

報告 フライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす温度と養生の影響

藤本 浩^{*1}・芦田 広喜^{*2}・古賀 善雄^{*3}・楠 貞則^{*4}

要旨: セメント原料として処理されているフライアッシュをセメント外割り使用したコンクリートについて、練上がり温度、養生温度および養生方法の違いが、フレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、フライアッシュを外割り使用した場合、フレッシュ性状(スランプ・空気量)の経時変化は寒中時と暑中時を想定したコンクリート温度5℃と35℃でも無混入コンクリートと大差ないこと、また、強度発現性は養生温度や養生方法に関係なく無混入コンクリートと概ね同等となることが確認された。

キーワード: フライアッシュ, 養生温度, 経時変化, フレッシュ性状, 圧縮強度, 断熱温度上昇

1. はじめに

石炭火力発電所から発生する石炭灰の量が年々増加傾向にある中、石炭灰の約90%を占めるフライアッシュは、そのほとんどがセメント原料として有効利用されているが、近年のセメント需要の低迷によりそれも限界になりつつある。

一方、レディミクストコンクリートに使用される細骨材は、海砂の採取規制の拡大等から、九州の一部地域においても代替骨材の検討がなされ、フライアッシュも代替骨材の一つとして選定されており、セメント外割り使用の確立が求められている。

現在、フライアッシュのセメント外割り使用については、土木学会四国支部の「フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針(案)」¹⁾に示され、整備がなされつつあるが、まだ一般的なものになっていないのが現状である。

筆者らはこれまでの研究^{2), 3)}で、フライアッシュをセメント外割り使用したコンクリートについて、フライアッシュ置換率10%が流動性改善効果から最も実用的で、コンクリートのプラスチック性の向上に有効であること、圧縮強度や耐久性も無混入コンクリートと概ね同等以上の品質が得られることを確認しているが、実用化にあたっては、現場施工に着目した練上がり温度、養生温度および養生方法の影響を把握しておく必要がある。

そこで、本研究では、フライアッシュを混入した外割りコンクリートについて、練上がり温度がフレッシュ性状の経時変化に及ぼす影響と、養生温度および養生方法が強度発現性に及ぼす影響を室内試験により検討した。また、フライアッシュを外割り使用すると、コンクリ

ートの断熱温度上昇量が高くなるとする報告^{4), 5)}があるため、フライアッシュの断熱温度上昇量への影響確認も行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に使用した材料を表-1に、フライアッシュの品質を表-2に示す。

セメントは、高炉セメントB種を使用した。

本研究で対象としているフライアッシュは、セメント原料用(粘土代替材)として有効利用されているフライアッシュ(以下、FAと称す)である。このFAは、図-1の石炭灰排出経路に示す節炭器・空気予熱器から発生するシンダーアッシュ、電気集塵機の1段目で発生する原粉のうち非分級用灰と判定されたもの、電気集塵機の2~3段目で発生する微細粉、原粉分級後の粗粉からなる混合灰で、JIS IV種に相当するものであるが、今回の検討に使用したFAの品質はII種に該当するものであった。

骨材は、2005 砕石および海砂を使用した。混和剤はAE減水剤標準形を用い、空気連行剤(AE剤)はFA用AE剤を用いた。また、断熱温度上昇量への影響確認試験では、単位水量と単位セメント量を一定条件として実施したため、スランプの調整に流動化剤を用いた。

2.2 実験の要因と水準

コンクリート実験の要因と水準を表-3に示す。

要因は、練り上がり温度、養生温度および養生方法である。練上がり温度は、実施工での環境条件を想定して、寒中期の5℃、標準期の20℃および暑中期の35℃の3水準とした。また、養生温度は練上がり温度と同一水準とした。

*1 西日本技術開発(株) 調査解析部課長 (正会員)

*2 九州電力(株) 総合研究所研究員 (正会員)

*3 西技工業(株) 佐賀営業所長 (正会員)

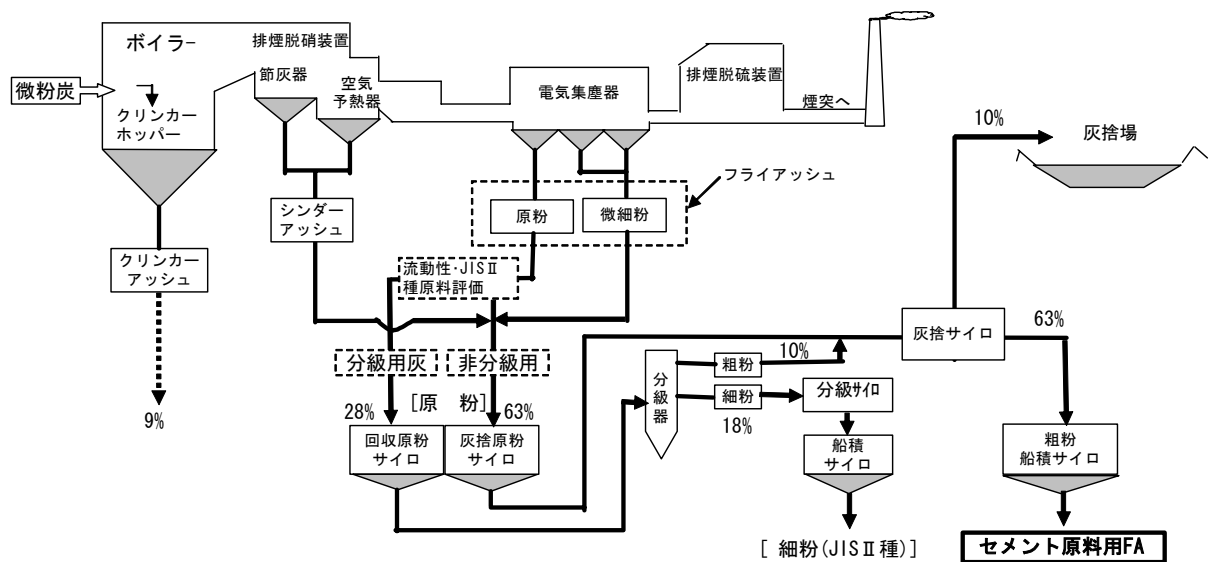
*4 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 (正会員)

表－１ 使用材料

セメント	高炉セメントB種	密度3.02g/cm ³ 比表面積3700cm ² /g
フライアッシュ	セメント原料用FA	Ⅱ種(表－２参照)
細骨材	海砂	絶乾密度2.54g/cm ³ 吸水率1.58% 粗粒率2.48
粗骨材	2005砕石(結晶片岩)	絶乾密度2.90g/cm ³ 吸水率0.61% 粗粒率6.45
AE減水剤 (標準形)	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体	
AE剤	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤	
流動化剤	メラミンスルホン酸系化合物	

表－２ フライアッシュの品質

試験項目		JIS A 6201 規格値 (Ⅱ種)	試験値
二酸化けい素	(%)	45.0以上	65.8
湿分	(%)	1.0以下	0.1
強熱減量	(%)	5.0以下	0.7
密度	(g/cm ³)	1.95以上	2.24
粉末度	45μmふるい残分 (%)	40以下	24
	ブレン値 (cm ² /g)	2500以上	3050
フロー値比	(%)	95以上	106
活性度指数	28日 (%)	80以上	88
	91日 (%)	90以上	99
メチレンブルー吸着量	(mg/g)	—	0.28
フライアッシュの品質判定		—	Ⅱ種



図－１ 石炭火力発電所の石炭灰排出経路概念図

養生方法は、気中養生と水中養生とし、水中養生では実施工における養生方法を考慮し、材齢7日目に気中養生へ移行する場合と最終材齢まで水中養生する場合とに分けた。

2.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合条件は、一般土木用を対象に水セメント比を 55%，目標スランプを 10±1cm，目標空気量を 4.5±1%とした。FA は細骨材補充混和材として容積置換で用い、配合は置換率 0%の無混入コンクリート(以下、FA0 配合と称す)と 10%置換したコンクリート(以下、FA10 配合と称す)の 2 種類とした。AE 減水剤はセメント質量に対して 0.25%の一定とし、スランプと空気量が目標範囲内となるように、単位水量と AE 剤量を調整した。また、細骨材率は所定のスランプを得るための単位水量が最小となる値とし、試験練りを行った結果、これまでの研究^{2), 3)}と同様に置換率 10%の増加に対して 4%小

表－３ 実験の要因と水準

要因	水準
練上がり温度	5℃，20℃，35℃
養生温度	練上がり温度と同一
養生方法	・気中養生 ・水中養生→気中養生 (材齢7日目に移行) ・水中養生

くすることができた。
断熱温度上昇量の確認試験では、FA 置換率を 0，10，20%，練上がり温度を 20℃とし、FA10 配合を基準に、細骨材率，単位水量および単位セメント量を一定条件で行い、流動化剤でスランプを調整した。コンクリートの配合を表－４に示す。

表－４ コンクリートの配合

配 合	水セメント比	FA置換率 (外割り)	練上がり温度	細骨材率	単位量 (kg/m ³)					A E 減水剤	A E 剤 (1A=C× 0.003%)	流動化剤	フレッシュコンクリートの性状		
					水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材				スランプ	空気量	練上がり温度
	(%)	(%)	(℃)	S/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	(kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	(g/m ³)	(g/m ³)	(g/m ³)	(cm)	(%)	(℃)
FA0-5	55	0	5	45.0	163	296	—	805	1115	C ×0.25%	0.8A	—	10.2	4.8	5.5
FA0-20			20		165	300	—	802	1110		1A		10.0	4.6	20.5
FA0-35			35		170	309	—	792	1098		1A		10.3	5.0	35.0
FA10-5		10	5	41.0	158	287	65	669	1209		5A		10.3	4.4	6.0
FA10-20			20		160	291	64	666	1203		5A		10.0	4.7	21.0
FA10-35			35		165	300	63	657	1191		7A		10.4	4.9	34.5
断熱温度上昇量試験配合	55	0	20	41.0	160	291	—	740	1203		1A	C ×0.24%	10.6	4.9	20.0
		10					64	666			5A	—	10.0	4.7	20.5
		20					129	592			13A	C ×0.72%	10.0	5.3	21.0

2.4 試験項目および試験方法

(1) コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、容量 55 リットルの二軸強制練りミキサを用いて、粗骨材、セメント、FA、細骨材の順で投入し、30 秒間空練りを行った後、水と混和剤を投入して 90 秒間練混ぜを行った。練混ぜにあたっては、あらかじめ恒温室に材料を保管し、所定の練上がり温度になるようにした。

(2) フレッシュ性状試験

フレッシュコンクリートの性状試験では、スランプと空気量の経時変化を測定した。スランプ試験と空気量試験は、それぞれ JIS A 1101 と JIS A 1128 に準拠した。測定時間は、練上がり直後(0 分)、30 分、60 分および 90 分とした。練上がり直後の性状を測定した後は、練り船にコンクリートを戻して各練上がり温度条件下で静置し(可変恒温室で実施)、所定の測定時間になるまで人手による切り混ぜを 15 分間隔で行った。また、測定時以外の時は試料をシートで覆い、乾燥を防いだ。

(3) 圧縮強度試験

供試体はφ10×H20cm の円柱供試体で、成形後は各練上がり温度に設定した恒温室に 24 時間静置し、脱型後、所定の養生条件にしたがって試験材齢(3 日、7 日、28 日、56 日)まで保管した。圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠して、1 材齢につき 3 本実施した。

(4) 断熱温度上昇量試験

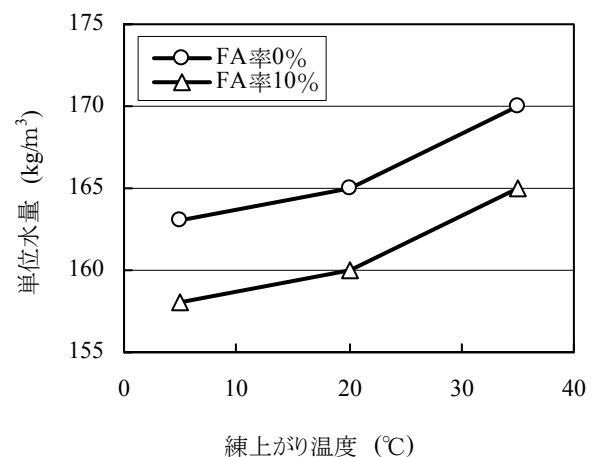
断熱温度上昇量は、空気循環式測定装置によって 14 日間測定した。

3. 実験結果

3.1 練上がり温度の影響

(1) 単位水量および AE 剤量

練上がり温度と単位水量の関係を図－2、AE 剤量との関係を図－3 に示す。FA10 配合の単位水量は、練上がり温度に関係なく FA の流動性改善効果により、FA0 配合よりも 5kg/m³(3%)少なくなった。また、単位水量は練上がり温度 20℃を基準にすると、5℃では減少し、35℃では増加する傾向を示すが、その増加量は FA0 配合と変わらなかった。このことより、練上がり温度が単位水量に及ぼす影響は、FA 混入の有無に関係ないことがわかった。



図－2 練上がり温度と単位水量の関係

AE 剤量については、FA0 配合は練上がり温度に関係なくほぼ一定の使用量となった。これに対して、FA10 配合は、FA0 配合よりも使用量が増加した。これは、文献 1)でもいわれているように FA 中の未燃カーボンによる影響と考えられる。また、練上がり温度が 5℃、20℃では、使用量は一定であるが、35℃になると空気連行性が悪くなり、使用量が増加する傾向を示した。ただし、AE 剤量の A タイプは、表 4 に示すように練上がり温度 5～35℃の範囲で 5～7A 程度の変動範囲であり、プラントでの日常管理は問題ないと考えられる。

(2) フレッシュ性状の経時変化

スランプロスおよび空気量ロスの経時変化を図 4 と図 5 に示す。練上がり温度を 35℃した場合のスランプロス量が最も大きくなる傾向を示すが、スランプロスの経時変化量は練上がり温度に関係なく FA0 配合と同程度であった。なお、スランプロス量については、練上がり温度 20℃でも経過時間 60 分で約 6cm と大きな値を示すが、これは室内でコンクリートを静置しているためと考えられ、実機でトラックアジゲータ車を使用した場合は、ロス量は軽減されるものと推測される。

FA10 配合の空気量は、練上がり温度に関係なく FA0 配合に比べて 30 分経過時のロス量が 0.5～1.0% 程度大きくなる傾向を示すが、30 分から 90 分にかけての空気量の変化量は FA0 配合と大差なかった。FA を混入すると、未燃カーボンに AE 剤成分が吸着されるために空気量の経時変化が大きくなるといわれている。今回、AE 剤には FA に吸着されにくい FA 用 AE 剤を使用しているが、完全に吸着現象を抑えることは難しいものと思われる。

3.2 養生温度および養生方法の影響

材齢と圧縮強度の関係を図 6 に、積算温度と圧縮強度の関係を図 7 に示す。水中養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、養生温度 20℃の場合に比べて 5℃では初期強度の発現が小さく、35℃では材齢 28 日以降の強度の伸びが小さくなる一般的傾向を示した。これに対して、気中養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、養生温度 5℃および 20℃の場合は材齢 28 日以降から、35℃の場合は材齢 7 日からそれぞれ伸びがなくなり、材齢 56 日では水中養生した場合よりも小さくなる傾向にあった。これは、乾燥が進行して水分が逸散したことにより水和反応が持続できなくなったためと考えられる。また、水中養生から材齢 7 日目に気中養生へ移行した場合は、水中養生した場合とほぼ同様な強度発現を示し、初期養生を適切に行えば、良好な強度発現が得られることが認められた。

FA10%配合の圧縮強度は、養生温度および養生方法の違いに関係なく FA0 配合と概ね同等の強度が得られており、普通コンクリートと同様に養生しても問題ないこと

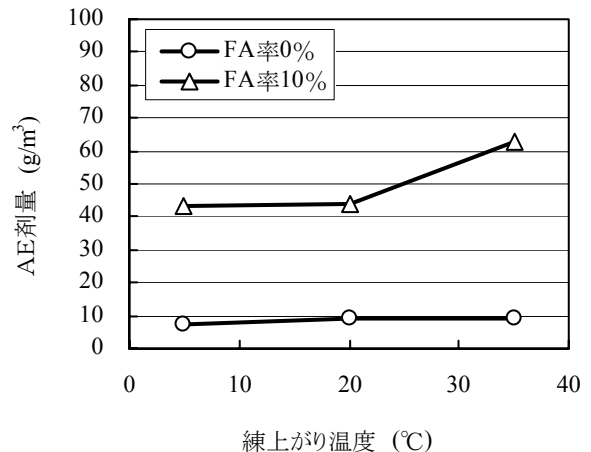


図 3 練上がり温度と AE 剤量の関係

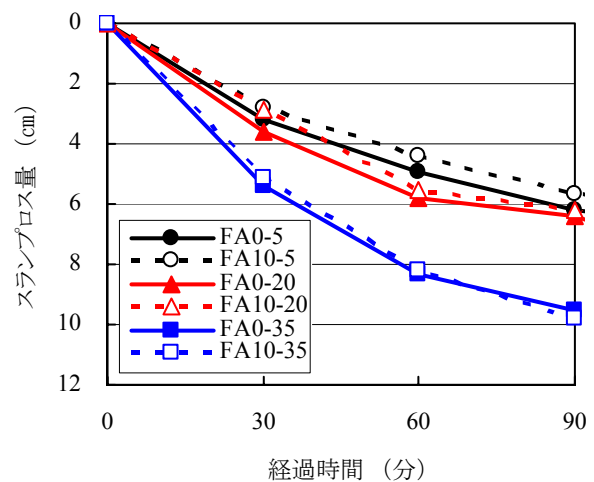


図 4 スランプロス量の経時変化

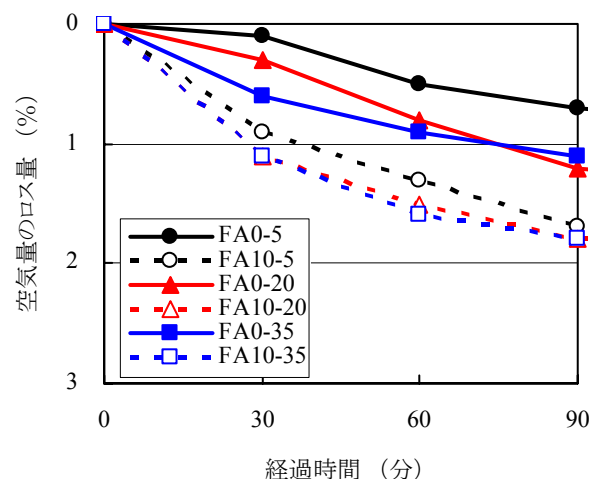
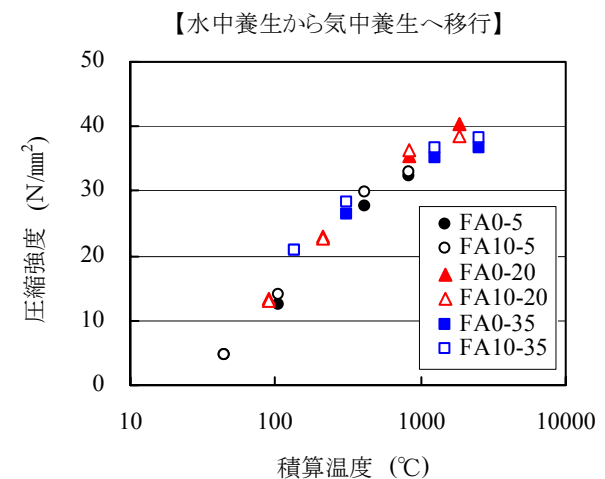
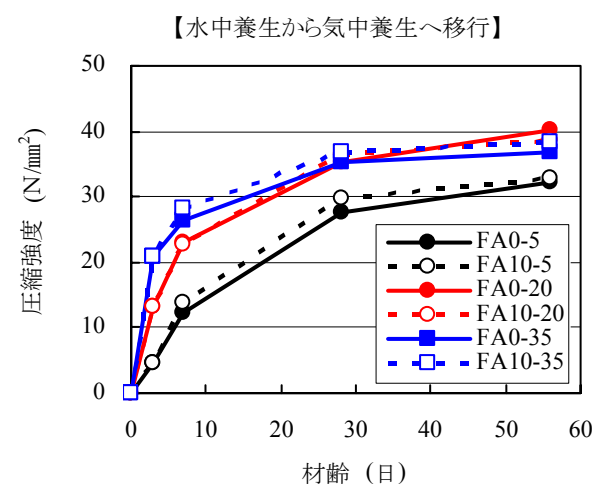
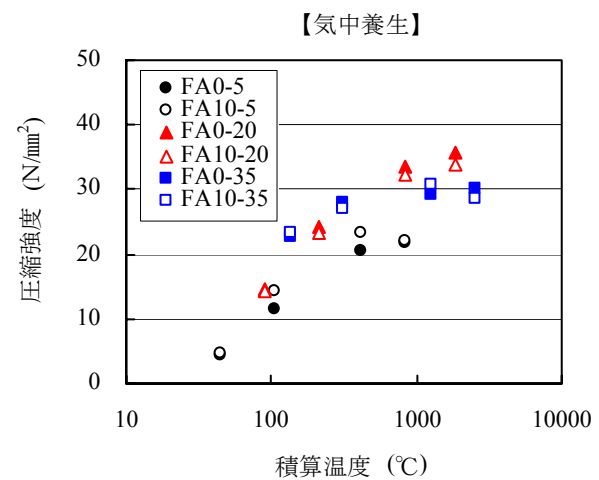
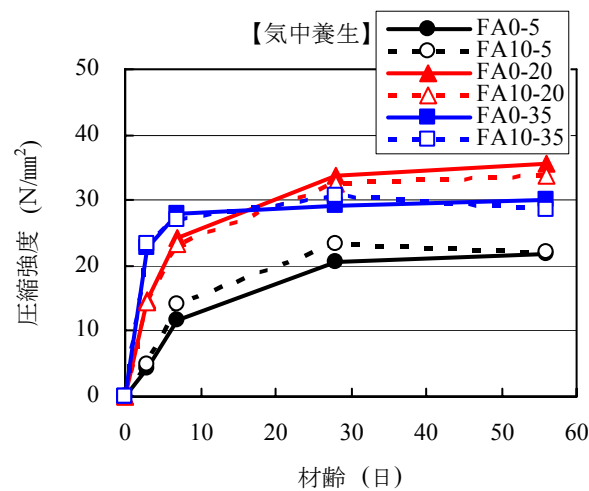
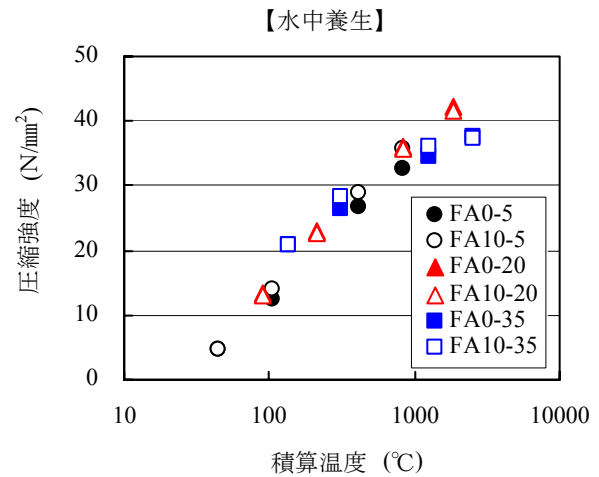
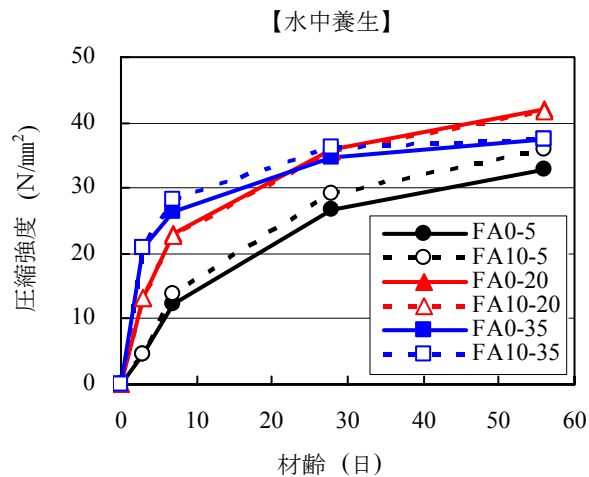


図 5 空気量のロス量の経時変化

が確認できた。また、積算温度と圧縮強度の関係は、FA0 配合と同じ直線、または曲線で示され、普通コンクリートと同じ積算温度での管理が可能であることがわかった。



図－6 材齢と圧縮強度の関係

図－7 積算温度と圧縮強度の関係

3.3 断熱温度上昇量

断熱温度上昇量の経時変化を図－8に、断熱温度上昇量の近似式を表－5に示す。なお、近似式は一般的に使用されている土木学会の式(1)を用いた。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (1)$$

ここに、 $Q(t)$ ：材齢 t 日における断熱温度上昇量 (°C)

Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量 (°C)

r ：温度上昇量に関する定数

t ：材齢 (日)

FA を 10%および 20%置換したコンクリートの断熱温度上昇量の経時変化は、置換率に関係なく無混入コンクリートと同程度であり、終局断熱温度上昇量は 43.5～43.9℃の範囲にあった。

既往の研究によれば、FA を外割り配合で細骨材代替したコンクリートの断熱温度上昇量は、FA 置換量 10～20kg/m³ で約 1～2℃高くなるとする報告^{4), 5)}もあるが、今回の高炉セメント B 種を用いた試験結果では FA を約 60～130lg/m³ 外割り使用しも断熱温度上昇量に及ぼす FA の影響は認められなかった。

4. まとめ

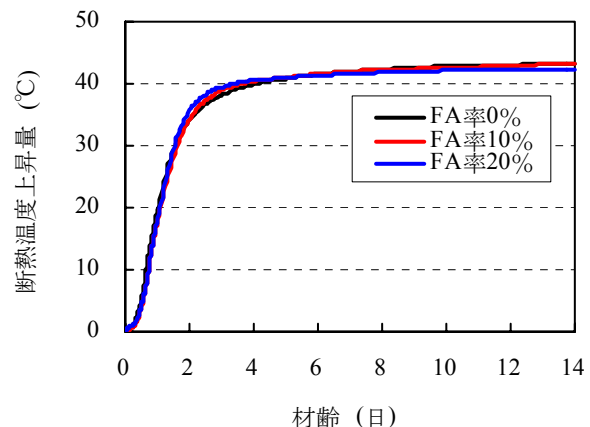
本研究では、石炭火力発電所から発生するセメント原料用フライアッシュを用いたコンクリートについて、コンクリート性状に及ぼす練上がり温度、養生温度、養生方法の影響ならびに断熱温度上昇量に及ぼすフライアッシュの影響を室内試験により検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) FA を 10%置換したコンクリートのスランブロスおよび空気量ロス、練上がり温度に関係なく無混入コンクリートと同程度である。
- (2) FA を 10%置換したコンクリートの圧縮強度は、養生温度および養生方法に関係なく無混入コンクリートと概ね同等の強度が得られる。
- (3) FA を 10%および 20%置換したコンクリートの断熱温度上昇量は、置換率に関係なく無混入コンクリートと変わらない。

以上のことから、FA を外割り使用したコンクリートの施工・養生に関しては、寒中時および暑中時ともに普通コンクリートと同様に実施しても問題ないことが確認できた。また、断熱温度上昇量に及ぼす FA 外割り混入の影響は認められなかった。

表－5 断熱温度上昇量試験結果

FA置換率 (%)	FA量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	断熱温度上昇量の回帰式 $Q_{(t)} = Q_{\infty} (1 - e^{-rt})$
0	—	291	$Q_{(t)} = 43.5 (1 - e^{-0.618 t})$
10	64		$Q_{(t)} = 43.9 (1 - e^{-0.586 t})$
20	129		$Q_{(t)} = 43.5 (1 - e^{-0.621 t})$



図－8 断熱温度上昇量の経時変化

参考文献

- 1) 土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針(案)，2003.3
- 2) 古賀善雄，船本憲治，藤本浩：フライアッシュを外割り使用したコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1643-1648，2006
- 3) 芦田広喜，古賀善雄，藤本浩：フライアッシュを外割り使用したコンクリートの諸特性（その2），コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.511-516，2007
- 4) 谷本努，及川隆仁，林稔：石炭灰と砕砂を用いたコンクリートの物性に関する研究，電力土木，No.254，pp.63-68，1994.11
- 5) 板井知明，尾之内厚志，望月真，依田填：フライアッシュを細骨材の一部として置換したコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.109-114，2001