

総 説

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—

鳥 居 和 之

別 刷

電 力 土 木 1月号 (No. 357)

社団法人 電力土木技術協会

# 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—

鳥居 和之\*

**概要** 北陸地方では、石炭火力発電所からの副産物であるフライアッシュの活用によりコンクリートの高耐久化(塩害や ASR の抑制対策)を目指す取り組みが始まっている。現在でも ASR による劣化が顕在化している現状を考慮すると、さらに一步踏み込んで、地域指定(ローカルルール)を導入して、コンクリートにフライアッシュセメントを積極的に使用することが推奨される。この事業を推進するためには、電力会社や国・地方自治体、生コンクリート工業組合などの理解と協力が不可欠であり、平成23年1月に産学官連携による「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検討委員会」を立ち上げた。本稿では、コンクリートの高耐久化のうち、ASR 問題に焦点をしぼり、その経緯と活動状況について紹介する。

**キーワード:** フライアッシュ、有効利用、コンクリートの高耐久化、ASR、産学官連携

## 1. 北陸地方が抱える、深刻な ASR とは

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の維持管理の問題に関連して、経済的かつ合理的な補修・補強の技術開発が重要な課題となっている<sup>1)</sup>。北陸地方の塩害に関しては、川砂、川砂利がコンクリート用骨材として使用されてきたことから、西日本の各地のような、海砂、海砂利による塩害(内在塩分)は発生していないが、冬期における日本海からの北西の季節風や道路に散布される凍結防止剤による塩害(外来塩分)が次第に顕在化してきている。一方、北陸地方は、河川の上流部に白山や立山などの火山があり、それらから河川に流入する火山岩(安山岩や流紋岩)によりほぼ全域で ASR による被害が発生している<sup>2)</sup>。図-1は北陸地方の ASR 劣化橋梁の分布図を示したものである。北陸地方を網羅した、全域の調査がほぼ終了し、河川水系ごとの岩石構成率やコンクリートの ASR 劣化度を把握できた。個人的には、新潟県や岐阜県などの地域の ASR も調べているが、残念ながら、ASR 劣化橋梁マップの作成はできていない。常日頃、ASR 劣化橋梁の維持管理では、反応性骨材の岩石学的特徴とコンクリートの ASR 劣化度との関係を地域ごとに明らかにすることが必須であると指摘してい

る。しかし、これはかなりの経験と岩石学などの知識を必要とする分野であり、ゼネコン、コンサルタント、さらに大学などの研究機関にもこの分野の人材が育っていない。

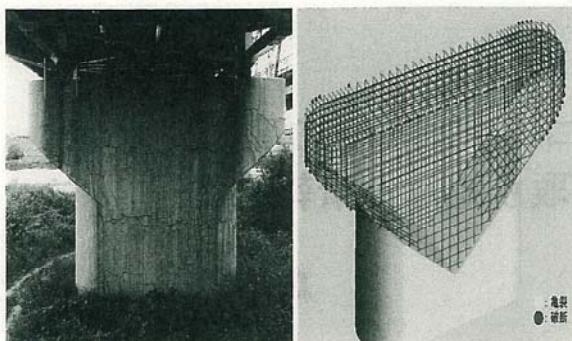
北陸地方では、能登半島全域で安山岩碎石が使用された経緯があり、能登有料道路や国道249号などで鉄筋破断をともなう、深刻な ASR が発生している<sup>3)</sup>。現在、能登半島の一部の地域では、骨材を新潟県からの石灰石に変更するようになっているが、奥能登地域では今後とも安山岩碎石に頼らざるを得ない実情がある。また、ここ4年間ほど、中日本高速道路と共に、北陸自動車道の約30の橋脚・橋台からコアを採取して、各地域の構造物の ASR 劣化度を実際に調べてきた。北陸地方の河川水系ごとに ASR の特徴を比較した調査結果より、とくに富山県の常願寺川、神通川の全域、石川県の手取川の上流域、福井県の九頭竜川の上流域からの河川産骨材が高い反応性を示す



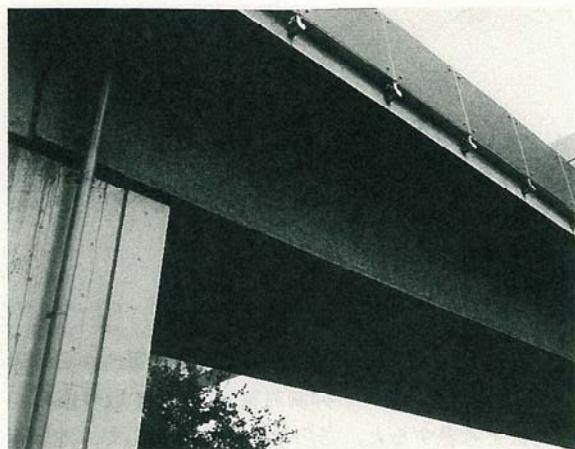
鳥居 和之



図-1 北陸地方の ASR 劣化橋梁の分布図



写真一1 鉄筋コンクリート橋脚のASR事例(富山県, 川砂利, OPC)



写真一2 ポストテンション式PC桁のASR事例(東京都, 陸砂, HOPC)

安山岩粒子を含有していることが明らかになった。この調査結果と対応するように、これらの河川産骨材を使用した地域では、写真一1に示すように、過大なASR膨張により鉄筋破断にまで至るものがあり、実際に神通川の2,3の橋梁では橋脚の打替えが実施されている<sup>4)</sup>。このように、北陸地方の抱えるASR問題には、ASR劣化構造物に対する、当面の補修・補強をどうするかの問題とASRそのものを発生させない、本質的な、予防的対策をどうするかの問題、との両面がある。

## 2. ASR抑制対策の問題点とは

JIS A5308(レディミクストコンクリート)によるASR抑制対策は、(1)化学法(JIS A1145)またはモルタルバー法(JIS A1146)で「無害」と判定された骨材を使用する、(2)コンクリートのアルカリ総量を3kg/m<sup>3</sup>以下にする、(3)ASR抑制効果が認められる混合セメントを使用する、からなる。土木学会と建築学会でどの対策を重視するかの順番が多少相違するが、基本的な対策の考え方は同じである。また、JR東日本のように、鉄道施設でのASR発生の状況を踏まえて、工事仕様書などにより厳しい、独自の対策を取り入れる動きもある。一方、ASRは骨材中の岩石に起因するものであり、当然、「所変われば、品変わる」、きわめて地域性の高い劣化現象である。このことが塩害対策と大きく異なっており、わが国で認識が欠落している点でもある(JISによる全国一律の規格や対策がなじまないのである)<sup>5)</sup>。ASR抑制対策について少し解説を加えると、(1)に関しては、わが国では化学法(JIS A1145)が偏重されてきた経緯があるが、化学法により骨材を「無害」と「無害でない」とに工学的に区別することはあまり意味がないものである。ASTM C289の解説には、化学法で適切に判定できない岩石名(石灰石、粘土鉱物や鉄化合物などを含有するものなど)が記載されているが、何故かこれがいつの間にか忘れられている<sup>6)</sup>。(2)に関しては、外部環境や骨材自身からのアルカリの影響が考慮されていないだけでなく、総量規制値そのものの妥当性が再検証されてこなかった。写真一2は東京の臨海副都心でのASRの発生事例である。この地域では橋梁や舗装、建築物などに新たなASRが発生している。実際、PC舗装の事例ではコンクリートのアルカリ量が2.2kg/m<sup>3</sup>と総量規制値以下

であった。この原因は反応性骨材がオパールを含有する砂であったことによるものである。北陸地方でも、河川水系ごとに反応性の岩石の種類とその量が相違していることから判断すると、当然、化学法の結果のみで骨材のアルカリシリカ反応性を正確に判定することは困難である。とくに、常願寺川産の骨材などには、高い反応性をもつ、クリストバライトやオパールを含有する安山岩粒子が混入しており、この場合にはアルカリ総量値を遵守してもASRが発生する可能性がある。従って、(1), (2)の対策の不確さを考慮すると、(3)の対策が最も有効なものであると考えられる。すなわち、骨材のASR試験法の信頼性や骨材の岩石混入のばらつきを考慮すると、高い反応性の岩石が混入する可能性があることを想定した対策が必要であり、このことは北陸地方にてコンクリートへの混合セメントの使用を「標準化」することに他ならない<sup>7)</sup>。

## 3. 何故、今、フライアッシュなのか

国土交通省などのグリーン購入制度の普及により、混合セメントの1つである高炉セメントB種はセメント全体の23%まで普及してきている。しかし、高炉セメントB種の原料である高炉スラグ微粉末は、首都圏近郊や大阪、名古屋、北九州などに生産が限られており、日本海側の地域ではまったく生産されていない事情がある。また、シリカフュームセメントは、アイスランドでのASR対策の実績より、5%程度の添加で抑制効果があることが知られているが、全量輸入による供給と価格の関係から、100N/mm<sup>2</sup>クラスの超高強度コンクリートへの用途に限られている。このような現状を考えると、日本海側の地域では、未利用資源の有効利用の観点からも、石炭火力発電所から産出するフライアッシュのコンクリートへの活用に積極的に取り組むべきであると言える<sup>8)</sup>。実際に、東北地方の日本海側の秋田県でも地域でのフライアッシュの活用に取り組んでいると聞いている。両者に共通するキーワードは、「地産地消」と「環境負荷」である。

東日本大震災では、多くの方々が亡くなられるとともに、海岸付近の橋梁や建築物が津波により跡形もなく流失した。これまでの土木・防災技術の限界に対して、「無念」

の気持ちを抱いている。その後、原子力発電所の多くは運転停止となり、再開のめどが立っていない。その間も、石炭火力発電所はフル稼働を続けている。北陸地方では、この夏、使用電力量の約半分を石炭火力発電所で賄ってきた。自然再生エネルギーの議論はさておき、当面は、埋蔵量が豊富な石炭に頼らざるを得ない状況がしばらく続くものと想定している。この際に、石炭灰の処理やその有効利用が今まで以上に切迫した課題となる。同時に、石炭灰を原料に受け入れてきたセメントの生産量が公共工事の減少で縮減しているという社会情勢を踏まえると、今まさに、フライアッシュをいかに活用するかの能力と意思が問われている。従来、コンクリートへのフライアッシュの使用実績はせいぜい2~3%程度であった。何故に使われていないのか。この答えは明確であり、フライアッシュの品質(化学成分や粉末度)が、石炭の種類やボイラーの形式、燃焼温度などの影響により、大きくばらつくことに理由があった。コンクリート製造者からは、とくに日々変動する残留炭素量(強熱減量値)の影響で、コンクリートの空気量が安定せず、「暴れるフライアッシュ」として敬遠されてきた。この問題を解決するためには、まず、コンクリート製造者の「トラウマ」をなくし、フライアッシュの信頼性を取り戻すことが必要であると感じた。

#### 4. フライアッシュの供給体制と品質保証は

平成23年1月、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検討委員会(委員長:鳥居和之)」が発足し、北陸地方でのコンクリートへのフライアッシュセメントの標準化と供給体制の確保を諂るための取り組みが始まった。北陸地方で稼動している石炭火力発電所の立地図を図-2に示す。北陸地方(富山県、石川県、福井県)には、それぞれの県に石炭火力発電所があるが、良質なフライアッシュを安定的に供給できるのは、ボイラーの形式とその燃焼温度の関係から、石

川県の七尾大田火力発電所と福井県の敦賀火力発電所である。このため、富山、石川の両県を七尾大田火力発電所から、福井県を敦賀火力発電所からと決めて、北陸地方の全域へ供給できるように、フライアッシュの中継基地を配置した。さらに、次の段階では、新潟県糸魚川市や福井県敦賀市のセメント工場へフライアッシュを直接輸送し、フライアッシュセメント(B種)としての供給する体制を視野にいれている。この体制が整えば、地域内でのセメントの輸送コストを大きく削減できるなどの利点がでてくると期待している。

一方、フライアッシュの品質保証に関しては、その物理的・化学的性質の変動を小さくすることと、ポゾラン活性を増大させる、の2点が要求される。これに対応するために、石川県の七尾大田火力発電所では、図-3に示すように、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をさらにサイクロンで分級化する工程により、高品質のフライアッシュを製造する技術が導入された。現在、年3万トンのフライアッシュがすでに生産されている。写真-3にフライアッシュの粒子形状を示す。フライアッシュには、空隙の多い粒子やいびつな形状の粒子が観察されず、ほぼ均一な粒径の球形粒子からなっている。また、ここで



図-2 北陸地方の石炭火力発電所の立地図

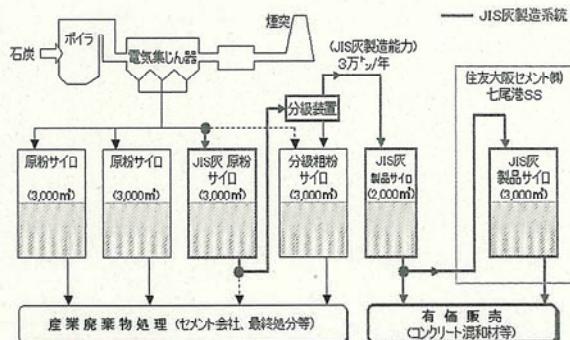


図-3 高品質フライアッシュの製造工程(七尾大田火力発電所)

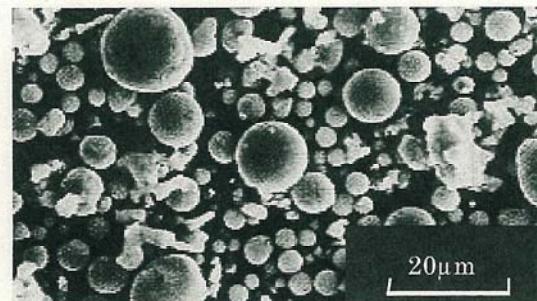
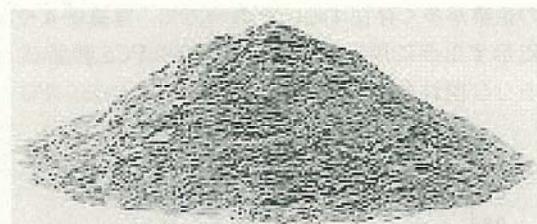


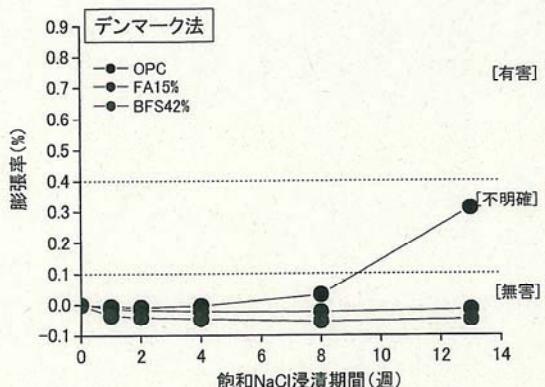
写真-3 フライアッシュの粒子形状(ほぼ均一な、球形の細粉粒子)

のフライアッシュの品質変動を見ると、強熱減量値が2%以下、活性度指数が90%以上(28日材齢)及び100%以上(91日材齢)を満足する、高品質なフライアッシュ(JIS A 6201 I種灰相当品)を安定的に供給できるようになっている。さらに、平成24年度夏には、福井県の敦賀石炭火力発電所でも同様なフライアッシュの製造装置が稼働し、年3万トンを福井県に供給できる予定である。

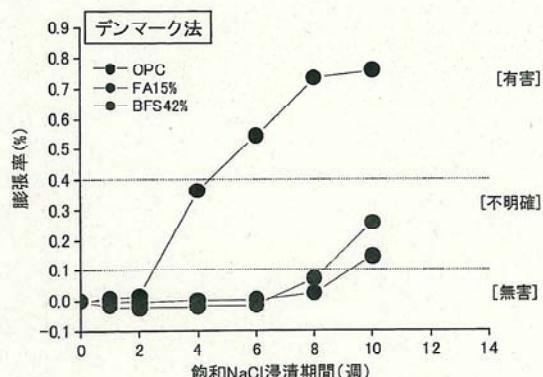
### 5. フライアッシュコンクリートのメリットは何か

フライアッシュコンクリートを標準化する目的は、50年(または100年)の耐用年数が保証できる、高耐久的で、かつひび割れ発生の少ない、良質なコンクリートを地域に提供することである。まず、通常のコンクリートへの普及を目指して、富山県、石川県の代表的なコンクリート会社4社を選定し、 $27 \text{ N/mm}^2$  クラスの標準配合にて工場の骨材と化学混和剤を使用するという条件で、フライアッシュ(七尾大田火力発電所)を15%添加(内割)したコンクリートの試験練りと実機試験を実施した。その結果、(1)コンクリートの単位水量を $5 \text{ kg/m}^3$  から $10 \text{ kg/m}^3$  低減するとともに、ブリーディングが減り、練り上がり状態が良好になる、(2)コンクリートの28日材齢強度はOPCやBBとほぼ同程度であるが、56日材齢以後の強度が上回る、ことが確認できた。これらの試験結果を受けて、生コン工場でのJIS認証の取得と富山県、石川県の建設工事での試験施工を順次始めている。同時に、金沢大学と金沢工業大学とで実験を手分けして、ASR抑制効果、塩分浸透・鋼材腐食抑制効果、ひび割れ抵抗性(水和熱、乾燥収縮)などの基礎的な技術資料を精力的に収集している。図一4及び図一5に石川県能登産安山岩碎石及び富山県常願寺川産川砂利を対象に実施した、促進モルタルバー法(水中養生( $20^\circ\text{C}$ )28日後、 $50^\circ\text{C}$ の飽和NaCl溶液に浸漬)の結果を示す。OPCモルタルは、NaCl溶液が浸透するとともにモルタルが大きく膨張しているが、FA15%モルタルは長期にわたり膨張が抑制されていることが明らかになった。

また、北陸地方には、地場産業としてPC橋梁やPCa製品の企業が多く存在する。その一方で、写真一4や写真一5に示すように、工場製作のPC桁やPCa製品のASRによるひび割れ発生が新たな問題になっている。PC橋梁



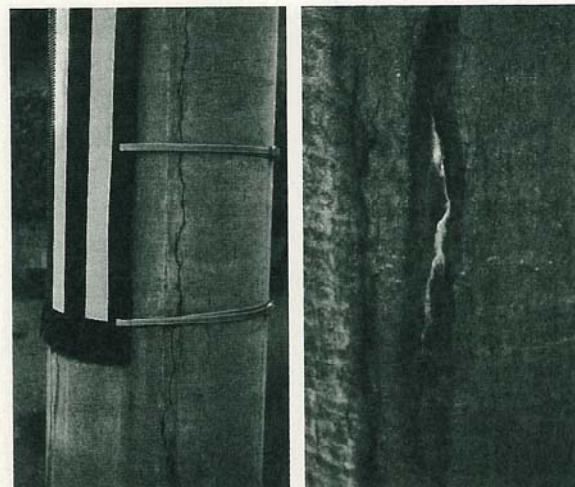
図一4 安山岩碎石を使用したモルタルバー(デンマーク法)の膨張挙動



図一5 常願寺川産川砂利を使用したモルタルバー(デンマーク法)の膨張挙動



写真一4 プレテンション式PCホロー桁のASR事例(石川県, 川砂利, HOPC)



写真一5 電柱のASR事例(富山県, 川砂, HOPC)

やPCa製品では、高強度( $50 \text{ N/mm}^2$  クラス)で、蒸気養生またはオートクレープ養生を実施するので、生コンクリート関係とは別途のASR対策が要求される。現在、地元の企業との共同研究で、フライアッシュを活用したPC桁やPCa製品の製造技術と部材の性能評価に関する検討を始めている。このような地域に根ざした、独自なフライアッシュコンクリートの技術開発は独創性かつ意欲的なも

のであり、「地域産業の育成と活性化」にも寄与できるものと自負している。

## 6. おわりに

コンクリートの耐久性に関する問題を解決する目的で、フライアッシュコンクリートを北陸地方に根付かせ、さらに標準化するという取り組みが始まった。この取り組みでは、高品質フライアッシュの製造技術と供給体制、品質保証から始まり、生コンクリート工場での実際の製造技術を指導するとともに、コンクリートの実務者が使いやすい「技術資料集(マニュアル)」の策定を目指している。フライアッシュコンクリートの試験練りを始めた当初は、正直、生コンクリート工場の現場サイドには「とまどい」と「不安」があったが、実際に使ってみると、意外と難しい材料ではないことが分かり、うまく「トラウマ」を払拭できたと感じている。私の持論は、「ローカルな材料をローカルなルールに基づいて使いこなす」ことである。その一方で、フライアッシュの利用促進に関しては、スランプや空気量、設計基準強度の全国統一的な規格(JIS)を見直し、フライアッシュの利点を活かせる、使い勝手が良いものに変更していくべきであると考えている。微力ながら、このことを今後とも学会などで訴えていきたい。

最後に、この原稿をあわただしく書いている際にも、大きな動きがあり、志賀原子力発電所の「安全強化策」の1つとして構築する防潮堤のコンクリートにフライアッシュを使用することが決定した。コンクリート躯体は拘束の大きな、マスコンクリートとなるので、温度ひび割れ対策が最も重要な課題となる。フライアッシュは七尾大田火力発電所からのものをセメント会社でフライアッシュセメントB種(17%)として製造し、地元の生コンクリート会社に提供することも決まった。平成23年10月から基礎の掘削工事に着工し、本格的な躯体コンクリートの打設は来年3月からになる。産学官連携の委員会及び作業部会の活動も忙しくなる。また、来週から1週間(平成23年10月)、タイの高速道路の現地視察とASR問題の講演のために、タイを訪問する。この訪問は、タイの高速道路の橋脚にASRによるひび割れが発生しており、その維持管理の技術指導を依頼されてのものである。タイのASRは花崗岩系の骨材(マイロナイト)が原因であるが、高温多湿の気候

がASRを促進しているようである。また、タイではフライアッシュによるASR抑制対策を検討中であるが、タイの国内では良質なフライアッシュが手に入らないと聞いている。「北陸から全国へと、さらに外国へと」、我々のフライアッシュコンクリートの技術情報が発信できると期待している。

## 謝 辞

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検討委員会」は、北陸電力が窓口になり、北陸地方の4大学(金沢大学、金沢工業大学、福井大学、富山県立大学)、国・地方自治体、生コンクリート工業組合など、多くの関係者にご参集いただいている。本委員会での活動にご協力いただき、深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 鳥居和之: コンクリートの長寿命化への提言, 橋梁と基礎, 42, 8, 2008, 82-84
- 2) 鳥居和之 他: 北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性, 土木学会論文集, 767/64, 2004, 185-197
- 3) 鳥居和之 他: 能登有料道路の基礎構造物のASR劣化とその対策, コンクリート工学, 46, 4, 2008, 27-33
- 4) 大代武志 他: 富山県のASR劣化橋梁の実態調査に基づくASR抑制対策および維持管理手法の提案, コンクリート工学論文集, 20, 1, 2009, 45-57
- 5) 鳥居和之: アルカリシリカ反応にいかに対応するか—試験、診断と対策の課題, セメント・コンクリート, 696, 2005, 1-9
- 6) 鳥居和之, 山戸博晃: 北陸地方における骨材の岩石・鉱物学的特徴とASR試験の適合性, セメント・コンクリート, 738, 2008, 53-56
- 7) 参納千夏男 他: 北陸地方産のフライアッシュによるアルカリシリカ反応の抑制効果, セメント・コンクリート論文集, 58, 2005, 233-239
- 8) 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, 48, 1, 2008, 44-48