

論文 北陸産分級フライアッシュの遠心成形製品への適用性

橋本徹*1・金井滋*2・林安成*3・鳥居和之*4

要旨: 本研究では、遠心成形により製造されるプレストレストコンクリート (PC) ポール、パイル製品への北陸産分級フライアッシュの有効活用を目指し、北陸産分級フライアッシュを用いた遠心成形供試体によるコンクリートの配合試験などを実施した。その結果、遠心成形時に密度の小さいフライアッシュがスラリーとして排出されることが報告されている。しかし、今回の試験ではフライアッシュのスラリーへの排出量は投入量に対し 1%以下とごく僅かであり、フライアッシュを内割・外割で適切に混和することにより、早期材齢でのポゾラン反応による強度発現や ASR 抑制効果などが十分に期待できることが判明した。

キーワード: 分級フライアッシュ, 遠心成形供試体, 圧縮強度, 高強度混和材, ASR 対策

1. はじめに

北陸地方では、塩害やアルカリシリカ反応 (ASR) が発生したコンクリート構造物が多数存在し、この地域特性を踏まえた対策として、北陸地方のコンクリートへの分級フライアッシュの有効活用が期待されている^{1),2)}。北陸産分級フライアッシュの特徴としては、平均粒径が約 8 μm と細かく、均一であるため、コンクリートに混和すると、ポゾラン反応による早期の強度発現や ASR 抑制などによるコンクリートの耐久性向上が確認されている³⁾。一方、北陸地方には、地場産業としてプレストレストコンクリート (PC)・プレキャストコンクリート (PCa) 製品の企業が多く存在し、近年、ASR による劣化事例への抑制対策として分級フライアッシュを有効活用することが推奨されている^{4),5),6)}。

本研究では、PC 製品のなかでも、これまで分級フライアッシュの活用事例の報告が少ない、遠心成形により製造される PC ポールや PC パイル製品を対象とし、分級フライアッシュを用いた遠心成形供試体による配合試験を実施した。これは、重要な社会インフラの一つとして位置づけられる電柱 (RC および PC ポール) では、古いものは既に製造から 60 年以上経過しており、北陸地方の塩害や ASR に対して抑制効果が期待できる北陸産分級フライアッシュを用いた高耐久性の製品で、今後、順次更新していくことが望ましいと考えたからである。しかし、遠心成形の場合、成形時の余剰水の搾出の際に微粒分であるセメントと一緒に流出してしまい強度が低下する。これに対して、セメントよりも比重の小さいフライアッシュなどの物質を予め混入させておくとセメントの流出が抑制されて強度低下が防止できるとの報告がある⁷⁾。従って、この場合には、ASR 抑制対策としての分級フラ

イアッシュの十分な効果が期待できないこととなる。

そこで本研究では、配合試験におけるフレッシュおよび硬化コンクリートの特性を把握するとともに、遠心成形時に発生するスラリー成分の定量化とその SEM 観察により、分級フライアッシュのスラリーへの排出量は投入量に対し 1%以下とごく僅かであることや、フライアッシュを内割・外割で適切に混和することにより、ポゾラン反応による強度発現と ASR 抑制の両効果が十分に期待できることを実験的に確認した。

2. 試験概要

配合試験は、プレキャスト (PCa) 製品工場の現状の製品配合を基準配合とし、北陸産分級フライアッシュの置換方法の違いにより、以下の 2 つのシリーズで実施した。

シリーズ I : セメント代替 (内割り) によるフレッシュ性状および圧縮強度の把握

シリーズ II : セメント代替 (内割り) と細骨材代替 (外割り) の組合せによるフレッシュ性状および圧縮強度の把握と遠心成形供試体の SEM による微細組織の観察

シリーズ I では、北陸産分級フライアッシュが従来よりも高品質 (ブレン比表面積約 4,700 g/cm^2 , フライアッシュ平均粒径約 8 μm)^{8),9)} となったことにより、内割比率を変化させ、主に強度発現状況を確認した。シリーズ II では、シリーズ I の結果を踏まえ、所定の管理材齢において十分な強度発現が期待できる内割比率を決定した後、外割比率を変化させ、主にコンクリートのフレッシュ性状の施工品質や内面仕上り状況などの製品品質が

*1 北陸電力 (株) 土木部 副部長 博士 (工学) (正会員)

*2 日本海コンクリート工業 (株) 製造技術部 部長

*3 日本海コンクリート工業 (株) 製造技術部 品質管理室

*4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系教授 工博 (正会員)

十分かどうかを確認した。これらの各配合試験においては、遠心成形時に発生するスラリー成分の各分量を把握した。また、シリーズⅡの遠心成形供試体中のSEM観察により、分級フライアッシュのポゾラン反応性を確認するとともに、フライアッシュ粒子の分布状況を分析範囲 200 μ m \times 200 μ m に占める面積率により算出した。

シリーズⅠおよびシリーズⅡで用いた使用材料は、PCa 製品工場で実際に使用しているセメント、骨材、高強度混和材および化学混和剤である。使用材料の産地と基本物性を表-1 に示す。遠心成形供試体(外径 200mm, 厚さ 40mm, 高さ 300mm の中空円筒供試体)の作製は、JIS A 1136「遠心力締固めコンクリートの圧縮試験方法」に準拠した。手順は、実際の遠心成形製品と同様、遠心成形用の鋼製型枠に所定量のコンクリートを投入し、遠心力成形機により 2G2 分, 11G2 分, 24G3 分, 34G5 分の条件で遠心力を加えた。その後、型枠を傾けてスラリーを排出し、常圧蒸気養生(前置きを 2 時間とった後、昇温速度 20 $^{\circ}$ C/時間で 70 $^{\circ}$ Cまで温度を上昇させ、最高温度 70 $^{\circ}$ Cを 4 時間保持し、その後徐冷)を実施し、所定材齢まで 20 $^{\circ}$ Cの恒温室で気中養生した。

3. シリーズⅠ

3.1 試験内容

(1) 配合試験

シリーズⅠで実施したコンクリートの配合を表-2 に示す。コンクリートの配合は、現状の PC パイル製品(呼び強度 85)の配合を基準配合とし、セメント、高強度混和材、北陸産分級フライアッシュの 3 つの材料の合計質量に対して、北陸産分級フライアッシュの質量が 5%、

表-1 使用材料

使用材料	記号	産地・基本物性
セメント	C	T社製普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3,350cm ² /g
混和材	高強度混和材	TM社製, セメント重量の10%を添加, 密度:2.95g/cm ³ , 比表面積:5,440cm ² /g
	フライアッシュ	北陸電力七尾大田火力発電所産, JISⅡ種, 密度:2.34g/cm ³ , 比表面積:4,610cm ² /g
細骨材	S	富山県神通川産の陸砂, F.M.:2.70, 密度:2.60g/cm ³ , 吸水率:1.87%
粗骨材	G	富山県黒部川産の河川砂利, 最大骨材寸法:20mm, F.M.:6.60, 密度:2.70g/cm ³ , 吸水率:1.21%
混和剤	MT	K社製高性能減水剤Ⅰ種

10%, 15%になるように調整した。配合設計の条件は、管理強度 94N/mm²(呼び強度 85), スランプ 18 \pm 3cm, 空気量 2 \pm 1%とした。試験項目として、遠心成形供試体の材齢 1 日, 7 日, 14 日および 28 日での圧縮強度試験を実施した。

(2) スラリー成分の分析

スラリー成分の各分量を把握するため、図-1 に示すスラリー成分の分析フローに従い、スラリーに含まれる水分量、骨材量、フライアッシュ量、セメント量および高強度混和材量をそれぞれ算出した。水分量は、105 $^{\circ}$ Cで 1 日乾燥させた乾燥スラリーの蒸発水量(W1)と乾燥スラリーを粉砕・縮分した調整試料を 550 $^{\circ}$ Cで 2 時間強熱した強熱減量から推定した乾燥スラリーに含まれる水分量(W2)の和とした。不溶残分として骨材とフライアッシュがあるため、骨材量はフライアッシュを含まない基準配合の不溶残分比率から推定した。フライアッシュ量は、フライアッシュを含む配合ケースの不溶残分比率から前述で算出した骨材の不溶残分比率を差し引いた比率により推定した。セメント量および高強度混和材量は、溶解成分の分析(CaO:(社)セメント協会の配合推定試験方法に準拠した EDTA 滴定法により分析, SO₃: JIS R 5202 三酸化硫黄の定量方法に準拠した硫酸バリウム重量法により分析)により得られるカルシウム分(CaO)

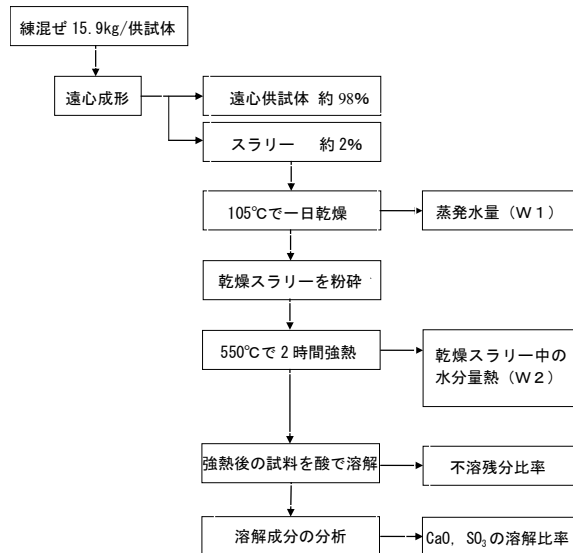


図-1 スラリー成分の分析フロー

表-2 配合(シリーズⅠ)

配合ケース	水粉体比(W/P)	フライアッシュ比率(FA/P)	単位量(kg/m ³)						高性能減水剤添加量(P \times %)
			水(W)	粉体量(P)			細骨材(S)	粗骨材(G)	
				セメント(C)	高強度混和材(SM)	フライアッシュ(FA)			
FA0%(基準配合)	28.2	0	155	500	50.0	0.0	642	1088	0.95
FA内5%	28.2	5	155	475	47.5	27.5	634	1088	0.95
FA内10%	28.2	10	155	450	45.0	55.0	625	1088	0.95or0.96
FA内15%	28.2	15	155	425	42.5	82.5	617	1088	1.00or0.98

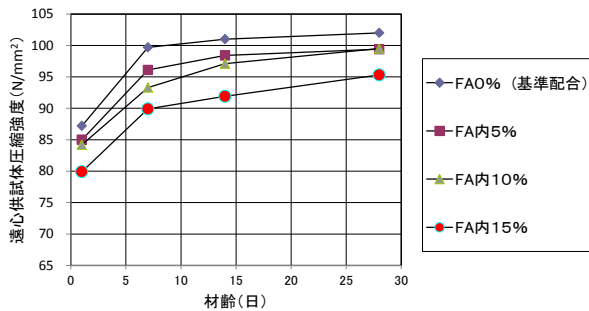


図-2 圧縮試験結果と材齢の関係 (シリーズ I)

とイオウ分 (SO₃) の溶解比率から推定した。

3.2 試験結果および考察

(1) 配合試験の結果

図-2 に圧縮試験結果と材齢の関係を示す。図より、北陸産分級フライアッシュの内割比率が大きくなるに従い、全体的に圧縮強度の発現性が小さくなる傾向がみられるが、北陸産分級フライアッシュの内割比率によっては材齢毎の強度発現性が異なっていることがわかる。特に、FA内10%のケースに着目すると、材齢1日までと材齢7日から14日の材齢において強度発現性が大きく、材齢28日ではFA内5%のケースの圧縮強度と同等である。このことは、北陸産分級フライアッシュの内割比率の違いにともなうセメントの水和反応の進行の違いがフライアッシュのポゾラン反応を早期から促進していると考えられ、今回の配合ケースのなかでは、内割10%の配合が最適な条件であると推察された。一方、管理強度 94 N/mm² を満足するために必要な材齢は、内割5%では材齢7日、内割10%では材齢14日、内割15%では材齢28日であった。工場での稼働率を考慮した場合、管理材齢は長くとも材齢14日以内としたいことから、シリーズIIで用いる内割比率として、管理材齢が7日の場合には内割5%以下の配合が管理強度を満足し、管理材齢が14日の場合には内割10%以下の配合がそれぞれ管理強度を満足した。なお、遠心供試体の内面仕上り状況は、目視および触診観察ではいずれも同様であった。

(2) スラリー成分の分析結果

図-3 に各配合における材料毎のスラリー成分比率を示す。各配合のスラリー排出量は 317g~342g で、1供試体当りのコンクリート量 15.9kg の約 2% と僅かであった。スラリー成分比率では、全スラリー排出量の 65% から 71% が水分、19% から 23% がセメント、残り 7% から 16% が高強度混和材、フライアッシュおよび細骨材であった。フライアッシュのスラリーへの排出量は、その内割比率とともに多くなるものの、スラリーに含まれるフライアッシュ排出量としては、最も多い FA内15% のケースでもフライアッシュ投入量の約 5% と少なく、遠心成形後も製品に残留するフライアッシュ量を算出すると、内割5% が 4.9% に、内割10% が 9.7% に、内割15% が 14.6%

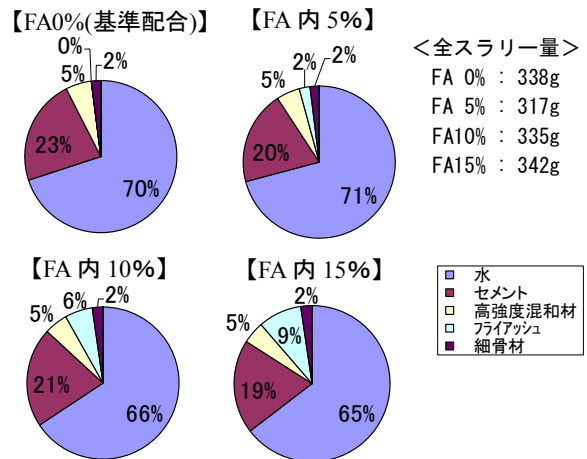


図-3 材料毎のスラリー溶出量 (シリーズ I)

になり、いずれの配合においても、スラリー成分として排出される量は投入量に対し 1% 以下とごく僅かであった。このことは、遠心成形の場合、セメントより密度が小さいフライアッシュがセメントの代わりに相当量が排出してしまうとする既往の報告⁷⁾とは異なる結果となった。これは、分級フライアッシュの粒径 (平均粒径: 約 8μm) が分級前の原粉 (平均粒径: 約 20μm) より細かく、均一であることと、既往の報告では骨材に砕砂、砕石を使用しているなどの使用材料の違いや、遠心成形時の遠心条件や養生条件などの製造条件が PCa 製品工場各社で異なることが主な要因と考えられた。

4. シリーズ II

4.1 試験内容

(1) 配合試験

シリーズIIで実施したコンクリートの配合を表-3 に示す。コンクリートの配合は、ASR 抑制対策としての分級フライアッシュの最低置換率が 15% 以上と規定¹⁰⁾されていることから、シリーズIの結果を踏まえ、スラリーへの排出量 1% を加え、内割と外割を合わせたフライアッシュ比率を最低 16% 確保することとした。従って、内割 5% (管理材齢 7日) に外割 11%、外割 16% の 2 ケースと、内割 10% (管理材齢 14日) に外割 6%、外割 11% の 2 ケースで、合わせて 4 ケースとした。ここに、外割比率とは内割に換算した比率を示している。なお、配合設計条件と試験項目はシリーズIと同様である。

(2) スラリー成分試験

シリーズIと同様、図-1 のスラリー成分の分析フローに従い、スラリー成分の分析を実施した。

(3) SEM 観察

シリーズIIの遠心成形供試体 (内割 10%、外割 11%、材齢 1日、7日、14日、28日) を用いて、遠心成形製品断面の内面部、中央部、外面部における北陸産分級フライアッシュのポゾラン反応性およびその試験体内での

表-3 配合 (シリーズII)

配合ケース	水紛体比 (W/P) (%)	フライアッシュ比率 (FA/P) (%)	単位量(kg/m ³)						高性能減水剤 添加量 (P×%)
			水 (W)	紛体量 (P)			細骨材 (S)	粗骨材 (G)	
				セメント (C)	高強度混和材 (SM)	フライアッシュ (FA)			
FA0% (基準配合)	28.2	0.0	155	500	50.0	0.0	642	1088	0.95
FA内5%+外11%	24.9	16.1	155	475	47.5	100.0	552	1088	0.97
FA内10%+外6%	26.3	16.1	155	450	45.0	95.0	581	1088	0.96
FA内10%+外11%	24.7	21.1	155	450	45.0	132.0	539	1088	1.02
FA内5%+外16%	24.7	21.0	155	475	47.5	139.0	508	1088	1.1~1.6

分布状況を、反射電子像および二次電子像により観察した。また、材齢 1 日の供試体を用いて、エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による面分析 (分析範囲 200μm×200μm に対する面積率) により、製品断面での北陸産分級フライアッシュの分布の定量化を試みた。

4. 2 試験結果および考察

(1) 配合試験の結果

シリーズIIでは、フライアッシュの外割により粉体量が増えたことにより、全体的に粘性が高まり、最も粉体量が多くなるFA内5%+外16%のケースでは所定のフレッシュ性状 (スランプ 18±3cm, 空気量 2±1%) を確保することができなかった。図-4 に残りの配合ケースにおける圧縮試験結果と材齢の関係を基準配合と併せて示す。図より、材齢 14 日まではシリーズIと同等の強度発現が確認され、材齢 14 日から 28 日の材齢期間では、3 ケースともシリーズI以上の強度発現となり、材齢 28 日での圧縮強度は基準配合と同等となることが確認された。これは、外割で添加した北陸産分級フライアッシュの良好なポズラン反応と、フライアッシュの微粉末効果¹¹⁾による未水和セメントの水和反応の促進とによる効果が寄与していると推察される。従って、本製品ではフライアッシュのポズラン反応の進行により供用中での強度増加が期待できるため、コンクリートのフレッシュ性状や製品の内面仕上り状況が満足する範囲内で、北陸産分級フライアッシュを内割・外割で適切に混和することは、良好なポズラン反応による強度発現やASR抑制効果など、PCパイル製品自体の製品品質や耐久性を高める効果があると考えられる。なお、遠心供試体の仕上り状況は、目視および触診観察では粘性の増加がみられたが、製品製造において問題になるものではなかった。

(2) スラリー成分の分析結果

図-5 に各配合における材料毎のスラリー成分比率を示す。シリーズIと同様に、スラリー溶出量はコンクリート投入量の約 2%と僅かであった。スラリー成分比率では、スラリー溶出量の約 50%が水分で、シリーズIよりも 14%から 18%減り、その分、フライアッシュとセメントの成分比率が増加した。また、製品に残留するフライアッシュ量は、FA内5%+外11%のケースが 15.5%

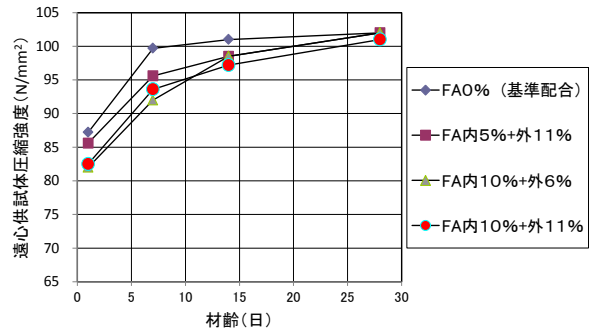


図-4 圧縮試験結果と材齢の関係 (シリーズII)

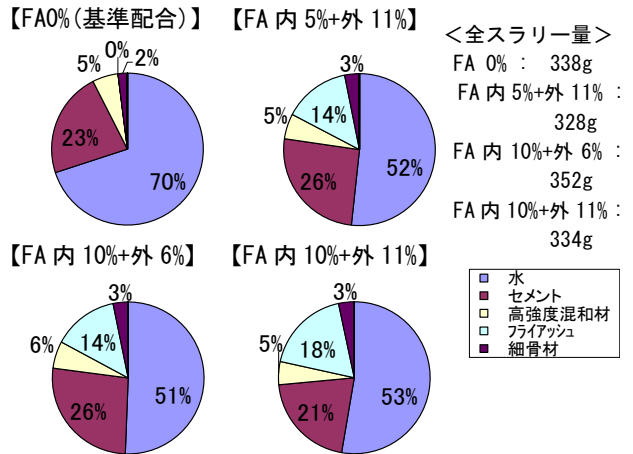


図-5 スラリー成分比率 (シリーズII)

に、FA内10%+外6%が15.5%に、FA内10%+外11%が20.3%になり、シリーズI同様、いずれの配合においてもスラリー成分として溶出する量は投入量に対し 1%以下とごく僅かであった。

(3) SEM 観察の結果

シリーズIIの遠心成形供試体 (FA内10%+外11%) の各材齢における反射電子像を写真-1 に、二次電子像を写真-2 に示す。なお、SEM観察においては、製品断面の内面部、中央部、外面部に分けて観察を実施したが、各断面の写真は紙面の都合により割愛した。まず、反射電子像に着目すると、いずれの材齢においても、フライアッシュ粒子の外側に暗い色調で表示されるポズラン反応相が観察された。これは、フライアッシュのポズラン

反応により生成したカルシウムシリケート水和物（低Ca/SiのCSH）と推察される。この反応相の厚さには、材齢による変化は認められないものの、色調が材齢とともに、やや明るくなっているように観察された。また、すべての写真は掲載していないが、製品断面の内面部、中央部、外面部におけるフライアッシュの反応の様子は、いずれの材齢においても顕著な差異は認められなかった。次に、二次電子像に着目すると、材齢1日では、内面部のごく一部のフライアッシュ粒子の周囲に、ポゾラン反応相がすでに認められた。また、外面部でもフライアッシュ粒子全体が反応しているものも認められたが、顕著に反応を示している粒子はごく僅かであった。材齢7日では、内面部では材齢1日と同様、ポゾラン反応相と推察されるものが認められたが、ほとんどのフライアッシュ粒子が未反応のまま残存していた。外面部では、内面部に比べてポゾラン反応を示す粒子が多く観察された。材齢14日および材齢28日では、内面部および外面部のいずれにおいても、多くのフライアッシュ粒子の周囲にポゾラン反応相が明確に認められた。これらのことは、北陸産分級フライアッシュのポゾラン反応が、材齢1日の早期から始まり、材齢14日ではかなり反応が進んでいることを意味している。従って、シリーズⅠに対し、シリーズⅡでは材齢14日以降の強度発現性が改善されたのは、分級フライアッシュのポゾラン反応の促進によるものであると推察したと整合する結果となった。

図-6に、材齢1日の遠心成形供試体（FA内10%+外11%）の内面部、中央部、外面部それぞれのEDSによる面分析結果（各2箇所実施）を示す。いずれの画像とも、左からCaO、Al₂O₃およびSiO₂を示したものである。おおよそ、CaOにおいて赤～白で表示されているものは、未水和のセメント粒子、Al₂O₃において赤～白で

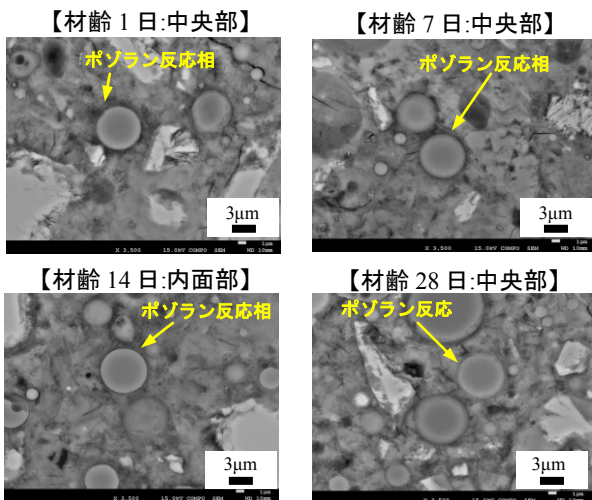


写真-1 各材齢における反射電子像 (FA内10%+外11%)

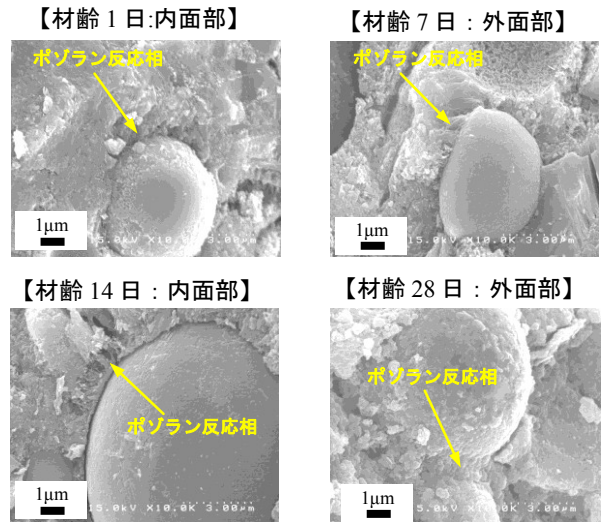


写真-2 各材齢における二次電子像 (FA内10%+外11%)

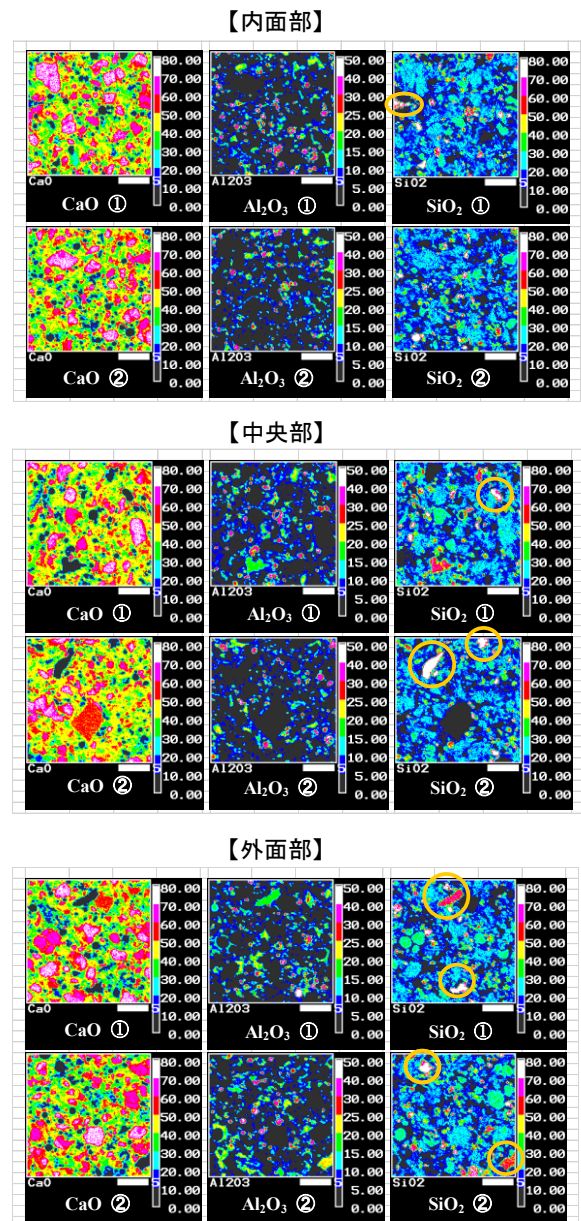


図-6 EDSによる面分析結果(材齢1日)

表示されているものや SiO₂ において赤～ピンクで表示されているものがフライアッシュ粒子に相当する。SiO₂ の画像上に○を付記した箇所は骨材に相当する。これらの色調の差異を利用して、フライアッシュ粒子に相当する部分を抽出し、フライアッシュ粒子の面積率（分析範囲 200μm×200μm に対する面積率）を求めた。その結果、2 箇所の平均値は、内面部：5.9%、中央部：5.7%、外面部：6.8%であり、いずれの箇所においてもフライアッシュの混入量は同程度であると判断された。従って、北陸産分級フライアッシュの試験体内での分散性状と強度発現への寄与はほぼ均等に発揮されるものと推察された。また、CaO の画像には、多くの未水和セメント粒子の存在が観察された。

5. 結論

本研究で得られた主な結果は、以下に示す通りである。

- (1) シリーズ I の配合試験の結果から、北陸産分級フライアッシュの内割比率がセメントの水和反応との関係で早期のポゾラン反応を促進していることが考えられ、今回の配合ケースのなかでは、内割 10%の配合が最適な条件であると推察された。
- (2) シリーズ I のスラリー成分の分析結果から、コンクリート投入量に対するスラリー溶出量は約 2%と僅かであり、そのスラリー成分比率に大きな違いはなかった。また、遠心成形後にスラリー成分として排出されるフライアッシュ量は、投入量に対して 1%以下であった。
- (3) シリーズ II の配合試験の結果から、外割を添加することにより材齢 14 日から 28 日の期間での強度増進が確認され、外割で添加した北陸産分級フライアッシュのポゾラン反応の促進による強度発現の効果が確認された。
- (4) シリーズ II のスラリー成分の分析結果から、シリーズ I と同様、コンクリート投入量に対するスラリー溶出量は約 2%と僅かであった。スラリー成分の比率は、水分が減りフライアッシュとセメントの排出比率が増加した。また、遠心成形後にスラリー成分として溶出するフライアッシュ量は、シリーズ I と同様に、投入量に対し 1%以下であった。
- (5) シリーズ II の SEM 観察結果から、材齢 1 日から材齢 28 日のすべてのサンプルにフライアッシュのポゾラン反応相が確認され、その頻度は材齢 14 日以降で顕著であった。
- (6) シリーズ II の SEM-EDS による面分析結果から、遠心成形供試体の断面方向（内面部、中央部、外面部）でのフライアッシュの分散状況に大きな差異は認められなかった。

謝辞

本研究は、(株)太平洋コンサルタント 田中秀和様、高橋晴香様および西日本コンクリート試験センターの皆様へ、各種配合試験の実施やスラリー成分の分析とその評価に関するご指導を賜りました。ここに、関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 鳥居和之：フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化—北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信—, 電力土木, No.357, pp.11-15, 2012
- 2) T. Hashimoto and K. Torii: The development of highly durable concrete using classified fine fly ash in Hokuriku District, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.312-321, 2013
- 3) 橋本徹：北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの性能評価と実用化に関する研究, 金沢大学学位請求論文, pp.1-16, 2014
- 4) 尾花祥隆, 鳥居和之：プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1065-1070, 2008
- 5) 板坂匠, Irfan Prasetya, 多田茂夫, 鳥居和之：分級フライアッシュによるプレストレストコンクリートの ASR 抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.439-444, 2013
- 6) 山村智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之：分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンション PC 桁への適用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.181-186, 2013
- 7) 増田靖彦, 名越聖治：セメント二次製品の遠心締め固め成形方法, 特許公報, 第 2639411 号, 1997
- 8) 橋本徹, 参納千夏男, 久保哲司, 鳥居和之：北陸産分級フライアッシュを用いたコンクリートの配合と強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.133-138, 2013
- 9) 橋本徹, 白根勇二, 高橋晴香, 鳥居和之：分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度改善メカニズムに関する一考察, 材料, Vol.63, No.10, pp.694-701, 2014
- 10) (財)日本規格協会：JIS ハンドブック⑩ 生コンクリート 2010, 2010
- 11) 山崎寛司：鉱物質微粒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.15-46, 1962