

委員会報告 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に関する研究委員会

鳥居 和之^{*1}・山田 一夫^{*2}・古賀 裕久^{*3}・久保 善司^{*1}・山路 徹^{*4}

要旨：本研究委員会は、アルカリ骨材反応（ASR）の材料的側面に関して、1980年代の委員会以降の最新情報を加味して検討を加えた。骨材のASR試験法とASR診断法について再考し、今後のあるべき姿を提案すると同時に、理論的検討の妥当性を検証する場となる既存構造物のASR劣化の現状について、岩石・鉱物学的な新しい視点も加えた考察を行った。岩石学的手法を骨材評価と劣化診断に適用するための手引きも提供した。さらにASRに関わるコンクリートの種々の問題についてまとめた。

キーワード：アルカリ骨材反応、岩石学、骨材、反応性評価、抑制対策、診断、劣化の現状

1. 委員会活動概要

アルカリ骨材反応（ASR）によるコンクリート構造物の劣化事例は全国に広がり、鉄筋破断による劣化事例などの報告がある一方、劣化程度が低く経過観察が妥当な劣化事例が大多数とされる。ASRにより劣化した構造物の構造安全性と対策に関しては、土木学会アルカリ骨材反応対策小委員会でも検討されたものの、ASRを材料面から検討した例は、1980年代のJCIの2つの検討以降、見あたらない。最近では、2005年のJCIセメント系材料・骨材研究委員会において、岩石学的評価の重要性和骨材の各種ASR試験方法で判定結果が異なる問題点が指摘されている。昨今の多様なASR問題への対応には、材料科学的な観点からの検討が不可欠と考えられる。したがっ

て、この十数年間のASR研究の進展を踏まえ、骨材の岩石・鉱物学的評価法、ASR抑制対策、およびASR診断法の再検討の必要性はきわめて高いと思われる。

本研究委員会では、ASRに関する最新の研究成果を取りまとめ、骨材のASR試験法とASR診断法について再考し、今後のあるべき姿を提案すると同時に、理論的検討の妥当性を検証する場となる既存構造物のASR劣化の現状について、岩石・鉱物学的な新しい視点も加えて検討することを趣旨とした。

本研究委員会では、上記の趣旨のもとに3つのWGを構成し、活動を実施した。構成員一覧を表-1に示す。WG1（反応性骨材および試験方法に関連したASR課題検討WG）では、既存の構造物での診断や新設構造物での抑制

表-1 構成委員一覧

委員長	鳥居 和之（金沢大学）	委員	檀 康弘（新日鐵高炉セメント（株））
副委員長	脇坂 安彦（（独）土木研究所）	鶴田 孝司（（財）鉄道総合研究所）	
	坂井 悦郎（東京工業大学）	中田 善久（日本大学）	
代表幹事	山田 一夫（太平洋セメント（株））	野口 貴文（東京大学）	
幹事	古賀 裕久（（独）土木研究所）	羽原 俊祐（岩手大学）	
	山路 徹（関西国際空港（株））	羽瀧 貴士（東亜建設工業（株））	
委員	荒野 憲之（電気化学工業（株））	広野 真一（（株）太平洋コンサルタント）	
	石井 浩司（ピーエス三菱（株））	松浪 良夫（（財）日本建築総合試験所）	
	岩月 栄治（愛知工業大学）	丸屋 剛（大成建設（株））	
	江口 和雄（ショーボンド建設（株））	宮川 豊章（京都大学）	
	鍵本 広之（電源開発（株））	八幡 正弘（北海道立地質研究所）	
	鹿毛 忠継（（独）建築研究所）	山本 武志（（財）電力中央研究所）	
	片山 哲哉（川崎地質（株））	渡辺 博志（（独）土木研究所）	
	河野 広隆（京都大学）	協力委員	奥田 由法（（株）アルスコンサルタント）
	川端 雄一郎（（独）港湾空港研究所）	笹谷 輝彦（（株）国土開発センター）	
	橋高 義典（首都大学東京）	参納 千夏男（（北陸電力（株））	
	葛目 和宏（（株）国際建設技術研究所）	杉山 彰徳（（株）太平洋マテリアル）	
	黒田 保（鳥取大学）	大代 武志（富山県庁）	
	佐々木 孝彦（（財）鉄道総合研究所）	野村 昌弘（中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株））	
	鈴木 宏信（（株）中研コンサルタント）	和佐田 慎吾（石川県庁）	

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 博士（工学）（正会員）

*2 太平洋セメント（株） 中央研究所 博士（工学）（正会員）

*3 （独）土木研究所 つくば中央研究所 工修（正会員）

*4 関西空港（株） 建設事務所 工修（正会員）

表-2 ASR 抑制対策・診断に関して新しく考えることが望ましい事項

考慮対象/作用機構	特徴	現行手法の課題	検出方法	抑制対策、効果
ペシマム混合率による膨張性状	反応性骨材(鉱物)と非反応性骨材の比率が一定値で膨張極大化、アルカリ量 3kg/m^3 以下でも発生	通常のもルタルバー法で検出不能	反応性/非反応性骨材比率を変えたもルタルバー法、ASTM C1260	混合セメント、混和材の使用、より厳しいアルカリ量規制必要?
遅延膨張型骨材	数 10 年以上をかけてゆっくりと膨張し長期継続、低アルカリ量でも発生?	化学法、もルタルバー法で検出不能	岩石学的特長を把握→ASTM C 1260	混合セメント、混和材の使用
骨材からのアルカリ溶出	骨材から $1\sim$ 数 kg/m^3 のアルカリ供給の可能性	考慮外	RILEM AAR-8	混合セメント、混和材の使用
環境からのアルカリ供給	融氷剤、海塩によりコンクリート中アルカリ量増加	考慮外	未確立	混合セメント、混和材の使用
アルカリ炭酸塩岩反応	特定の地域に特徴的な泥質ドロストーン中の隠微晶質石英による膨張	炭酸塩岩の定義が曖昧、化学法は炭酸塩岩に適用不能	岩石学的評価→ASTM C 1260, RILEM AAR-5	国内では考慮不要→未利用のドロストーンの利用拡大可能
石灰石と反応性骨材との相互作用	非反応性骨材として粗骨材に多用されるが、細骨材による ASR 膨張の可能性	ペシマムの影響があり、検出困難	ASTM C1260(細骨材)、促進コンクリートバー試験	非反応性細骨材の使用、混合セメント、混和材の使用
反応性鉱物種類の同定	ASR 膨張の原因特定と膨張挙動の推定に重要	方法論が未確立	ASTM C295, RILEM AAR-1	抑制対策立案に必須の基礎情報
ひび割れの原因としての ASR の特定	ASR ゲルの存在≠ASR 膨張、ASR ゲルが骨材の亀裂を誘発している組織観察が必要	方法論が未確立	偏光顕微鏡観察、EPMA による面分析	抑制対策立案に必須の基礎情報

注：作用機構の観点から考え得る事象を列挙。実環境における、実構造物への影響度合いについては、現実の調査をととした包括的なレビューが必要であり、すぐに対策を講じなければならないとは限らない点には注意が必要。

対策への岩石・鉱物学的評価手法の適用について、その有用性と活用方法の検討を行った。さらに、現行の骨材の試験法を再検証し、その問題点と今後の対策に関する検討も行った。WG2 (ASR 劣化構造物の調査・診断 WG) では、最新の情報を整理し、ASR 劣化実態の把握およびそれらの維持管理の取組みについて検証し、今後の合理的かつ経済的な維持・管理計画の策定に役立つ基礎資料の作成に取り組んだ。WG3 (コンクリートに関連した ASR 課題の検討 WG) では、現在問題となっている ASR に関連した諸問題についての既往の研究のレビューを行った。

2. 反応性骨材の岩石・鉱物学的評価方法 (WG1-1)

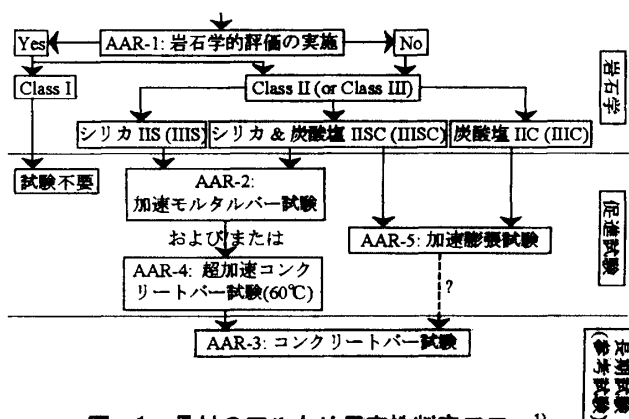
2.1 岩石・鉱物学的評価方法の重要性

本研究委員会の特徴の一つは、この 20 年間の ASR に関する国内での研究において取り上げられることが少なかった岩石・鉱物学的評価方法の重要性を指摘し、方法論を提示していることである。ASR による劣化が深刻であり、作用機構に立脚した対策が整備されてきつつある北米、欧州、オーストラリアなどでは必ず骨材の岩石・鉱物学的評価が根底にある。図-1¹⁾に RILEM で検討されている骨材の評価フローを例として示す。

もう一つの特徴は、ASR の実態調査の重要性を主張している点にある。上記の諸外国で ASR 対策が進んだ背景には、ASR による被害例が的確に報告され、かつ岩石・鉱物学的評価に基づく診断がなされたことが、重要な役割を果たしたと推定される。いずれも理想論ではなく、現実の劣化に対応するために必要なものであった。日本で ASR 劣化を引き起こした主な岩種は安山岩とチャー

トであると考えられるが、諸外国では堆積岩中の隠微晶質石英による遅延膨張型の ASR が問題となったという違いはある。日本の多くの骨材、つまり安山岩やチャートに対して、化学法ともルタルバー法が有効であるのは事実であるが、日本にも少なからず存在する隠微晶質石英を含む堆積岩系の遅延膨張型骨材の反応性の検出には限界があるのも事実である。

日本で岩石・鉱物学的評価が、コンクリート工学になぜ根付かなかったのだろうか? 1980 年代後半、東京大学の小林一輔教授(現名誉教授)は、ASR 研究に同大地質学教室の飯山敏道教授(現名誉教授)の参加を呼びかけた。飯山教授は、岩石・鉱物学の基礎知識を背景に、鉱床の成因論と水溶液と岩石の反応を取り扱う Geochemistry の専門家であり、ASR の発生機構の解明には適任であった。1993 年の土木学会示方書改定委員会の内部資料を見ると、本章で記述する多くのことは整理されている。

図-1 骨材のアルカリ反応性判定フロー¹⁾

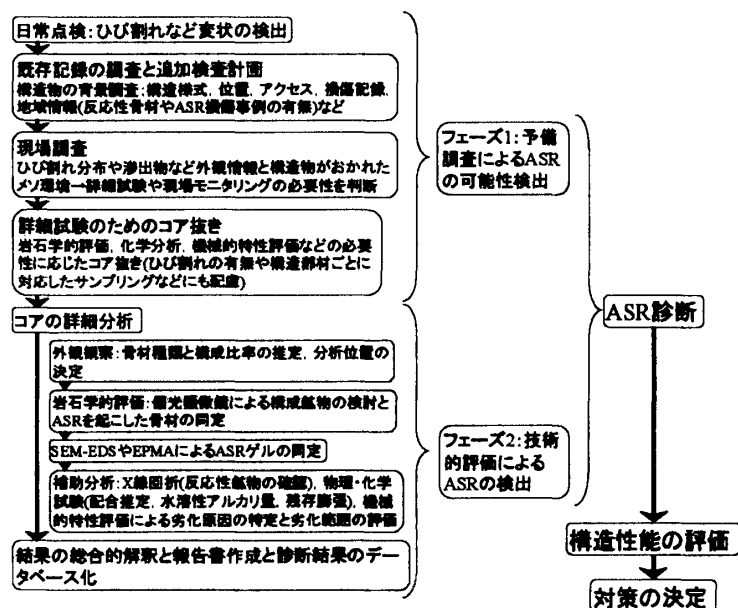
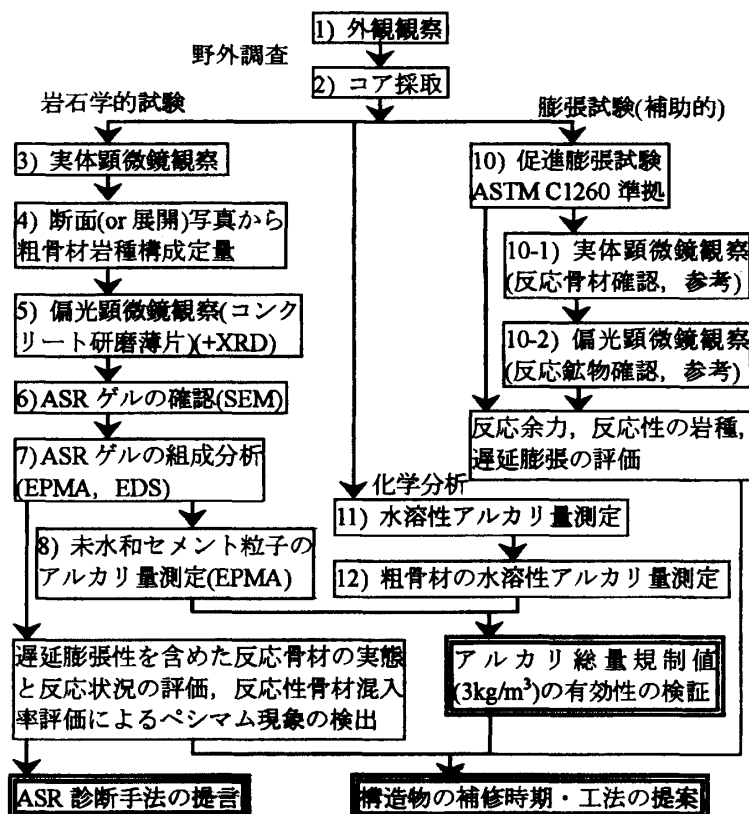
図-2 ASR 診断フロー¹⁾

図-3 岩石・鉱物学的詳細検査(文献3)を元に修正・加筆)

1980年代後半, 早期に実効性ある ASR 対策を広めるため, 反応性骨材の判定法と ASR 抑制対策が国交省により定められた。この対策は比較的短時間の試験結果を元に定められたものであり, 現場経験を元に有効性の確認が必要なものであった²⁾。

ASR 抑制対策実施以降の構造物では, ASR による劣化は激減しているであろうが, 一方で, 少数ではあっても, 従来の抑制対策では考慮されていない作用機構により, 重要構造物で深刻な被害が発生しているのも事実であろう。ならば, 新しい作用機構を検出し合理的な対策を講じるために, 岩石・鉱物学的観点から実構造物の劣化原因を調査することが必要である。岩石・鉱物学的評価なしには, 構造物の劣化の本質的原因の特定は不可能であるし, 新設に用いる骨材のアルカリ反応性の合理的な判定法への改善も困難である。ゆえに, 時間は要するであろうが, 岩石・鉱物学的評価が国内に根付き, 有効に活用されることを期待する。

3.2 現行抑制対策に十分には考慮されていない作用機構の再考

現実の構造物において見過ごされがちな重要な作用機構として考え得るものを表-2 に列挙した。

ここに示した事項の多くは, 現行の抑制対策が議論されていた 20 年前において, すでに指摘されていたものも多い。土木学会コンクリート標準示方書 2007 年版においては, この一部が反映されている。

問題となるのは, これらの機構による実コンクリート構造物の被害状況である。現行の抑制対策では十分には考慮されていないこれらの機構が, どの程度の割合でどの程度の劣化を引き起こしているのか, 実態調査なしには不明であるため, 工学的に意義がある対策を立てにくい。この観点からも, 岩石・鉱物学的観点からの劣化原因の調査が必要である。

表-1 に示したような現象について理解するためにも, 委員会報告書では ASR の作用機構に関する最新のレビューを行った。

3.3 コンクリート用骨材の分類

現在, コンクリート用骨材の命名は, 骨材種類により対応する法規に従って行われている。石灰石骨材は鉱業法, 川砂利(砂)などは砂利採取法, 砕石は採石法, などである。これらの命名はコンクリート用骨材としての意義を考慮されたものではなく, 日本にはコンクリート用骨材としての岩石種類を記載する規程はない。その意義が工学的に認められない, ということが, 日本で岩石学的方法論が確立していない理由と推定できる。化学法とモルタルバー法でアルカリ反応性の判定ができるのなら

ば、わざわざ骨材を岩石学的に評価する必要はない、という理屈になる。しかし、残念ながら学術的にはそうではない。さらに、碎石に関しては、骨材商品の名称が学術的には妥当でないと考えられるものも多数ある。破碎しない天然の川砂利などは、複数種類の岩石の混合物であり、岩種構成を理解しない限り反応性を推定できないし、骨材のアルカリ反応性試験の選定もできない。

一方、海外の多くの地域では、思想的に、コンクリートに使用する骨材の岩石種類を正しく評価するということは、当然と考えられている。適切な命名は骨材の履歴を明らかにするという観点でも有効である。

そこで、本研究委員会では、骨材のアルカリ反応性を考慮した岩石学的分類と記載方法について提案した。また、骨材は採取場所の特性から、その品質に一定の変動を有するものであることを認識することも重要で、この点についても解説した。これらを考慮した骨材の記載シートの提案も行った。

この提案を行うに際し、従来情報を整理し、岩種ごとの反応挙動や、反応を示す可能性がある岩種と特徴の整理も行った。さらに、ASR 以外の機構で、骨材に起因する劣化も多くあり、その概要の整理も行った。

3.4 ASR 診断フロー

ASR が疑われる劣化構造物の診断は、維持管理を目的とする場合がほとんどであり、ひび割れ発生による劣化の原因推定までなされることは多くない。維持管理が目的であるので、当然、対象構造物の劣化の進行予測が主眼となる。このような体制は当面の劣化構造物の維持管理には経済的で合理的とも見える。しかし、劣化の原因を調べないため、従来実施されてきた ASR 抑制対策が有効であったのかどうか不明確なままである。次章でも述べられるが現在の ASR 抑制対策は暫定なのであり、その効果は実構造物の変状を解析することで初めて実証されていくし、問題点も明らかになる。

本研究委員会では、このような考えから、原因調査が適切になされることを期待して、ASR 劣化の原因調査の診断フローを提案した。RILEM AAR-6 を元にまとめた ASR に関する診断と評価のフローを図-2 に示す。また、このフロー中のコアの詳細分析の具体的内容を図-3 に示す。この方法は、表-1 で示した種々の問題を解決するためのルーティン解析でもある。コンクリートの研磨薄片を作製し、偏光顕微鏡で観察するという一定の経験と技術を要する作業をベースとしているので、現時点では一般的とは言えないが、この手法が広く実施されない限り、日本における ASR 被害の真の姿は見えてこないであろう。本手法による結果は、劣化構造物の維持管理計画立案の基礎データとなると共に、現行抑制対策の有効性を確認、もしくは見直す基礎データともなる。

3.5 ASR 診断の実際

現場でひび割れが観察され、構造物種類と部位や環境条件、および「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針（日本コンクリート工学協会）」などを参考に、ひび割れパターンから ASR の可能性が推定される場合が多いであろう。しかし、これらの情報のみから、ひび割れの原因を ASR と判定するのがいつも簡単であるとは限らない⁴⁾。

劣化原因が ASR であることの決定的証拠は、骨材が ASR ゲルにより破断している組織の直接観察(偏光顕微鏡、もしくは電子プローブ微小部分分析(EPMA)による面分析)とそのひび割れの構造物全体の劣化への寄与の確認である。しばしば簡易的に SEM で ASR ゲルの典型的組織を確認することで済まされるが、ASR ゲルの存在だけでは、ひび割れが ASR によるものとは言えない。

抑制対策の前後に関わらず、原因推定が容易ではないケースとして、以下のようなものがある。

- ・ひび割れパターンから ASR と推定されるが、観察によりゲルが検出されない。
- ・コア観察ではゲルが認められ、薄片の顕微鏡観察により、反応性の可能性がある骨材は確認できるが、ASR ゲルが見つからない。
- ・ASR ゲルは確認できるが、原因物質がごく少量。
- ・副次的反応(例えばエトリンガイト生成)との混同
- ・複合劣化の場合(例えば凍害との複合)

上記のような困難な場合はあるが、岩石・鉱物学的評価は原因特定に有効であることには間違いない。抑制対策以前の構造物調査には、抑制対策の有効性と限界を確認する意義がある。抑制対策以降の構造物調査には、抑制対策が不十分であった原因もしくは新しい劣化機構を探り、より有効性の高い対策を提案する基礎となる。さらに実構造物の劣化・変状の原因特定が常に明確に分るというものではないことを受け入れるのも、技術の進歩には重要であろう。分ったとしても原因は複合的で、多くの因子が相互に絡み合っている場合もあり、単純な対策として一般化しにくい場合もある。

学術的には図-3 のフローに従った詳細な分析が望ましいが、予算的制約や診断の目的が限定されるなどして、現実には断片的な情報のみで済まされることが大多数である⁴⁾。前述のように診断の目的が維持管理であるために、残存膨張試験が主体となりがちである。コンサルティング会社には守秘義務があり、実態を公開してもらうことは困難であるが、日本全体の技術レベルの向上のため、発注者側が情報を整理して公開して行くことが重要であると技術者倫理の観点から考える。この際、一部の経験豊富なコンサルティング会社の技術者、または限られた学識経験者以外では、岩石・鉱物学的解釈を誤

表-3 日本の ASR 年表

1982	阪神地区での損傷事例の発見(ASR によるコンクリート構造物の劣化が本格的に問題化)
1983~1985	建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」
1986	建設省通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」通達, JIS A 5308「レデーミクストコンクリート」(当時)の ASR 対策
1989	建設省通達「アルカリ骨材反応抑制対策について」(建設省技術調査室)
2000, 2001	ASR 抑制対策が機能しなかった事例の最初の報告
2001	福島県での ASR 疑惑(「無害」判定の骨材と同じヤードからの抜取り骨材の再評価が「無害でない」と判定された)
2002	国土交通省「アルカリ骨材反応抑制対策について」を改訂(アルカリ総量規制, 混和材使用, 無害骨材の順に)
2003~2004	国土交通省が全国の直轄国道及び高速道路等の橋梁で ASR に起因する損傷について調査
2004	福島県で骨材の反応性の判定結果のねつ造事件

る可能性があり、関連機関の密接な連携も重要である。

4. ASR 抑制対策についての検討(WG1-2)

4.1 ASR 抑制対策の経緯

わが国での ASR 抑制対策の経緯を表-3 に示す。わが国で ASR によるコンクリート構造物の劣化が本格的に問題となったのは、1982 年頃の阪神地区での損傷事例の発見がきっかけであると言われている。この時期には、東北日本海側などで塩害によるコンクリート橋の劣化も顕在化し、いわゆる「コンクリートクライシス」としてマスコミにも大々的に取り上げられることとなった。

阪神地区での損傷事例の発見の後、日本各地でそれらしき事例が発見され、多くの研究機関等で、損傷の原因から骨材の実態、劣化メカニズム、劣化予防方法、補修方法等について広範な研究が行われた。特に昭和 58~60 年度に行われた建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」は官学民を巻き込んだ大プロジェクトであった。それに並行して開催された建設省の「コンクリート構造物の耐久性向上技術検討委員会」では、諸外国の対策やわが国での最新の関連する研究成果を検討した。この成果が、昭和 61 年の建設省の「アルカリ骨材反応暫定対策について」通達や JIS A 5308「レデーミクストコンクリート」(当時)の ASR 対策の原型となった。この通達は、その名称が示すように、あくまでも暫定対策であった。

このため 3 年後の平成元年には、この通達は最新の研究成果を取り込んで改訂された。通達の名称、「アルカリ骨材反応抑制対策について」(建設省技術調査室)が示すように、そこに示された対策は「抑制」であり「防止」とはなっていない。合理的・経済的に、かつ完全に ASR を「防止」することは困難であるとの判断があった。こ

の事実は、現在も変わっていない。

平成元年の通達および JIS A 5308 の附属書の ASR 対策は、その後継続して効力を発揮したが、2001 年に福島県で、「無害」と判定された骨材と同じヤードから抜取り調査された骨材が「無害でない」と判定されるという事例も発生し、また、2004 年には同じ福島県で骨材のアルカリ反応性に関するデータの改ざんが発覚した。このような事例の原因は、骨材が天然材料であり、サンプリングの度に判定結果が変わりえる可能性が十分にあることも一因ではあるが、福島県の事例に限られたことではないことも明らかになってきた。この事実を重く見た国土交通省は、2001 年に「コンクリート中の塩分総量規制及びアルカリ骨材反応抑制対策に関する懇談会」を立ち上げ、通達の ASR 抑制対策をより効果的かつ確実なものにするための方向性を検討した。

もともと、昭和 61 年と平成元年の通達では、少なくとも土木分野では、(1)試験により無害と判定された骨材の使用、(2)低アルカリ型セメントの使用、(3)ASR 抑制効果のある混和材の使用あるいは混合セメントの使用、(4)コンクリート中のアルカリ総量の抑制 (3kg/m^3 以下)、の 4 つの抑制手法は横並びで優先順位が付けられていたわけではなかった。しかし、一部には「無害」の骨材でなければ使用してはいけないとの間違った認識もされるようになっていた。このため、骨材製造者としては何があっても「無害」というラベルを貼りたいという方向へ向かったようである。

2001 年時点では既に、低アルカリ型セメントの製造は事実上皆無で、普通ポルトランドセメントのアルカリ含有量はかなり低下して、低アルカリ形に相当するレベルとなっていた。このため、ごく普通に使用される配合の範囲では、容易にコンクリート中のアルカリ総量を 3kg/m^3 以下に抑制することが可能となっていた。また、土木分野では高炉セメントの使用量が増えていた。このような状況を考慮し、国土交通省は 2002 年に「アルカリ骨材反応抑制対策について」を改訂し、ASR 抑制対策を見直し、(1)コンクリート中のアルカリ総量の抑制 (3kg/m^3 以下)、(2)ASR 抑制効果のある混和材の使用あるいは混合セメントの使用、(3)試験により無害と判定された骨材の使用、とした。なお、土木分野では優先順位も示し、(1)(2)(3)の順としている。

4.2 ASR 抑制対策の効果の検証

ASR 抑制対策の効果について多数の構造物を調査した事例としては、2003 年~2004 年に国土交通省が全国の直轄国道及び高速道路等の橋梁で ASR に起因する損傷について調査したものがある⁵⁾。この調査の結果、国土交通省の直轄橋梁には、アルカリ骨材反応が生じていると見られる橋梁が約 2% あった。しかし、1987 年の以降

に竣工した橋梁では劣化事例がほとんどなく、ASR 抑制対策の効果が現れているものと考えられる。

橋梁以外のコンクリート構造物についても調査した結果としては、旧建設省、旧運輸省、農林水産省が共同で設置した「土木コンクリート構造物耐久性検討委員会」によるコンクリート構造物の実態調査結果がある。この調査では、竣工年代や地域ごとにランダムに選定された 2099 件（旧建設省分）の構造物（橋梁、擁壁、カルバート、河川構造物、トンネル）について目視による調査などが行われたが、抑制対策の適用以後は、ASR によると見られる損傷が生じた構造物はなかった⁹⁾。

一方、抑制対策以降に建設された構造物で ASR が生じた事例も少数であるが報告されている。例えば上田らは、平成 7 年に竣工した橋梁において、竣工から 2 年後に ASR による変状が見つかったこと、一方、この橋梁に用いられたコンクリートの配合報告書を確認したところ、モルタルバー法での試験の結果「無害」と判定された骨材が用いられていたこと、同一産地の骨材で化学法による試験を行った結果でも「無害」と判定されたことなどを報告している⁷⁾。

また、海外の事例であるが、Katayama は、極めて反応性の高いガラス質の流紋岩が含まれるコンクリートで、コンクリート中のアルカリ量が Na_2O 当量で 2.6～3.1 kg/m^3 と比較的少ないにもかかわらず、ASR による膨張が生じている事例があったことを報告している⁸⁾。

これらを考え合わせると、1986 年に定められた対策を適切に実施することにより、コンクリート構造物の ASR による劣化を、ほとんどの場合で防ぐことができると考えられる。しかし、100%防げるものではないことを忘れてはならない。

4.3 骨材の ASR 反応性試験の検討

各委員からの報告により、例えば、次のような課題があることが指摘された。

アルカリ総量が多い場合に長期的な膨張を示すことがある隠微晶質石英などの有害性は、化学法や JIS モルタルバー法で検出することが困難との指摘があった。

石灰石（炭酸塩岩）では造岩鉱物である方解石、ドロマイトなどの炭酸塩鉱物がアルカリ溶液中で化合物を生成しアルカリが消費されるため、 R_c が大きく評価され、正しい判定が得られないが、石灰石骨材の評価に化学法が用いられている場合も散見するとの指摘があった。

オパールなど極めて反応性の高い鉱物は、骨材中に占める割合が少量でも ASR の原因になりうるが、サンプリングによっては検出されないおそれがあり、こうした鉱物の有害性を従来の骨材試験で評価することは容易ではないとの指摘があった。

4.4 ASR 抑制対策の課題

検討の結果、わが国の ASR 抑制対策の今後の課題としては、例えば以下の項目が挙げられる。

(1) 総量規制の規制値

Na_2O 当量で 3 kg/m^3 以下に規制しても ASR が生じる可能性が指摘されており、その理由としては、極めて反応性の高い鉱物には 3 kg/m^3 以下に規制したコンクリート中でも反応すること、骨材からのアルカリの溶出により局部的に高アルカリ環境が形成されるおそれがあること、海水や融氷剤中のナトリウムイオンがコンクリートに侵入するおそれがあること、などが挙げられた。

(2) 混和材、混合セメントの使用

フライアッシュを用いた抑制対策については、海外基準ではフライアッシュの成分などを考慮してセメント置換率を規定している場合がある。混和材の品質が変化することも想定した規制方法が必要か、検討の余地がある。

(3) 骨材試験による方法

骨材試験方法には種々の提案があるが、前節に示したように限界もあるので注意が必要である。また、骨材は天然のものであるため、採取する間に品質が変化することは避けられない。このような点をふまえると、骨材試験のみで ASR を完全に防止することは困難であり、合理的な活用方法が求められている。

5. ASR 劣化構造物の実態とその対策 (WG2)

5.1 ASR 劣化構造物実態調査の現状および将来への課題

これまで、各種 ASR 劣化構造物の実態調査がなされ、ASR がどの地域で多発し、どの程度の頻度で生じているのかはある程度は明らかになってきている。しかし、ASR が生じた構造物の発生原因については、明確でない場合が圧倒的に多い。なぜならば、多くの場合において使用された骨材や配合に関する情報が不明なためである。

WG2 では、「必要とされている ASR 劣化構造物実態調査結果」を明確にするため、2 つのアンケートを本研究委員会内で実施した。その結果、骨材情報あるいは骨材情報と劣化状況の関係が分かれば、新設構造物だけでなく、既設構造物の維持管理にも有効であるとの意見が多数集まった。また、現状では ASR 劣化が顕著に現れていると認識されている構造物は、ASR 抑制対策以前に建造されたものがほとんどであるため、ASR 抑制対策以降に建造された構造物の実態を把握すべきである、という意見も得られた。

本報告書では、上記アンケートの結果を受け、ASR 劣化実態調査結果に関して、骨材情報が得られている劣化実態調査結果について重点的に触れている。しかしながら、骨材情報が得られている実態調査結果の例は少なく、また、骨材情報が得られているものは ASR の劣化が著しく進行しているものに偏る傾向が見られた。危険を過度

に類らないためには、ASR の劣化が著しい場合の情報だけでなく、劣化の進行が穏やかな場合や ASR が生じていない場合の調査結果も必要である。

構造物において使用された骨材情報を得るには、コアを採取し、骨材を観察して骨材種類を判定することが最も確実である。しかし、コアの採取・骨材種類の判定には費用がかかる。本報告書では、コアの採取・骨材判定にかかる費用を低減させることを目的とした、小径コア採取による調査の有効性についても検討を行った。

5.2 ASR 劣化構造物の維持管理の現状と課題

ASR 劣化構造物の維持管理のための技術的な指針類が、近年各団体から提案されてきている。コンクリート構造物における ASR の実態を調査するための手法としては、古くは 1986 年に、当時の建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」においてとりまとめられている。このプロジェクトで各種実態調査手法が提案されてから約 20 年が経過し、その間に ASR に関する多くの知見も蓄積されてきた。ここでは、近年とりまとめられつつある各種維持管理に関する指針類を参考に、現状を整理し、今後、より適切な維持管理を実践していく上での課題についてとりまとめた。

上述した各種維持管理に関する指針類のとりまとめを行った結果、ASR 劣化構造物に対する維持管理方法において、評価・判定に関する記述は必ずしも同じではない。この理由としては、以下のようなこと等が考えられる。

- (i)使用されている骨材種類は地域によって大きく異なる。
- (ii)維持管理対象となる構造物の種類と数、それらに求められている性能は、構造物の管理にあたる団体によって大きく異なる。
- (iii)維持管理を実施する体制（技術者の数、予算上の制約等）は、管理する団体によって大きく異なる。

すなわち、維持管理に関する指針類を作成するに当たっては、地域の事情や構造物の管理にあたる団体の特徴を踏まえ、個々の状況に適した技術指針類を整備することが重要である。

6. コンクリートに関連した ASR 課題 (WG3)

6.1 ASR に関連したコンクリートの諸問題

ASR においては、骨材の試験方法および岩石・鉱物学的評価以外にもコンクリート構造物の施工、維持管理に関連した多くの課題が残されている。昨今の研究の蓄積にもかかわらず、ASR メカニズムの複雑さや骨材の多様性がその要因であると考えられる。WG3 で取り組んだ内容は、以下のものである。特殊骨材や人工軽量骨材などに ASR 発生に関するもの、実構造物における各種環境作用および複合劣化現象に関するもの、さらには、維持管理対策実施に関連した ASR 劣化コンクリートの力学性

状、劣化予測および電気防食と ASR の関係に関するものなどである。以下に WG3 での検討概要を述べる。

6.2 特殊骨材および人工軽量骨材

(1) 特殊骨材のアルカリシリカ反応

循環型社会への移行および骨材枯渇の観点から、再生骨材、スラグ骨材およびガラス破砕骨材などの特殊骨材の利用が進められている。これらの骨材に対する ASR に関する規程や最新研究について取りまとめを行った。

再生骨材については、ASR 劣化構造物から採取した骨材を現行の JIS 規格に基づき、再生骨材として製造したものについての検討や、化学法における付着モルタルの影響に関する検討などについて報告した。ガラス破砕骨材については、各種の既往研究をレビューし、それらの使用時でのフライアッシュや高炉スラグなどの鉱物混和材による抑制対策の有効性を指摘した。

(2) 人工軽量骨材のアルカリシリカ反応

人工軽量骨材を使用したコンクリートに関しては、最近まで、ASR による劣化事例は報告されていなかった。そのため、人工軽量骨材を用いたコンクリートでは、ASR は生じないものと考えられてきた。しかし、軽量骨材において ASR 発生に関する最新の報告があるため、人工軽量骨材中のゲルの膨張圧緩和や軽量骨材内部の気孔が与える影響、被害事例、反応性試験方法さらには人工軽量骨材における ASR 抑制を目的とした人工軽量骨材の改質方法などの研究・報告について整理した。

(3) 長期アルカリ環境下における骨材の挙動

放射性廃棄物施設等、長期にわたる使用を前提とする場合について、骨材のアルカリ環境下における長期安定性の問題が検討されている。ASR 以外のものも含めて長期アルカリ環境下に関する骨材挙動に関して、長期間の ASR 評価、骨材中の鉱物の変質などの研究・報告について整理を行った。

6.3 各種環境作用および複合劣化現象

(1) 使用・環境条件が与える影響

骨材の多様性ととも、使用・環境条件が ASR に与える影響は大きいとされる。環境条件が与える影響については、温度、湿度、日射および水掛かりなどに着目し、これらに関する既往の研究を整理した。さらに、外部からのアルカリ供給については、凍結防止剤、海洋環境下における海水の影響に着目し、整理を実施した。海洋環境においては、実構造物における飛沫帯や干満帯での劣化事例、塩化物イオンの影響に関する実験的研究、さらには複合劣化についても範囲を広げ、整理を行った。

(2) 凍害との複合劣化

凍害との複合劣化については、ASR および凍害を促進する要因において、温度条件の影響について着目し、実環境においては促進される季節が異なることから、そ

れぞれの劣化が異なる時季に進むことを既往の研究と関連づけながら整理を行った。また、各劣化機構において生じる劣化形態（ひび割れ、ポップアウト、スケーリング）に着目し、各劣化によって生じた変状（ひび割れ等）が、複合劣化へ与える影響の可能性について既往の研究と関連づけながら整理を行った。さらに、近年、実施された凍害と ASR により劣化した構造物での調査事例についても取りまとめている。

(3) エトリンガイト遅延生成 (DEF) と ASR

この劣化は、硬化後数年間を経たコンクリート内部組織全体に生じる膨張による劣化現象であり、ひび割れの大部分に多量のエトリンガイトが2次生成することから、DEF (Delayed Ettringite Formation, エトリンガイト遅延生成) と呼ばれる。ASR によって生じたひび割れ中にも観察されることがあるが、ASR と DEF との関連性は明らかにはされていない。そこで、既往の研究の整理を行うとともに、岩手大学において行われた DEF と ASR に関する一連の実験的検討を紹介し、得られた結果に基づく、両者のメカニズム、発生条件、DEF と ASR の共通点や相違点と知見を取りまとめた。

6.4 維持管理対策実施に関連した ASR 課題

(1) 劣化コンクリートの力学的性状

ASR 劣化コンクリート構造物の補修・補強などの対策実施においては、劣化コンクリートの力学的性状を適切に反映させた対策設計が必要である。ASR 劣化コンクリートの力学的性状（圧縮強度、静弾性係数および変形特性）に着目し、膨張量とそれらの関係、拘束が与える影響に関する既往の研究を整理した。

(2) 劣化予測

劣化構造物の維持管理において劣化予測はきわめて重要である。ASR においては、反応がきわめて複雑であり、それらの劣化モデルが十分に確立していないのが現状であるものの、いくつかの劣化予測モデルが提案されている。調査結果に基づく手法や解析に基づく手法、残存膨張率の測定に基づく手法など提案されている劣化予測の考え方について整理した。

(3) 電気防食との関係

電気防食工法は塩害が劣化した構造物の補修工法の一つである。ASR を生じた構造物において塩害による劣化を同時に受けている構造物も使用・環境条件によっては存在する。電気防食が与える影響については、コンクリート中の電気伝導現象のメカニズム、それに伴うイオンの集積、さらには、電気防食による通電が ASR 膨張に与える影響について既往の研究に基づき整理を行った。

7. あとがき

本研究委員会の活動は本年3月をもって終了し、その

成果をとりまとめた報告書の出版に向けて鋭意作業を実施している。本報告書においては、岩石学的評価の活用方法、現状の骨材の反応性試験法の見直しなど、ASR の材料的な側面を切り口とした現状の課題および今後のあり方についての考え方を提示する予定にしている。また、出版書の出版に合わせて、下記の要領で講習会を開催し、それらの成果の公表を行う予定である。

「合理的なアルカリ骨材反応抑制対策と維持管理に対する提言に関する講習会」
開催日 2008年9月5日(金)
開催場所 東京大学農学部弥生講堂
内容: ①基調講演 ②委員会報告

本研究委員会では、ASR に関する現状の課題について材料科学的な観点から各種の検討を行い、これまでの ASR に対する取組みや現状の問題点を整理し、今後の解決策について提言するなどし、この十数年間の研究の進歩を踏まえ、今後、ASR 問題に取り組む際の有用な情報の整理を行うことができた。一方、未解決の問題も残されており、ASR の近年の研究などの取組みが一時的なものではなく、継続的に取り組まれることを望み、結びといたします。

最後に、本研究委員会の活動の機会を与えていただき、ご支援を賜った JCI ならび JCI 研究委員会に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 山田一夫：最近の国際的な AAR 関連基準の動向－RILEM TC 191-ARP の指針の概要－，セメント・コンクリート，No. 704，pp. 16-25，2005
- 2) 建設省土木研究所地質化学部：日本産岩石のアルカリシリカ反応性，ISSN0386-5878，土木研究所資料第2840号，1989
- 3) 福永靖雄，松井隆行，座波清，山戸隆秀：沖縄におけるアルカリ骨材反応の診断手法，第27回日本道路会議，20040，2007
- 4) 山田一夫，川端雄一郎，河野克哉，林建佑，広野真一：岩石学的考察を含んだ ASR 診断の現実と重要性，第7回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文集，2007
- 5) 国土交通省道路局：直轄国道，高速道路等におけるアルカリ骨材反応が生じた橋梁の調査結果について（お知らせ），記者発表資料，<http://www.mlit.go.jp/index.html>，2004.9
- 6) 古賀裕久，河野広隆，渡辺博志：コンクリート構造物の健全度に関する実態調査結果，Vol.42，No.12，pp.58-63，2000.12
- 7) 上田洋，松田芳範，石橋忠良：アルカリ反応性の観点から見た骨材の現状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，PP.607-612，2001.6
- 8) Tetsuya Katayama：Alkali-Aggregate Reaction in the Vicinity of IZMIR Western Turkey，11th International conference on alkali-aggregate reaction，pp.365-374，2000.6