

高炉セメント B 種にフライアッシュを混合した環境配慮型コンクリートの検討
(その 2：実測断熱温度上昇試験結果を用いた温度応力解析検討)

株式会社関電パワーテック
大阪兵庫生コンクリート工業組合
株式会社関西宇部
新関西菱光株式会社
株式会社浅沼組

正会員 ○峯 秀和
正会員 船尾 孝好
中尾 陽一
谷村 賢一郎
新田 稔

1. 目的

本研究ではその 1¹⁾ に続き、高炉セメント B 種 (BB) にフライアッシュ (FA) を 20%混合したコンクリート (BB+FA20%) について、断熱温度上昇試験および温度応力解析を行い、その温度特性とひび割れ抵抗性を評価した。実測結果を基に温度・応力解析を実施し、他配合と比較した結果、BB+FA20%は最も低い最高温度を示し、マスコンクリート (マスコン) への適用の可能性が確認された。

2. 断熱温度上昇試験結果

Φ300mm×300mm の供試体における断熱温度上昇試験を実施し、最大温度およびその到達時間を測定した。表 1 に実験に用いた材料一覧を表 2 に断熱温度上昇試験に用いた配合を示す。なお、その際のフレッシュ試験結果・圧縮強度結果を表 3 に示す。

表 1：断熱温度上昇試験に用いた材料一覧

種別	記号	種類	生産者・産地	備考
セメント	BB	高炉セメントB種	U社	密度:3.04g/cm ³
	NC	普通ポルトランドセメント	U社	密度:3.16g/cm ³
混和材	FA	フライアッシュII種	京都府舞鶴発電所	密度:2.25g/cm ³
細骨材	S1	砕砂	兵庫県西島産	表乾密度 2.58g/cm ³
	S2	石灰石砕砂	福岡県北九州産	表乾密度 2.69g/cm ³
粗骨材	G1	砕石2005	兵庫県西島産	表乾密度 2.62g/cm ³
	G2	石灰石砕石2005	大分県津久見産	表乾密度 2.70g/cm ³
混和剤	SP	高性能AE減水剤	S社	高性能AE減水剤標準形
水	W	上水道水	大阪府	—

表 3：断熱温度上昇試験のコンクリート物性試験

記号	FA 置換率	スランブ cm	空気量 %	GT ℃	圧縮強度結果(平均値)N/mm ²			
					7日	28日	56日	91日
24BB+FA	20%	18.5	4.2	21.4	20.9	32.5	39.0	42.7
24N+FA	20%	19.0	5.9	21.0	19.1	26.3	32.8	36.5

表 4：断熱温度上昇量 (実測値)

No.	終局断熱温度上昇量 Q _∞ (℃)	温度上昇速度に関する定数 r
24BB+FA	44.13349	0.87133
24N+FA	44.41354	0.79443

表 2：断熱温度上昇試験に用いた配合

記号	呼び強度	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)										
							BB	NC	FA	W	S1	S2	G1	G2	SP		
24BB+FA	24	50	63	46.1	18	4.5	280	—	70	175	469	326	464	478	3.01	B×0.45%	9A
24N+FA	24	55	69	47.8			—	254	64	175	497	345	460	474	3.31	B×0.40%	7.5A

3. 温度応力解析の諸条件と解析結果

表 5 に温度応力解析に必要な各物性値の入力値を示す。配合については BB+FA20%に加え、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを内割りで 20%置換した呼び強度 24 の配合 (24N+FA) を対象に、表 4 の断熱温度上昇試験の実測値を採用した。それ以外の結合材 (NC, BB) については、土木学会コンクリート標準示方書 設計編 (2022)²⁾ を参照した。なお、24BB+FA のその他の物性値は BB の値を、線膨張係数は 12×10⁻⁶/℃を使用し、24N+FA の物性値については FB の値を用いた。

この内容に基づき、三次元有限要素法に基づく非線形温度応力解析プログラム (計算力学研究センター: ASTEA MACS) を活用し、表 6 に示す配合について温度応力解析を実施した。

解析モデルの形状は、層状構造物 (フーチング) で部材寸法 11m×11m×高さ 3m で設計基準強度 24N/mm² とし、解析期間はコンクリート打設 3 ヶ月前から、打設 6 ヶ月後まで (2024/4/1~2024/9/30) とした。なお、図 1 に解析モデルの測点例を示す。最小ひび割れ指数も同様とする。

表 5 の値を用いた温度応力解析結果を表 7 に示すように部材の中心温度は、BB(74.39)>NC(73.39)>N+FA (65.05) >BB+FA (64.65) で小さくなっており、表層部温度は NC (50.47) >BB (48.50) >N+FA (42.60) >BB+FA (39.52) となっている。ひび割れ指数中心部は BB+FA (1.01) <BB (1.13) <N (1.48)

キーワード 高炉セメント B 種, フライアッシュ, 断熱温度上昇, 温度応力解析

連絡先 〒541-0051 大阪府大阪市中央区備後町 3 丁目 6 番 2 号 KF センビル 5F 株式会社関電パワーテック
TEL06-4705-8635(代表)

<N+FA (1.51) となっており、表層部ではBB (0.75) <BB+FA (0.97) <N (1.02) <N+FA (1.23) となっている。参考値に検討した呼び 24BB+FA の線膨張を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした場合、ひび割れ指数に改善効果が見られ、線膨張係数の最適設定が今後の課題と考えられる。

4. まとめ

- ・ BB+FA20%配合の最高温度は、中心温度および表面温度で良好な結果を示した。
- ・ ひび割れ指数は BB と同程度またはわずかに改善が見られた。今後 BB+FA 配合の適切な線膨張設定が必要と考えられる。
- ・ CO₂排出量の削減が期待できる BB+FA 配合は、環境配慮型コンクリートとしての実用性が高く、マスコンクリートへの適用において、ひび割れ抑制と環境負荷低減の両立が可能な手法である。

以上

表 5：各物性値の入力条件

各物性値		地盤			
		配合名			
解 析 時 間		2024/4/1 ~ 2024/8/30			
打ち込み温度		24N	24BB	24N+FA	24BB+FA
打ち込み温度		20	25℃	25℃	25℃
膨張率 (1/℃)		1.7	2.7	2.7	2.7
密度 (kg/m ³)		2100	2400	2400	2400
位置 (kg/m ³)		1.4	1.15	1.15	1.25
初期温度 (℃)		20	25	25	25
材料	コンクリート	[JSC2022]	[JSC2022]	[JSC2022]	[JSC2022]
	セメント	[JSC2022]	[JSC2022]	[JSC2022]	[JSC2022]
	骨材	[JSC2022]	[JSC2022]	[JSC2022]	[JSC2022]
	水	[JSC2022]	[JSC2022]	[JSC2022]	[JSC2022]
断面	厚さ	200	200	200	200
	幅	200	200	200	200
	高さ	200	200	200	200
	形状	正方形	正方形	正方形	正方形
引張強度	引張強度	20	20	20	20
	引張強度	20	20	20	20
	引張強度	20	20	20	20
	引張強度	20	20	20	20
ヤング係数	ヤング係数	500	500	500	500
	ヤング係数	500	500	500	500
	ヤング係数	500	500	500	500
	ヤング係数	500	500	500	500
熱膨張係数	熱膨張係数	10	10	10	10
	熱膨張係数	10	10	10	10
	熱膨張係数	10	10	10	10
	熱膨張係数	10	10	10	10
自己収縮	自己収縮	0.3	0.3	0.3	0.3
	自己収縮	0.3	0.3	0.3	0.3
	自己収縮	0.3	0.3	0.3	0.3
	自己収縮	0.3	0.3	0.3	0.3
熱伝導率	熱伝導率	1.4	1.4	1.4	1.4
	熱伝導率	1.4	1.4	1.4	1.4
	熱伝導率	1.4	1.4	1.4	1.4
	熱伝導率	1.4	1.4	1.4	1.4
温度固定境界条件		20	Z=10000.00(mm)(最下面)に固定 (固定ワット: 全77)		

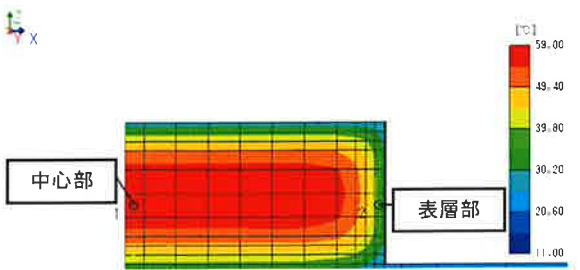


図 1：解析モデルの測点例

表 7：温度応力解析

No.	呼び方	最高温度(℃)		最小ひび割れ指数		線膨張
		中心部	表層部	中心部	表層部	
1	呼び24N	73.79	50.47	1.48	1.02	10
2	呼び24BB	74.39	48.50	1.13	0.75	12
3	呼び24N+FA	65.05	42.60	1.51	1.23	10
4	呼び24BB+FA	64.65	39.52	1.01	0.97	12
参考	呼び24BB+FA	64.65	39.52	1.20	1.19	10

表 6：温度応力解析を実施した配合

No.	呼び方	材 齢	FA置換率 (%)	W/C (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	NC	BB	FA	細骨材
1	呼び24-15-20N(高性能)	28	0	57	57	175	307	3.05	2.25	2.56
2	呼び24-15-20BB(高性能)	28	0	55	55	175	307	318	62	832
3	呼び24-15-20N+FA(高性能)	56	20	69	55	170	247	68	272	817
4	呼び24-15-20BB+FA(高性能)	56	20	63	50	170	247	68	272	763

※ 大阪広域生コンクリート協同組合ホームページ掲載、標準配合を用いた。なお、呼び24-12N高性能がないため、同一呼び強度のスラブ15cm配調合を用いた。

【参考文献】

- 1) 峯秀和, 船尾孝好, 中尾陽一, 谷村賢一郎, 西邨知之, 新田稔: 高炉セメントを混合した環境配慮型コンクリートの検討 (その1: フレッシュ性・強度発現性), 第80回土木学会年次全国大会, 2024.09
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2022.