

論文 フライアッシュを用いたコンクリートの断熱温度上昇

國府勝郎^{*1}・佐々木和徳^{*2}・上野敦^{*3}・宇治公隆^{*4}

要旨：フライアッシュは、マスコンクリートの断熱温度上昇抑制対策のための結合材として多用されている。本文は、1999年のフライアッシュのJIS改正によって新たに区分されたフライアッシュI種およびII種に適合するフライアッシュを用いたコンクリートの断熱温度上昇を試験した結果について検討したものである。そして、コンクリートの単位結合材量、フライアッシュによるセメントの置換率および種類による終局断熱温度上昇量および温度上昇速度係数の変化、またフライアッシュの反応による発熱量の普通ポルトランドセメントに対する割合を示すセメント換算係数が示されている。

キーワード：フライアッシュ、断熱温度上昇、結合材量、置換率、セメント換算係数

1. まえがき

石炭火力発電から発生するフライアッシュは、電力需要の増大に応じて生産量の増加が見込まれており、この有効利用が重要な課題となっている。このようなことから、フライアッシュをコンクリートに適切に使用しやすくするため、フライアッシュの品質に関するJIS規格は、1999年2月の改正によって新たに4種類に区分された。そして、強熱減量や粉末度などに支配されるフライアッシュの品質は、フライアッシュによるセメントの置換率を30%としたモルタル強度の発現特性から求めた活性度指数や、減水性能を背景としたフロー値比によって明確にされている。

しかし、フライアッシュを用いたコンクリートの実施工においては、配合や養生などの条件は種々に変化し、フライアッシュの品質特性が、その配合や実構造物コンクリートにおいてどのように発揮されるかは不明である。フライアッシュの種類を使用目的に応じて選定する目安はJIS改正によって与えられたが、適正活用のための資料は未だ十分に蓄積されていない。

著者らは、水結合材比を $W/(C+k \cdot F)$ として表したときの等値換算係数 k (prEN206-1997における k 値)を用い、フライアッシュを用いたコンク

リートの強度と、配合および養生条件が同等の通常コンクリートの強度とを対比することによって、フライアッシュの種類ごとの結合材としての性能を、養生温度および材齢の条件に応じて定量的に評価した¹⁾。

本論文は、フライアッシュI種およびII種に適合するフライアッシュを使用し、フライアッシュによるセメントの置換率および単位結合材量を変化させたコンクリートの断熱温度上昇を試験した結果を述べたものである。フライアッシュの温度上昇抑制効果は、強度発現に関する等値換算係数 k と類似のセメント換算係数 k_f によって表され、フライアッシュI種はセメントの発熱量を1.0としたときに約0.65、II種は0.55程度であることが明らかにされている。また、フライアッシュの置換率にともなうボゾラン反応の変化が、セメント換算係数によって検討されている。

2. 実験方法

2.1 使用材料

実験に使用したセメントは、混合材の含まれていない研究用セメントを使用した。このセメントの粉末度は3160 cm^2/g 、材齢28日のセメント強度は58.8 N/mm^2 であり、市販の普通ポルトランドセ

*1 東京都立大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 博士(正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所工事管理室 修士(正会員)

*3 東京都立大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*4 東京都立大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 博士(正会員)

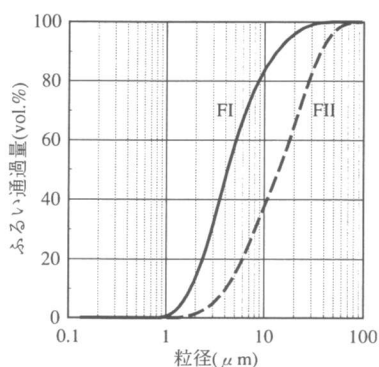


図-1 フライアッシュの粒度分布

メントと同等の品質と見なしてよい。

フライアッシュは、東北発電工業製で JIS A6201-1999 に適合するフライアッシュ I 種(以後、FI と記す)および II 種(以後、FII と記す)であり、表-1 および 2 にその化学成分および物理的性質を示す。粉末度は概略値が示されており、この粒度分布をレーザー回折式粒度分布測定装置で測定した

結果、FI の平均粒径は $4.21 \mu\text{m}$ 、FII は $14.1 \mu\text{m}$ であった。FI の材齢 28 および 91 日の活性度指数は 105 および 113、FII のそれは 92 および 100 であった。なお、このフライアッシュは、既報告の実験に用いたものと同じである。

実験に用いた粗骨材は、絶対乾密度 2.63g/cm^3 、吸水率 0.73%、FM6.79 の硬質砂岩砕石 2005 であり、細骨材は、絶対乾密度 2.61g/cm^3 、吸水率 1.16%、FM2.90 の砕砂である。

混和剤は、リグニンスルホン酸系の AE 減水剤とアルキルアリルスルホン酸系の通常の空気量調整剤を用いている。

2.2 配合

コンクリートの配合は、単位結合材量を 270、310 および 350kg/m^3 とし、フライアッシュ FI および FII によるセメントの置換率を、質量比率で 0 および 30% とした。なお、FI を用いた単位結合材量 310kg/m^3 とした配合については、置換率 15 および 45% についても試験している。試験を行ったコンクリートの配合を表-3 に示す。コンクリートのスランブは目標 8cm に対して 6～10cm の範囲に、空気量は目標 5.0% に対して 4.2～6.1%

表-1 フライアッシュの化学成分

試料	化学成分(%)						
	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
FI	1.3	54.0	23.7	5.4	6.3	2.2	0.8
FII	2.1	51.2	28.3	4.5	5.4	1.3	0.5

表-2 フライアッシュの物理試験成績

試料	粉末度 (cm^2/g)	密度 (g/cm^3)	平均粒径 (μm)	フロー 値比	活性度指数	
					28日	91日
FI	4000	2.41	4.21	117	105	113
FII	6000	2.26	14.1	109	92	100

表-3 コンクリートの配合

種類	結合材量	置換率	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
					W	C	F	S	G
N	270	0	64.8	45	175	270	0	819	1005
	310	0	56.5	45	175	310	0	810	993
	350	0	50.0	45	175	350	0	789	968
FI	270	30	59.3	45	160	189	81	827	1015
	310	15	51.6	45	160	264	46	816	1001
	310	30	51.6	45	160	217	93	811	995
	310	45	51.6	45	160	170	140	805	988
	350	30	46.3	45	162	245	105	792	972
FII	270	30	63.0	45	170	189	81	813	997
	310	30	54.8	45	170	217	93	796	976
	350	30	49.1	45	172	245	105	777	953

の範囲にあった。練上がり時のコンクリート温度は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ となっている。

2.3 試験方法

コンクリートの断熱温度上昇は、空気循環式測定装置(東京理工製)によって試験した。1 バッチあたりの練混ぜ量は 25L とし、ミキサから排出したコンクリートを十分に攪拌して約 5L の試料を試料容器に詰め、断熱試験槽に格納した。温度上昇の測定は、1 日の温度変化がほとんど認められなくなるまでの 9～17 日間継続した。断熱温度上昇曲線は、一般に用いられている式(1)によることとし、シンプレックス法による最小自乗法近似によって、終局断熱温度上昇量および温度上昇速度係数を求めた。フライアッシュを用いたコンクリートの断熱温度上昇は、温度上昇開始時の曲線が普通コンクリートに比べて多少異なる挙動をすることが認められたが、従来からのデータと比較することを考慮して式(1)を採用した。

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\gamma t)\} \quad (1)$$

ここに、 $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇 ($^\circ\text{C}$)、 Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 ($^\circ\text{C}$)、 t : 材齢 (日)、 γ : 温度上昇速度に関する定数

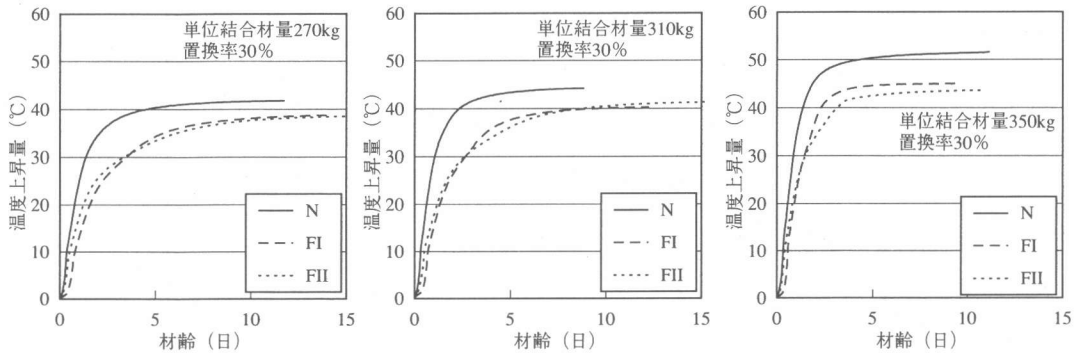


図-2 断熱温度上昇曲線の代表例

3. 結果および考察

3.1 断熱温度上昇曲線

普通コンクリート、FIおよびFIIを用いたコンクリートの断熱温度上昇試験結果として、置換率30%の場合を単位結合材量270, 310および350kg/m³ごとに図-2に示す。フライアッシュを結合材として用いることによって、いずれの結合材量においても、温度上昇が普通コンクリートよりも抑制されていることがわかる。フライアッシュコンクリートの温度上昇曲線は、発熱の開始部分で普通コンクリートの場合よりわずかに遅延する傾向がある。断熱温度上昇の測定値を通常用いられている式(1)によって近似した結果を表-4に示す。式(1)による近似曲線は、温度上昇開始時にわずかに誤差はあるが、材齢約3日以後の温度上昇近似曲線は実測値を良好に近似している。

3.2 単位結合材量の影響

置換率30%の場合の単位結合材量による終局断熱温度上昇量および温度上昇速度係数の変化を図-3に示す。終局断熱温度上昇量および温度上昇速度係数は、いずれもフライアッシュで置換することによって低下している。これらの特性値が単位結合材量に比例するものと仮定すると、図示のように多少ばらつきが見られるが、結合材量10kg/m³あたりの終局断熱温度上昇量の増加割合は、普通コンクリートは平均1.1℃であるのに対し、FIを用いたコンクリートでは平均0.96℃、FIIを用いたコンクリートでは平均0.76℃となる。そして、置換率30%のフライアッシュコンクリートの終局断熱温度上昇量は、普通コンクリートよりも3.5～7.5℃低下している。また、結合材量

表-4 断熱温度上昇試験結果

種類	結合材量	置換率	終局上昇量 Q_{∞}	速度係数 γ
N	270	0	41.5	0.857
	310	0	44.2	0.984
	350	0	51.4	0.984
FI	270	30	38.9	0.420
	310	15	48.4	0.699
	310	30	40.9	0.474
	310	45	38.7	0.398
	350	30	46.6	0.657
FII	270	30	37.7	0.542
	310	30	40.5	0.524
	350	30	43.8	0.732

10kg/m³あたりの温度上昇速度係数の増加割合は、普通コンクリートが平均0.016であるのに対し、FIを用いたコンクリートでは平均0.030、FIIを用いたコンクリートでは平均0.024となっている。フライアッシュを用いた場合のコンクリート温度の上昇速度係数は普通コンクリートより小さいが、I種とII種との関係は逆になっている。初期の上昇曲線の立ち上がり性状と曲線近似のずれを考慮すると、温度上昇速度係数の変化割合を詳細に検討しても意味がないと思われる。

3.3 置換率の影響

単位結合材量を310kg/m³としたときのFIによる置換率の影響を図-4に示す。終局断熱温度上昇量は、置換率が15%で普通コンクリートよりも増大しているが、温度上昇速度係数は置換率の増加にほぼ比例して低下している。このように、一定結合材量のもとで、フライアッシュでセメントを多く置換するほど、温度上昇抑制効果が大きくなる。フライアッシュによる置換率が15%と小さい場合、30%の場合に比べて温度上昇量が大きく

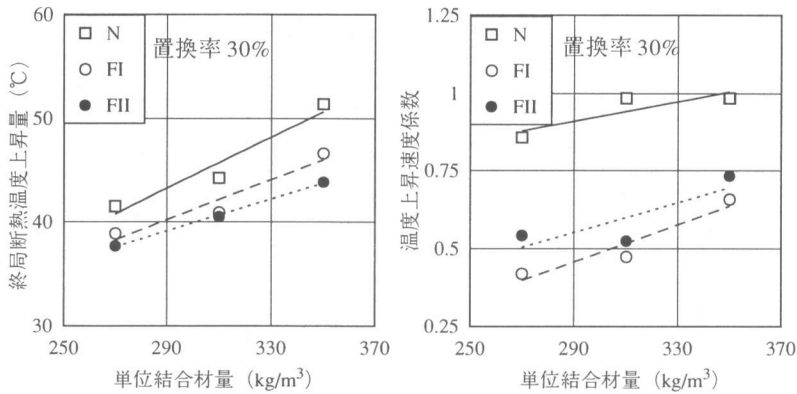


図-3 温度上昇性状に対する結合材量の影響

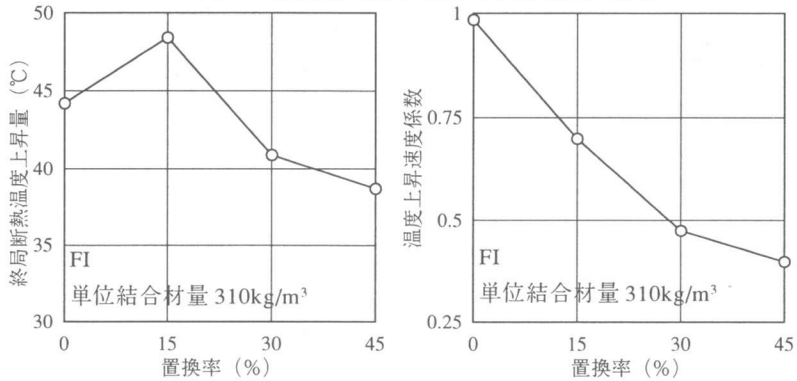


図-4 温度上昇性状に対する置換率の影響

なったことは、既報告りで示した強度発現性状が大きくなったこととも類似している。したがって、フライアッシュのポゾラン反応性に関する化学的要因も検討する必要があることを示唆しているものと思われる。フライアッシュによる置換率が15%の場合に見られる終局断熱温度上昇量の増加の原因については3.6において検討する。

3.4 フライアッシュの種類の影響

フライアッシュの種類が温度上昇性状に及ぼす影響は、3.2でも言及したが、FIとFIIとの間の差はいずれの単位結合材量の場合にもほぼ同様に大差ない結果であった。同一フライアッシュを使用したコンクリートの圧縮強度の発現性状から求めたFIおよびFIIの等値換算係数の相違りを考慮すると、断熱状態ではフライアッシュの反応が温度上昇によって促進されることも考えられ、活性度または強度に関する等値換算係数の大きなFIを用いたコンクリートの温度上昇は、FIIを用いた場合よりも顕著に増大することが予想された

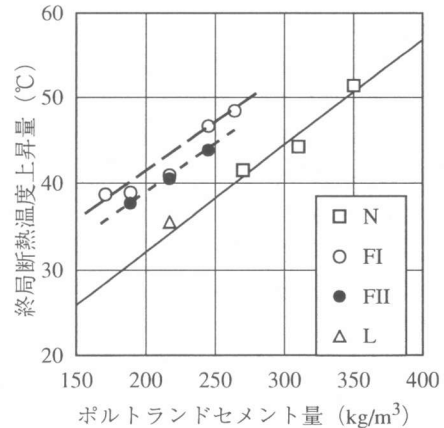


図-5 セメント量と終局温度上昇量との関係

が、この差は小さいことが明らかとなった。

3.5 セメント換算係数

フライアッシュのポゾラン反応による発熱への影響を検討するため、試験を行った全ての配合の終局断熱温度上昇量とポルトランドセメント量との関係を図-5に示す。フライアッシュを用いた

表-5 セメント換算係数の計算結果

種類	結合材量	置換率 r(%)	セメント量 (kg/m ³)	C/F	終局上昇量 Q _∞ (℃)	セメント換算 係数k _t
FI	270	30	189	2.33	38.9	0.742
	310	30	217	2.33	40.9	0.534
	350	30	245	2.33	46.6	0.685
	310	15	264	5.74	48.4	1.488
	310	30	217	2.33	40.9	0.534
	310	45	170	1.21	38.7	0.551
FII	270	30	189	2.33	37.7	0.612
	310	30	217	2.33	40.5	0.497
	350	30	245	2.33	43.8	0.450

場合の終局断熱温度上昇量は、普通コンクリートの関係線よりも大きな値を示しており、一定ポルトランドセメント量における普通コンクリートからの温度増分は、フライアッシュによる発熱と見なすことができる。このように考えれば、FIの方がFIIよりもわずかに大きな傾向を示しており、フライアッシュの種類による反応活性度の違いが現れている。

フライアッシュを温度ひび割れ制御の目的で使用する場合、フライアッシュの発熱量のセメントに対する割合がわかっておれば、セメント置換による温度上昇量の低減効果の予測が容易となる。そこで、終局断熱温度上昇量は結合材の量に比例すると見なし、式(2)に示す等価セメント量を表すためのフライアッシュのセメント換算係数 k_t を導入して検討することとした。

$$C_{eq} = C + k_t F \quad (2)$$

$$r = F / (C + F) \quad (3)$$

ここに、 C_{eq} ：等価セメント量(kg/m³)、 C ：単位セメント量(kg/m³)、 F ：単位フライアッシュ量(kg/m³)、 r ：置換率、 k_t ：セメント換算係数

このようにして等価セメント量を表せば、フライアッシュのセメント換算係数 k_t は、ポルトランドセメントに対するフライアッシュ単位質量当たりの温度上昇の割合を意味することになる。式(2)と(3)とから、セメント換算係数は式(4)のように計算される。なお、等価セメント量 C_{eq} は、フライアッシュコンクリートの終局断熱温度上昇量 Q_{∞} を、普通コンクリートの単位セメント量と終局断熱温度上昇量との関係式(5)に代入し、終局断熱温度上昇量が等しくなるセメント量を求めた

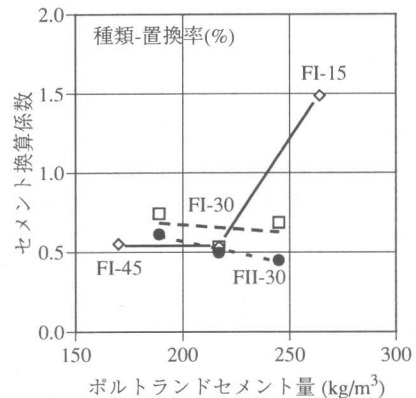


図-6 セメント換算係数への配合条件の影響
値である。

$$k_t = (C_{eq} - C) / C \{ r / (1 - r) \} \quad (4)$$

$$Q_{\infty} = 0.114C + 10.60 \quad (5)$$

セメント換算係数 k_t の計算結果を表-5に示す。図-6にポルトランドセメント量とフライアッシュのセメント換算係数との関係を示す。単位結合材量が270～350kg/m³の範囲でフライアッシュによる置換率を30%($C=189\sim245$ kg/m³)とした場合、温度上昇に関するフライアッシュのセメント換算係数は、FIは0.53～0.74(平均0.65)、FIIは0.45～0.61(平均0.52)となり、フライアッシュI種の方がII種よりも反応性が高い傾向にあることが定量的に示された。また、置換率を一定とした場合には、FIおよびFIIともに、ポルトランドセメント量が小さいほど、または水結合材比が大きいほどセメント換算係数 k_t が大きくなる傾向が伺える。

一方、置換率を15%とした場合には、終局断熱温度上昇量の実測値が著しく大きく得られた結果

から、FIのセメント換算係数は置換率30%の場合の約3倍に、置換率45%では30%の場合と同等もしくは小さくなる傾向を示している。この結果は、フライアッシュの使用にあたっては、水結合材比や置換率などの配合条件によって、フライアッシュの作用やコンクリートの品質に及ぼす効果が変化することを示しており、ボゾラン反応性を化学的に解明する必要がある。

3.6 セメント／フライアッシュ比の影響

フライアッシュによるセメントの置換率を15%とした場合の特異な結果を確認するために、FIによる置換量に相当する絶対体積を、反応性が微弱で温度上昇への影響を無視できると見なせる石灰石微粉末で置き換えた同一配合の温度上昇を試験した。使用した石灰石微粉末は、密度 2.71g/cm^3 、粉末度 $4400\text{cm}^2/\text{g}$ で、CaO含有率55.4%、強熱減量43.4%のものである。

この断熱温度上昇試験結果を式(1)によって近似した結果、終局断熱温度上昇量は 35.6°C 、温度上昇速度係数は0.79となった。この終局断熱温度上昇量の結果は、セメント量と温度上昇量との関係を示した図-5において、普通コンクリートの関係線上に打点(L)されており、石灰石微粉末を用いたコンクリートの終局断熱温度上昇量は、鉱物質微粉末を添加したことによる促進は認められない。すなわち、鉱物質微粉末を添加することによるセメントの分散にともなう水和面積の拡大に起因する発熱量は小さいものと考えられる。

フライアッシュのボゾラン反応性を化学的に検討した報告²⁾によれば、フライアッシュの反応律則は基本的に(水酸化カルシウム量／未反応フライアッシュ量)であるとされている。水酸化カルシウム量はセメント量に比例するので、C/Fを指標とすれば、FIの単位結合材量を 310kg/m^3 とした場合、置換率15%のC/Fは5.74、30%の場合は2.33、45%の場合は1.21となる。また、置換率が小さいほど水和環境温度が高く、セメントからの水酸化カルシウムの供給量も大きくなる。さらに、養生温度が高いほどボゾラン反応性が高いことも推察されており¹⁾、FIを置換率15%で用いた場合の本試験結果は、フライアッシュの反応性を反映した一般的な傾向である可能性がある。

4. 結論

フライアッシュI種およびII種に適合するフライアッシュ2種を用い、置換率および単位結合材量を変化させた断熱温度上昇試験を行った結果から、次の結論が得られる。

- 1) フライアッシュによる置換率を30%としたコンクリートの単位結合材量 10kg/m^3 あたりの終局断熱温度上昇量の増加割合は、普通コンクリートの 1.1°C に対して、フライアッシュI種の場合 0.96°C 、フライアッシュII種では 0.76°C であった。
- 2) フライアッシュによるセメントの置換率を30%程度で使用的場合、普通コンクリートに比べて終局断熱温度上昇量および温度上昇速度係数ともに顕著に低下するが、フライアッシュI種とII種との間の温度上昇性状の見かけの相違は顕著なものではなかった。
- 3) 置換率30～45%の範囲におけるフライアッシュの発熱性状に対する影響をセメント換算係数として表せば、フライアッシュI種は平均0.65、II種は平均0.52程度であり、フライアッシュI種の方がII種よりも反応性が高い傾向にあることが定量的に示された。
- 4) 終局断熱温度上昇量および温度上昇速度係数は、全般的にはフライアッシュによるセメントの置換率の増大にほぼ比例して低下した。しかし、フライアッシュI種による置換率が15%のコンクリートの場合、終局断熱温度上昇量は普通コンクリートよりも増大する傾向が認められ、これはコンクリートの強度発現性状とも対応しており、ボゾラン反応の面から検討が必要である。

参考文献

- 1) 國府勝郎, 上野敦, 平野将司: フライアッシュの強度発現に関する養生温度および材齢効果の定量的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.79-84, 2000.7
- 2) 小早川真, 黄光律, 羽原俊祐, 友澤史紀: セメント硬化体中のフライアッシュのボゾラン反応率と各種要因の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.67-72, 2000.7
- 3) 山崎寛司: 鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究, 土木学会論文集, 第85号, pp.15-44, 1962.9