

北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの標準化と PC 橋梁への適用

鳥居 和之*1・深田 宰史*2・Ha Minh Tuan*3・小林 和弘*4

北陸地方では、アルカリシリカ反応（ASR）と塩害（凍結防止剤）によるコンクリートの早期劣化対策が喫緊の課題であり、コンクリート構造物の高耐久化を目的にして、フライアッシュコンクリート（FA コンクリート）の標準化が強く望まれている。本稿では、北陸地方における FA コンクリートの標準化の経緯について紹介するとともに、FA コンクリートを使用したプレテンション方式 PC 桁の暴露・耐荷性試験と高耐久性 PC 桁の地域実装の事例について概説する。

キーワード：フライアッシュ、PC 桁、ASR 抑制対策、凍結防止剤、地域実装

1. はじめに

欧米諸国のセメントおよびコンクリート産業全体では、「環境負荷低減（CO₂ 発生量）」と「省資源・省エネルギー」の観点から、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換した混合セメントの使用に積極的に取り組んでいる。一方、わが国では、高炉セメント B 種は、土木工事の公共工事仕様書に取り入れられたことから、セメント全体の 22% のシェアを占めている。それに対して、フライアッシュセメントまたはフライアッシュを混和材として使用したコンクリートの使用量は、全体のせいぜい 1～2% である。この事情は、高炉セメントの原材料である高炉スラグ微粉末を産出する製鉄所がまったくない日本海側でも同様であり、北陸地方では北九州の製鉄所から運搬された高炉スラグを原材料として、高炉セメントが製造されている。このような混合セメントの使用は、政策的なものであり、地域的な事情をまったく反映していなかった。

一方、日本海側では、図 - 1 に示すように、北海道から中国、九州地方まで、それぞれの地域において石炭火力発電所が稼働しており、FA コンクリートを活用するのが有利であり、「地産地消」の観点からも経済的合理性に合致するものと考えられた^{1,2)}。

【凡例】

- 石炭火力発電所（フライアッシュ産出）：38 箇所
- 製鉄所（高炉スラグ産出）：15 箇所
- ☆ セメント工場（高炉セメント製造）：30 箇所

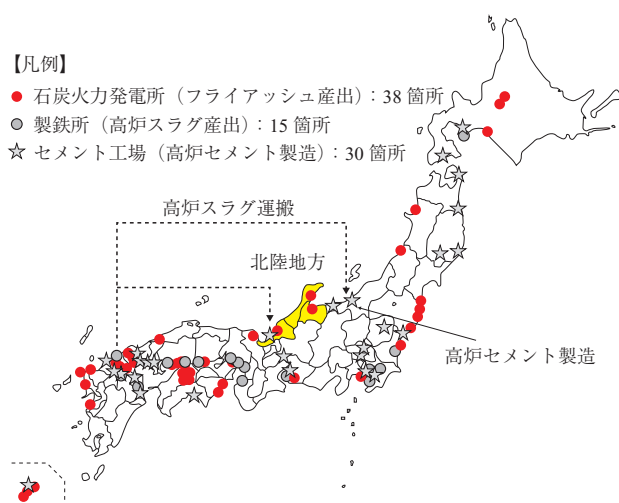


図 - 1 石炭火力発電所および製鉄所の位置図

そのような状況下で、北陸地方の大学、生コン工業組合、電力会社および国・自治体との産学官連携により、「北陸地方（富山・石川・福井）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：金沢大学教授 鳥居和之）」が 2011 年 1 月に設立された³⁾。とくに、北陸地方では、アルカリシリカ反応（ASR）と塩害（凍結



*1 Kazuyuki TORII

金沢大学理工研究域
環境デザイン学系 教授



*2 Saiji FUKADA

金沢大学理工研究域
環境デザイン学系 教授



*3 Tuan Minh HA

金沢大学大学院 自然科学
研究科 博士後期課程



*4 Kazuhiro KOBAYASHI

(株)ピーエス三菱 名古屋支店
金沢営業所 所長

防止剤)によるコンクリートの早期劣化対策が喫緊の課題であり、コンクリート構造物の高耐久化を目的とした、FAコンクリートの標準化が前述の産官学より構成される委員会の活動³⁾のなかで望まれていた⁴⁾。2017年3月、北陸新幹線敦賀延伸工事の本格的な着工を控え、鉄道建設・運輸施設整備支援機構(JR-TT)の土木工事標準示方書にFAコンクリートが新たに採用され、本工事にて実際に使用できるようになった。

そこで本稿では、最初に、北陸地方におけるFAコンクリートの標準化の経緯について紹介する。次に、FAコンクリートを使用したプレテンション方式PC桁の研究開発の一環として実施した、FAコンクリートを使用したPC桁のASR抑制効果と耐荷性の検証試験、さらに高耐久性PC桁の地域実装⁴⁾について概説する。

2. 高品質フライアッシュの製造・供給体制

2.1 高品質フライアッシュの製造

フライアッシュ粒子の周囲に生成したポゾラン反応水和物(CSH)の電子顕微鏡画像(SE像)を写真-1に示す。これがコンクリートの強度発現や耐久性改善に寄与するものとなる。ポゾラン反応水和物(外部・内部)は1~2 μ mのCSH(小さいCa/Si比が特徴)により形成されており、この層厚はフライアッシュの粒径に無関係で、ほぼ同一であった。このことから判断すると、フライアッシュのポゾラン反応は、フライアッシュに含有される石英やムライトなどの結晶相とは生じず、ガラス相(アルミノシリケート)のみと生じている。したがって、ガラス相の多い鉱物組成(化学成分分析によるSiO₂含有量とは直接関係ない)ほど、また粒径が細かいものほど、フライアッシュのポゾラン反応性が優れることが判明した。

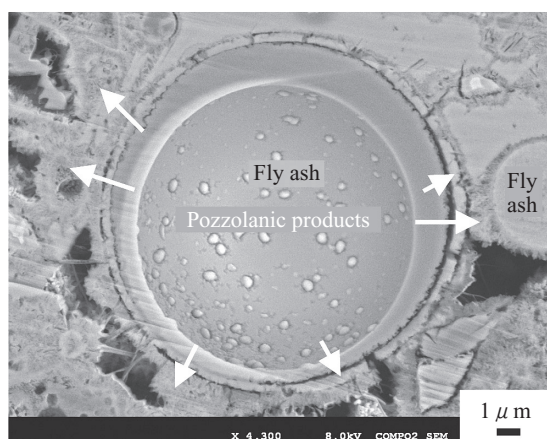


写真-1 フライアッシュ粒子の周囲に生成したポゾラン反応水和物(CSH)のSE像

したがって、フライアッシュの品質保証には、フライアッシュの物理的・化学的な性質の変動を小さくするとともに、フライアッシュ自身のポゾラン反応性を改善することが要求された⁵⁾。このような目的で、北陸電力・七尾大田および敦賀の石炭火力発電所では、フライアッシュの原料炭をオーストラリアからの瀝青炭のみに選別する工程と、

そこで採取したフライアッシュ原粉(JIS II種灰)をさらにサイクロンの空流選別による工程を取り入れ、高品質なフライアッシュ(以下、分級フライアッシュ)の製造技術を確認した。分級フライアッシュは、均一な細かい粒径(平均粒径:7 μ m, 原粉の1/3)の球形粒子から構成されているのが特徴である。現在、フライアッシュの分級化作業では、プレーン粉末度を1000cm²/g増大させることを目標にしている。この条件での分級フライアッシュの捕捉率は50%となり、経済的(セメント価格の1/2以下)にも十分に成り立つものとなっている。

2.2 地域全域でのフライアッシュの供給体制

七尾大田および敦賀の石炭火力発電所では、それぞれ年3万トンの分級フライアッシュがすでに製造可能となり、それぞれの県内に中継サイロを設けることにより、七尾大田産のものは富山県、石川県、新潟県の一部(JR東日本の新潟駅高架化工事などでFAコンクリート(約20万m³)が使用されている)に、また敦賀産のものは主に福井県に供給されている。

FAコンクリートをさらに普及させるためには、地域全域にて安価でかつ安定的に利用できることと、毎月の基本物性データをユーザーにすべて提供することが重要であると考えている。

2.3 FAコンクリート配合設計・施工指針

レディーミクストコンクリート(JIS A5308)では、耐久性向上(塩分浸透とASR抑制効果)との関係から、FAコンクリートの配合設計において、セメントに対する置換率を内割り15%と統一し、必要に応じて、砂置換(5~7%)と併用することを推奨した。これが地域標準化(汎用化)における基本配合となった。さらに、普及のために、FAコンクリートの配合設計・施工指針(富山、石川、福井版)を2013年に刊行した³⁾。なお、本マニュアルは北陸電力ホームページから自由にダウンロードできる。

3. FAコンクリートによるASR抑制効果

3.1 PC桁に発生したASRひび割れの特徴

わが国では、ASR抑制対策(1986年)以後、ASR発生が減少してきた。これにはセメント原料のうち粘土の多くが石炭灰に代替されるようになり、セメントのアルカリ量が0.6%程度まで低下してきたことが関係している。その一方で、石川県能登産の安山岩砕石や富山県産の河川骨材を使用したコンクリート構造物では、現在でもASRが一部に発生している。最近の調査では、使用骨材の反応性の大小と組成ベシマム(反応性・非反応性骨材の組合せにより、アルカリ量が少なくてもASRが発生する現象)の影響により、アルカリ総量が2.2~2.4kg/m³の条件で、実際にASRが発生していることが確認されている。

プレテンション方式PCホロー桁で発生したASRによるひび割れを写真-2に示す。このPC桁は石川県内の工場で作られたものであるが、骨材には富山県庄川産の河川骨材が使用されていた。石川県および富山県の市町村道に使用されており、とくに昭和50年代に架設されたものにASRが発生していた。プレテンション方式PC桁では、

下フランジの側面および下面において、橋軸方向に卓越したひび割れが発生しているのが特徴であった。これまでの調査により、プレテンション方式 PC 桁でも、I 桁や T 桁のひび割れは表面に留まっており、耐荷力や使用性がほとんど低下していないが、ホロー桁は中空部に水が滞留することにより、深刻な ASR が発生していた。PC ホロー桁から採取したコンクリート片の偏光顕微鏡による観察結果を写真 - 3 に示す。庄川産の陸砂に含有されている流紋岩質溶結凝灰岩と安山岩の一部に顕著な ASR の反応痕跡と膨張ひび割れが観察された。



写真 - 2 PC ホロー桁で発生した ASR によるひび割れ

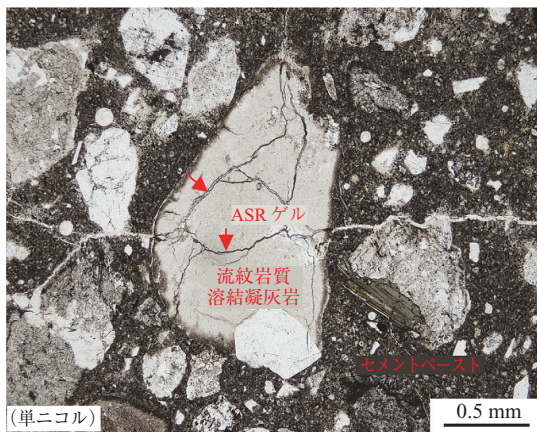


写真 - 3 PC ホロー桁から採取したコンクリート片の偏光顕微鏡による観察結果

3.2 FA コンクリートの ASR 抑制効果の検証

北陸地方の代表的な反応性骨材である、富山県常願寺川産の川砂および川砂利（安山岩粒子がそれぞれに 30% 含まれる（ペシマム混合率とほぼ一致））を使用して、コンクリートプリズム試験（CPT）を実施した。CPT 試験体（75 mm × 75 mm × 250 mm）は、アルカリ総量を NaOH 溶液の添加により 5.5 kg/m³ に調整した後に、試験体をステンレス製の容器に入れ、湿度 95% 以上、温度 60℃ の条件で促進養生した⁶⁾。コンクリートの配合は、単位セメント量を 320 kg/m³、水結合材比を 50%、細骨材率を 45% とし、FA コンクリートでは普通ポルトランドセメントの 15% を内割り置換した。なお、非反応性骨材としてほぼ同じ粒径の石灰石砕砂と石灰石碎石を使用した。常願寺川

産の川砂および川砂利を使用した CPT（材齢 26 週）の膨張率の変化を図 - 2 に示す。ここでは、カナダの基準（CSA）を参考にして、コンクリートの膨張率が 0.04% を「有害」と「無害」との閾値とした。

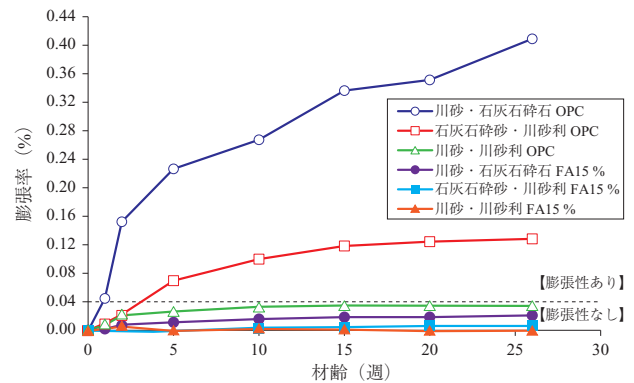
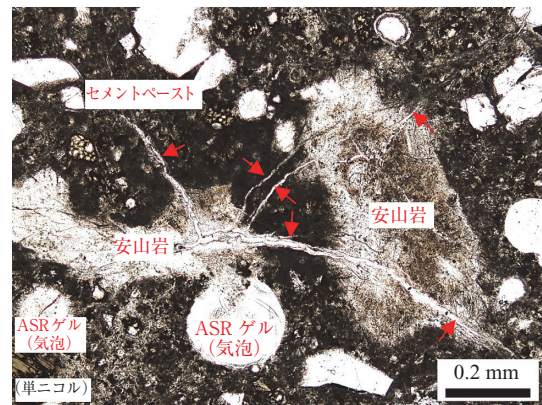
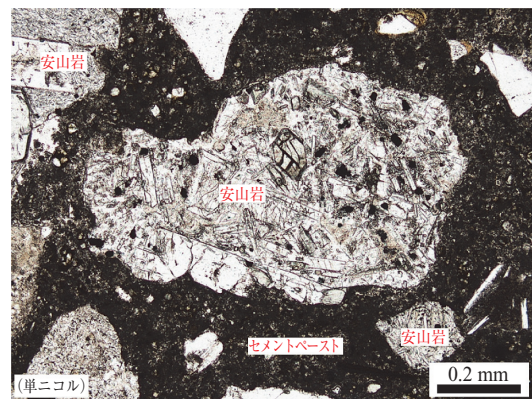


図 - 2 CPT（材齢 26 週）の膨張率の変化



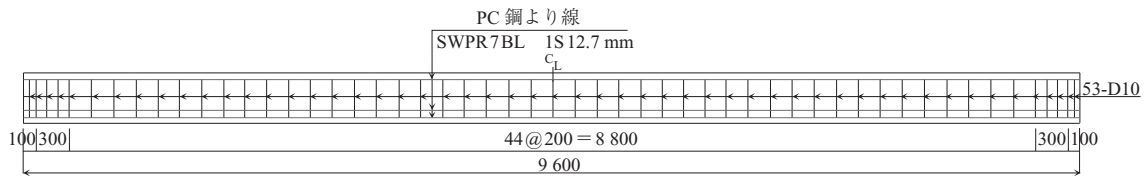
(a) 川砂・石灰石碎石



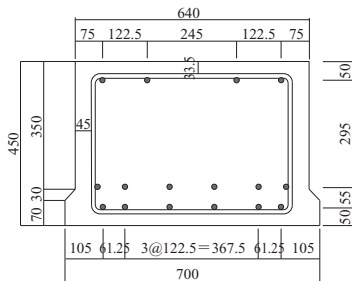
(b) 川砂・石灰石碎石 (FA 15%)

写真 - 4 コンクリート片の偏光顕微鏡による観察結果

これより、コンクリートの膨張率は川砂・川砂利 < 石灰石砕砂・川砂利 < 川砂・石灰石碎石の順番で大きくなり、反応性・非反応性骨材の組合せによる組成ペシマムの影響を明確に確認できた。また、FA コンクリート（置換率：15%）はいずれの細・粗骨材の組合せにおいても「無害」と判定された。細・粗骨材の組合せによる組成ペシマムは



(a) 側 面



(b) 断 面

図 - 3 PC 桁の一般図 (単位 : mm)

アルカリ量との関係で相違する。しかし、RILEM-AAR4に準じたアルカリ量 (5.5 kg/m³) は実際の構造物でのほぼ最大のものであることから、FA コンクリートは組成ベシマムをもつ、北陸地方の川砂や陸砂の ASR 抑制対策として有効であることが確認できた。コンクリート片の薄片研磨試料の偏光顕微鏡による観察結果を写真 - 4 に示す。川砂・石灰石砕石の組合せは、川砂中の安山岩が激しく反応しており、骨材からセメントペーストに多数の膨張ひび割れが進展していた。それに対して、FA コンクリートではいずれも ASR が効果的に抑制されていた。

4. 高耐久プレテンション方式 PC 桁の研究開発

4.1 高耐久プレテンション方式 PC 桁の暴露・荷重試験

PC 桁は実物大の JIS A 5373-AS09 桁とした。側面図および断面図を図 - 3 に示す。桁長は 9 600 mm、断面は上縁幅 640 mm、下縁幅 700 mm、高さ 450 mm である。PC 鋼材は SWPR7BL 1S12.7 mm の PC ケーブルを上縁 4 本、下縁 12 本配置した。3.2 で示した常願寺川産の川砂および川砂利を使用して、早強ポルトランドセメントにフライアッシュを 15% 混入した PC 桁 (以下、FA 試験体) と混入しない PC 桁 (以下、H 試験体) の 2 種類を作製した。H 試験体および FA 試験体に使用したコンクリートの配合を表 - 1 に示す。PC 桁は、打設後に蒸気養生 (温度 50℃) を行ったのち、打設後 14 時間経過後にプレストレスを導入し、約 1 週間屋内にて湿潤養生した。初期養生終了後、金沢大学の構内の日当たりの良い場所に約 1 年半、屋外で暴

露した⁷⁾。

暴露試験終了時の H 試験体の ASR によるひび割れの発生状況を図 - 4 に示す。H 試験体のひび割れとして、側面では下側 2 段と上段の PC 鋼線に沿って、上面では上段側面側の PC 鋼線に沿って桁軸方向のひび割れが生じている。また、桁軸方向では PC 鋼材の付着伝達長の影響によりプレストレスが導入されない桁端部において亀甲状のひび割れが主に観察された (写真 - 5)。また、上面においては、日射および降雨による水分供給の影響により、ASR の反応が助長され、上面での膨張量が下面に比べて大きくなったことに加え、PC 鋼材の配置として、下段側に多く鋼材を配置しているため、H 試験体のみ大きな上反り (約 14 mm) が発生していた。

一方、FA 試験体のひび割れは、プレストレスが導入されていない桁端部と側面のごく一部のみであり、FA コンクリートによる確実な ASR 抑制効果が実物大 PC 桁でも確認できた。

曲げ荷重試験における PC 桁の荷重と鉛直変位の関係を図 - 5 に示す。

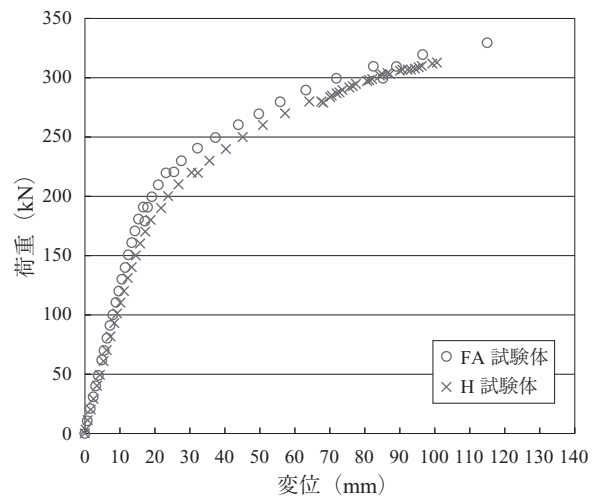


図 - 5 荷重荷重と鉛直変位 (支間中央) の関係

表 - 1 H 試験体および FA 試験体に使用したコンクリートの配合

種別	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						SP (B × %)	AE (B × %)
			水 W	結合材 B		細骨材 S	粗骨材 G	NaCl		
				セメント C	フライアッシュ FA					
H 試験体	38.7	46.3	150	388	—	822	955	25.5	1.00	0.006
FA 試験体	34.8	44.6	150	366	65	770	955	25.5	1.20	0.02

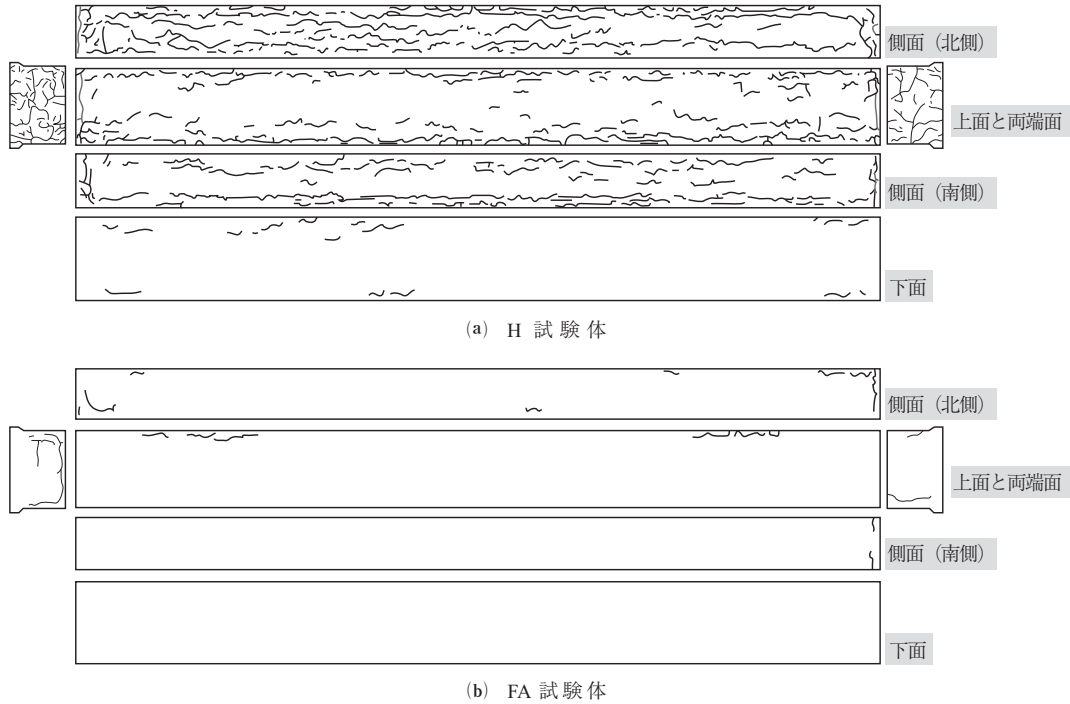


図 - 4 暴露試験体の ASR ひび割れ展開図



写真 - 5 桁端部における亀甲状のひび割れ (H 試験体)

弾性域での曲げに関する剛性の違いについて、荷重-変位関係の傾きを調べた結果、H 試験体および FA 試験体の 50 kN 荷重時は、それぞれ 11.5 kN/mm および 12.8 kN/mm となっており、ASR ひび割れによる影響で、約 10% の違いが見られた。また、荷重試験による H 試験体および FA 試験体の終局荷重と変位は、H 試験体の方が終局荷重で約 5% 程度、変位で約 10% 程度小さいことから、H 試験体では ASR の影響により強度および剛性が低下していることが判明した。

4.2 FA コンクリートを使用した高耐久 PC 桁の地域実装

北陸地方では、ASR 抑制対策だけでなく、凍結防止剤による鋼材腐食の観点からも、PC 桁の高耐久化が課題とされていた。また、北陸地方には、石川県七尾市と福井県敦賀市に PC 桁の製造工場があり、両工場はフライアッシュの供給元 (石炭火力発電所) にそれぞれ隣接し、FA コンクリートの PC 橋梁への活用は「地の利」に適合していた。このような状況を背景にして、FA コンクリートを使用したプレテンション方式 PC ホロー桁に関しては、石川県宮

坂橋歩道橋 (写真 - 6, 2014 年 9 月架設, 七尾大田産分級フライアッシュ使用⁸⁾) と福井県大月橋 (写真 - 7, 2016 年 7 月架設, 敦賀産分級フライアッシュ使用) が相次いで完成した。さらに、FA コンクリートを使用したプレキャスト PC 床版に関しても、北陸電力、富山 LNG 火力発電所の LNG 船着岸棧橋工事 (ASR および塩害 (海水) 対策) と北陸自動車道路、日野川橋の RC 床版更新工事 (ASR および塩害 (凍結防止剤) 対策) が 2016 年 11 月に完成した⁴⁾。



写真 - 6 宮坂橋歩道橋 (石川県)



写真 - 7 大月橋 (福井県)

一方、ポストテンション方式PC橋梁への利用拡大に関しては、JR-TTの新たなASR抑制対策（2017年4月通達）により、手取川や九頭竜川産の骨材は多くが「準有害」と判定されるので、アルカリ総量が 2.2 kg/m^3 を超える高強度レベルの配合では、FAコンクリートまたは高炉セメントコンクリートの使用が義務づけられることになった。最近のセメントの実績から、セメントのアルカリ量は0.6%程度（セメント会社の工場によりばらつきがある）と推定できるので、単位セメント量で 360 kg/m^3 程度がアルカリ総量の閾値になる。したがって、北陸新幹線の橋梁上部工やポストテンション方式PC桁の工事では、今後、FAコンクリートによる現場打設を前提にしたASR対策が必要とされる。この際に、JR-TTはコンクリートの空気量を5.5%（寒冷地仕様）に設定しており、高強度FAコンクリート（40Nクラス）での配合設計、とくに空気量管理の課題（たとえば、化学混和剤（高性能AE減水剤とAE助剤）の相性、夏期打設での空気量の時間変化など）を早急に解決しなければならなくなった。この課題の解決に向け、現在生コン工場では輸送時のスランプと空気量の変化を考慮し、夏、冬配合の決定を進めている。

5. おわりに

北陸地方におけるFAコンクリートのさらなる普及における課題についてまとめると、以下のようである。

コンクリート構造物の耐久性向上の観点からFAコンクリートと高炉セメントコンクリートのどちらを優先するかは、それらの地域の流通に委ねるべきであり、経済的合理性から判断すると、日本海側の地域ではFAコンクリートの積極的な活用が望ましいと考えている。また、さらなる普及の前提として、少なくとも、石炭火力発電所は分級装置などの設置により、高品質のフライアッシュの品質保証と供給体制の確保に今後とも努めるべきであり、その費用は「地域貢献」と「石炭灰処理費用」の観点から電力会社が担うべきものであると考えている。この1、2年で、北陸3県でのFAコンクリートのJIS認証取得工場数が増大し、図-6に示すように、全体の約60%にも達している。それには、2017年度から本格化した北陸新幹線金沢・敦賀間の延伸工事でのFAコンクリートの採用への期待がある。ただし、生コン工場のJIS認証取得は品質保証の最低レベルであり、良質なFAコンクリートの安定供給のためにはさらなる研鑽が必要とされる。

現状では、生コン工場間での技術レベルに大きな差があるのも事実である。最後に、FAコンクリートの普及のための私見として、①生コン工場でのサイロ、計量設備などの整備への支援（1工場あたりサイロや計量器で約1500万の設備投資の負担）、②発注者（JR-TTや県）が設計に取り入れるための工事仕様書への記載（産官学での積極的な関与の姿勢）、③FAコンクリートの適切な価格設定と協同販売制度の見直し（良いものにはそれ相当の価格が必要であり、すべて同一の価格は不平等、開発意欲を削ぐ）、を述べておきたい。

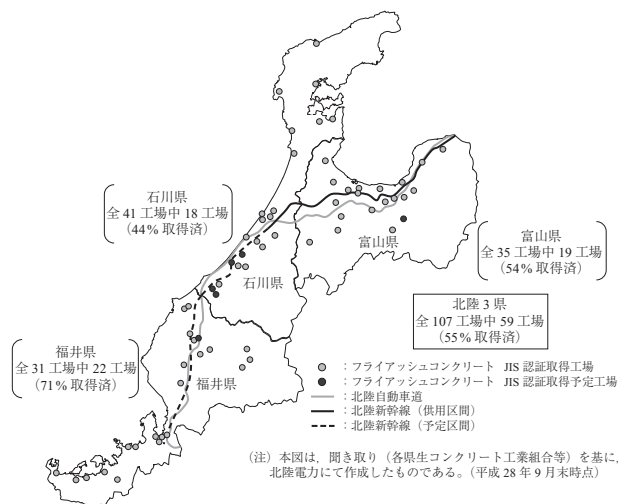


図-6 北陸3県でのFAコンクリートのJIS認証取得工場数

謝 辞

本研究は、内閣府・科学技術振興機構（JST）による戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として実施したものである。また、本研究を実施するにあたり、北陸電力(株)、(株)日本ピーエスの各社よりご協力とご支援をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 鳥居和之：フライアッシュコンクリートの地域標準化と北陸地方での実装，土木学会誌，Vol.102，No.7，pp.34-35，2017。
- 2) 鳥居和之，橋本徹：今，何故，北陸地方でフライアッシュコンクリートなのか，セメントコンクリート，No.810，pp.18-23，2014。
- 3) 「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・福井版），2013。
- 4) 鳥居和之，深田宰史，浦修造：フライアッシュコンクリートを使用した高耐久プレキャストPC床版の開発と社会実装，プレストレストコンクリート，Vol.58，No.2，pp.96-103，2017。
- 5) 久保哲司，参納千夏男，蟹谷真生，鳥居和之：フライアッシュコンクリートの社会実装を目的とした技術開発 -北陸地方での経緯と実績-，コンクリート工学，Vol.54，No.9，pp.914-919，2016。
- 6) 菊地弘紀，山戸博見，広野真一，鳥居和之：細・粗骨材の組み合わせの組成ベシマム現象によるASR劣化事例の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1041-1046，2016。
- 7) 深田宰史，Ha Minh Tuan，小林和弘，鳥居和之：フライアッシュ混入が反応性骨材を用いたPC桁の耐荷力性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.355-360，2017。
- 8) 山村智，桜田道博，小林和弘，鳥居和之：フライアッシュコンクリートのPC橋梁への適用に関する実用化研究，プレストレストコンクリート，Vol.57，No.5，pp.46-53，2015。

【2017年8月23日受付】