツトスラブを模擬し上下面は開放，4 側面は外部への放熱を遮断するため厚さ 200mm の発砲スチロールで断熱した。部材寸法は W1000 × D1000 × H1200mm で，図 - 6 に示す位置で圧縮強度用のコアを採取した。部材中心部は無応力容器と熱電対内蔵型ひずみ計(T 社製 KM-100BT)を設置し温度とひずみを，また部材の所定位置に熱電対を設置し温度を測定した。圧縮強度は JIS A 1108 に準じ，材齢 7，28，42，56 および 91 日で標準養生強度を，材齢 42，56 および 91 日でコア強度を測定した。

表 - 9 フレッシュ試験結果

化学混和剤の種類	FA細骨材容積置換率 (%)	呼び強度	経時	O工場				S工場				A工場			
				スランプ (cm)	空気量 (%)	CON 温度 (°C)	粘性	スランプ (cm)	空気量 (%)	CON 温度 (°C)	粘性	スランプ (cm)	空気量 (%)	CON 温度 (°C)	粘性
				AE減水剤 (高機能)	5	27	練上	13.0	4.8	13.0		13.0	5.3	15.0	
			30分	13.0	4.3	13.0		10.0	4.9	14.0		12.0	4.7	13.0	
			60分	13.0	3.4	15.0		11.0	4.2	15.0		12.0	4.3	14.0	
	5	24	練上	13.5	5.1	13.0		13.0	5.2	14.0		12.0	5.0	13.0	
			30分	13.0	4.5	15.0		10.5	4.5	14.0		12.0	5.0	14.0	
			60分	13.0	4.0	15.0		10.0	3.8	15.0		11.5	4.3	14.0	
	2.5	27	練上	14.0	5.5	15.0		12.0	5.1	14.0		13.5	4.8	13.0	
			30分	13.0	5.1	15.0		8.5	4.3	15.0		13.0	4.7	13.0	
			60分	13.0	4.1	17.0		8.0	3.5	16.0		13.0	4.3	13.0	
	2.5	24	練上	13.0	5.4	16.0		12.0	4.5	14.0		13.5	5.2	13.0	
			30分	12.5	4.8	16.0		10.0	3.9	15.0		13.5	4.9	14.0	
			60分	12.5	4.3	18.0		9.0	3.0	15.0		12.5	4.7	14.0	
			練上	13.0	5.0	16.0		12.5	4.8	15.0		14.5	4.5	13.0	
	5	27	30分	12.0	4.7	17.0	x	12.5	4.2	15.0		14.0	4.3	14.0	
			60分	9.0	4.2	18.0	x	10.5	3.5	16.0		12.5	4.0	14.0	
	5	24	練上	12.0	5.3	17.0		13.0	5.0	15.0		14.0	4.5	14.0	
			30分	12.0	4.3	17.0		12.5	4.5	15.0		13.5	4.1	14.0	
			60分	12.0	3.9	17.0	x	10.5	3.8	16.0		11.5	3.8	14.0	
	2.5	27	練上	13.0	5.0	16.0		12.5	4.8	15.0		12.0	4.9	14.0	
			30分	10.5	4.5	17.0	x	10.5	4.4	14.0		10.5	4.6	14.0	
			60分	10.5	4.1	17.0	x	11.0	4.0	14.0		11.0	4.0	14.0	
	2.5	24	練上	13.5	4.7	16.0		12.5	5.0	14.0		12.0	4.5	14.0	
			30分	13.0	4.5	16.0	x	11.5	4.1	14.0		12.0	4.1	14.0	
			60分	12.5	4.0	16.0	x	10.0	3.8	14.0		11.5	3.8	14.0	

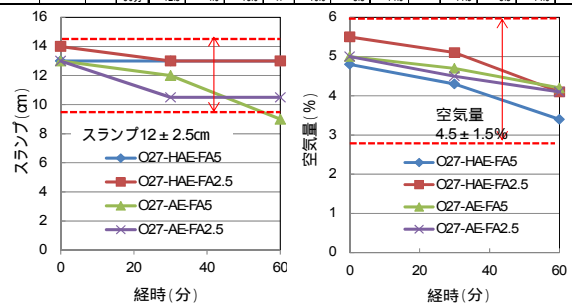


図 - 4 経時とスランプまたは空気量の例 (O工場)

表 - 10 経時60分後の粘性評価とスランプの関係

化学混和剤の種類	FA細骨材容積置換率 (%)	呼び強度	工場名		
			O工場	S工場	A工場
AE減水剤 高機能タイプ	5	27	(12.5)	(9.0)	(12.5)
		24	(13.0)	(10.0)	(11.5)
	2.5	27	(13.0)	(8.0)	(13.0)
		24	(13.0)	(11.0)	(12.0)
AE減水剤	5	27	x (12.5)	(10.0)	(10.5)
		24	x (12.0)	(10.5)	(11.5)
	2.5	27	x (10.5)	(11.0)	(11.0)
		24	x (9.0)	(10.5)	(12.5)

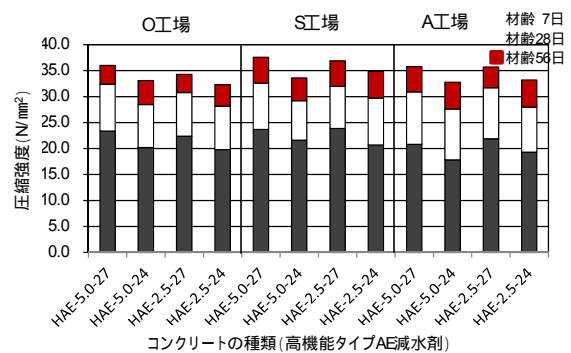


図 - 5 工場別のコンクリート種類と圧縮強度

(3) 線膨張係数の算定方法

模擬部材中心部に設置したひずみ計により得られた温度とひずみの関係から，既往の文献³⁾を参考に FA コンクリートの線膨張係数を算定した。建築構造物では外部拘束によるマスコンひび割れが特に問題になることから，図-7のように温度下降過程のひずみと温度の勾配から得られる線膨張係数を真値とした。

なお、算定される線膨張係数は若干の自己収縮ひずみの影響を含んだ見かけの線膨張係数である。

5.3 試験結果および考察

呼び強度 24 および 27 共に荷卸し時間は約 30 分であった。呼び強度 24 のスランブは 13.0cm 空気量は 4.9%、呼び強度 27 は 13.0cm 空気量 4.6% で目標値を満足した。コンクリート温度は 16~17 で、外気温は 14~15 であった。標準養生強度とコア強度結果を表 - 11 に示す。材齢 m 日の標準養生強度と材齢 n 日のコア強度の差が mS_n で示されるが、呼び強度 24 の ${}_{56}S_{91}$ は $-1.1N/mm^2$ 、呼び強度 27 は $-4.3N/mm^2$ で両者共に $0N/mm^2$ 以下であった。

模擬部材の温度履歴の一例を図 - 8 に、部材温度の一覧を表 - 12 に示す。試験体中心部(測定点)は材齢 2 日程度で最高温度に達し、材齢 20 日程度で外気温とほぼ等しくなった。また部材の材齢 91 日間の平均養生温度は両調査共に 10.3 であった。ここで、平均養生温度と ${}_{56}S_{91}$ の関係を図 - 9 に示す。図中の太線は FA 指針による ${}_{56}S_{91}$ の標準値である。本試験で得られた ${}_{56}S_{91}$ は、平均養生温度が 10.3 のとき $0N/mm^2$ 以下であった。

コンクリートの温度とひずみの関係の一例を図 - 10 に示す。図より温度下降時における温度とひずみの関係は線形であり、この傾きを線膨張係数として算定した。その結果、呼び強度 24 の線膨張係数は 9.50×10^{-6} 、呼び強度 27 は 8.99×10^{-6} であった。なお一般のコンクリートの線膨張係数が $7 \sim 10 \times 10^{-6}$ である⁴⁾ことから、今回の試験で用いた FA コンクリートの線膨張係数は一般のコンクリートと大差ないと考えられる。本試験で得られた線膨張係数は、温度応力解析のインプットに用いた。

6. 温度応力の検討

6.1 断熱温度上昇試験

(1) 試験概要

5. で模擬部材試験を実施した 2 種類の調査(材料も 5. 同一)について、温度応力解析に用いるための断熱温度上昇特性の把握を目的とした。試験は JCI-SQA3:1998 コンクリートの断熱温度上昇試験(案)により実施した。

(2) 試験結果

図 - 11 に断熱温度上昇試験結果を、表 - 13 に断熱温度上昇試験結果を式(1)⁵⁾で回帰し同定した係数を示す。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-\alpha(t - t_0)^{\beta}\}] \quad (1)$$

ここで、 $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量()

Q : 断熱温度上昇量の終局値()

α, β : 断熱温度上昇速度に関する係数

t : 材齢(日)

t_0 : 温度上昇開始材齢(日)

本試験で得られた断熱温度上昇特性は、温度応力解析のインプットに用いた。

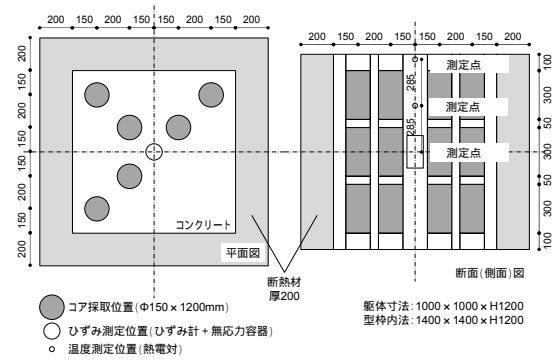


図 - 6 模擬部材の詳細

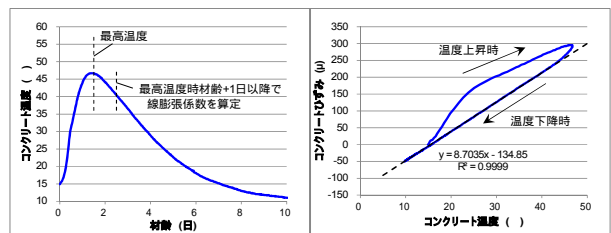


図 - 7 線膨張係数の算定例

表 - 11 圧縮強度・ mS_n の結果一覧

調査	圧縮強度 (N/mm^2)							${}_{28}S_{91}$	${}_{56}S_{91}$	
	標準養生									
	7日	28日	42日	56日	91日	42日	56日	91日	(N/mm^2)	
24-12-40 C30-S2.5FA	17.5	25.2	26.6	30.6	32.1	31.2	31.8	31.7	-6.5	-1.1
27-12-40 C30-S2.5FA	18.1	26.4	27.8	31.7	32.8	33.2	33.2	36.0	-9.6	-4.3

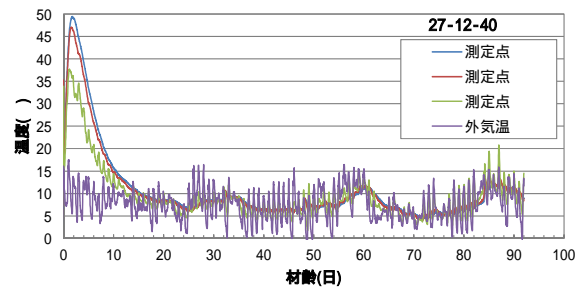


図 - 8 模擬部材温度履歴の例(呼び強度27)

表 - 12 模擬部材温度の一覧

調査	最高温度()			平均養生温度()	平均気温()
	測定点	測定点	測定点		
24-12-40 C30-S2.5FA	46.0	44.2	35.7	10.3	7.6
27-12-40 C30-S2.5FA	49.4	47.0	37.7	10.3	

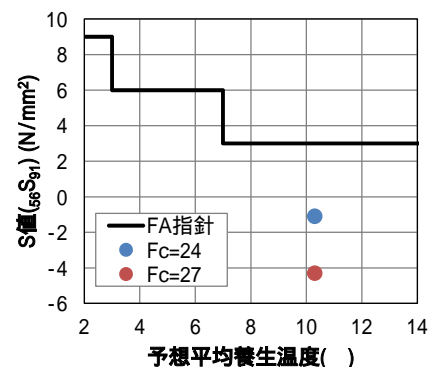


図 - 9 平均養生温度と ${}_{56}S_{91}$ の関係

6.2 温度応力解析

(1) 解析概要

FA コンクリートを使用するマスコンクリート部材について、温度応力に起因する有害なひび割れ発生の可能性を検討することを目的として、温度応力解析を行った。

解析には 3 次元有限要素法を用いた。1/2 解析モデルを図 - 12 に示す。解析対象は長さ約 68m、幅約 59m、厚さ 2m のマットスラブである。コンクリートの物性値は 5. の結果を、断熱温度上昇特性は 6.1 の結果を用いた。また外気温は気象庁による月別平均気温のデータを使用した。解析における温度、応力および応力強度比の検討位置は各打設工区のスラブの中央部とした。

(2) 解析結果

解析結果一覧を表 - 14 に示す。文献⁴⁾によれば、漏水抵抗性を確保する際の応力強度比の設計値は 0.8 以下、一般環境下で鉄筋腐食抵抗性を確保する際の応力強度比の設計値は 1.3 以下とすることを標準としている。表より、対象とした 2 種類のコンクリートのいずれも応力強度比の最大値が 0.4 であったため、マットスラブに有害なひび割れが発生する可能性は小さいと考えられる。

7.まとめ

本試験の範囲において FA 内割 30% に FA 細骨材容積置換率 2.5、5 および 10% を用いたコンクリートの調査検討を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) FA 細骨材容積置換率 2.5% の調査はその他の調査よりも単位水量を小さくでき、かつフレッシュ性状が良好であった。
- 2) 目視による粘性評価とスランプ値との対応は明確には認められなかった。
- 3) 呼び強度 24 と 27 の FA 細骨材容積置換率 2.5% の調査について、標準養生強度と冬期の模擬部材（平均養生温度 10.3 ，気温 7.6 ）のコア強度から求めた s_0s_{91} 値は -1.1 ~ -4.3N/mm² で 0N/mm² 以下であった。
- 4) 呼び強度 24 と 27 の FA 細骨材容積置換率 2.5% の調査の模擬部材中心の最高温度は 46.0 ~ 49.4 で、線膨張係数は $8.99 \sim 9.50 \times 10^{-6}/$ であった。
- 5) 温度応力解析の結果、呼び強度 24 と 27 の応力強度比の最大値は 0.4 であり、マットスラブに有害なひび割れが発生する可能性は小さいと考えられる。

参考文献

- 1) 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査設計・施工指針・同解説，2007
- 2) 石井佑大，宇治公隆ほか：タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討，コンクリート工学年次論文集，pp.37-42, Vol.30, No.2, 2008

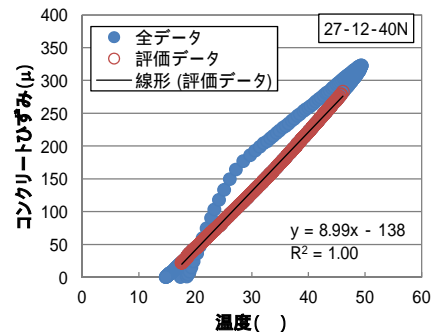


図-10 温度とコンクリートひずみの関係

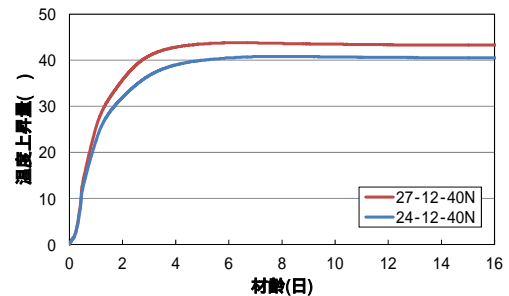


図-11 断熱温度上昇試験結果

表-13 断熱温度上昇式の係数一覧

調査	Q	α	β	t_0
24-12-40N	40.8	0.74	1.08	0.00
27-12-40N	43.8	0.79	1.17	0.00

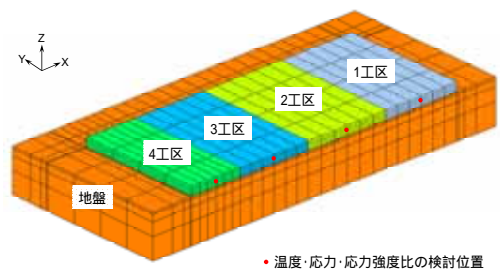


図-12 解析モデル

表 - 14 解析結果の一覧

コンクリート種類	工区	最高温度 (°C)	最大引張応力 (N/mm ²)	最大応力強度比
24-12-40N	1	48.8	0.6	0.4
	2	48.9	0.8	0.4
	3	49.0	0.7	0.4
	4	49.0	0.5	0.3
27-12-40N	1	52.8	0.6	0.4
	2	52.8	0.8	0.4
	3	52.9	0.7	0.4
	4	52.9	0.6	0.3

- 3) 例えば、津田智弘ほか：低熱ポルトランドセメントを用いた建築物の温度・応力計測(その 2 線膨張係数および構造体強度発現)，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.499-500，2008
- 4) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説，2008
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ制御指針，2008