

論文 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発現の改善効果

白根 勇二^{*1}・橋本 徹^{*2}・高橋 晴香^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨：分級フライアッシュと石灰石砕石を併用したコンクリートを実構造物に適用したところ、強度発現が良好で、ひび割れ発生が非常に少ないとの結果を得た。そこで、コンクリートの強度発現性の違いを検討することを目的に、圧縮強度試験や細孔径分布の測定、骨材界面の観察を行った。その結果、石灰石砕石は材齢 7 日以前から強度発現に寄与し、モルタルの細孔量を少なくするとともに骨材界面の組織を緻密化すること、分級フライアッシュは材齢 7 日以降の強度発現に寄与し、材齢 28 日から 91 日の期間に 100nm 以上の細孔量を減少させる効果が大きいことが明らかとなった。

キーワード：分級フライアッシュ、石灰石骨材、圧縮強度、細孔径分布、骨材界面、ポゾラン反応

1. はじめに

石炭火力発電所は、微粉炭の燃焼に伴う副産物として石炭灰を多量に産出するが、安定的な電力供給を確保するうえで非常に重要な役割を担っており、石炭灰の産出量は今後も増加することが予測されている。そのため、コンクリート分野では地球環境の保全や資源リサイクルの観点から、フライアッシュを混和材として積極的に利用する検討が数多く進められている¹⁾。

北陸地方においても、コンクリート構造物の長寿命化とコンクリート材料として有効な資源の地産地消を目指し、平成 23 年から産官学が連携して委員会を立ち上げ、分級フライアッシュの有効利用促進を図っている²⁾。最近では、実構造物への本格的な利用が進んでおり、著者らは分級フライアッシュによる良好な強度発現性や温度上昇量の低減によって、実構造物の温度ひび割れ抑制に効果があったことを報告している^{3), 4)}。

また近年、良質な骨材の不足や乾燥収縮ひび割れの抑制などを背景に、粗骨材に石灰石砕石を使用する事例が増えている⁵⁾。今後、北陸地方ではコンクリートの品質向上に加え、ASR 対策の観点から、石灰石砕石を利用する工場が増えていくことが予想される。前述の著者らによる分級フライアッシュの実構造物の適用にあたっては、レディーミクストコンクリートの製造工場によって粗骨材の種類が異なり、それぞれ陸砂利と石灰石砕石を用いたコンクリートを使用した。異なる材料を使用した結果、石灰石砕石を用いたコンクリートは陸砂利と比較して、乾燥収縮、自己収縮および温度収縮によるひび割れの発生が非常に少なく、かつ材齢に伴う強度発現が非常に良好であるとの結果を得た。

しかしながら、これまでフライアッシュセメントと石灰石砕石を併用した事例は少なく、両者の組み合わせによるコンクリートの特性について明らかとなっていないのが現状である。そこで本研究では、セメントと粗骨材の組合せによって強度発現性が異なる点に着目し、セメント 2 種類（普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュセメント B 種）、粗骨材 2 種類（陸砂利および石灰石砕石）を組み合わせた 4 種類のコンクリートについて、圧縮強度試験や細孔径分布の測定、骨材界面の観察などを行い、その強度発現性の違いについて考察を行った。

2. 検討概要

2.1 検討ケース

検討ケースを表-1 に示す。セメントと粗骨材の種類を要因とし、それぞれ普通ポルトランドセメント (OPC) とフライアッシュセメント B 種 (FB) を、陸砂利 (G) と石灰石砕石 (LS) を水準とした合計 4 ケースとした。

コンクリートの配合および使用材料を表-2 および表-3 に示す。コンクリートの配合は、水セメント比 (W/C) を 50%、目標スランプを 12cm、目標空気を 4.5% の条件のもと決定した。FB は、セメント中の分級フライアッ

表-1 検討ケース

ケース	略称	セメント種類	粗骨材種類
ケース 1	OPC-G	普通ポルトランドセメント	陸砂利
ケース 2	OPC-LS		石灰石砕石
ケース 3	FB-G	フライアッシュ	陸砂利
ケース 4	FB-LS	セメント B 種	石灰石砕石

*1 前田建設工業 (株) 技術研究所 基盤技術研究グループ 主任研究員 (正会員)

*2 北陸電力 (株) 土木部 副部長 (開発技術担当) (正会員)

*3 (株) 太平洋コンサルタント 解析技術部 解析グループ (正会員)

*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)

表-2 コンクリート配合

ケース	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
ケース1 OPC-G	50	41.0	165	OPC 330	S1 706	G1 1068	2.640
ケース2 OPC-LS	50	43.5	161	OPC 322	S2 765	G2 1056	2.576
ケース3 FB-G	50	41.0	163	FB 326	S1 702	G1 1063	2.608
ケース4 FB-LS	50	43.5	156	FB 312	S2 767	G2 1059	2.496

表-3 使用材料

種別	概要	
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積3,280g/cm ³
	FB	フライアッシュセメントB種, 密度:2.97g/cm ³ , 比表面積3,510g/cm ³
細骨材	S1	山砂(石川県産), F.M.=2.66, 密度=2.51g/cm ³ , 吸水率=1.86%
	S2	山砂(石川県産), F.M.=2.56, 密度=2.54g/cm ³ , 吸水率=2.56%
粗骨材	G1	陸砂利(富山県産), Gmax=25mm, F.M.=6.87, 密度=2.64g/cm ³ , 吸水率=1.53%
	G2	石灰石碎石(新潟県産), Gmax=20mm, F.M.=6.77, 密度=2.70g/cm ³ , 吸水率=0.50%
混和剤	AD	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体

シュ(北陸電力七尾火力発電所産, JIS II 種灰)の質量比率が17±2%となるよう混合したものである。

分級フライアッシュの品質⁶⁾を表-4に, 分級フライアッシュおよび石灰石砕石中の微粒分の粒度分布の測定結果を図-1に示す。分級フライアッシュはJIS A 6201のII種品であるが, 分級工程によって粒径の細かいものが多く含まれており, 一般的なII種品よりも比表面積が大きくなっている。そのため, フロー値比や活性度指数の値も従来のII種品よりも大きく, 流動性や強度発現性が大きく改善されている。また, 平均粒径が約8μm(分級前は約21μm)と微細で, シリカ質のガラス成分を約73%(分級前は約65%)と多く含有している。

粗骨材はケースによって陸砂利または石灰石砕石を使用した。陸砂利は丸みを帯びた形状で, 表面組織が凹凸を有しているが, 石灰石砕石は角張った形状をしており, 表面組織が平滑かつ緻密で, 微粒分量は約2%であった。図-1より, 石灰石砕石には10μm以下の微細な粉末が多く含まれていることが確認できる。

なお, 細骨材はケースによっての製造工場が異なるものを使用した, いずれも同地域で採取された山砂であり, 品質にも大きな差異は無く, 本検討の結果に影響を及ぼしていないものとみなした。

表-4 分級フライアッシュの品質⁶⁾

項目	JIS規格 II種	データ				
		最大	最小	平均	標準偏差	
二酸化けい素(%)	45.0以上	63.6	51.9	57.8	3.6	
湿分(%)	1.0以下	0.4	<0.1	-	-	
強熱減量(%)	5.0以下	2.4	1.3	1.9	0.3	
密度(g/cm ³)	1.95以上	2.48	2.30	2.40	0.04	
粉末度	45μmふるい残分(%)	40以下	1.3	0.1	0.5	0.3
	比表面積(cm ² /g)	2500以上	5130	4330	4794	173
フロー値比(%)	95以上	111	103	107	2.0	
活性度指数(%)	材齢28日	80以上	96	82	89	4.1
	材齢91日	90以上	110	96	103	3.5

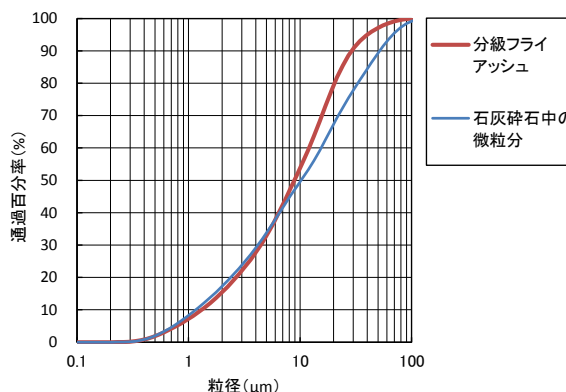


図-1 分級フライアッシュおよび石灰石砕石中の微粒分の粒度分布

2.2 試験項目

試験項目を表-5に示す。本検討では, 圧縮強度の物理的影響を検討することを主な目的としており, ブリーディング試験, 細孔径分布の測定および偏光反射顕微鏡による骨材界面の遷移帯(ITZ)の観察を行った。細孔径分布の測定と偏光反射顕微鏡による観察には, 圧縮強度と同様の方法で作製した円柱供試体からサンプルを採取し, 試験に用いた。

表-5 試験項目

項目	試験方法
ブリーディング試験	JIS A 1123 に準拠
圧縮強度試験	JIS A 1108 に準拠 (材齢 7, 28, 91 日)
モルタル部の細孔径分布の測定	水銀圧入式ポロシメータ (材齢 28 日, 91 日)
骨材界面の観察	偏光反射顕微鏡 (材齢 28 日)

3. 検討結果と考察

3.1 ブリーディング試験

図-2 にブリーディング試験の結果を示す。各ケースの配合は細骨材率や単位水量を調整しており、使用材料による影響を断定することはできないが、今回の試験ではFBを用いたケースの方がOPCを用いたケースよりもブリーディング量が多くなる傾向であった。また、石灰石碎石を用いたケースが、陸砂利を用いたケースよりもブリーディング量が多くなる傾向であったが、両者の差は小さく、粗骨材による違いはほとんどない。

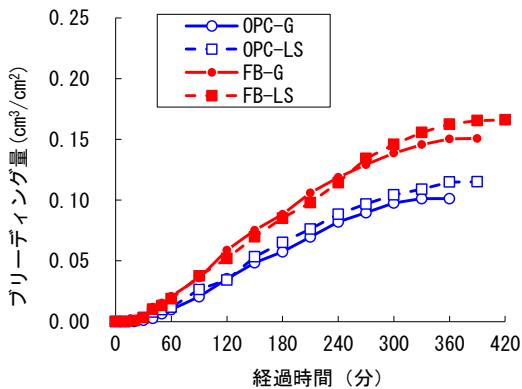


図-2 ブリーディング試験の結果

3.2 圧縮強度試験

図-3 に圧縮強度試験の結果を示す。また、図-4 に材齢 28 日の圧縮強度に対する各材齢の強度比を、図-5 に陸砂利 (G) のケースに対する石灰石碎石 (LS) のケースの強度比 (LS/G) を示す。

まず、セメントの種類の影響に着目すると、FBの圧縮強度はOPCに比べて材齢7日では小さいが、材齢28日ではほぼ同等となり、材齢91日では逆転して大きくなった。一般的に、フライアッシュのポゾラン反応は材齢28日以降に発現されると言われているが、分級フライアッシュを用いた本試験では、材齢7日の比較的初期の段階から材齢91日までの間、圧縮強度比が増加しており、順調な強度発現効果が認められる。これは、分級によって粒径が小さくなったフライアッシュがコンクリート中に均質に分散しているため、ポゾラン反応の開始時期が早まるとともに、長期に渡ってポゾラン反応が継続していることを示唆するものである。

また、図-5の粗骨材種類の影響に着目すると、同じセメントを用いた場合、陸砂利に対する石灰石碎石の圧縮強度比は、いずれの材齢においても1.20~1.25倍でほぼ一定の割合で推移している。これは、石灰石碎石が材齢7日以前の初期材齢から強度発現に寄与していることを示す結果と考えられる。

なお、分級フライアッシュと石灰石碎石を用いた

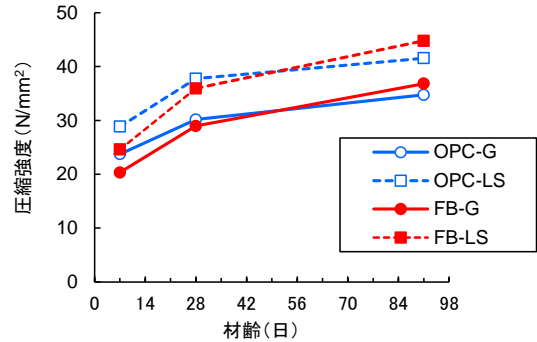


図-3 圧縮強度試験の結果

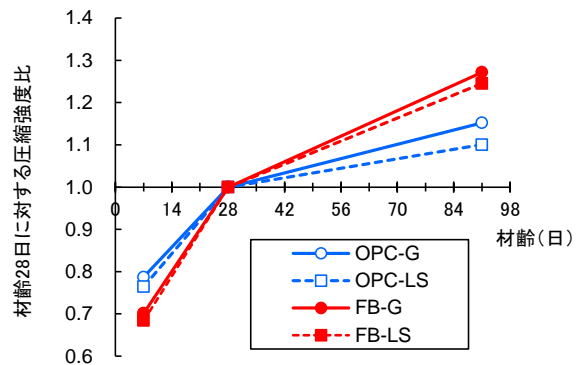


図-4 材齢 28 日の圧縮強度に対する強度比

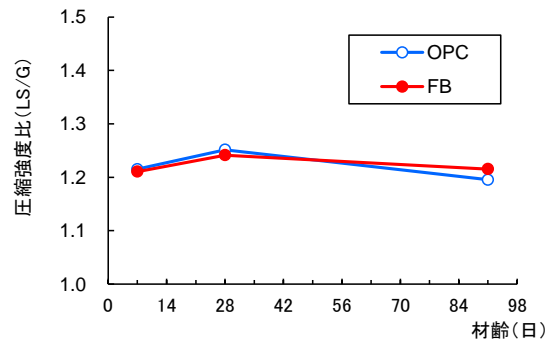


図-5 骨材種類による圧縮強度比 (LS/G)

「FB-LS」は、双方の特性を併せ持った良好な強度発現性を示しており、材齢7日までに於ける強度改善効果、材齢7日以降における強度増進効果が認められる。

3.3 コンクリートの破壊状態

各コンクリートの破壊形態を把握するため、材齢91日の圧縮強度試験後の供試体の破壊状態を確認したところ、セメント種類による違いは認められなかったが、骨材種類による違いが認められた。写真-1に「FB-G」および「FB-LS」の破壊状態の例を示す。

陸砂利 (G) を用いたコンクリートの破壊状態は、粗骨材とペーストの付着面からの破壊が目立ち、界面の破壊が先行していた。一方、石灰石碎石を用いたコンクリ

ートの破壊状態は、骨材とセメントペースト界面で破壊する箇所が少なく、骨材の破壊に至るものが多く見られ、骨材界面の付着が非常に良好であった。一般的に、コンクリートの強度に影響を与える材料的要因として、骨材強度の影響、セメントペーストの強度を決定づける水セメント比の影響、骨材とセメントペーストの付着性状の影響が考えられる。今回の検討においては、コンクリートの破壊状態から判断して、骨材とセメントペーストとの付着性状が圧縮強度に影響を及ぼしたと考えられる。

骨材とセメントペーストの付着性状の影響要因の一つとして、ブリーディング発生による脆弱層の形成が挙げられるが、前述のとおり粗骨材種類によるブリーディング量の差が大きくないことを確認しており、主要因ではないと考えられる。他の要因として骨材岩種の影響が挙げられる。石灰石碎石を用いたコンクリートは、骨材表面においてカルサイトとアルミネート相が反応して水和物を生成することで、骨材とペースト界面の組織が緻密化され付着強度が増加することが知られている⁷⁾。本試験結果ではこの要因が大きかったと考えられるが、骨材界面の付着性状については偏光反射顕微鏡による微視的な観察結果をもとに後述する。

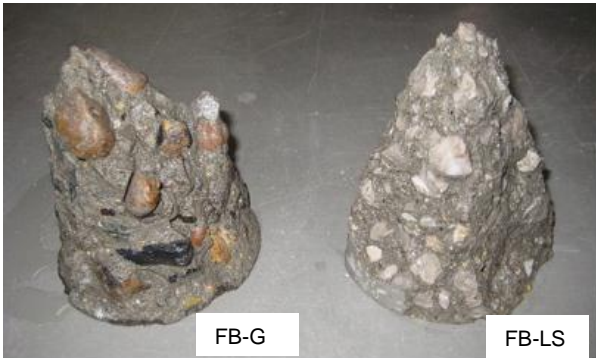


写真-1 コンクリート破壊状態の例

3.4 モルタルの細孔径分布

コンクリート供試体中のモルタル部分における細孔径分布 ($3 \times 10^{-3} \sim 400 \mu\text{m}$) を水銀圧入式ポロシメータで測定した結果を図-6～図-8に示す。細孔径分布の測定は材齢28日と91日の時点で行い、使用材料の違いのほか、材齢経過に伴う変化を確認した。

材齢28日の細孔量に着目すると、セメント種類の影響よりも骨材種類による影響が大きく、陸砂利の細孔量が22Vol.%程度であるのに対して、石灰石碎石の細孔量は18Vol.%程度で、石灰石碎石を用いたコンクリートの方がモルタル中の細孔量が少なくなった。各配合とも水セメント比が同一条件であるにも関わらず明確な違いが現れた要因として、石灰石碎石に含まれる微粒分の影響が考えられる。前述のとおり、石灰石碎石中には約2%

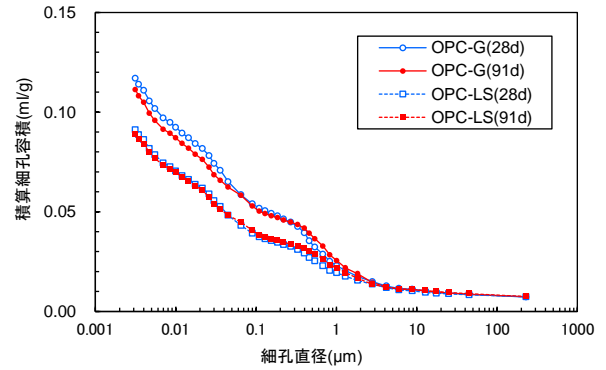


図-6 細孔径分布の測定結果 (OPC)

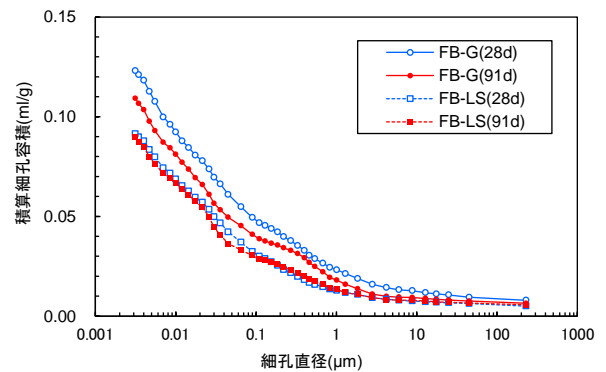


図-7 細孔径分布の測定結果 (FB)

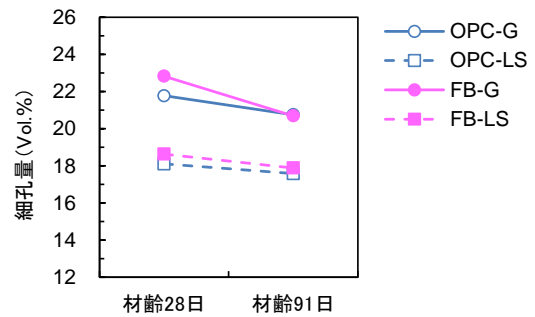


図-8 細孔量の変化

の微粒分が含まれており、モルタル中にこの微粒分が分散されているものと推察される。このため、微粒分による空隙充填効果や、微粒分とセメントペーストとの化学反応が圧縮強度の向上に寄与したものと考えられる。

材齢による変化に着目すると、図-8に示すとおり、いずれのケースも材齢の経過に伴って細孔量は小さくなったが、「FB-G」の細孔量が4ケースの中で最も減少した。図-7に「FB-G」の細孔径分布を示しているが、材齢28日から91日において細孔径が全範囲に渡って細孔容積が減少している。これは、分級フライアッシュのポズラン反応による空隙充填効果と推察されるが、材齢28日の時点で他のケースよりも粗な状態であったために細孔量の減少も顕著に現れたものと思われる。

各ケースの細孔径分布の変化を詳細に把握するため、

細孔直径を 100nm 以上, 19~100nm, 3~19nm に区分し, 材齢 28 日から 91 日までの細孔容積の変化量を比較した結果を図-9 に示す。石灰石碎石を用いたケースはいずれの区分においても細孔容積の変化量が少なく, FB は OPC と比べて直径が大きな細孔の減少に大きく寄与している。この傾向は陸砂利を用いたケースでより顕著になっており, 「FB-G」では 100nm 以上の細孔容積減少が大きくなっている。比較的大きな空隙は強度への影響も大きいと考えられるため, 100nm 以上の細孔容積の減少が強度増加に寄与した要因の一つであると考えられる。

図-10 にモルタルの細孔量と圧縮強度の関係を示す。細孔量と圧縮強度には負の直線的な相関関係があり, 空隙構造の影響が大きいことがわかる。

以上より, 石灰石碎石中の微粒分や分級フライアッシュがモルタル中の空隙構造を改善し, コンクリートの圧縮強度の発現に寄与したと思われる。

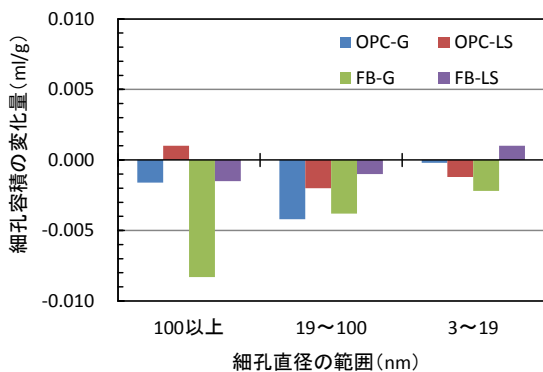


図-9 材齢 28 日から 91 日での細孔容積の変化量

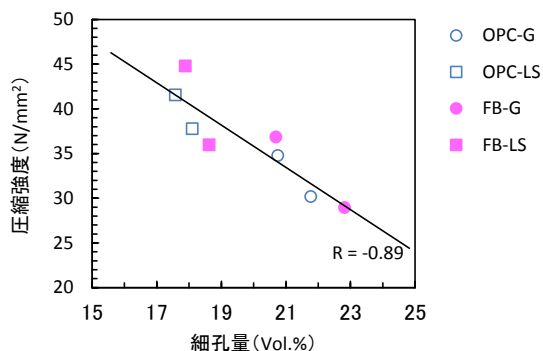


図-10 細孔量と圧縮強度の関係

3.5 偏光反射顕微鏡による骨材界面の観察

粗骨材とペーストの界面における遷移帯 (ITZ) の空隙状態や密実性を確認することを目的に, 材齢 28 日の円柱供試体から薄片研磨サンプルを作製し, 偏光反射顕微鏡による観察を行った。写真-2~写真-5 に偏光反射顕微鏡によって観察された骨材界面の状態の代表的な例を示す。写真の上部が供試体作製時の上側で, 写真は骨材



写真-2 骨材界面状態の一例 (OPC-G)

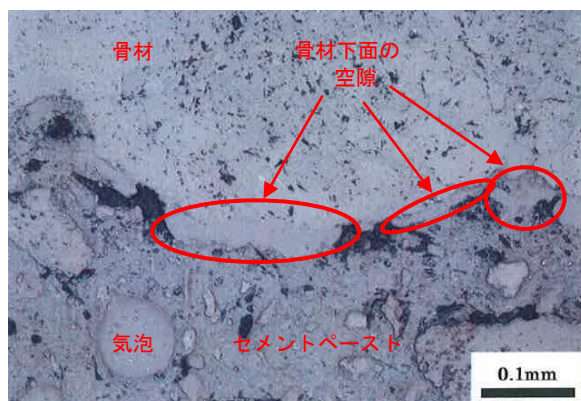


写真-3 骨材界面状態の一例 (OPC-LS)

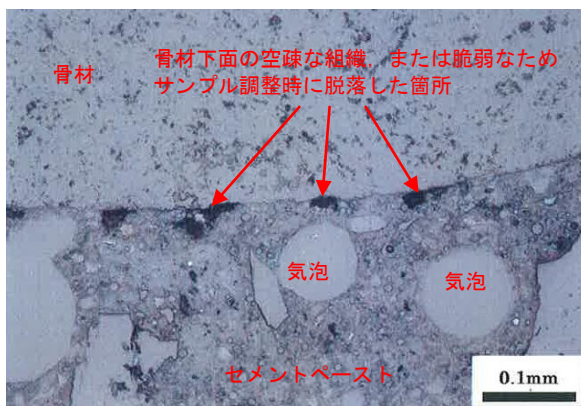


写真-4 骨材界面状態の一例 (FB-G)

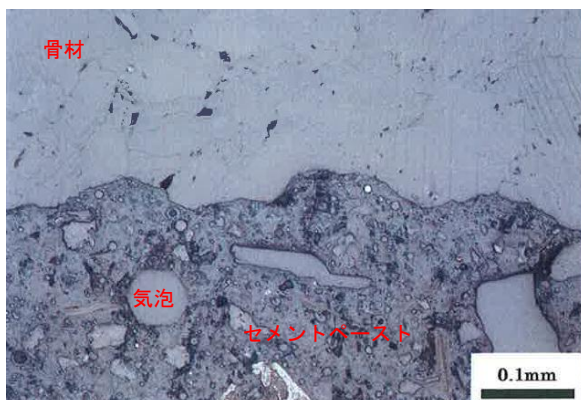


写真-5 骨材界面状態の一例 (FB-LS)

下面に着目したものである。

「OPC-G」の粗骨材下面とセメントペーストとの界面には、写真-2に示すような空隙(約50 μ m)が他のケースよりも比較的多く観察された。空隙は、コンクリート中のブリーディング水の痕跡と推察される。「OPC-G」の界面にはサンプル調整時に脆弱な界面組織が脱落したと思われる箇所も多く認められた。骨材界面の組織に脆弱な箇所が存在していたためと考えられ、コンクリートの圧縮強度に寄与しない組織であったと思われる。

「OPC-LS」の粗骨材下面とセメントペーストとの界面にも、「OPC-G」と同様に空隙が観察されたが、発生領域が「OPC-G」よりも少なく、空隙の厚さも薄かった(20 μ m~30 μ m程度)。石灰石砕石とセメントペーストが化学的に結合していること、石灰石砕石中の微粒分のセメントペースト内への均一分散による効果と思われる。

「FB-G」の粗骨材下面とセメントペーストとの界面は、空隙の発生は比較的少なかったが、サンプル調整時に組織が脱落したと思われる箇所が認められた。骨材周囲のセメントペーストにはフライアッシュの存在も確認ができたが、強度発現が十分で無いため脱落が生じたと考えられる。

「FB-LS」の粗骨材下面とセメントペーストとの界面は、空隙や組織の脱落箇所がほとんど観察されず、骨材とセメントペースト界面が密着し、緻密な箇所が非常に多く観察された。石灰石砕石とセメントペーストが物理・化学的に強固に結合するとともに、フライアッシュが骨材界面のセメントペースト部にも充填されて緻密な付着領域を形成することで、界面付近の強度増加に寄与したと推察される。そのため、「FB-LS」には「OPC-LS」で観察された組織の脱落も見られず、良好な骨材界面の形成に至ったものと考えられる。

以上の微視的な観察結果は、前述のコンクリートの破壊性状や強度発現性の考察を裏付けるものであると考える。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 石灰石砕石は材齢7日以前から強度発現に寄与し、分級フライアッシュはポゾラン反応によって材齢7日以降の強度発現に寄与する効果が大きいことが明らかとなった。また、両材料を使用したコンクリートは双方の特性を併せ持った効果を発揮することが確認された。
- (2) 陸砂利を用いたコンクリートの骨材界面の付着性状は空隙や脆弱層が形成されやすく強度低下の要因と

なりやすいが、石灰石砕石を用いたコンクリートの骨材界面の付着状態は良好で、圧縮強度の増加に寄与した。

- (3) 石灰石砕石を用いると微粒分の分散によってモルタル部の細孔量が少なくなり、密実な内部組織を形成することが明らかとなった。また、分級フライアッシュは100nm以上の細孔量を減少させる効果が大きいことが明らかとなった。
- (4) 石灰石砕石と分級フライアッシュを用いたコンクリートは、粗骨材とペーストの界面が密着し、組織が緻密となっていることが明らかとなった。石灰石砕石とセメントペーストが物理的・化学的に強固に結合するとともに、フライアッシュが骨材界面のペースト部にも充填され付着領域を形成することで、界面付近の強度増加に寄与することが考えられた。

本研究は、北陸地方において産官学で取り組む「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会(委員長:金沢大学鳥居教授)」の成果の一部である。また、研究にあたり(株)太平洋コンサルタントの広野真一氏に偏光顕微鏡観察についてご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会:循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術,コンクリートライブラリー132,2009.12
- 2) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会:報告書(富山・石川版),2012.3
- 3) 浅井謙三,寺田彰,山崎純一:志賀原子力発電所防波堤設置工事の設計と施工,電力土木, No.364, pp.63-67, 2013.3
- 4) 白根勇二,山田倫,笹倉伸晃,橋本徹,久保哲司,舟橋政司:分級フライアッシュを用いたコンクリートの防潮堤への適用,前田建設技術研究所報, Vol.54, 2013.11
- 5) 日本コンクリート工学会:コンクリートの収縮問題検討委員会報告書,2010.3
- 6) 橋本徹,参納千夏男,江田明孝,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, 2013.7
- 7) 石灰石鉱業協会:石灰石骨材とコンクリート 補遺版 2012, pp.21-23, 2012.3