

報 告

[1010] 水和熱制御混和剤を添加したフライアッシュコンクリートの基礎物性

正会員○小堺規行（住友セメント）

正会員 内田清彦（ 同上 ）

井ノ川尚（ 同上 ）

稲田和夫（ 同上 ）

1. はじめに

セメントの水和発熱速度を大幅に低減し得ることを特長とした水和熱制御混和剤は、マスコンクリートの温度応力ひび割れに有効な対策の一つとして期待されている。既往の研究では、普通ポルトランドセメントを用いた最小断面寸法1mのマスコンクリートブロックにこれを適用した場合の発熱速度は無添加の $1/2 \sim 1/3$ となり、中心最高温度は $5 \sim 9^\circ\text{C}$ 低下することが確認されている[1]。本研究では、既往の研究よりもさらに寸法の大きい部材が多い原子力発電施設を構築するフライアッシュコンクリートにこの水和熱制御混和剤を適用し、温度応力の低減に対する有効性を評価することを目的としたものである。

本報ではこの水和熱制御混和剤の有効性評価の第一段階として、施工時期を考慮した種々の練り上がり温度と初期養生温度におけるフレッシュならびに硬化コンクリートの性状、および断熱温度上昇試験における熱的特性に対して与える影響を検討した。

2. 実験

2. 1 水和熱制御混和剤の特長

水和熱制御混和剤はヒドロキシカルボン酸エステルを主成分とするものであり、コンクリートのアルカリ性、打設時のコンクリート温度、および水和発熱による躯体の温度上昇に応じて徐々に分解し、水和抑制成分を放出する性質を有する。従ってマスコンクリート部材にこの混和剤を適用した場合、水和発熱による温度上昇速度が大幅に低下し、放冷により内部の蓄熱を少なく抑えることが可能となる。なお以下この水和熱制御混和剤をTFと略す。

2. 2 実験計画

実験のパラメータを表-1に、またコンクリート試験項目を表-2に示す。調査は実部材を想定したスラブ用調合と、壁用調合の2系統を設定した。強度および弾性係数試験（JIS A1108, 1113, JIS原案）は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 、長さ変化試験（JIS A 1129）、凍結融解（JIS原案）には $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体を用いた。断熱温度上昇試験は、 $\phi 30 \times 30\text{cm}$ の容器に試料を密閉充填し、住友社方式の水循環式断熱温度上昇試験機を用い、材令14日まで測定を行った。

表-1 実験パラメータ

要 因	水 準			
	1	2	3	4
想 定 部 材	スラブ	壁	—	—
TFの添加量 (C×%)	0	0.6	0.8	1.0
練り上がり及び 養生温度(°C)	5	20	30	—

表-2 コンクリート試験項目

フレッシュ コンクリート	スランプ、空気量、凝結硬化速度 ブリージング
硬 化 コンクリート	圧縮強度、弾性係数、引張強度、 長さ変化、凍結融解
断熱温度上昇試験	

2. 3 使用材料および調合

セメントは住友社製普通ポルトランドセメント（比重3.14, 粉末度3250 cm²/g）、フライアッシュは常磐火力（株）製（比重2.02, 粉末度2940 cm²/g）を用いた。フライアッシュの化学成分および物理的性状を表-3に示す。細骨材は信濃川産川砂（比重2.59, 粗粒率2.64）と柏崎産山砂（比重2.59, 粗粒率1.21）の2種を重量比で7:3に混合したもの、粗骨材は信濃川産（最大寸法25mm, 粗粒率7.32）を用いた。混和剤はリグニンスルホン酸塩を主成分とするAE減水剤（以下LS）および水和熱制御混和剤TFと、ナフタレンスルホン酸塩系の流動化剤（以下NA）を使用した。またAE剤はアニオン系活性剤を主成分とするものを用いた。

表-4は、ベースコンクリート（スランプ12cm, 空気量4%）の調合であり、これにNAとTFを後添加してスランプ18cmまで流動化したものを試験に供した。壁用調合はスラブ用調合よりも設計基準強度が高く、また鉄筋量の多い箇所への打設性を考慮してW/Cを低く、S/aを高くした。フライアッシュはB種フライアッシュセメント相当の混合率で、TFは表-1に示した4水準でセメント重量に対して添加した。

表-3 フライアッシュの化学成分および物理的性状

単位 水量比 (%)	吸着量 (mg)	化 学 成 分 (%)						
		ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
99	0.6	2.79	56.1	25.3	4.1	5.7	1.4	0.77

表-4 ベースコンクリートの計画調合

調 合	温度 (°C)	W/C+F (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
				W	C	F	S	G	LS
ス ラ ブ 用	30	50.7	38.6	161	254	64	686	1144	0.795
	20			153	242	60	699	1168	0.755
	5			148	234	58	707	1182	0.730
壁 用	30	48.1	42.1	169	282	70	728	1049	0.880
	20			160	266	67	743	1073	0.832
	5			150	250	62	767	1100	0.780

3. 結果および考察

3. 1 フレッシュコンクリート試験

(1) スランプおよび空気量試験

TFは減水性を有しており、既往の研究で普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに添加した場合とほぼ同等かそれ以上の減水効果を本研究で検討したフライアッシュコンクリートにおいても示し、TFのみでもスランプを18cmまで流動化可能な場合があった[2]。またTFには空気連行性がないため、添加、無添加の違いによるAE剤使用量の増減は無かったが、流動化後の空気量はいずれの調合の場合も若干減少した。

(2) 凝結硬化速度試験

無添加と0.8%添加した場合の練り上がり温度と凝結時間の関係を図-1に示す。無添加の場合は温度が高い程凝結および始発→終結間が短くなる。TFの添加により凝結は遅れるが、無添加に対する遅延の程度は温度が高い程大きく、また20℃より30℃の方が遅延が大きい。この傾向は遅延剤によって凝結制御を行った場合とは異なっており、TFの抑制成分が温度が高い程放出され易いことを示している[3]。また30℃では始発→終結間が長く、水和進行が緩やかになることがわかる。

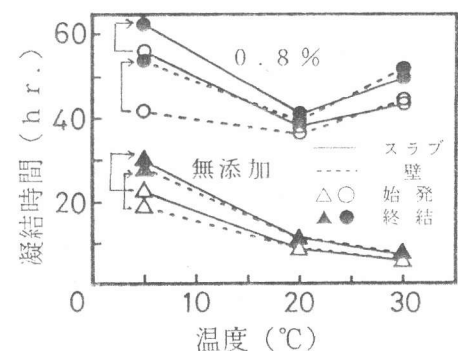


図-1 練り上がりおよび養生温度と凝結時間の関係

(3) ブリージング試験

TFの添加量を変えた場合の練り上がりおよび養生温度とブリージング率の関係を図-2に示す。ブリージングの傾向は凝結時間の傾向とほぼ一致しており、30℃における増加が著しい。温度が高い程抑制成分の放出量が多くなり、凝結が遅延したことに起因すると考えられる。

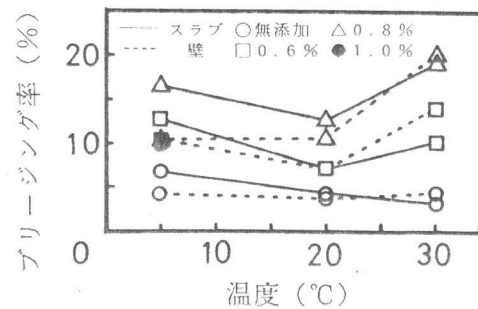


図-2 各温度におけるブリージング率

3. 2 硬化コンクリート試験

(1) 強度試験

壁用調合を例とし、無添加およびTFを0.8%添加した場合の圧縮強度発現を図-3に示す。TFを添加した場合、材令7日までは無添加を下回るが、その後は逆転し材令28日以降では無添加を上回っている。スラブ用調合においても同様の傾向が得られたが、この傾向は30℃において顕著であり、温度が高いにも係わらず長期強度が大きく増進する特長が認められる。TFを添加すると徐々に水和が進行し、無添加よりも緻密な水和組織が形成されるためと考えられる。

図-4は、20℃におけるTFの添加量と圧縮強度の関係である。添加量0.6、0.8%の圧縮強度発現は材令7日において無添加とほぼ同等であり、その後無添加を上回るが、添加量1.0%では水和制御効果が過剰となり材令7日までの強度発現が大きく遅れ、その後急激に増進している。

図-5は同じく20℃における無添加と0.8%添加の場合の、材令の経過に伴う圧縮強度と引張強度の関係であるが、いずれもある一定の関係が認められ、ブリージングによる悪影響は無く、一般的なコンクリートの性状と変わらなかった。また弾性係数の発現は添加、無添加間に差が認められなかった。

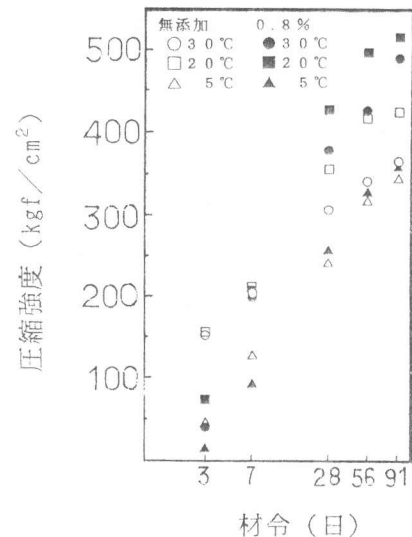


図-3 無添加、0.8%添加の圧縮強度発現（壁用調合）

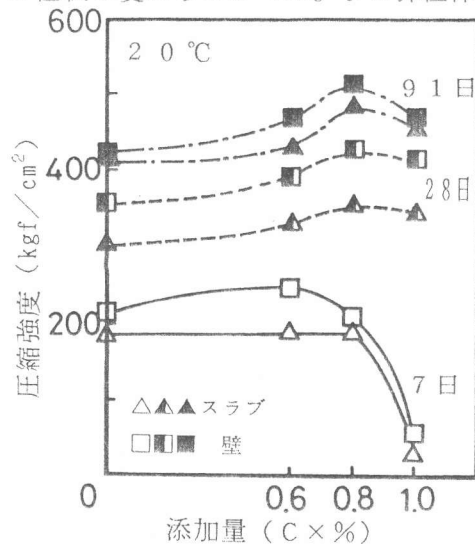


図-4 添加量と圧縮強度の関係

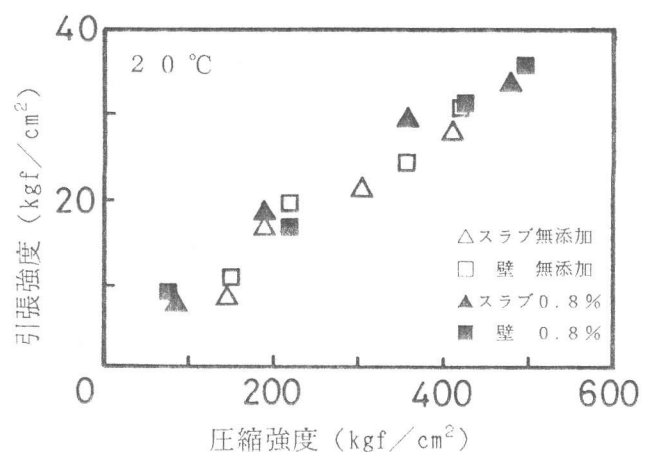


図-5 圧縮強度と引張強度の関係

(2) 長さ変化および凍結融解試験

練り上がり温度 20°C における無添加と 0.8% 添加の場合の、長さ変化試験と凍結融解試験を行った結果を図-6 および図-7 に示す。材令 91 日における長さ変化量はいずれも一般的なコンクリートと同程度である。凍結融解試験の相対動弾性係数についても、無添加、添加共に 300 サイクル終了時に 70% を維持している。

3. 3 断熱温度上昇試験

(1) 断熱温度上昇曲線

スラブ用調合における材令 7 日までの断熱温度上昇曲線を図-8 (30°C) および図-9 (20°C 、 5°C) に示す。

TF の水和熱制御効果は、 30°C において顕著に認められ、添加量増加につれて曲線の立ち上がりが遅くなり、勾配も緩やかになる。 0.6% 添加では曲線の勾配はさほど変わらず、発熱も 2~3 日の間にほぼ完結するが、 0.8% もしくは 1.0% 添加した場合には勾配が緩やかになり、5~7 日にわたって発熱している。これは図-1 で示したように、TF を添加した場合に凝結が長くなる傾向を裏付ける。また 1.0% 添加した場合が最も明確であるが、いずれも温度上昇量 10°C 付近に変曲点がある。この変曲点は、約 10°C 温度上昇した時点で TF の抑制成分が分解・放出され始めることを示唆している。従って TF の抑制成分は、練り上がり直後にはコンクリートの温度やアルカリ性により分解・放出されて凝結に影響を与え、その後温度の上昇に伴って再び分解・放出されて水和を制御する性質を持つことがわかる。

図-9 に示した 20°C および 5°C の場合は、TF の添加により曲線の立ち上がりは遅れるが、勾配については 30°C の場合程顕著な効果が認められない。

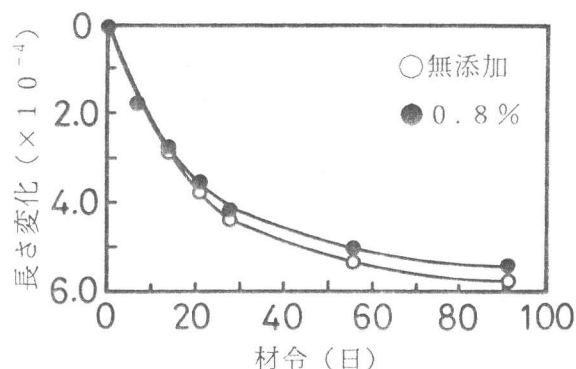


図-6 長さ変化試験結果 (20°C)

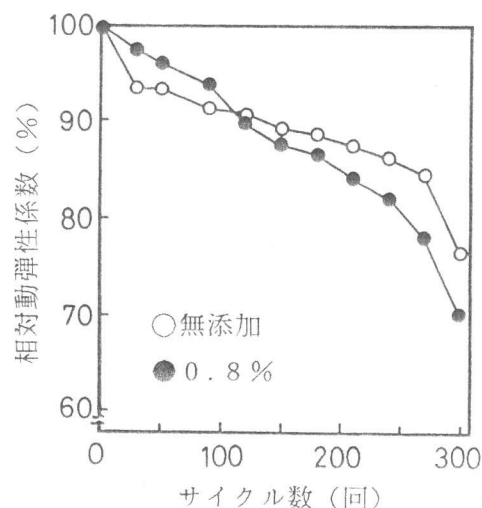


図-7 凍結融解試験結果 (20°C)

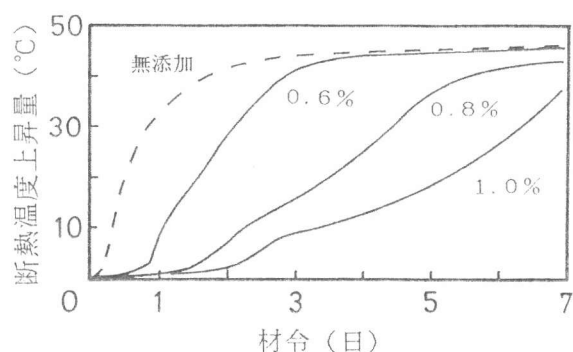


図-8 30°C における断熱温度上昇曲線

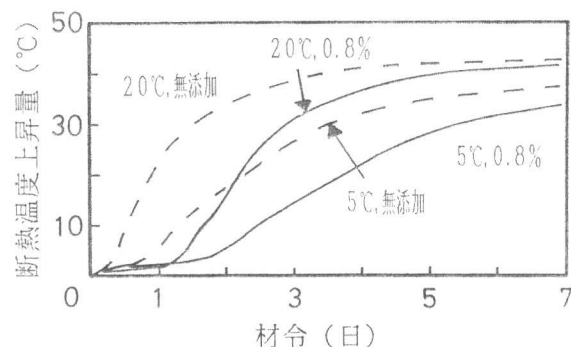


図-9 20°C 、 5°C における断熱温度上昇曲線

(2) 回帰式

断熱温度上昇曲線に対する回帰は材令14日までの実験値を基に行った。回帰式は以下の3種類であり、30℃および20℃の無添加の場合は(1)式、5℃の無添加と5℃、20℃、30℃でTFを添加した場合は発熱開始までを(2)式で、その後は(3)式を用いて近似を行うと比較的良好な実測値との相関が得られた(図-10参照)。以下の式において、Tは材令t日における断熱温度上昇量、Kは断熱温度上昇の終局値、Aは(2)式による1次回帰部分の傾き、Yは(2)式による回帰が可能な期間(日)、 α 、 β は温度上昇速度に関する実験定数である。これらの定数を表-5に示す。

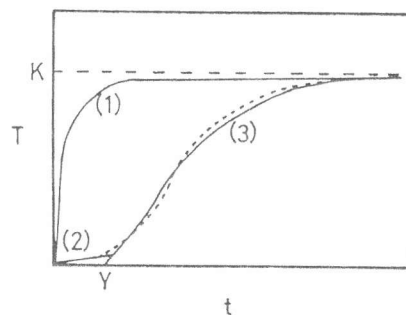


図-10 適用した回帰式の種類

$$T = K \{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (1)$$

$$T = A t \quad (2)$$

$$T = K [1 - \exp\{-\alpha(t - Y)^\beta\}] \quad (3)$$

表-5 スラブ用調合における各断熱温度上昇曲線回帰式の定数

練り上がり温度(℃)	単位セメント量(kg/m ³)	TF添加量(C×%)	回帰式種類	Y(日)	A	K(℃)	α	β
30	254	無添加	(1)	—	—	47.43	1.075	—
		0.6	(2)+(3)	0.875	2.933	45.80	0.917	1.081
		0.8	(2)+(3)	1.500	1.158	44.63	0.242	1.499
		1.0	(2)+(3)	2.000	0.730	45.20	0.069	1.936
20	242	無添加	(1)	—	—	42.60	0.783	—
		0.8	(2)+(3)	1.250	1.513	41.90	0.719	1.084
5	234	無添加	(2)+(3)	0.750	3.514	40.40	0.493	0.933
		0.8	(2)+(3)	1.750	0.948	37.68	0.399	1.035

(3) 水和熱制御効果

TFの水和熱制御効果をさらに定量的に把握するため、表-5に示した α の値とTFの添加量の関係を図-11に示した。無添加は練り上がり温度の低下に伴い α が減少する。添加量0.8%と比較すると、30℃が最も小さく、次いで5℃、20℃の順になっている。30℃において添加量を増した場合は、1.0%で無添加の約15分の1まで減少し、温度が高い程TF添加による断熱温度上昇速度の低下が顕著であることがわかる。図-12には回帰曲線の発熱立ち上がり時間と α の関係を示す。30℃では α の減少に伴い立ち上がり時間が遅れるが、20℃、5℃では α はさほど減少せず立ち上がり時間のみが遅れており、TFの暑中における特長を良く表している。

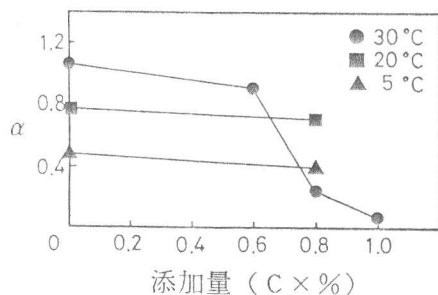


図-11 添加量と α の関係

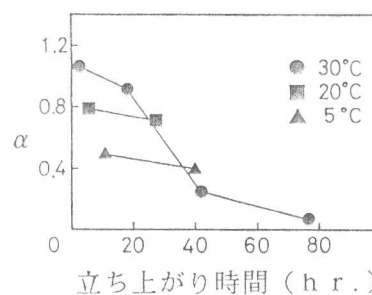


図-12 立ち上がり時間と α の関係

4. まとめ

原子力発電施設を構築するフライアッシュコンクリートの基礎物性ならびに熱的特性に水和熱制御混和剤（TF）が及ぼす影響をまとめると以下のようである。

（1）スランプおよび空気量に及ぼす影響

TFは減水性を有している。本研究で試料としたコンクリートは、スランプ12cmのベースコンクリートを18cmまで流動化させたものであるが、ナフタレンスルホン酸塩系の流動化剤を殆ど用いずとも所定のスランプまで流動化させることが可能であった。またTFには空気連行性が無く、添加、無添加の違いによるAE剤の使用量に増減は無かった。

（2）凝結およびブリージングに及ぼす影響

TFの抑制成分はコンクリートのアルカリ性と温度（または温度上昇）によって分解・放出され、水和を抑制する。従って、添加量が多い場合はアルカリ性による分解・放出量が多く、また練り上がり温度が高い場合は温度による分解・放出量が多くなり、凝結とブリージングに影響を与える。

（3）強度に及ぼす影響

TFの添加により5℃、20℃、30℃いずれの練り上がりおよび養生温度でも長期強度が増進し、無添加の約110～120%に到達する。特に30℃における長期強度の伸びが著しい。これは暑中においても水和が徐々に進行するため、形成される水和組織が緻密になることに起因する。

（4）耐久性に及ぼす影響

耐久性評価のため長さ変化および凍結融解試験を行った結果では、TFを添加した場合でも無添加と同様に品質低下は認められない。

（5）熱的特性に及ぼす影響

TFの添加量増加につれて発熱速度は低下するが、その度合は練り上がり温度30℃において最も著しく、回帰式で与えられた発熱速度に関する α の値は30℃において1.0%添加した場合無添加の15分の1にまで減少した。これはTFが水和熱制御混和剤として有効に機能するには温度の高いコンクリート程有利であることを意味している。

5. 謝辞

本研究の遂行に当たり、多大なる協力と指導を頂いた鹿島建設株式会社ならびに株式会社国立技研の関係諸氏に深く感謝致します。

6. 参考文献

- [1] 稲田 和夫, 小堺 規行ほか セメント・コンクリート論文集, No. 44, pp. 198, 1990
- [2] 時川 忠, 宮 功ほか 第44回セメント技術大会講演集, pp. 244, 1990
- [3] 伊藤 真純, 田中 恭一 セメント・コンクリート, No. 471, pp. 31, 1986. 5