

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

鳥居 和之*1・参納千夏男*2

1. はじめに

近年、橋梁の長寿命化計画の策定のための既設橋梁の現地調査が全国各地で始まっている。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に関連して、経済的かつ合理的な調査・診断と補修・補強の技術開発が重要な課題となっている。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）が顕在化してきている。一方、北陸地方は全国でも有数の ASR 劣化構造物が多く存在する地域である。ASR 劣化橋梁の実態調査の結果より、ASR 抑制対策として推奨されているアルカリ総量規制（ 3 kg/m^3 以下）を遵守した場合でも、骨材からのアルカリ溶出や反応性がきわめて高いクリストバライトやオパールを含有する安山岩のベシマム現象の影響により今日でも ASR が発生する事例があることや、外部環境から供給されるアルカリ（海水や凍結防止剤）の影響により長期にわたり鉄筋破断をとまなう深刻な ASR 劣化が発生すること、が明らかになってきている^{1),2)}。

ここでは、北陸地方の抱える ASR 問題の解決と反応性岩石を含む可能性がある骨材資源の活用を目指して、北陸地方で産出するフライアッシュの有効利用を目的とした ASR 抑制対策について提案する。

2. 北陸地方の反応性骨材の特徴と ASR の地域マップ

北陸地方の ASR 発生橋梁の分布図を図-1 に示す。北陸地方の ASR に関しては、ここ数年間に県、市町村での ASR 劣化橋梁の調査が進められてきた結果、福井県の九頭竜川流域での ASR 発生が新たに明らかになり、北陸 3 県をほぼ網羅した ASR 劣化橋梁の分布図を提示

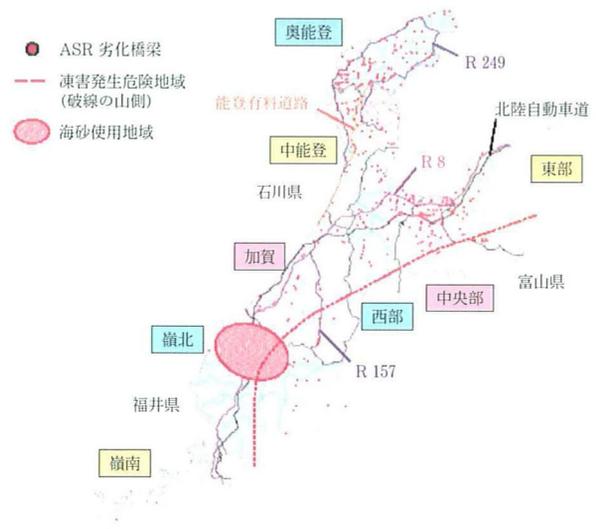


図-1 北陸地方の ASR 発生橋梁の分布図

できるまでになってきている。このような地域版 ASR マップの完成は全国的にも珍しいものである。一方、北陸地方の反応性骨材としては、能登半島で産出する安山岩砕石が広く知られているが、北陸 3 県でコンクリート用骨材として一般に使用されてきた河川産骨材（川砂、川砂利）にも火山岩起源（安山岩、流紋岩）や堆積岩起源（凝灰岩、チャート）の反応性の岩石が混入している。このため、図-1 に示すように、富山県の常願寺川流域、石川県の手取川上流域、福井県の九頭竜川流域を中心に、北陸 3 県のほぼ全域にて ASR が発生しているのが特徴である。我が国における現行の ASR 試験法（化学法（JIS A 1145）、モルタルバー法（JIS A 1146））の問題点とその限界については以前より指摘してきているが、北陸地方の河川産骨材の多くは化学法（JIS A 1145）によって「無害」と「無害でない」の境界線上に分布している¹⁾。このことは骨材の岩種構成率のわずかな違いによって判定結果が相違することを意味している。また、北陸地方の河川産骨材は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、当然ながら化学法の判定結果のみで骨材のアルカリシリカ反応性を正確に評価することは困難なことである。さらに、富山県産の河川産骨材には、たまたま高い反応性を示す

*1 とりい・かずゆき／金沢大学理工研究域環境デザイン学系教授（正会員）

*2 さんのう・ちかお／北陸電力(株)土木部（正会員）

クリストバライトやオパールを含有する岩石がごく少量混入することがあり、ASR に対して安全と考えられる骨材でも ASR が発生することもあり得る。このように、河川産骨材の採取地による岩種構成率のばらつきなども考慮すると、北陸地方では、化学法の「無害」、「無害でない」の判定結果にかかわらず、反応性骨材が混入する可能性を想定した ASR 抑制対策を採用することが得策であると言える。

3. 北陸地方におけるフライアッシュの供給体制と品質確保

北陸地方の石炭火力発電所の立地図とそれらから供給されるフライアッシュの物理的性質、化学成分を図-2 および表-1 に示す。現在、グリーン購入制度の推奨により、北陸地方での高炉セメント B 種の使用量はセメント全体の 24% (平成 20 年度) となっているが、高炉セメントの使用は公共土木工事が主体であり、建築工事には使用されていない。高炉セメント B 種の使用増大は ASR 抑制対策にも役立っているが、同時に建築工事では ASR 発生に対して無防備であることを知っておくべきである。また、フライアッシュに関しては、1999 年の JIS 規格の改正によりコンクリート用混和材としての用途が拡大されたが、フライアッシュセメントの使

用は北陸地方でもきわめて限定されたものである。従来、フライアッシュの品質（化学成分、物理的性質）は、石炭の種類やボイラーの形式、燃焼温度などの影響を大きく受けるので、フライアッシュの品質は地域差があり、このことがフライアッシュのコンクリートへの有効利用の拡大を阻害している要因の一つになっているようである。一方、北陸地方には、富山、石川および福井の 3 県のそれぞれに北陸電力の石炭火力発電所が立地しているため、地域内でのフライアッシュの利用は輸送コストを大きく削減できる利点がある。最近、石川県の七尾大田火力発電所では、フライアッシュの分級機を再稼働させ、フライアッシュの品質の確保に努めており、JIS の II 種灰相当のフライアッシュを安定的に供給できる体制を整えつつある。このことに関連して、石川県のコンクリート製品協会は、「地産地消」をキャッチフレーズとして、七尾大田火力からのフライアッシュを混入したコンクリート製品を標準品として、石川県よりリサイクル製品の認定を受けている。地域におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用の新たな取組みの一例として紹介するものである。

4. フライアッシュによる ASR 抑制対策の実証試験

JIS A 5308 における ASR 抑制対策は、①「無害」と判定された骨材を使用する、②アルカリの総量値を 3 kg/m^3 以下とする、③抑制効果のある混合セメントを使用する、の 3 つの対策の内 1 つを選択することになっている。前述したように、クリストバライトやオパールなどを反応性鉱物として含有する岩石に対しては②の対策では不十分であり、②と③を組み合わせた ASR 抑制対策が必要であると考えている。実際、このような取組みは、RILEM TC 191-ARP などでも指摘されており、骨材のアルカリシリカ反応性と構造物の重要性や使用・環境条件を考慮した ASR 抑制対策がそれぞれの国や地域で提案されてきている。セメントの流通状況を考慮すると、北陸地方では安定的な供給が可能であるフライアッシュによる ASR 抑制対策を積極的に推進することが合



図-2 北陸地方の石炭火力発電所の立地図

表-1 北陸地方のフライアッシュの物理的性質および化学成分

産地		密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	化学成分 (Wt%)									
				Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
七尾産	最大	2.32	3 870	2.8	69.94	21.84	5.16	5.70	1.00	1.23	1.01	0.61	1.15
	最小	2.18	3 570	1.8	65.11	18.23	1.03	4.19	0.59	0.85	0.01	0.29	1.02
	平均	2.24	3 675	2.2	67.53	20.16	1.93	5.16	0.71	1.06	0.40	0.39	1.07
敦賀産	最大	2.26	4 100	4.2	65.65	22.76	1.59	5.52	0.85	1.11	0.14	0.82	1.47
	最小	2.21	3 780	3.2	63.12	21.18	0.99	4.47	0.63	0.97	0.03	0.20	1.05
	平均	2.22	3 902	3.8	64.11	22.20	1.23	4.84	0.71	1.04	0.09	0.52	1.24
新港産	最大	2.20	2 730	2.1	50.38	29.80	4.44	9.44	0.89	2.80	0.73	0.36	0.82
	最小	2.11	2 140	1.7	49.30	28.84	3.37	8.43	0.78	2.38	0.41	0.32	0.73
	平均	2.15	2 437	1.9	49.94	29.46	4.05	8.97	0.84	2.64	0.53	0.35	0.78

表-2 フライアッシュによる ASR 抑制対策の一提案

骨材の産出地	反応性骨材の特徴	ASR 抑制対策の選択 ^{*1}	
		アルカリ総量値 ^{*2}	フライアッシュ置換率 ^{*3}
富山県の常願寺川水系、神通川水系（立山山麓の火山岩起源）	川砂、川砂利に含まれる安山岩、流紋岩に反応性があり、反応性の高いクリストバライト、オパールを含有する。ベシマム混合率への配慮が必要である。	2.5 kg/m ³ 以下	15% 以上 (20% 推奨)
石川県の手取川水系、福井県の九頭竜川水系（白山山麓の火山岩起源）	川砂、川砂利に含まれる流紋岩、安山岩、溶結凝灰岩に反応性があるが、骨材全体の内の少量であり、全体的に反応性が低い。	3.0 kg/m ³ 以下	15% 以上
石川県の能登地方産安山岩砕石	安山岩砕石は火山ガラス、クリストバライトを含有する。火山ガラスからのアルカリ溶出と粘土鉱物の含有（スメクタイト化）への注意が必要である。	2.5 kg/m ³ 以下	15% 以上 (20% 推奨)

*¹: ASR 抑制対策はアルカリ総量とフライアッシュ置換率の両者を満足するものとする。

*²: 骨材からのアルカリ量は考慮していないが、骨材から溶出するアルカリ量は 0.5 kg/m³ 程度を考慮すべきである。

*³: フライアッシュ置換率はセメントの内割り質量比率を基準とするが、砂置換（外割り）との併用も可能である。

理的である。とくに、ASR による劣化が現在でも発生している石川県や富山県の一部地域では、さらに一步踏み込んで、セメントの地域指定をして、フライアッシュセメントまたは高炉セメントを標準セメントにすべきであると考えている。この事業を進めるためには、電力会社やセメント会社の協力の下で供給体制を整える必要があるとともに、地方自治体や生コンクリート工業組合、建設業組合などの理解と協力が不可欠である。さらに、地域住民への理解を得るためには ASR の情報公開が必要になる。これまでの経験から、全国一律の ASR 抑制対策はもともと無理があり、それぞれの地域の反応性骨材に対する地方版ローカルルール適用で対応すべきであると考えている。北陸地方におけるフライアッシュによる ASR 抑制対策の一提案を表-2 に示す。ここでの提案は、北陸地方の代表的な反応性骨材である、能登産の安山岩砕石や常願寺川産の河川産骨材を使用したコンクリート試験体の促進膨張試験の結果に基づいて決定したものである。すなわち、海岸部や道路構造物などの外部から常にアルカリが供給される、厳しい塩害環境下でも、良質なフライアッシュの置換率を 20% にすれば長期にわたり ASR を抑制できることを根拠にしたものである。

一方、塩害による鉄筋腐食と ASR によるひび割れの発生との複合的な作用を受ける環境条件下でのフライアッシュによる ASR 抑制効果を実証することを目的として、大規模な屋外暴露試験を平成 16 年 9 月に開始した。本屋外暴露試験では、常願寺川産の川砂、川砂利を含有する鉄筋コンクリート試験体（縦 50 cm×横 50 cm×厚さ 20 cm）を全部で 36 体作製した。写真-1 に示すように、富山県新港の海岸岸壁に試験体を暴露して、ASR によるひび割れの進展と鉄筋の腐食状況の関連性を電気化学的モニタリングにより調べている。鉄筋コンクリート試験体（OPC および FA-N 15% 混合）の暴露期間 3 年におけるコンクリート試験体の劣化状況を写真-2 に示す。アルカリ（練混ぜ時に NaCl を 10 kg/m³ 混入）を添加した鉄筋コンクリート試験体では、OPC 単味のは塩分による鉄筋腐食と同時に ASR によるひび割れが発



写真-1 富山新港での鉄筋コンクリート試験体の暴露状況



写真-2 鉄筋コンクリート試験体の劣化状況（OPC および FA-N 15%、暴露期間 3 年）

生し、それらが複合したひび割れの状況が観察されるのに対して、FA 15% 混合のものは鉄筋腐食によるひび割れのみが発生しており、ASR の発生が長期にわたり抑制されているのが確認された。一方、NaCl 無添加の鉄筋コンクリート試験体では、海水飛沫の浸透による影響が暴露 5 年でやっと現れてきている程度であるので、暴露期間をさらに延長して測定を継続する予定でいる。

5. おわりに

長年のひび割れウォッチャーとしての習性によるものか、郊外へのドライブの際にも、街なかの散策の際にも、コンクリートのひび割れにはすぐに目がいき、「これは乾燥収縮による」、「このひび割れは ASR」と説明したがるので、同伴者（家内）からはいつも「いい加減にしない」とお叱りをいただいている。先日、まだ 10 年しか経ってない、この地域を代表する建造物に ASR によるひび割れが多数発生しているのを目にする機会があった。北陸地方での ASR の問題はいまだに解決されていないことは十分に理解していたが、実際、このような建造物を目の当たりにして、「このことは黙っておいた方が楽だけど、どうせ困ると私の所へ相談にくるのかなぁ」と少し憂鬱な気分になっている。これまでも地方自治体や生コンクリート工業組合の関係者には、北陸地方版のローカルルールによる ASR 抑制対策の必要性を機会あるごとに言ってきたつもりである。しかし、全国版の JIS A 5308 が厳然として存在する以上、北陸地方版の

ASR 抑制対策を新たに実施する機運はなかなか生まれてこなかった。さらに、深刻な建設業界の現状を考えると、「この時期に何を今さら」の本音が聞こえ、新たな取組みへの経済的な余裕がすべての分野でなくなってきているのが現実である。最後に、フライアッシュの活用に関しては、スランプや空気量、設計基準強度に関して無理のない配合や基準を提案すべきであると考えている。すなわち、全国一律の凍害に対する空気量の設定値や設計基準強度の材齢を少し工夫するだけでもフライアッシュの利用を格段に増大させることができると考えている。このことは、比較的多量に産出する低品質フライアッシュの有効利用の促進においても言えることである。

参考文献

- 1) 鳥居和之ほか：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，No.767/V-64，pp.185～197，2004
- 2) 大代武志ほか：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，Vol.20，No.1，pp.45～57，2009