

## 委員会報告 ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会

山田 一夫\*1・川端 雄一郎\*2・久保 善司\*3・合田 寛基\*4・佐川 康貴\*5・広野 真一\*6

**要旨:** 本研究委員会は、コンクリート構造物における ASR のリスクの考え方を整理するとともに、アルカリシリカ反応 (ASR) に対する合理的な診断と抑制対策を提示することを目的として、それらのあるべき姿について検討した。まず、ASR が構造物の機能に及ぼした事例を整理するとともに、ASR と使用性の関係を明らかにすることが今後の課題であることを指摘した。また、国内外の最新情報から、我が国における ASR に対する診断と抑制対策の現状と課題を提示した。これらの成果として、今後のあるべき姿として構造物の重要度に応じた診断方法、コンクリートプリズム試験、抑制対策を提案した。

**キーワード:** ASR, リスク, 診断, 岩石学的診断, 抑制対策, コンクリートプリズム試験

### 1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) に対する診断や抑制対策の考え方は、国内外で大きく変わりつつある。日本では 1986 年以降、ASR の抑制対策が実施されてきたが、現在も ASR が発生した構造物が報告されており、現行の抑制対策に限界があることもわかってきた。このような中、近年では ASR 抑制対策を新たに講じた事業体もある。

ASR 抑制対策の見直しの必要性は、例えば JCI-TC062A 「作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会 (鳥居和之委員長)」など、学会レベルでも既に指摘されている。しかしながら、新たな抑制対策のあるべき姿が定量的に議論されたことはほとんどない。これにはいくつかの原因が考えられる。一つには、現実的な ASR による被害が明らかでないことがある。構造物のひび割れパターンなどから ASR の有無が判断されても、「何故 ASR が発生したのか?」という詳細な診断まではなされていない場合が多く、またその方法論も十分に整備されていない。より合理的な抑制対策を講じるためには適切な診断手法の構築が望まれる。もう一つは、ASR 発生のリスクが明確でないことが挙げられる。新たな抑制対策を講じることでコストが増大するが、新たな対策によるリスクの低減効果、すなわち費用対効果が明確でない。このリスク低減効果は必ずしも画一的なものである必要はなく、構造物の重要度に応じて定められることが望まれるが、そのような意識はあまりない。

ASR に関する問題は国内だけではない。現在、建設分野においても国内技術の海外展開が積極的に進められているが、ASR は地質の影響を強く受けるため、国内と同

じ考え方で海外工事を行うことは極めて危険である。

これらの背景を基に、本研究委員会は 4 つの WG を設立し、ASR の最新情報を踏まえ、新しい診断フローや抑制対策、試験法を提示することを目的として、FS 委員会も含めて 3 年間活動を行ってきた。委員会の構成を表 1 に示す。

### 2. ASR のリスクと抑制対策

#### 2.1 コンクリート構造物における ASR のリスク

本研究委員会では、まずコンクリート構造物における ASR のリスクについて整理した。リスクの定義に基づけば、コンクリート構造物における ASR のリスクとは、ASR が発生することによって構造物に生じる変状等、またそれによって当該構造物の関連するシステムに及ぼす影響によって生じる補修等の費用もしくは損害額と、ASR が構造物において発生する確率から算出される期待値 (費用や人命)、であると考えることができる。したがって、コンクリート構造物における ASR のリスクを議論する上では、構造物における ASR の発生確率、また ASR による構造物の変状に伴う損失、を明らかにする必要がある。しかしながら、これらは明確に議論されてこなかった。

ASR が発生する確率について、本来は ASR 発生の有無で議論すべき問題ではない。現状技術で構造物における ASR 膨張を適切に制御できない以上、材料設計によって ASR の発生が無いとみなしているだけである。現在、コンクリート構造物における ASR の発生確率は明確でない。現時点では、リスク源として反応性骨材を検出す

\*1 独立行政法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 主任研究員 工博 (正会員)

\*2 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造研究領域 主任研究官 博士 (工学) (正会員)

\*3 金沢大学 理工学域 環境デザイン学類 博士 (工学) (正会員)

\*4 九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系 助教 博士 (工学) (正会員)

\*5 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*6 株式会社太平洋コンサルタント 解析技術部 (正会員)

ることその発生確率とみなしているに過ぎない。また、その反応性骨材の検出には JIS 規格である化学法およびモルタルバー法によって実施される場合がほとんどであるが、これらには限界がある。これらの課題を抽出し、新しい試験法と抑制対策を提示することで、ASR の発生確率をゼロに近づけることが今後重要となる (2.3)。当然、将来的には ASR 膨張を予測し、構造物が要求性能を満足するか時間軸上で照査できなければならない。すなわち、“ASR の抑制”ではなく“ASR の制御”を目指さなければならない。

ASR による構造物の変状に伴う損失についても十分に明らかではない。これまでの研究の多くは、部材レベルのものがほとんどである。これら研究の成果から、鉄筋破断が発生していなければ ASR が発生しても部材の安全性は確保されていると認識されている。一方、実構造物においては種々の問題、特に構造物の機能として不具合が発生した事例も報告されている。ASR 膨張が構造物の機能に及ぼす影響については十分に議論されてこなかった。本研究委員会では、実構造物における ASR 発生事例を収集し、ASR 膨張が構造物の機能に及ぼす影響について整理した (2.2)。

本来、コンクリート構造物における ASR のリスクが定量的に議論できるのであれば、それぞれの構造物に対するリスクが示され、それに応じたリスク対応を講じることができる。しかしながら、現状としてこれらは非常に難しい問題である。したがって、本研究委員会では、構造物の重要度を区分し、それぞれの許容リスクを整理した上で、我が国における ASR に対する診断と抑制対策のあるべき姿について議論した。

## 2.2 構造物の重要度と ASR の許容リスク

コンクリートに関連する技術者に対して、構造物に ASR を許容すべきか、もしくは抑制対策を厳しくすべきか、アンケートを行った<sup>1)</sup>。その結果を図-1 に示す。アンケートの結果、半数以上の技術者から「重要構造物ではより精緻な対策が必要」、約 1/4 の技術者から「例外的なケースはやむを得ない」との回答を得た。すなわち、抑制対策に関して、一般構造物では ASR の発生を許容するという考えを多くの技術者が有していた。すなわち、画一的に厳しい抑制対策を行うのではなく、構造物の重要度やリスクレベルに応じた抑制対策の必要性があることがわかった。

構造物の重要度に応じた抑制対策については、既に RILEM<sup>2)</sup>や AASHTO<sup>3)</sup>などで提示されている。一例として、AASHTO PP65 の構造物における ASR が生じた場合の重大性区分を表-2 に示す。AASHTO PP65 では、設計者もしくは所有者に抑制対策を選択する上で幅広い自由

表-1 委員構成

委員長	山田 一夫	国立環境研究所
顧問	鳥居 和之	金沢大学
	宮川 豊章	京都大学大学院
幹事長	川端 雄一郎	港湾空港技術研究所
幹事	久保 善司	金沢大学
	合田 寛基	九州工業大学大学院
	佐川 康貴	九州大学大学院
	広野 真一	太平洋コンサルタント
委員	石井 浩司	ピーエス三菱
	岩城 一郎	日本大学
	岩月 栄治	愛知工業大学
	上田 尚史	関西大学
	鍵本 広之	電源開発
	片山 哲哉	太平洋コンサルタント
	金海 鉦	国際建設技術研究所
	黒田 保	鳥取大学
	古賀 裕久	土木研究所
	鈴木 宏信	中研コンサルタント
	鶴田 孝司	鉄道総合技術研究所
	富山 潤	琉球大学
	西田 宏司	高速道路総合技術研究所
	中野 眞木郎	原子力安全基盤機構
	長谷川 拓哉	北海道大学大学院
	濱崎 仁	芝浦工業大学
	三浦 正純	四電技術コンサルタント
	八幡 正弘	マイジオ
	山本 篤史	日本建築総合試験所
	山本 貴士	京都大学大学院
協力委員	中川 裕之	四国総合研究所

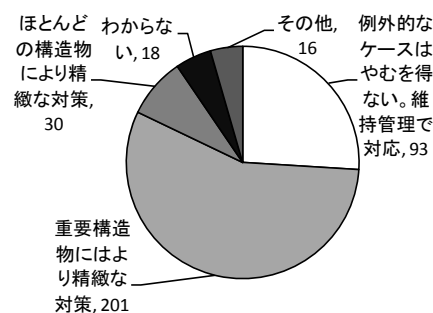


図-1 ASR に対する考え方

度を与えることが基本思想にある。例えば、反応性骨材が産出される地域で 100 年間供用の長大橋を構築すると仮定する。この時、ASR が生じると構造物の寿命そのものを短縮化するほか、早期の補修につながるため、ASR を許容できない。したがって、混和材量の増加やコンク

表-2 構造物における ASR が生じた場合の重大性区分 (AASHTO PP65) <sup>3)</sup>

区分	ASR の結果	ASR の受容性	例
S1	安全性や経済・環境的結果が小さいもしくは無視できる	ASR によるいくらかの劣化は許容する	建物内の非構造部材, 仮設構造物 (例<5年)
S2	重度な被害であっても, 安全性や経済・環境的結果が軽微である	中程度の ASR のリスクは許容する	歩道, 縁石, 排水路, 供用年数<40年
S3	軽微な被害であると, 安全性や経済・環境的結果に明らかな影響がある	低いリスクの ASR は許容する	舗装, カルバート, 防護柵, 地方の小規模橋梁, 取替えコストが深刻な PCa 部材, 供用年数 40-75 年
S4	軽微な被害であっても安全性や経済・環境的結果が重大となる	ASR は許容できない	主要な橋梁, トンネル, 調査や補修が困難な重要部材, 供用年数>75年

表-3 構造物における ASR が生じた場合のリスク (RILEM TC 191-ARP) <sup>2)</sup>

区分	構造物
S1	非構造部材, 仮設もしくは短期供用の構造物, 取替えが容易な部材, 大半の住宅建造物
S2	大半の土木建築構造物
S3	原子力施設, ダム, トンネル, 例外的に重要な橋梁・高架橋, 有害物質を保有する構造物

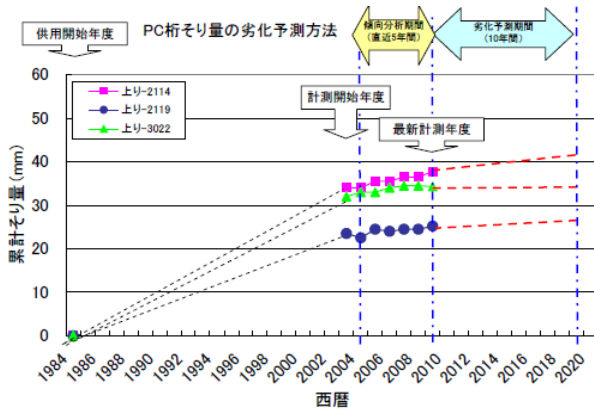


図-2 PC 軌道桁の反り量の予測方法 <sup>4)</sup>

リートのアルカリ総量の制限などの対策が必要である。一方, 同じ骨材を用いたコンクリートを歩道に使う場合, ASR によって引き起こされる結果はさほど深刻ではない。したがって, このような構造物ではアルカリ総量を制限せずに混和材量を減らすこともできる。

AASHTO PP65 は高速道路に特化して作成されたものであるが, 同様の考え方は他構造物にも適用可能である。例えば RILEM TC 191-ARP では, リスクレベルを3段階に区分しており, 高リスクの構造物として, 原子力施設やダム, トンネルなどを例として挙げている (表-3)。

表-2 および表-3 では, 構造物に要求する項目として安全性のみが挙げられている。しかしながら, ASR が発生して安全性が問題になるケースは多くなく, 鉄筋破

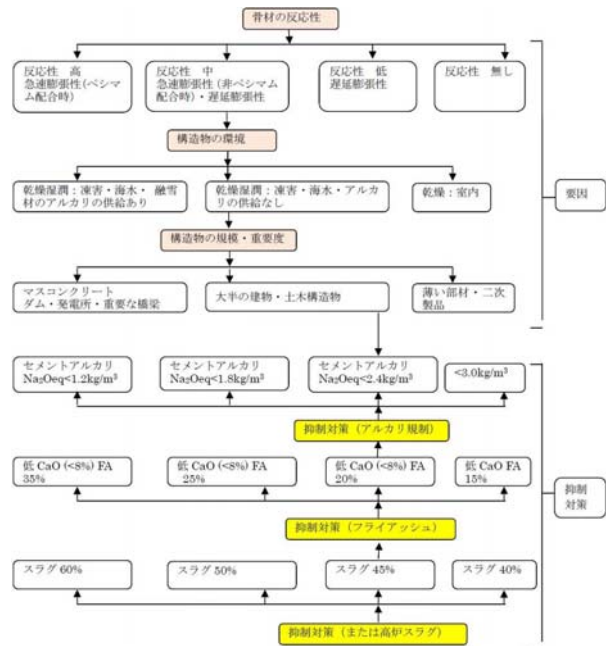


図-3 抑制対策の選定フロー <sup>6)</sup>

断にまで至った報告事例も限定される。一方, ASR が生じた部材もしくは構造物で生じる機能低下については十分に議論がなされてこなかった。ASR が生じた実構造物においては, ASR 膨張による部材の変形等によって構造物の機能に重大な影響が報告されている。しかしながら, ASR が構造物の機能に及ぼす影響については, 一般技術者だけでなく, 専門家間においても十分に認知されていない。RILEM では 2014 年から "Technical committee on prognosis of deterioration and loss of serviceability in structures affected by alkali-silica reaction" が設立され, ASR が構造物の機能に及ぼす影響を明らかにすることは国際的にも重要な課題と考えられている。

例えば, ASR が発生した PC 軌道桁 <sup>4)</sup> では, ASR 膨張劣化の進行に伴い, 通常的设计で許容されないキャンパー (負反り) が確認された。軌道桁には, 道路橋の橋面のような防水層がなく, 雨水などの水分の供給が全体的に行われるため, 桁全体の変形が生じやすいと考えられ

表-4 アルカリ総量 3kg/m<sup>3</sup>で ASR が発生した暴露試験体と骨材試験結果の対応<sup>8)</sup>

記号	岩種	地域	化学法		モルタル バー法	薄片試料の観察結果 <sup>*</sup>	ひび割れ状況 <sup>**</sup> ※( )内は、最大ひび割れ幅 (単位: mm)			
			Sc (mmol/l)	Re (mmol/l)			3A	3B	5A	5B
1	砂岩	東北	63	20	無害でない	供試体3B, 進行状況k3, 隠微晶質または微晶質石英	c1	c2 (0.1)	c3 (0.25)	c3 (0.3)
2	安山岩	東北	356	168	無害		c2 (0.1)	c1	c1	c2 (0.1)
3	細粒ハン レイ岩	東北	21	26	無害	供試体3A, 進行状況k2, 隠微晶質または微晶質石英	c2 (0.1)	c1	c2 (0.1)	c1
4	安山岩	東北	247	70	無害でない		c1	c2 (0.2)	c1	c2 (0.15)
5	安山岩	東北	528	244	無害でない		c1	c2 (0.1)	c2 (0.15)	c3 (0.25)
6	安山岩	東北	258	106	無害でない	供試体3A, 進行状況k2, クリストパライト, トリディマ イト, 火山ガラス	c1	c2 (0.15)	c3 (0.3)	c3 (0.35)
7	安山岩	中国	366	68.4	無害でない	供試体3A, 進行状況k4, クリストパライト, 火山ガラス	c3 (0.3)	c3 (0.3)	c3 (0.5)	c3 (0.5)
8	玄武岩	四国	220	140	無害でない	供試体3A, 進行状況k2, ガラス, クリストパライト	c2 (0.1)	c2 (0.1)	c2 (0.2)	c2 (0.1)
9	安山岩	四国	451	138	無害でない		c2 (0.2)	c1	c3 (0.3)	c3 (0.4)
10	安山岩	九州	549	176	無害でない	供試体3A, 進行状況k4, トリディマイト, 火山ガラス	c3 (0.25)	c3 (0.4)	c3 (0.5)	c3 (0.6)

\* 薄片試料の観察結果は、観察した供試体、進行状況、反応性を有する物質の順に記した。実施していない場合は空欄とした。

\*\* 供試体は、アルカリ量3kg/m<sup>3</sup>, 5kg/m<sup>3</sup>のものが2体ずつあったので、便宜的に、3A, 3B, 5A, 5Bと記号を付けて整理した。

(c1) 角部限定ひびわれ, (c2) 単独ひび割れ, (c3) マップ状ひび割れ

る。軌道面の変形は、走行性に関係するため、同構造物の長寿命化計画では重点的な対策が必要と認識されている。特に、その劣化（反り量）の予測では、図-2 に示すような、経年の反り量計測結果をもとに将来の変形を予測する手法を示している。また、瀬戸内海に位置する橋梁<sup>5)</sup>では、橋脚に ASR が発生した。当時この橋脚に対して PC のプレキャストパネルを巻き立てる補強工法を適用した。これによって軸方向の膨張が卓越し、桁端が押し上げられ、フィンガージョイント部での段差が走行性に影響を及ぼした事例がある。

このように、ASR 膨張は構造物の機能に影響する場合が多々ある。公表されている事例に限りがあるものの、本研究委員会では構造物としての機能低下の評価が重要なことを、今後の課題として指摘した。

### 2.3 抑制対策

海外では、リスクレベルに応じた抑制対策が多く採用されている。これらを我が国で活用する上では骨材の反応性の違いに特に注意が必要である。図-3 に我が国の反応性骨材を対象とした抑制対策の選定フロー（案）<sup>6)</sup>を例示する。まず、骨材の反応性を4段階に区分し、骨材の反応性と構造物の環境から、ASR のリスクレベルを設定する。次に、リスクレベルと構造物の重要度や耐用年数から、ASR の抑制レベルを6段階から設定する。最後に、抑制レベルを基にアルカリ総量、もしくは混和材の最小含有量から設定する。

抑制対策以降の ASR 発生事例の多くは、ペシマムを生じる高反応性骨材と遅延膨張性骨材である。特に、高反

表-5 CPT 試験法（案）

温度	60°C
保管環境	1.5mol/l の NaOH で湿らせた湿布 +プラスチックフィルムで梱包
配合	実配合
アルカリ総量	5.5 kg/m <sup>3</sup>
試験体寸法	(75±5) × (75±5) × (250±50) mm

応性骨材がペシマム配合で含まれている場合、混和材の ASR 抑制効果は低下することが指摘されている<sup>7)</sup>。図-3 ではこのような国内の ASR 事情も考慮されている。

### 2.4 コンクリートプリズム試験

現在、骨材の ASR 反応性は化学法やモルタルバー法で判定される。事業者によって判定基準は異なるものの、試験法は同一である。一方これらの試験には限界があることも指摘されている。表-4 に23年以上暴露されたコンクリート角柱試験体（アルカリ総量 3kg/m<sup>3</sup>）での ASR の発生状況と骨材試験結果の対応の比較表を示す<sup>8)</sup>。ペシマム現象を示す高反応性骨材はアルカリ総量 3kg/m<sup>3</sup>でも膨張し、また遅延膨張性骨材は化学法やモルタルバー法では検出できていない。このような背景から、例えば北米では、化学法やモルタルバー法ではなく、コンクリートプリズム試験（CPT）に移行している。CPT を実施するメリットは以下のようなものが挙げられる。

- 1) 各種のペシマム現象や遅延膨張が生じる骨材を検出できる。特に、骨材の粒度調整などを必要としないため、粒径ペシマム現象の影響などを排除できる。
- 2) 混和材の適正混入率を把握することができる。

3) モルタルよりも比較的大きな断面で試験を実施するため、試験期間中のアルカリ溶脱の影響が緩和される。

4) 試験結果が暴露試験と比較的整合する。

我が国でも JCI AAR-3 が CPT として基準化されているが、制定当時は最先端ではあったものの、現在では種々の不備がある。例えばアルカリ総量を  $2.4\text{kg/m}^3$  添加して半年間試験を行うとしているが、現行の海外の試験と比べると、日本のセメント中のアルカリ量の低下に伴いアルカリ総量が不足して ASR が十分に加速されないこと、また期間が半年であり短期間の判定では遅延膨張性骨材の検出精度が低いこと、などの技術課題が挙げられる。これらは早急に修正が必要であり、本研究委員会では修正案（アルカリ総量  $5.5\text{kg/m}^3$ 、試験期間 1~2 年）を提案した。

また、現在 RILEM では温度を  $60^\circ\text{C}$  に高めることでより早期判定が可能となるような試験法（RILEM AAR-4）の制定を進めている。AAR-4 ではアルカリ総量を  $5.5\text{kg/m}^3$  として、 $60^\circ\text{C}$  で 20 週試験を行うものである。これらの試験はこれまで海外の骨材に対する適用性が議論されてきたが、近年の研究では、我が国のペシマムを生じる骨材の検出も可能であることが報告されている<sup>9)</sup>。

上述した通り AAR-4 は我が国の骨材にも有効な可能性はあるものの、あくまでも骨材試験であり、コンクリートの性能評価のための試験ではない。また、水分供給が少ないこと、アルカリ溶脱が生じることなどが指摘されている<sup>9)</sup>。そこで、本研究委員会では、表-5 に示す試験法を提案した。本試験の特徴は、水分の供給を保持しつつ、かつアルカリ溶脱が生じないように、アルカリ溶液で湿らせた湿布でコンクリート表面をラップし、さらに遮水性のあるプラスチックフィルムで覆うことである。図-4 にアルカリラッピングの方法を示す。50g の  $1.5\text{mol/l}$  NaOH 水溶液を含んだ不織布 2 枚でコンクリートを包み、試験体からのアルカリ溶脱を防ぐとともに、コンクリートに十分な水分を供給することを意図したも

のである。

提案した試験をベースとして、本研究委員会では共通

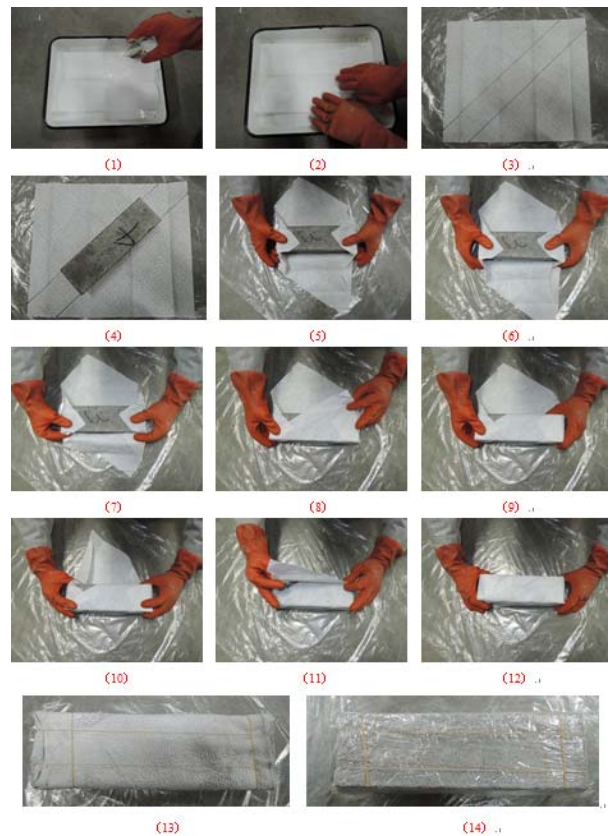


図-4 アルカリラッピングの方法

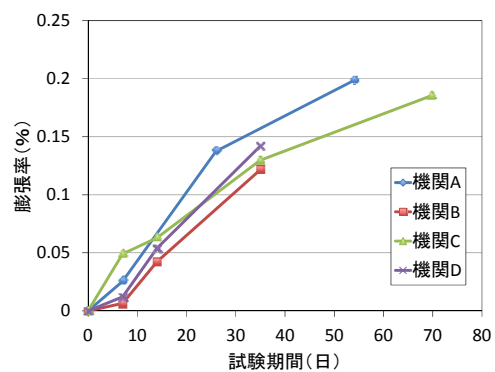


図-5 CPT 共通試験の一例

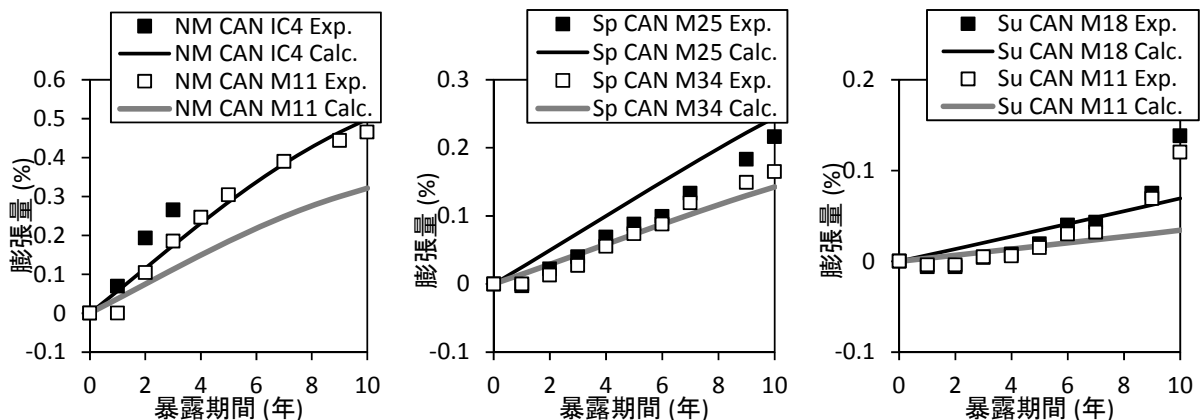


図-6 CPT を活用した簡易膨張予測の事例<sup>10)</sup>

試験を実施した。各機関における試験結果の一例を図-5に示す。提案したCPTは比較的再現性が高いことがわかる。また、共通試験から幾つかの改善点も抽出することができた。試験法の精度向上のため、引き続き検討を進める予定である。また、アルカリラッピングは既設構造物から採取したコアの残存膨張試験にも有効である可能性があるため、これらの研究が進むことが期待される。

また、最近では、CPTを活用して簡易的に長期のASR膨張の予測を行った研究事例も報告されている(図-6)<sup>10)</sup>。さらに、混和材のASR抑制効果を事前にアルカリ総量に換算し定量評価する手法が提案された<sup>11)</sup>。これらによりASR抑制対策をより合理的に設計することができると考えられる。本研究委員会では、これらの研究事例をレビューし、今後のASR抑制対策のあるべき姿について議論した。

### 3. 構造物のASR診断フロー

#### 3.1 ASR診断の現状と診断に必要な技術力

##### (1) 診断の定義

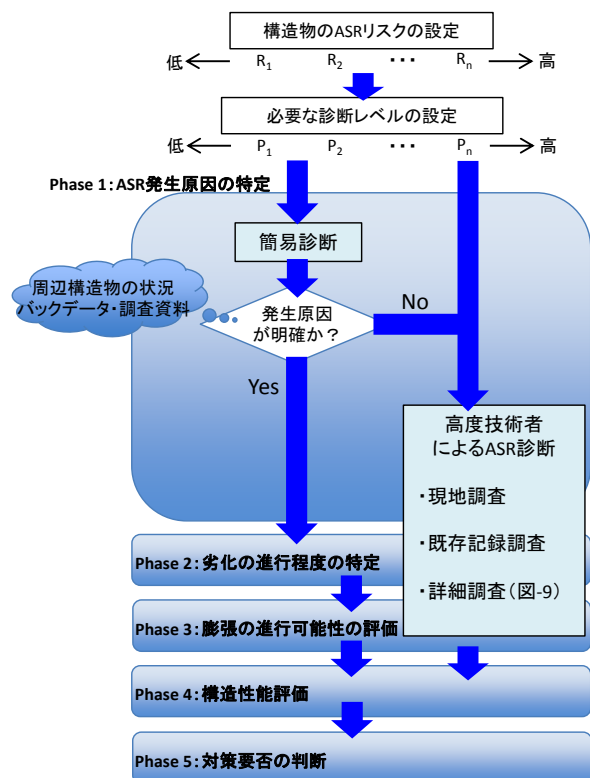
診断には様々な視点が考えられ、目的も様々である。ASR診断について、広義には、i)ASR発生の有無と原因を特定すること、ii)劣化の進行程度を知ること、iii)膨張の進行可能性を知ること、iv)構造性能に対する影響の有無の評価、v)対策の要否の判断、の5つに区別することができる。本研究委員会では、それぞれの目的を達成するための診断フローを作成した。また、診断(diagnosis)は本来、i)ASR発生の有無と原因を特定することであり、これを狭義のASR診断と位置付けた。

##### (2) ASR診断の現状と診断に必要な技術力の整理

ASRの維持管理における一つの問題点として、原因がASRであるか否かの判断の容易さがASR維持管理経験の多少によって大きく異なることが挙げられる。ASRによる変状については、これまで学会や関連機関(管理者)によって検討され、特徴的な変状の捉え方がマニュアル等に記載されているが、他の劣化によるひび割れと混同されることも多い。この原因としては、ASRの発生が特定地域に集中していることも挙げられるが、同様のひび割れが他の劣化原因でも生じ得ることに起因している。つまり、ASRの判定においては総合的な判断(地質的な状況、水分供給、日射などの環境作用、さらには生じやすい部位と変状との関係、あるいは周辺構造物における発生状況)が必要となることが多い。ASRの判定の難易度は、経験の多少に強く依存する。したがって、診断フロー作成においては、技術者・管理者のASR経験、および技術レベルと対象構造物の重要度を加味して、診断レベルを選定することを意識した診断フローの作成を目指した。構造物の重要度、管理者・技術者のレベル(ASR

	ASR経験なし	診断士or インハウス エンジニア (経験少)	診断士or インハウス エンジニア (経験多)
構造安全性や 第三者影響に 対する要求低	診断レベル低 コスト高		診断レベル低 コスト低
通常構造物			
重要構造物	診断すべきでない		診断レベル高 コスト高

図-7 構造物の重要度や技術者レベルに応じた診断レベル設定の概念図



経験を含む)に応じた診断レベルの設定の概念図を図-7に示す。例えば、対象地域でのASR構造物に関する既往の詳細な調査データや対策経験のある管理者と技術者にあつては、外観調査のみでもASRの判定が可能であるケースも少なくない。したがって、ASR発生の有無を目的とした診断レベルは目視程度の高くないものが設定可能である。逆に、ASR経験そのものの少ない管理者、あるいは経験があつても対象地域での経験が少ない場合は、目視でASRの判定を行うことは困難であるため、さらに詳細な調査を要する。すなわち、ASR管理経験(バックデータを含む)によって、要求あるいは推奨する診断レベルを示し、維持管理における診断技術の合理化を促すことを想定している。なお、ASRの特定がきわめて重要

な場合や重要構造物においては、岩石学的診断を基本とした高度な岩石学的診断を採用しなければならない。高度な岩石学的診断については、3.3にて述べる。

### (3) ASR 診断のフレーム

維持管理の実務においては、原因の追求よりも対策（手段）が重視される傾向にある。また、実務では個別の業務として発注されることが多く、携わる技術者がこれらを一連のフローとしてその業務に取り組む機会は少なく、その技量を十分に活用できないケースもある。これらの背景を鑑み、本研究委員会は、構造物の重要度、診断のレベルの設定までを含む一連の診断フレームを提示することとした。広義の ASR 診断フローのフレームを図-8 に示す。本稿では、このフローを概説するとともに、図-8 のうち Phase 1 の「ASR 発生原因の特定」について主に記述する。

まず対象構造物の要求性能や供用期間を含め、構造物の重要度から ASR のリスクを決定する。このリスクは表-2 や表-3 で事例を示した通りである。次に、ASR のリスクに応じて、診断レベルを設定する。診断レベルに必要な技術力は上述した通りである。例えば ASR のリスクを許容できる部材もしくは構造物の場合、簡易な ASR 診断が可能である。この時、構造物で ASR が発生した原因が合理的に説明できるかが重要である。例えば、対象構造物の周囲の構造物における ASR の発生状況や、ASR の発生を裏付けることのできるバックデータや調査資料があれば、当該構造物も ASR と判断できる。一方、周囲の構造物で ASR の発生が認められず、既存記録の調査結果で骨材が非反応性、かつ抑制対策（アルカリ総量、混合セメント）が講じられている場合には、ASR が発生した原因を明らかにする必要がある。この原因解明のためには高い技術力が必要となるケースがあり、必要であれば高度な岩石学的診断（図-9<sup>6)</sup>）を採用する。なお、ASR のリスクを許容できない部材もしくは構造物で ASR の発生が疑われた場合、高度な岩石学的診断が不可欠であることは言うまでもない。

Phase 2, Phase 3 について、簡易な診断の場合は既存の簡易技術で診断するが、高度な診断の場合は図-9 を基本として検討する必要がある。

Phase 4, Phase 5 については、他基準類で記載されているのでここでは割愛するが、最終的には構造物の性能評価を行い、対策の要否を判定する。

本研究委員会で提示した診断フローで重要なことは対象構造物において ASR が生じた場合のリスクを分類し、そのリスクレベルに応じて技術者の診断技術レベルを設定することにある。これは、ASR に関連する詳細技術は、岩石学等の素養が必要であり、例えばコンクリート診断士であっても結果の解釈が困難な場合が多々ある

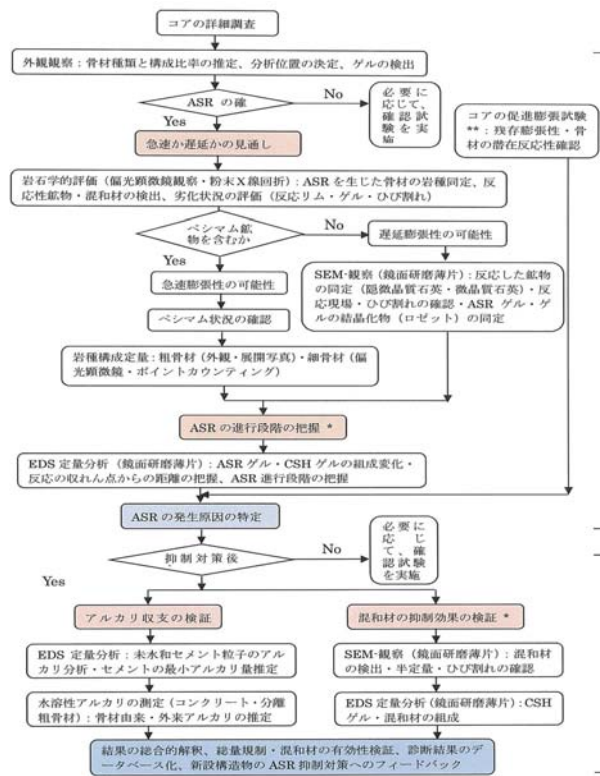


図 2.2 (続き) コンクリート構造物の ASR 診断フロー (案)  
\* Katayama et al. (2004, 2008)、EDS:エネルギー分散型スペクトル分析装置  
\*\*Katayama et al. (2004)の方法 (φ5cm×L13cm, 80°C 1M NaOH 浸漬)、または JCI-

図-9 岩石学的診断に基づく ASR 診断フロー<sup>6)</sup>

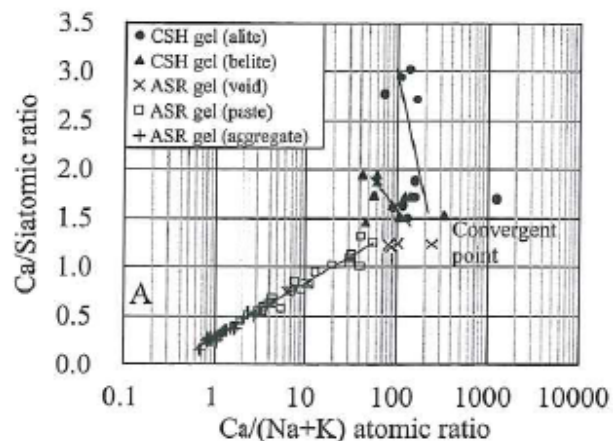


図-10 [Ca]/[Si]-[Ca]/[Na+K] 図 (I 型)

ことを踏まえたものである。ただし、Phase 4 以降では構造設計等の素養も必要であり、適切な技術者が総合的に判断しなければならない。

### 3.2 岩石学的診断

ASR 診断における岩石学的試験の重要性については、JCI-TC062A「作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会」でも十分に説明されている。ASR の診断や対策には岩石学的視点が欠かせないが、岩石学的診断を実施する上での、技術者の技術力そのもの

を客観的に判断することは、現状発注者には困難である。そこで、ASR劣化が発生した実構造物から採取したコンクリートコアについて、複数の試験機関において岩石学的診断を実施し、その結果を比較した。その結果、ある調査機関では、詳細な肉眼観察による岩種の分析とひび割れなどの分布、反応性鉱物が報告された一方で、岩石と比較して脆弱なコンクリートからの薄片作製が良好に行えなかったとの理由から、その根拠となる具体的な偏光顕微鏡観察の結果が示されなかった場合もあった。また、岩石学的試験によるASR診断が十分にできず、結果が得られないケースも見られた。このように、ASRの診断には岩石学的試験が非常に重要であるにもかかわらず、それを行える環境が国内に十分には整っていないことが浮き彫りとなった。特に、岩石学的診断の結果は、診断を行うための薄片作製の技術力、岩石学やコンクリート工学の素養などに強く影響された。結果の比較などから、ASRの岩石学的診断について、指針や基準等が必要であることが再認識された。詳細は委員会報告書を参照されたいが、この結果を踏まえ、委員会報告では、岩石学的試験の最新の方法論を示し、その活用方法などについて、高度で研究的な事項も含めて詳細に解説する。委員会報告で詳細に解説する技術や観点の重要性や、適切なASR診断に必要な技術力と、それを行う人材の育成が課題であることなどについて、実感していただくことを期待する。

### 3.3 最新の岩石学的診断法

本研究委員会では、まずコンクリートコアなどの採取された試料を観察・分析し、正確にASRの診断を行う方法として、最新の技術を用いて実施可能な最大限の内容としての、技術的に理想的なASR診断フローを示した(図-9)<sup>6)</sup>。これは、原子力用コンクリートに関して提案されたものを引用しているが、コンクリート全般について適用すべきものであり、ASRの先の委員会報告書でも同様なものを示している。本委員会報告では診断フローの各項目について、方法論とそれにより得られる情報(活用方法)などについて、研究的な内容も含めて解説する。詳細は委員会報告を参照されたいが、ここではその一部を紹介する。

#### (1) 偏光顕微鏡観察

偏光顕微鏡下での薄片観察では、骨材の岩種や構成鉱物(反応性鉱物)、セメントの種類(フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの有無)などのコンクリートの構成要素とともに、ASRの発生・進行段階を確認する。

細骨材の岩種構成を定量的に求める場合は、偏光顕微鏡下でポイントカウンティングを行う。これは、薄片試料上に適当な間隔の方眼をかけ、交点上の岩石や鉱物を

種類別に数え、計測した総数に対する種類別の計測数から構成割合を求めるものである。実際には“メカニカル・ステージ”を使用し、一定間隔で薄片試料を移動しながら、顕微鏡の視野に設置された十字線の交点の直下にきた岩石や鉱物を数えることになる。

#### (2) ASRの発生・進行段階の評価

ASRの程度は薄片観察で決定し、野外での構造物の被害と対応させる。通常、ASRは、i)骨材の反応リムの形成、ii)骨材周辺のゾル・ゲルの取り巻き、iii)骨材内の膨張ひび割れ形成・ゲル充填、iv)骨材を取り巻くセメントペースト内の膨張ひび割れ形成・ゲル充填、v)骨材から離れたセメントペーストの気泡内へのゲルの沈殿、の順序で進行するので<sup>12)</sup>、このような点に着目したうえで、発生と進行状況を評価する。反応リムやASRゲルだけを発見し、ASRと結び付ける旧態依然とした手法と異なり、膨張の直接の原因であり証拠でもある膨張ひび割れが、どのような骨材粒子に生じているのかに目をつける。ASRゲルの発見が、即座にASR劣化(膨張)の証拠となるわけではない。

#### (3) EDS定量分析(ASRゲルの組成線と進化)

未水和セメントに含まれるエーライトとビーライトは、一定の[Ca]/[Si]比をもった最終的な水和物(CSHゲル)となる。一方で、ASRゲルは反応性骨材粒子からセメントペーストへの移動に伴い、アルカリを放出、Caを吸収してCSHゲルの組成に近づいていく。ASRの進行したステージでは、ASRゲルとCSHゲルは“収斂点(Convergent point)”で平衡状態に到達する<sup>13)</sup>。コンクリートの潜在的な膨張性はASRゲルの組成と密接に関係している。ASRゲルの組成を[Ca]/[Si]-[Ca]/[Na+K]図(図-10<sup>14)</sup>)にプロットし、ASRの進行状況を把握する。ASRゲルの組成線の形は、傾き、範囲などにより、3つの進化型に区別できる。I型、II型、III型であり、骨材岩種の違いは影響しない<sup>15)</sup>。I型はASRゲルの1本の組成線で表され、線上で[Ca]/[Si]比が[Ca]/[Na+K]とともに着実に増加する(図-10)。これは膨張が進行中の前期～中期ステージのASRに普通に見られる。II型は平行に並列するASRゲルの組成線で特徴づけられる。これは生成時期の異なるゲルの存在を示唆する。この場合、ASRは中期～後期ステージにあり、ASRゲルの膨張性は比較的小さい。III型は屈曲したASRゲルの組成線を示す。これは溶脱や風化の進行を示し、ASRがさらに後期のステージにあることを示唆する。このように、[Ca]/[Si]-[Ca]/[Na+K]図上でのASRゲルの進化型は、ASRゲルの位置やASRの進展ステージ、環境(新鮮/風化、溶脱、炭酸化、凍結融解など)を反映している。構造物がさらに膨張するかどうかを評価するには、モニタリングとともに、ASRゲルの組成確認が役立つ可能性が高いが、今



後の研究も必要である。

#### 4. まとめ

本研究委員会では、コンクリート構造物における ASR のリスクという観点から、今後の抑制対策および診断のあるべき姿について議論を行ってきた。ASR のリスクとは何か？この問いに対する答えを得るためには、構造物の重要度から骨材に起因する地域性の問題まで、多岐にわたる課題を解決しなければならない。この問題に対して、本研究委員会では新たなアプローチを試行し、一定の成果を提示できたと考えている。しかしながら、これらの成果は多くの課題も有する。我々 ASR に関連する研究者および技術者は今後も継続して議論を進め、我が国の ASR 対策の高度化に向けて取り組む所存である。

今、ASR を取り巻く環境は、国内外でも大きく変化しようとしている。本研究委員会の議論の成果が反映され、ASR 対策の合理化が加速されることを期待したい。

#### 参考文献

- 1) 川端雄一郎, 山田一夫, 古賀裕久, 久保善司: アルカリシリカ反応を生じた構造物の診断に対する技術者の意識調査—ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会の活動—, コンクリート工学, Vol. 50, No. 7, pp.593-600, 2012
- 2) Nixon, P., Hawthorn, F. and Sims, I.: Developing an international specification to combat AAR, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.8-16, 2004
- 3) Federal Highway Administration: Selecting measures to prevent deleterious alkali-silica reaction in concrete, 2012
- 4) 北九州市建築都市局都市交通政策課: 北九州モデル長寿命化計画, 2011
- 5) 崎山義之, 岩田明, 岩崎大輔, 石田邦洋: PC 巻立て工法による大島大橋橋脚の耐震補強について, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, 6-154, pp.307-308, 2005
- 6) 中野眞木郎: 原子力用コンクリートの反応性骨材の評価フローの提案, JNES-RE-レポート, 2014
- 7) Kawabata, Y., Ikeda, T., Yamada, K. and Sagawa, Y.:

Suppression effect of fly ash on ASR expansion of mortar/concrete at the pessimum proportion, Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 031711-KAWA-01, 2012

- 8) 古賀裕久ほか: 屋外に 23 年以上暴露したコンクリートの観察結果に基づく骨材の ASR 反応性の検討, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No.4, pp.361-376, 2013
- 9) Yamada, K. et al.: CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion, Journal of Construction and Building Materials (submitted)
- 10) 川端雄一郎, 山田一夫, 小川彰一, 大迫政浩: 加速コンクリートプリズム試験を用いたコンクリートの ASR 膨張予測に関する試み, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.13, pp.453-458, 2013
- 11) 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: セメント系材料により生成される水和物の相組成と ASR 膨張抑制効果の関係, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4, pp.402-420, 2013
- 12) Katayama, T. et al. : Late-Expansive ASR due to Imported Sand and Local Aggregates in Okinawa Island, Southwestern Japan, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.862-873, 2008
- 13) Katayama, T. and Bragg, D. : Alkali-Aggregate Reaction Combined with Freeze/Thaw in Newfoundland, Canada-Petrography Using EPMA, Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.243-250, 1996
- 14) Katayama, T. : Diagnosis of Alkali Aggregate Reaction —Polarizing Microscopy and SEM-EDS Analysis : 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions (CONSEC'10), pp.19-34, 2010
- 15) Katayama, T. : ASR Gel in Concrete Subject to Freeze-Thaw Cycles—Comparison between Laboratory and Field Concretes from Newfoundland, Canada, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.174-183, 2008