

論文 各種超微粉末を用いた高強度コンクリートの耐火性能

藤原 了*¹・築地 優*²・富山 悟*³・藤原 浩巳*⁴

要旨：フライアッシュや高炉スラグ微粉末を超微粉末化し、高強度コンクリート混和材として適用した場合の耐火性能についてモルタルおよびコンクリートでの検討を行った。高強度コンクリート混和材として用いられているシリカフェームと比較を行い、高炉スラグ超微粉末、フライアッシュ超微粉末、およびシリカフェームの順で耐火性能は優れていることが分かった。また、各種超微粉末の置換率が少なく、粒径が大きくなるほど、耐火性能は向上する傾向にあることが分かった。

キーワード：フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、高強度コンクリート、耐火性

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の長寿命化および耐久性向上の観点から、高強度コンクリートを適用する構造物が増加している。しかし、高強度コンクリート構造物は、火災を受けるとコンクリートが爆裂し、かぶり部分が脱落して耐火性能が低下することが知られている。火災での高強度コンクリート構造物の安全性を確保する上で、コンクリートの耐火対策は必要不可欠である。その爆裂対策手法の一つとして有機繊維の混入がある^{例えば、1)}。

一方、これまでに筆者らは、粉碎コストが比較的安価である乾式粉碎・分級によってフライアッシュや高炉スラグ微粉末を 50% 累積体積通過径（以下、 D_{50} ） $D_{50}=0.8\sim 3\mu\text{m}$ 程度のシングルミクロンからサブミクロンオーダーにまで超微粉末化した。これら超微粉末を用いたモルタルまたはコンクリートのフレッシュ性状、収縮特性および強度特性などを把握し、高強度コンクリート混和材として適用の可能性について検討した結果を報告^{2), 3)}した。フライアッシュ超微粉末や高炉スラグ超微粉末を高強度コンクリート混和材として使用する際には、耐火性能を把握する必要があると考えられる。そこで、本研究では、異なる粒径のフライアッシュ超微粉末および高炉スラグ超微粉末と、シリカフェームを用いた高強度コンクリートを比較することで、フライアッシュ超微粉末および高炉スラグ超微粉末の高強度混和材としての耐火性能について確認することを目的とした。具体的には、ステップ1では、モルタルでの各種混和材置換率と耐火性能の簡易評価を行い、ステップ2では、コンクリートでの耐火性能の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料を表-1 に示す。50%累積体積

通過径である D_{50} はレーザー回折式粒度分布測定器によって測定を行った。

異なる粒径のフライアッシュ超微粉末 (FA) は、フライアッシュ II 種を原料とし、乾式粉碎または分級による微粉碎方法により製造した。高炉スラグ超微粉末 (BF) も同様な方法により製造した。

2.2 実験水準と練混ぜ方法

ステップ1のモルタル調合は、ステップ2のコンクリート調合から粗骨材を除いた調合とした。水結合材比を20.0%、質量比で結合材：細骨材=1：0.9とし、混和材を置換していない OPC を基準として、各混和材を質量置換率で5、15、20 および30%内割置換し、合計21水準行い、各混和材置換率と耐火性の関係を把握することを目的とした。練混ぜは、モルタルミキサーを用い、空練30秒→注水→モルタル化時間+120秒→5分静置→30秒練混ぜとし、練量は2Lとした。

ここで、モルタル化時間とは練混ぜ開始から目視により水と結合材と砂が一体化し、その後一体化の状態がほとんど変化しないと判断される時間³⁾を「モルタル化時間」とした。

ステップ2のコンクリート調合を表-2に示す。水結合材比を17.5%とし、FA および BF の置換率は、後述する理由により決定した。表-2に示すケース1では、SF を混和材として使用した場合の PP 繊維の効果について確認を行った。なお、PP 繊維は外割で0.2vol%混和した。ケース2では、各混和材置換率20% (SF のみ15%) とし、粒径および混和材の種類による耐火性の確認を目的とした。ケース3では、FA1.5 を使用した場合の置換率の違いによる耐火性の確認を目的とした。ケース4では、SF を使用した場合と同等の作業性が得られると思われる各混和材置換率での耐火性の確認を目的とした。なお、SF と同等の作業性が得られると思われる各混和材置換

*1 (株)デイ・シイ 技術センター 技術開発課 サブリーダー 修士(工学) (正会員)

*2 (株)デイ・シイ 技術センター 技術開発課

*3 (株)デイ・シイ 技術センター 技術サービス課 サブリーダー

*4 宇都宮大学 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料

名称	材料名	記号	密度 (g/cm ³)	D ₅₀ (μm)	強熱減量 (%)	その他
水	上水道水	W	1.00	-	-	
セメント	普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	17.1	1.03	
混和材	フライアッシュ超微粉末1	B AD	FA0.9	2.63	0.94	3.98
	フライアッシュ超微粉末2		FA1.5	2.56	1.52	2.04
	フライアッシュ超微粉末3		FA3.0	2.53	3.01	2.00
	高炉スラグ超微粉末		BF	2.91	1.81	0.59
	シリカフェーム		SF	2.25	0.39	1.64
細骨材	安山岩砕砂	S	2.62	-	-	吸水率2.58%
粗骨材	安山岩砕石	G	2.63	-	-	吸水率2.41%
繊維	ポリプロピレン繊維	PP	0.91	-	-	繊維径65μm、繊維長12mm
混和剤	高性能減水剤	SP	-	-	-	ポリカルボン酸エーテル系
	消泡剤	AE	-	-	-	ポリアルキレングリコール誘導体

表-2 ステップ2 (コンクリート) の実験水準

調査No.	W/B (%)	AD 種類	AD/B (%)	SP/B (%)	AE/B (%)	PP (vol%)	単位量 (kg/m ³)				ステップ2の実験ケース			
							W	B	S	G	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
SF-15PP	17.5	SF0.4	15	2.90	0.03	0.2	150	857	868	569	○			
SF-15			15	2.30		-				569	○	○		○
FA0.9-15		FA0.9	15	1.35		-				591				○
FA0.9-20			20	1.25		-				584		○		
FA1.5-20		FA1.5	20	1.30		-				579		○	○	
FA1.5-25			25	1.10		-				571			○	○
FA1.5-30			30	1.15		-				562			○	
FA3.0-20		FA3.0	20	1.40		-				577		○		
FA3.0-30			30	1.10		-				559				○
BF-20		BF1.8	20	1.05		-				600		○		
BF-25			25	0.90		-				597				○

率については、事前に回転粘度計によりモルタルでの塑性粘度が同程度となる置換率の評価を行い決定した。しかし、FA3.0については置換率を大きくしてもSFと同様な作業性が得られなかったため、置換率30%とした。結合材についてセメント、各混和材は練混ぜ時に別々に計量してミキサに投入した。練混ぜ時は、強制二軸型ミキサを用いて公称容量60Lに対して練量40Lとした。練混ぜの順序は、結合材+細骨材投入→空練30秒→注水→モルタル化時間+60秒→粗骨材投入後120秒→5分静置→30秒練混ぜ→排出とした。

2.3 ステップ1の実験項目と測定方法

(1) フレッシュ性状

モルタルフローは、JASS 5M-701:2015に準拠して測定を行い、260±10mmとなるようにSP添加量によって調整した。SPの固形分30%は単位水量に加えて補正した。

(2) 耐火性 (質量変化率)

耐火性は、材齢7および28日において、小型電気炉(使用最高温度1,150℃)にて実施した。試験体は、40×40×160mmの供試体を作成し、24時間後に脱型し、材齢7および28日まで温度20±1℃、湿度60±2%の条件にて封緘養生後、40×40×60mmの大きさとなるよう

に乾式カッターで供試体を切断後、1水準2本の供試体を小型電気炉にランダムに配置した。1回の耐火性試験で最大10本の供試体を設置した。加熱曲線は、図-1に示す小型電気炉の加熱曲線の最大設定(1,100℃まで自動で昇温)とし、1,100℃となった時点で70分間1,100℃を保持し、その後は自然冷却とした。

質量変化率は、以下に示す式(1)により算出した。

$$M = (m_2 - m_1) \div m_1 \times 100 \quad (1)$$

ここに、M: 質量変化率 (%)

m1: 耐火試験前の質量の測定値 (g)

m2: 耐火試験後の質量の測定値 (g)

2.4 ステップ2の実験項目と測定方法

(1) フレッシュ性状

コンクリートスランプフローは、JIS A 1150に準拠して測定を行った。測定はフロー値、50cmフロー通過時間を計測した。フロー値の目標値は65cm±5cmとし、空気量は2.0%以下を目標とした。フロー値の目標範囲となるようにSP添加量によって調整した。SPの固形分30%は単位水量に加えて補正した。

V漏斗流下時間は、高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法(案)JSCE-F512-2018に準拠して測定を

行った。吐出口の寸法は75mmのV漏斗試験機を用いた。

(2) 圧縮強度

圧縮強度は、φ100×200mmの円柱供試体とし、JIS A 1108に準拠して測定を行った。24時間後の脱型から20℃の水中養生を行い、耐火試験と同材齢である材齢28日の圧縮強度の確認を行った。

(3) 含水率

含水率は、耐火試験体と同一の条件である封緘養生したφ100×200mmの円柱供試体とし、耐火試験時である材齢28日を基準として105℃の乾燥器で定量となるまで乾燥させ、質量変化率から算出した。

(4) 耐火性（質量変化率）

耐火性は、材齢28日において、写真-1に示すように供試体を設置した大型加熱炉にて実施した。試験体は、100×100×4000mmの供試体を作成し、24時間後に脱型し、材齢28日まで温度20±1℃、湿度60±2%の条件にて封緘養生を行い、1水準2本の供試体を加熱炉に配置し、供試体の周囲を厚さ50mm、最高使用温度1,400℃のセラミックファイバーの断熱材で覆い、1面加熱とした。加熱曲線は、ISO-834-1 Fire-resistance tests-Elements of building construction-Part 1（以下、ISO834）に規定されている式(2)に示す標準加熱温度曲線に準拠し、3時間加熱を行い、その後は自然冷却とした。温度の制御は、加熱炉内に設置された6本のK型熱電対の平均温度がISO834となるように制御を行った。

$$T = 345 \log(8t + 1) + 20 \quad (2)$$

ここに、T: 加熱温度 (℃), t: 経過時間 (分)

なお、質量変化率は、ステップ1の耐火試験同様に式(1)により算出した。

(5) 爆裂深さ

爆裂深さは、耐火試験に用いた供試体を、耐火試験終了後、100×4000mmの供試体に対し、25mm×25mmのグリッドを切り、グリッドの各節点において、写真-1に示すように加熱を受けないコンクリート表面高さを原点（高さ100mm）として、爆裂後のコンクリートの加熱面までの高さを測定し、その平均値を爆裂深さとした。

(6) 細孔径分布

細孔径分布は、PP繊維を混入したSF-15PP以外の10水準について水銀圧入法にて測定を行った。試料は、5mmの篩を用いて粗骨材を除外したモルタルとし、φ50×100mmの円柱供試体を作成し、コンクリート耐火試験体と同一養生を行った。前処理として、材齢28日の時点で、円柱供試体の試料を2.5~5mmの大きさとなるように粉碎・篩分け調整後、真空凍結乾燥法（FD法）を行った。FD法は、-45℃で3時間予備凍結を実施し、その後、小型凍結乾燥機（冷却温度-80℃）で凍結乾燥を行い、乾燥終了後に常温・常圧に戻し、測定までデシケ

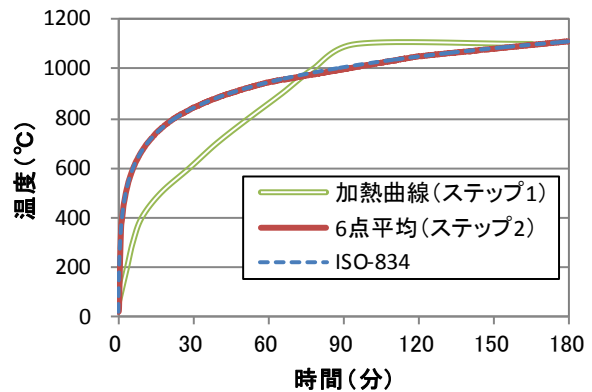


図-1 加熱曲線

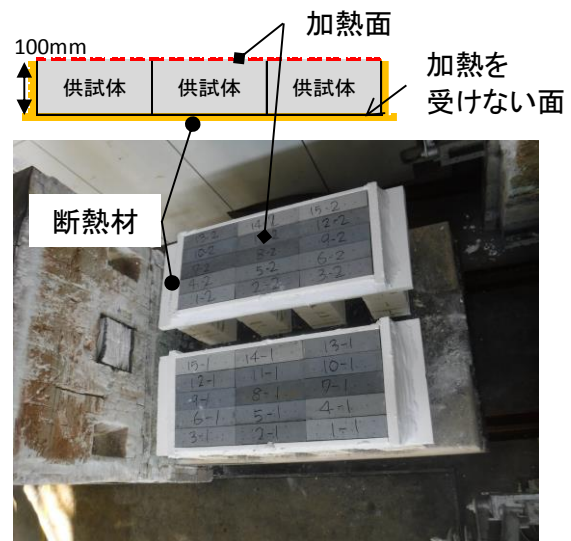


写真-1 ステップ2の供試体設置状況

ータにて保管を行った。なお、測定前に室温下で24時間真空減圧を行ってから測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ステップ1のモルタル実験結果

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-3に示す。

目標範囲のフロー値となるように調整したSP添加率は、SFを用いた水準より、FAまたはBFを用いた水準の方が低減できた。SF-30Mの水準は、SP添加率をメーカー推奨上限添加率まで添加してもフロー値の目標範囲まで調整することができなかった。また、OPCは、練混ぜ時のモルタルの一体化が確認できず、一体化時間を測定できなかったため、練混ぜ時間は15分とした。モルタル化時間は、FAおよびBF置換率増加とともに短縮される傾向であった。これは、FAまたはBF置換率の増加とともに最密充填に必要な $D_{50}=0.6\sim 2\mu\text{m}$ 程度の粒径が増加したためである³⁾と思われる。

(2) 耐火性（質量変化率）

耐火試験前後の質量変化率を表-3に示す。なお、表

表-3 ステップ1 (モルタル) の実験結果

調合No.	AD/B (%)	SP/B (%)	モルタルフロー(mm)	モルタル化時間(s)	質量変化率(%)	
					7日	28日
OPC	0.0	2.00	268	一体化せず	11.7	11.6
SF-5M	5.0	1.50	251	170	89.3	12.1
SF-15M	15.0	3.00	266	20	79.0	100
SF-20M	20.0	4.80	251	50	100	100
SF-30M	30.0	5.00	170	60	100	100
FA0.9-5M	5.0	1.40	260	220	12.0	11.9
FA0.9-15M	15.0	1.85	269	40	49.9	12.3
FA0.9-20M	20.0	1.60	261	30	100	100
FA0.9-30M	30.0	1.35	252	30	100	100
FA1.5-5M	5.0	1.40	267	270	11.9	11.9
FA1.5-15M	15.0	1.70	260	80	12.0	11.9
FA1.5-20M	20.0	1.25	255	60	100	12.2
FA1.5-30M	30.0	1.05	261	30	100	100
FA3.0-5M	5.0	1.45	253	420	11.9	11.9
FA3.0-15M	15.0	1.15	265	240	12.0	11.9
FA3.0-20M	20.0	1.05	269	240	38.6	12.2
FA3.0-30M	30.0	0.95	250	90	100	100
BF-5M	5.0	1.40	269	420	11.8	12.0
BF-15M	15.0	1.10	265	240	11.5	11.9
BF-20M	20.0	1.05	252	90	12.0	12.0
BF-30M	30.0	0.91	265	30	11.9	11.9

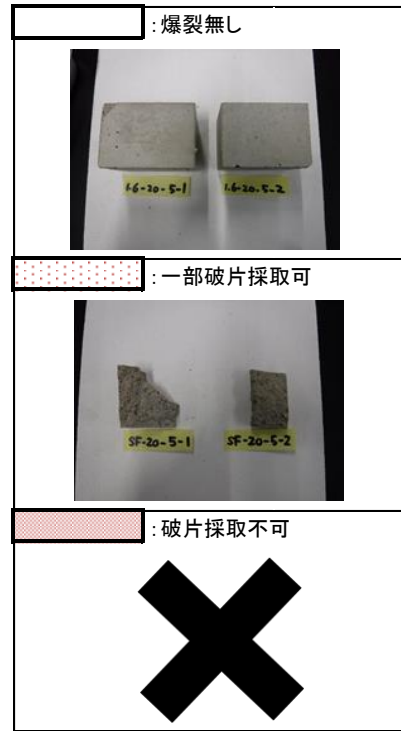


表-3 の右側に示す写真は、質量変化率の結果の網掛け部の爆裂程度の目安の指標である。目視により爆裂が確認されない水準は「爆裂無し」、一部破片が採取可能であった水準は「一部破片採取可」、爆裂した破片の回収が不可能であった水準は「破片採取不可」とした。

表-3 より、材齢 7 日より 28 日の耐火試験の方が質量変化率は小さくなる。つまり、耐火性は向上する傾向であった。これは、材齢の経過によりモルタルの水和反応が進行し、内部の水分量が低減したためであると推測できる。各混和材置換率が少なく、または、粒径の大きな FA を用いるほど、質量変化率は小さくなる傾向であった。これは、各混和材置換率が小さく、粒径の大きな混和材ほど、加熱時の蒸気圧を緩和する十分な空隙が成形されたものと考えられる。BF, FA3.0, FA1.5, FA0.9, および SF の順で耐火性は良好であり、同程度の粒径である BF および FA1.5 では、BF を用いた方の耐火性が向上することが分かった。BF を用いた水準は BF 置換率 30% でも爆裂が確認できなかった。

3.2 ステップ2 のコンクリート実験結果

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-4 に示す。全ての水準において、フロー値および空気量は目標範囲に調整できた。ケース 2 の混和材置換率を同一とした結果より、モルタル化時間は、粒径が小さいほど短縮された。

V 漏斗流下時間は、SF-15PP, FA3.0-20 および FA3.0-30 の水準を除いたすべての水準において、SF-15 より短い流下時間であった。そのため、FA0.9, FA1.5, および BF

を混和材として使用した場合、SF と比べて同等以上の流動性が得られると考えられた。FA3.0 を用いた水準においては、スコップにより練返しを行う際にダイランシー性が感じられ、作業性が悪かった。

(2) 圧縮強度

表-4 に示す圧縮強度は、全ての水準において 150N/mm² 前後となった。BF を用いた水準が、SF および FA を用いた水準より強度は大きくなる傾向となった。これは、BF の潜在水硬性と SF および FA のポゾラン反応の反応性の違いによると考えられる。

(3) 耐火性

ステップ 2 の耐火試験結果を表-4 に、ケース 2 の耐火試験後の供試体の状況を写真-2 に、ケース毎の細孔直径と log 微分細孔容積との関係を図-2 に示す。また、図-1 より、加熱曲線は ISO-834 通り加熱ができた。表-4 に示した質量変化率と爆裂深さは正の相関があった。含水率は、定量まで約 60 日要し、全ての水準において 3~4% 程度となり、質量変化率と含水率の相関は確認できなかった。

ケース 1 では、SF を混和材として PP 繊維の有無による耐火性の確認を行った。PP 繊維を混和しないとすべて爆裂してしまっていたが、PP 繊維を 0.2vol% 混和することで、質量変化率は減少した。これは、加熱時の蒸気圧を緩和する十分な空隙が成形されたもの¹⁾と考えられる。

ケース 3 では、同一粒径の FA を用い、置換率の違いによる耐火性の確認を行った。FA 置換率が増加しても質量変化率はほぼ同程度となった。ステップ 1 のモルタル

表-4 ステップ2 (コンクリート) の実験結果

実験 ケース	調査No.	SP/B (%)	モルタル化 時間(s)	練り上がり 温度(°C)	フロー (cm)	50cm通過 (s)	空気量 (%)	V漏斗 (s)	含水率 (%)	質量変化率(%) 28日	爆裂深さ (mm)	圧縮強度(N/mm ²) 28日
1	SF-15PP	2.90	100	24.5	65.0	38.7	0.8	110	3.1	20.4	11.8	154
	SF-15	2.30	120	25.1	63.0	21.0	1.9	50	3.3	100	100	145
2	SF-15	2.30	120	25.1	63.0	21.0	1.9	50	3.3	100	100	145
	FA0.9-20	1.25	60	25.8	66.0	13.3	0.5	38	3.4	49.8	37.1	145
	FA1.5-20	1.30	130	25.2	67.0	17.0	0.9	49	3.3	74.5	67.7	144
	FA3.0-20	1.40	780	25.2	68.0	31.0	2.0	247	3.5	34.3	21.4	153
	BF-20	1.05	180	25.2	69.0	16.5	0.8	49	3.1	15.6	5.9	157
3	FA1.5-20	1.30	130	25.2	67.0	17.0	0.9	49	3.3	74.5	67.7	144
	FA1.5-25	1.10	100	25.4	65.0	12.0	1.3	42	3.1	74.7	69.3	144
	FA1.5-30	1.15	80	24.7	64.5	11.5	1.1	39	3.9	72.1	65.2	144
4	SF-15	2.30	120	25.1	63.0	21.0	1.9	50	3.3	100	100	145
	FA0.9-15	1.35	140	25.6	70.0	12.0	0.7	43	3.3	49.1	36.3	149
	FA1.5-25	1.10	100	25.4	65.0	12.0	1.3	42	3.1	74.7	69.3	144
	FA3.0-30	1.10	600	25.4	66.5	27.0	1.2	220	4.1	77.2	71.1	150
	BF-25	0.90	100	25.3	63.5	12.5	1.3	41	3.5	33.1	22.2	155



写真-2 実験ケース2の耐火試験後の試験体の状況

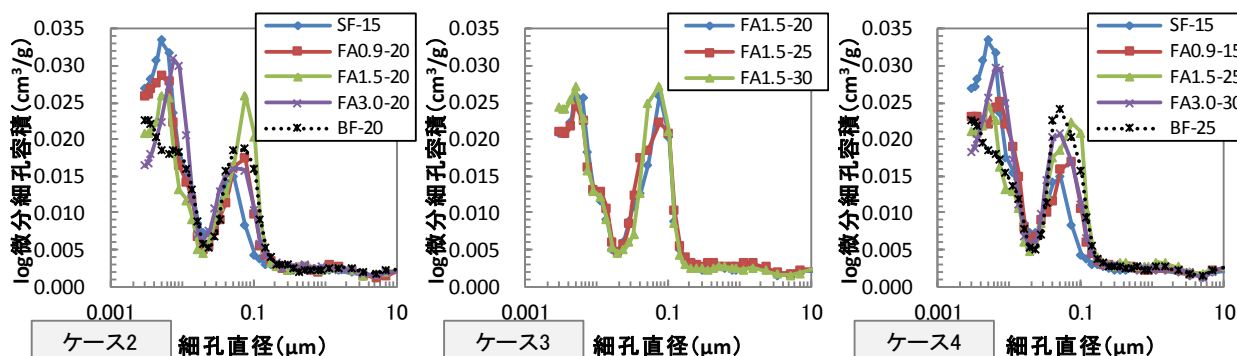


図-2 実験ケース毎の細孔直径と細孔容積との関係

では置換率が少ないほど質量変化率は小さくなる傾向となった。しかし、コンクリートではモルタルと同様な傾向は確認できなかった。図-2のケース3の細孔直径と細孔容積の関係からも顕著な差が確認できなかった。ここで、ステップ1とステップ2でFA置換率と質量変化率との関係が異なる傾向を示した要因のひとつとして、ステップ1の昇温曲線よりステップ2の方が、急な昇温曲線であったことにより、加熱時の蒸気圧の緩和状況が異なっていたと考えられる。

ケース4では、SFと同一作業性と思われる各混和材置換率での耐火性能確認を行った。質量変化率は、BF-25、FA0.9-15、FA1.5-25、FA3.0-30およびSF-15の順で小さくなった。FAは粒径が小さくても置換率が少ない方が質量変化率は小さくなった。ここで、図-2のケース4の細孔直径と細孔容積の関係から、細孔直径0.01μm以下

の細孔容積は、SF、FA3.0、FA1.5、FA0.9およびBFの順で多い傾向であった。細孔直径0.01μm以下の割合が多いと質量変化率は大きくなる傾向になった。これは、細孔直径0.01μm以下の細孔容積の割合が多いことで、蒸気圧の緩和が低くなり、質量変化率が大きくなったと考えられる。

ケース2では、同一置換率での耐火性の評価を行った。表-4および写真-2より、耐火性は、BF-20、FA3.0-20、FA0.9-20、FA1.5-20、およびSF-15の順で良好となった。ケース4と同様な傾向であり、とくにBFを用いた水準の質量変化率が小さくなり、今回実験した水準の中で一番耐火性が良好となった。写真-2のBF-20の矢印部分は、1本の供試体底面の一部(1/4程度)が爆裂した部分を示す。

ここで、李の研究⁴⁾によると、PP繊維を混入した場

合、加熱により、細孔直径 0.003~0.1 μm の小さな細孔容積は減少し、0.1~0.3 μm の細孔容積が増加し、蒸気圧が緩和されるとしている。そのため、0.1 μm 以下の細孔直径に着目し、図-3 に 0.1 μm 以下の積算細孔容積と質量変化率との関係を示す。図-3 より、0.1 μm 以下の積算細孔容積が少ないほど質量変化率は小さい傾向になることが分かった。

また、図-4 に材齢 28 日におけるケース 2 のモルタルに含有する水酸化カルシウム量と質量変化率との関係を示す。水酸化カルシウム量は、粉末 X 線回折装置を用いて内部標準法⁵⁾を参考とし、算出した。水酸化カルシウム量は、水酸化カルシウムの $2\theta = 18.1^\circ$ [1 0 1]面のピーク面積 $I_{\text{Ca(OH)}_2}$ と内部標準に用いた $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (コランダム (10mass%)) の $2\theta = 57.4^\circ$ [1 0 1]面のピーク面積 $I_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ の比である $I_{\text{Ca(OH)}_2} / I_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ で評価した。ピーク面積比 $I_{\text{Ca(OH)}_2} / I_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ が大きいほど質量変化率が大きいと図-4 から分かる。水酸化カルシウム量が多いほど耐火性が小さいことは、水酸化カルシウムの脱水分解による結晶水が爆裂現象の要因としている高野らの研究¹⁾と一致する。これらのことより、ケース 2 の耐火性が改善された理由として、0.1 μm 以下の細孔直径の割合の違いと水酸化カルシウム量の違いであると考えられた。

以上の結果より、BF, FA, および SF の順で耐火性は優れていた。そのため、高強度混和材として超微粉末化した FA または BF を用いた場合、SF より耐火性は改善されることが分かった。

4. まとめ

本研究では、超微粉末化した FA および BF を用いた高強度コンクリートの耐火性を、SF を用いた高強度コンクリートと比較した結果、以下の知見を得た。

- (1) モルタルでは、各混和材置換率が少なく、粒径の大きいほど、耐火性は改善された。混和材では、BF, FA3.0, FA1.5, FA0.9 および SF の順で耐火性は良好となることが分かった。
- (2) コンクリートでは、モルタル同様に BF, FA, および SF の順で耐火性は良好となった。また、FA1.5 は置換率の違いによる耐火性の変化が確認できなかったが、FA0.9 および FA3.0 では、置換率が少ない方が耐火性は良好となった。
- (3) 0.1 μm 以下の細孔直径の割合が少ないほど、水酸化カルシウム残存量が少ないほど、耐火性は良好となる傾向にあることが確認された。

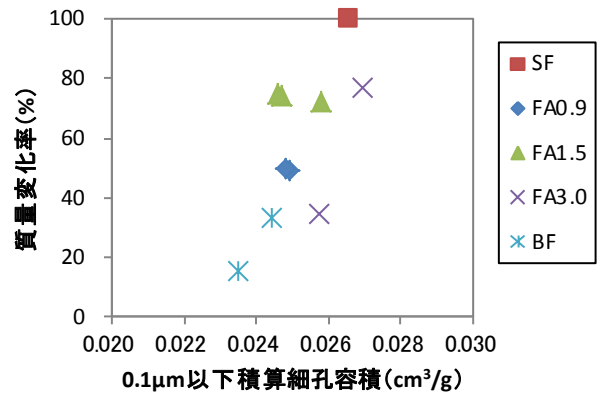


図-3 積算細孔容積と質量変化率との関係

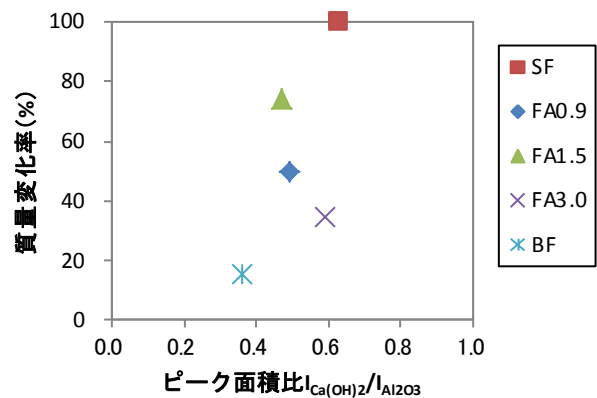


図-4 ピーク面積比と質量変化率との関係

参考文献

- 1) 高野智宏ほか：高温加熱を受ける高強度繊維補強コンクリートの耐火性能について，土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.424-436, 2007.7
- 2) 藤原了ほか：シングルミクロン高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの収縮特性の改善，セメント・コンクリート論文集, Vol.72, pp.122-128, 2019.3
- 3) 藤原了ほか：フライアッシュ超微粉末を用いた高強度コンクリートの流動性および収縮特性，コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1181-1186, 2019.5
- 4) 李在英：高強度コンクリートの火災時の爆裂現象における空隙圧力と熱応力に関する実験的研究，博士論文，京都大学大学院，2016.3
- 5) 井元晴丈ほか：混合セメントの水和反応解析，コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.41-46, 2003.5