

産学官連携による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状況報告（その2）

参納 千夏男*1 中島 隆甫*2 干場 博之*3

1. はじめに

北陸地方では、アルカリシリカ反応(ASR)によるコンクリート構造物の損傷事例が多く報告されており、アルカリ総量規制による ASR 抑制対策が十分でないことが指摘されていた。一方で、北陸地方においては、高炉セメントの材料である高炉スラグを産出する製鉄所がないことから、地域の石炭火力発電所で産出されるフライアッシュを混和材として利用することが合理的であると考えられた。そこで、北陸電力（株）では、地域産骨材に対する地域産フライアッシュによる ASR 抑制効果を確認し、フライアッシュのコンクリートへの有効利用を促進することとした¹⁻⁵⁾。

フライアッシュの利用促進の取組みについては、以前は、主な利用先が土木材料としての利用であったため、土木部門の課題として取組まれることが多かった。そのため、フライアッシュが材料として優れていることを示しても、フライアッシュの品質管理や供給体制が整備されておらず、安定した利用拡大を図ることができにくい状況であった。残念ながら、一昔前は、会社内で「フライアッシュを造るために火力発電所を運転している訳ではない」、「良い品質のフライアッシュを造るために石炭の産地を選んでいる訳ではない」といった声を聞くことがあった。しかしながら、近年、全国的に環境負荷低減を目指したフライアッシュ有効利用の機運が高まってきたこともあり⁶⁾、フライアッシュの有効利用に対する認識は変わりつつあった。

また、フライアッシュは、一旦、大型工事で利用されても継続性がない場合が多かった。それは、利用する仕組みがなかったためであり、以下のように関係者が各々の役割を果たして連携する仕組みが必要であると考えられた。

- ・フライアッシュ産出事業者である電力会社の

フライアッシュの供給体制と品質確保

- ・コンクリートを製造するコンクリート工場のサイロ、計量設備等の増設や整備およびフライアッシュコンクリートの配合設計の確立
- ・発注者が積極的にフライアッシュの使用を取り入れていく姿勢や仕様書の整備

そこで、北陸電力（株）では、石炭灰活用グループのような組織はなかったが、土木部門と火力部門とが協調し、フライアッシュによる ASR 抑制効果検証試験の実施や分級装置の稼働などの事前の準備を整え、産学官連携による委員会を立ち上げ利用を促進することとした。

本稿では、これまでの経緯や成果を報告し、フライアッシュの利用促進に際して得た所見を述べる⁴⁾。

2. 委員会の活動内容

(1) 委員会の構成

委員会の構成を図-1に示す。委員会は、大学からはコンクリート工学専攻の有識者が、産業界からは各県のコンクリート工業組合が、官公庁からはオブザーバーとして国土交通省北陸地方整備局企画部および各県土木部が参画している。北陸電力（株）は、フライアッシュの産出事業者であり、委員として参画する一方、事務局として委員会を運営してきた。

(2) 委員会の検討内容

委員会での主な検討内容は以下の3点である。

- ① フライアッシュの品質保証とフライアッシュコンクリートの工学的性質の確認

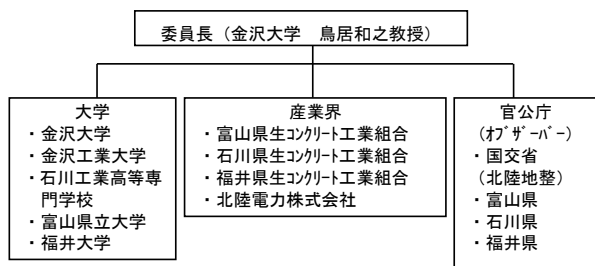


図-1 委員会の構成

*1 北陸電力株式会社 土木建築部 土木技術チーム

*2 北陸電力株式会社 土木建築部 土木技術チーム

*3 北陸電力株式会社 火力部 火力発電環境チーム

- ② 北陸地方産のフライアッシュを用いたコンクリートの実用化のための各種試験の実施
- ③ 北陸地方産のフライアッシュを用いたコンクリートの利用方策の検討

(3) 委員会の開催実績

委員会は、2011年1月に第1回委員会を開催し、2011年度、2012年度は年2回の委員会を開催し、2013年度以降は、年1回の頻度で開催してきた。2019年1月には、第11回委員会を開催している。

3. フライアッシュの製造工程と品質管理

北陸地方には、富山県、石川県、福井県に各々1箇所ずつ石炭火力発電所が稼働している。これらの石炭火力発電所（富山新港火力発電所、七尾大田火力発電所および敦賀火力発電所）から産出されるフライアッシュは、2017年度の実績では年間約60万tであり、その約8割は、セメントの原材料として利用されており、混和材としての利用はわずかである。北陸地方では、コンクリート用フライアッシュを供給する発電所として、出力が大きく、良質なフライアッシュが産出される七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所2箇所を選定し、それぞれに分級装置を設置した。この背景としては、良質なフライアッシュを地域に供給することによって、有効利用を進めるとともに品質確保に常に余力をもたすことにより、フライアッシュの活性度指数を確実に満足するフライアッシュを供給することにある。図-2に、フライアッシュの

製造および出荷フローを示す。北陸地方の石炭火力発電所では、オーストラリア、インドネシアなどの海外から輸入した石炭を燃料としている。燃料調達の基本は、燃焼効率が高く、費用が安い石炭を安定に調達することであるが、両発電所では産地毎のフライアッシュの品質データを長年にわたり蓄積しており、燃料調達計画に、JISⅡ種以上のフライアッシュが産出される石炭（「JIS灰適合炭」という）をフライアッシュの需要に足りる量以上に常時確保することとしている。製造の手順としては、まず、JIS灰適合炭を燃焼したときに、電気集じん器で採取されたフライアッシュ（原粉）の品質を確認する。次に、JISⅡ種に適合していることを確認した上で、原粉サイロに取り込み、これを分級装置（空気渦セパレータ方式）に通した後にJIS灰製品サイロに取り込み、さらに、出荷する際には、フライアッシュ（分級品）の品質を定期的に確認している。分級装置はブレン比表面積で、原粉+1,000cm²/gを目標として運用しており、七尾大田火力発電所および敦賀火力発電所のそれぞれで、年間3万tの製造能力を確保している。なお、フライアッシュは、5割程度が採取され、残りの粗粉は、セメントの原料として有効利用されている。この捕捉率は、採取するフライアッシュの品質をできるだけ高める方針により、分級装置の稼働率を7割と想定し、各々の発電所で年間3万t採取することのできるバランスから決められたものである。

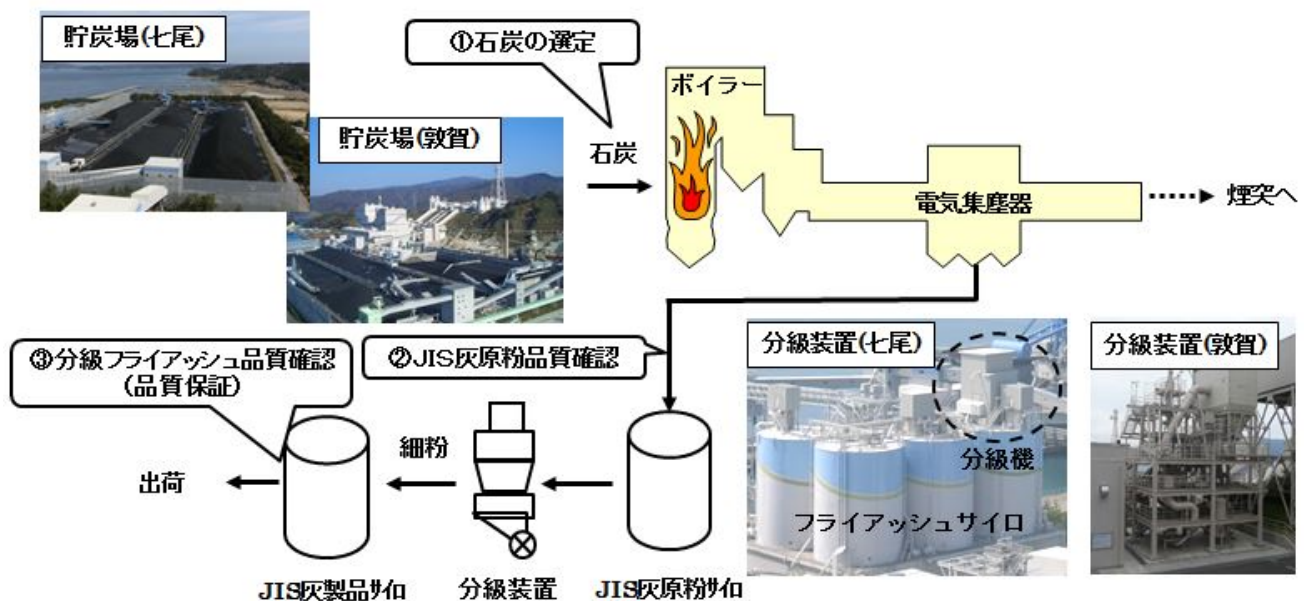


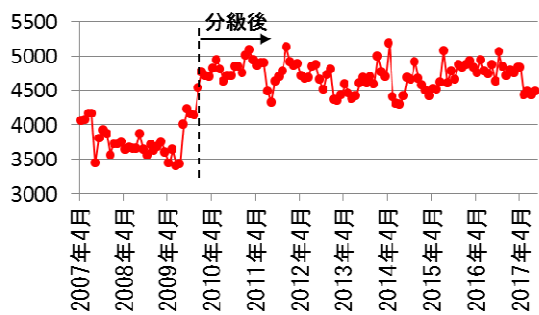
図-2 フライアッシュの製造および出荷フロー

両発電所のフライアッシュの JIS 項目データのまとめを表-1に示す。表-1に示す通り、両発電所産フライアッシュの品質は同程度に確保されており、ブレン比表面積の標準偏差は、JIS で規定されている品質の均一性 ($\pm 450 \text{ cm}^2/\text{g}$) を十

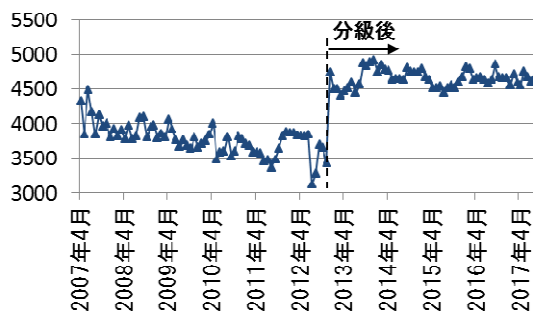
分に満足している。さらに、両発電所産フライアッシュのブレン比表面積の推移を図-3に、活性度指数(材齢91日)の推移を図-4に、フロー値比の推移を図-5に示す。これらの図に示すとおり、ブレン比表面積は、分級開始後から、平

表-1 フライアッシュの品質データ一覧

JIS項目	JIS規格値 (II種)	七尾大田火力発電所				敦賀火力発電所				
		分級前(2007.4~2009.7)		分級後(2010.1~2017.8)		分級前(2007.4~2012.11)		分級後(2012.12~2017.8)		
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
二酸化けい素含有量(%)	45.0以上	67.6	1.9	57.3	4.1	64.4	3.0	63.6	1.7	
湿分(%)	1.0以下	0.1以下	-	0.1以下	-	0.1以下	-	0.1以下	-	
強熱減量(%)	5.0以下	2.1	0.4	2.0	0.3	3.6	0.5	3.5	0.3	
密度(g/cm^3)	1.95以上	2.24	0.05	2.40	0.05	2.22	0.02	2.29	0.01	
粉末度	網ふるい方法 ($45 \mu\text{m}$ ふるい残分)(%)	40以下	16.2	4.2	0.5	0.5	17.4	4.9	1.3	0.3
	ブレン方法 (比表面積) cm^2/g	2,500以上	3,730	204	4,710	198	3,780	225	4,660	122
フロー値比(%)	95以上	100	1	107	2	101	2	102	2	
活性度指数	材齢28日	80以上	83	2	97	7	82	2	94	7
	材齢91日	90以上	95	3	109	6	96	2	107	6

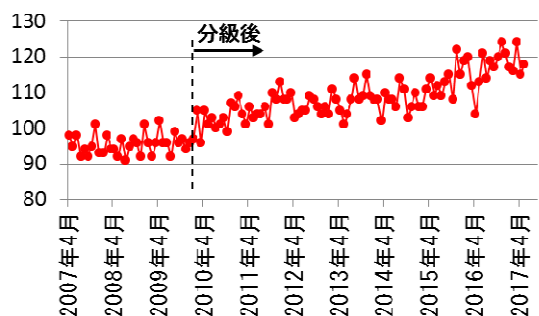


七尾大田火力発電所産

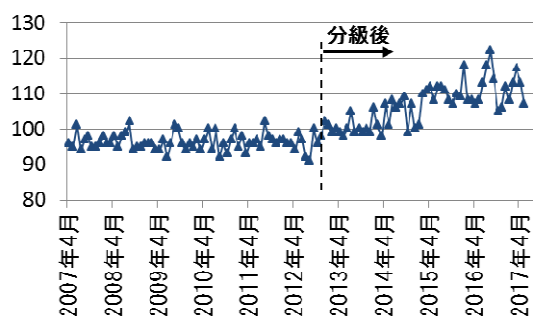


敦賀火力発電所産

図-3 ブレン比表面積の推移

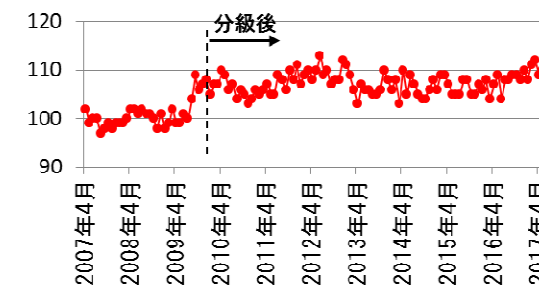


七尾大田火力発電所産

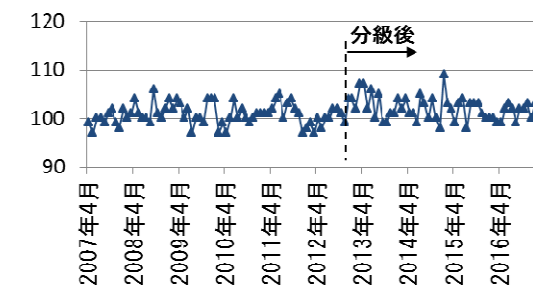


敦賀火力発電所産

図-4 活性度指数(材齢91日)の推移



七尾大田火力発電所産



敦賀火力発電所産

図-5 フロー値比の推移

均で約 4,700 cm²/g 程度と JIS I 種に近い細かさであり、ブレン比表面積の増加にともない、活性度指数、フロー値比もすべて増加しているのが分かる。活性度指数に関しては、材齢 91 日において、100 を超えており、ポゾラン反応性が大きく向上していることが確認される。活性度指数が増加する要因としては、主として比表面積の増加（分級により平均粒径は約 1/3）に伴うフライアッシュ自身の反応率（反応表面積）の増大によるとの報告がある⁷⁾。

4. フライアッシュの供給体制とフライアッシュコンクリートの利用実績

(1) フライアッシュの供給体制

図-6 に、北陸地方全域におけるフライアッシュの供給体制を示す。北陸地方では、七尾大田火力発電所産のフライアッシュを富山県、石川県に供給し、敦賀火力発電所産のフライアッシュを福井県に供給する体制を構築した。図-6 に示すとおり、各県の消費地に拠点となる中継サイロを設け、利用者である生コンクリートプラントへの運搬の便宜を図っている。さらに、近年、新潟県など近隣の県の需要に応じる体制も整えた。

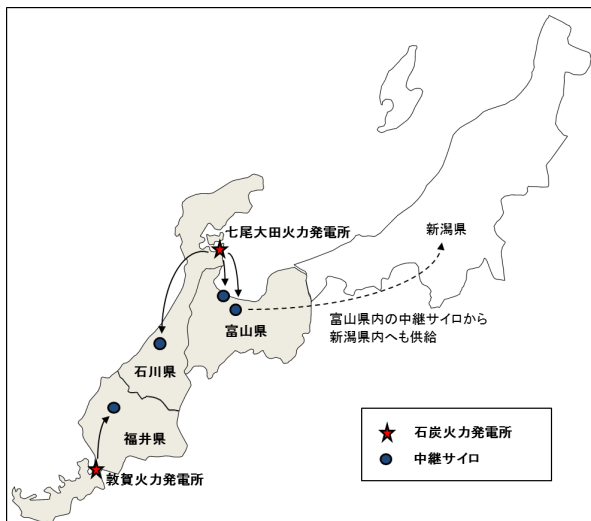


図-6 北陸地方におけるフライアッシュの供給体制

(2) 生コンクリートプラントの JIS 取得状況

図-7 に、北陸地方における生コンクリートプラントのフライアッシュコンクリートの JIS 取得状況を示す。北陸地方では、産学官におけるフライアッシュコンクリートの利用拡大状況を見極めて、約 7 割の生コンクリートプラントが JIS A5308 を取得している。このことにより、汎用的に使用できなかったフライアッシュコンクリート

が、広い地域において使用できる環境が整ってきている。この際にフライアッシュの品質面との関係で重要なことは、前述したように、発電所により、ボイラーの性能や燃料となる石炭種が異なるため、JIS A6201 の規定を満足していても、発電所ごとにフライアッシュの品質は異なることから、生コンクリートプラントでは、異なる発電所のフライアッシュを使用する場合には、配合の修正が必要になるため、地域を分けて、同じ地域の発電所で産出されるフライアッシュを常に供給することである。

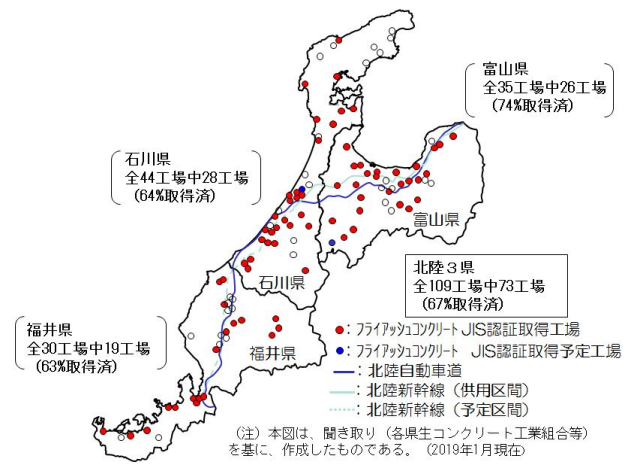


図-7 北陸地方における生コンクリートプラントのフライアッシュコンクリートの JIS 取得状況

(3) フライアッシュコンクリートの利用実績

図-8 に、北陸地方における公共工事におけるフライアッシュコンクリートの打設量の推移を示す。図-8 に示すとおり、委員会を通して、官公庁の協力の元、モデル工事として、フライアッシュコンクリートの適用実績を積んできた。

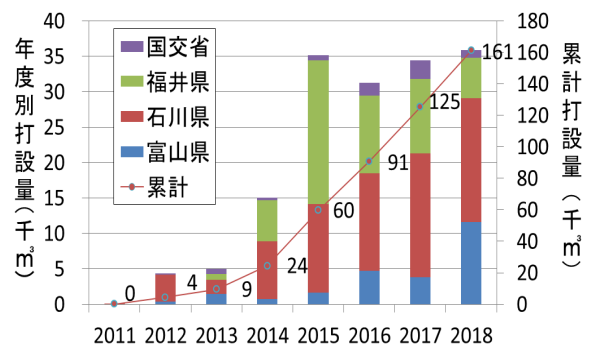


図-8 北陸地方における公共工事におけるフライアッシュコンクリートの打設量の推移

5. フライアッシュの利用促進に際して得た所見

以下に、著者らがフライアッシュの利用促進に際して得た所見を種々の項目について咀嚼して述べる。感覚的な見解も含んでおり、根拠は示さないが、各所でフライアッシュの利用促進を図る際の参考となれば幸いである。

(1) 空気量、スランプの経時変化

フライアッシュコンクリートの場合、配合や使用混和剤の種類、天候によっては、経時ロスが大きいことがあるが、AE減水剤を高機能タイプにするか、AE剤をフライアッシュ専用の混和剤にすることにより、大抵の場合には、改善される。

(2) ブリーディング

フライアッシュコンクリートの場合、同じ呼び強度の高炉セメントや普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートよりもブリーディングは一般的に少なく、早めの仕上げが可能である。夏季に表面が乾燥しがちになり、仕上げをしにくい場合があるが、暑中コンクリートとして、養生に配慮すれば問題はないと考えている。あるいは、単位水量を極端に減らし過ぎないように、配合に配慮することも肝要と思われる。

(3) フレッシュ性

フライアッシュコンクリートは、粘り気が強いと言われる場合があるが、慣れれば仕上げ作業に問題はない。

(4) 仕上がり外観

フライアッシュコンクリートは、ブリーディングが少なく、材料分離しにくいいため、砂すじや沈降ひび割れが発生しにくく、仕上がり外観は、一般的に他のコンクリートよりも優れる。ただし、消波ブロックの場合、斜めの部位の傾斜した型枠の下に気泡が残ることがあり、締固めの際に注意や慣れが必要な場合がある。

(5) ひび割れの発生

フライアッシュを混和した場合、水和熱が抑制されるため、温度ひび割れは少なくなる。また、ボールベアリング効果等により、配合上、単位水量が低減されるため、乾燥収縮ひび割れも他のセメントを使用したコンクリートよりも発生しにくくなる。

(6) 初期強度

北陸地方産フライアッシュ（分級フライアッシュ）

を用いた場合、初期強度は、同じ呼び強度であれば、普通セメントを使用したコンクリートに近く、高炉セメント(BB)を使用したコンクリートよりも高い。従って、BBに比べて型枠を早期に外すことが可能であるため、強度発現の特性を生コンプラントに事前に確認し、施工計画に反映するとよい。また、初期強度発現が良好なことから、打込み時のコンクリートの温度は、土木学会「フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）」に従い、「原則として10℃以上でなければならぬ」としていたが、冬季に10℃以下(5～10℃)となる場合は、七尾大田火力発電所、または敦賀火力発電所から産出されるフライアッシュを使用することを前提として、初期凍害を受けないように十分に養生することで施工してもよいこととした⁸⁾。これは、施工者や官庁担当者の要望を受けて、これまでの施工実績や学識経験委員の見解を踏まえ、委員会で策定したマニュアルに反映したものである。

(7) 硬化コンクリートの耐久性

北陸地方産フライアッシュ（分級フライアッシュ）を用いた場合、ほとんどの耐久性（ASR、塩害、中性化、凍害）は、同等もしくは向上する傾向にある。特にASR抑制効果は高い。

(8) 混和材としてのフライアッシュの利用

セメントとの置換率を設定できることや普通ポルトランドセメント以外のセメントとの組み合わせが可能である点では、混和材としての利用が有効である。

(9) フライアッシュの品質

良質で品質変動の少ないフライアッシュを供給することは、上述したように、耐久性向上効果が高く、利用促進に大変有効であると思われる。

6. おわりに

本稿では、産学官連携による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状況を報告し、取組みの中で得た所見を述べた。北陸地方における本取組みが参考となり、全国的なフライアッシュの利用に少しでも繋がれば幸いである。

参考文献

- (1) 門木秀一・参納千夏男：フライアッシュの利用によるアルカリシリカ反応抑制対策に関する研究, 電力土木, No.319, pp.108-112 (2005)
- (2) 鳥居和之・参納千夏男：骨材資源の活用を目指したアルカリシリカ反応抑制対策の提案. コンクリート工学. Vol.48, No. 1, pp.44-47 (2010)
- (3) 鳥居和之：フライアッシュ活用によるコンクリートの高耐久化ー北陸地方のA S R問題への取り組みと情報発信ー, 電力土木, No.357, pp.11-15 (2012)
- (4) 橋本徹・久保哲司・参納千夏男：産学官連携による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に向けた取り組み, 電力土木, No.361, pp.56-60 (2012)
- (5) 「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)
- (6) 金津努・中井雅司・齋藤直：フライアッシュの活用による環境負荷低減への取り組み, コンクリート工学, Vol.48, No. 9, pp.44-47 (2010)
- (7) 土肥浩大・白濱暢彦・山下牧生：分級により粒度調整したフライアッシュの諸特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.626-631 (2017)
- (8) 北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造および施工マニュアル (2018)

(本報告は、一般社団法人電力土木技術協会誌, No.401, pp.65-69 (2019)を転載しています。)