

# 委員会報告 性能規定に基づく ASR 制御型設計・維持管理シナリオに関する研究委員会

山田 一夫\*1・山本 貴士\*2・佐川 康貴\*3・上田 尚史\*4・久保 善司\*5・小川 彰一\*6

**要旨:** 本委員会では、構造物の重要度と要求性能に応じたアルカリシリカ反応 (ASR) の制御型設計および維持管理への連係シナリオの確立を目的に、ASR 発生可能性を評価し、膨張挙動を予測するためのコンクリートプリズム試験 (CPT) の高度化を検討した。また、JCI の ASR 関連規準 (AAR3, DD2) の改正案を提示した。一方、ASR 劣化部材の構造性能評価について、共通の ASR 供試体を対象とした解析を実施し、評価に必要な情報をまとめるとともに、膨張予測を基にした性能予測の課題を示した。さらに、管理者へのヒアリングをもとに ASR に対する維持管理の課題を整理し、ASR を考慮した設計・維持管理シナリオを示した。

**キーワード:** ASR 制御, 設計・維持管理連係シナリオ, コンクリートプリズム試験, 構造性能評価

## 1. はじめに

アルカリシリカ反応 (以下、ASR) に対しては、これまで必ずしも十分でない骨材のアルカリ反応性試験とコンクリート配合上の抑制対策をもとに、設計上は劣化が生じないとする「抑制」型の設計が行われてきた。しかし、ASR の疑われる構造物は未だ報告され、維持管理での点検、評価、予測の技術上の課題が多く、事後維持管理とならざるを得ない現状である。また、ASR 補修・補強対策に対する実構造物での長期的な評価、フィードバックが不十分で、対策の難しさを生み出していた。

そこで本研究委員会では、設計の対象とする構造物で ASR が発生した場合の構造物への影響度をあらかじめリスクレベルとして評価し、構造性能を含めた要求性能と構造物の重要度に応じた ASR 「制御」型の設計および維持管理の連係シナリオを確立することで、ASR への対策を容易にする技術的フレームを提案することを目的とした。本研究委員会の構成を表-1 に示す。

WG1 (試験・予測法) では、ASR 発生可能性および膨張予測を実現するための試験法を検討した。ここでは、「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会 (TC115FS, 2011-2013)」<sup>1)</sup> で有用性を見出したコンクリートプリズム試験 (以下、CPT) に着目した。全国数機関参画の共通試験に基づき、促進倍率や環境依存性の定量化を考察し、試験方法の一般化を図るとともに、膨張挙動予測への適用を検討した。また、既存の JCI-ASR 関連規準 (AAR3, DD2) の改正案を提示した。

WG2 (診断・対策) では、ASR 劣化構造物の実際の診

断、対策で問題となっている点を明らかにするために、道路管理者を中心とした意見収集を行った。また、国内外のガイドラインを収集し、技術者レベルがそれほど高くない状況での現実的な維持管理フローのあり方を検討した。さらに、補修・補強対策の耐久設計に用いることのできる対策後の耐久性データの収集に当たった。

WG3 (性能評価) では、ASR が発生あるいは進行した場合の部材の変形、応力解析ならびに性能評価手法を整理した。これに関連して、構造性能評価のための解析ツールを利用する際の、情報入力から出力に至る手順の問題点を抽出するために、ASR 劣化供試体を対象とした共通解析を実施した。さらに、膨張予測可能性を組み入れた構造性能予測の技術的課題を検討した。

表-1 委員会構成

委員長	山田一夫	国環研	幹事長	山本貴士	京都大学
WG1 (試験・予測法)		◎: 主査			
◎佐川康貴	九州大学		五十嵐豪	東北大学	
鹿毛忠継	国総研		川端雄一郎	港空研	
子田康弘	日本大学		丸山一平	名古屋大学	
吉田夏樹	日総試				
WG2 (診断・対策)		◎: 主査 ○: 副査			
◎久保善司	金沢大学		○小川彰一	太平洋コンサルtant	
岩月栄治	愛知工業大学		古賀裕久	土木研究所	
鶴田孝司	鉄道総研		萩原直樹	NEXCO 総研	
WG3 (性能評価)		◎: 主査			
◎上田尚史	関西大学		合田寛基	九州工業大学	
高橋佑弥	東京大学		寺本篤史	広島大学	
戸田圭彦	JIP テクノサイエンス		富山 潤	琉球大学	
三木朋広	神戸大学				

\*1 (国研)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 工博 (正会員)

\*2 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 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)

\*4 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*5 金沢大学 理工学域環境デザイン学類准教授 博士(工学) (正会員)

\*6 (株)太平洋コンサルtant 営業推進部 博士(工学) (正会員)

## 2. ASR 発生リスクの評価と予測に向けた技術的課題

### 2.1 試験法

#### (1) コンクリートを用いた試験法の位置付け

コンクリートの ASR による膨張は、骨材の種類や粒度、セメントの種類、水セメント比、骨材の組合せ等、種々の要因によって影響されることが、これまでの研究によって明らかにされてきている。また、近年では化学法やモルタルバー法では反応性を検出できない骨材の存在も指摘されている。よって、現状では、ASR によるコンクリートの膨張性および抑制対策を正しく評価する方法としては、実際のコンクリートに用いられる材料と配(調)合に基づいてコンクリート供試体を作製し、試験を実施することが最も信頼性が高いと考えられる。

JCI では、従来から、JCI AAR-3「コンクリートのアルカリシリカ反応性試験方法(コンクリート法)」が規定されている。これは、1983年に設置された「アルカリ骨材反応調査研究委員会(AAR委員会)」及びそれを引き継いだ「コンクリート法によるアルカリ骨材反応判定試験方法研究委員会」(1989年設置)の調査研究の結果として取りまとめられたものであり、制定当時の最先端情報を基に作成されたものであるが、最近の研究成果に基づく、規格の内容について修正が必要な箇所が認められる。そこで、本WGでは、TC-115FSからの検討も踏まえ、(a)アルカリ添加量と試験期間、(b)混和材を用いた場合の試験期間、(c)供試体寸法、(d)保水紙の水量管理、(e)質量変化の測定、(f)供試体の保管方法について修正または追加した改正案を取りまとめた。

#### (2) 最適な促進試験方法に関する検討

海外では、骨材の反応性を判定するため、コンクリートプリズム(角柱)供試体を用いた試験(CPT; Concrete Prism Test)がCSAやASTM、RILEMで規格化されている。これらは、コンクリートのアルカリ総量を $5.25 \sim 5.5 \text{ kg/m}^3$ に設定し、1年間の加速試験を実施するものである。CSAやASTMでは、アルカリ総量を $5.25 \text{ kg/m}^3$ に増量し、 $38^\circ\text{C}$ で1年間促進養生することで、屋外に10年間暴露したコンクリートブロックの膨張量と相関が高く、信頼性のある結果が得られるとされている<sup>2)</sup>。

CPTでは、試験期間中の乾燥やアルカリ溶脱が懸念される。また、これらの要因によって測定結果の変動係数が大きくなることも指摘されている<sup>3)</sup>。このような問題を解決する方法として、コンクリートの細孔溶液中のアルカリ濃度に近い濃度のアルカリ溶液を含ませた保水紙でCPTを被覆する「アルカリラッピング(AW)」と呼ばれる方法(AW-CPT)が提案され、その適用性について次のように報告されている<sup>4)</sup>。ASRは基本的には、骨材中の反応性シリカとアルカリとの反応であり、高温かつアルカリ量が多い場合に膨張率も高くなると考えられ

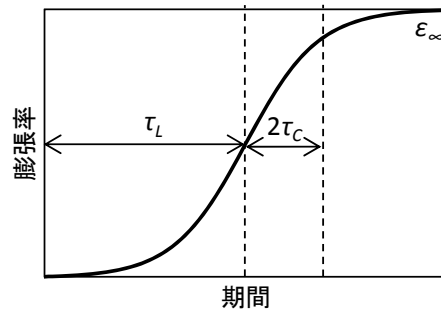


図-1 Larive による膨張モデル<sup>5)</sup>

る。しかし、温度が $40^\circ\text{C}$ や $20^\circ\text{C}$ のように比較的低い場合には、必ずしもアルカリ量が多い場合に、膨張率が大きくはならないこと、また、 $60^\circ\text{C}$ の膨張率を上回ることも等が報告されている。この原因として、促進条件によっては、アルカリシリカゲルが供試体外に失われ、膨張が大きくなることが示唆されている。よって、骨材の反応性によって適切な促進条件を設定する必要がある。また、特に、ペシマム現象を有する骨材を用いたコンクリートにおいては、試験体内での骨材含有量の均一性が疑われ、膨張量の測定結果のばらつきや試験の再現性について更なるデータの蓄積が必要である。

### 2.2 予測

近年では、コンクリート構造物におけるASR膨張を予測し、構造物の変形や耐荷性能を予測する研究が活発化している。このようなASR膨張の予測研究の中では、コンクリートのASR膨張をどのようにモデル化するかが議論の中心的な位置づけになっており、それらに関する調査結果を以下に示す。

膨張予測モデルとして、種々のスケールを対象に、幾つか提案されている。マクロな膨張モデルとして最も国際的に認知されているのはLarive式<sup>5)</sup>であり、以下で表現される(図-1)。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\infty \frac{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_c}\right)}{1 + \exp\left[-\frac{(t - \tau_L)}{\tau_c}\right]} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_t$ : 時間  $t$  における膨張率(%),  $\varepsilon_\infty$ : 最終膨張率(%),  $\tau_c, \tau_L$ : 時間を表す定数(日)である。

CPT等で得られる無拘束の膨張の実験値に対して、式(1)をフィッティングすることで3つの定数( $\varepsilon_\infty, \tau_c, \tau_L$ )を求めると、実際のコンクリート構造物の膨張予測に活用する場合には、温度依存性や湿度依存性、応力異方性に関するモデルを用いて、実際の膨張挙動に換算することになる。これらのマクロモデルは主にIFSTTARを中心に構築されており、そのモデルは参考文献<sup>6)</sup>に取りまとめられている。

マクロな膨張モデルは決定すべき定数が少なく、簡易的である一方、実際の現象を反映できない場合もある。したがって、メソ～ミクロスケールの膨張モデルも近年開発されている。精力的に研究がなされているのは Toulouse 大の Multon らのチームであり、LMDC モデルと呼ばれる<sup>7)</sup>。LMDC モデルは骨材の溶解反応からゲルの生成、拘束圧に応じた骨材（中の ASR ゲル）の膨張圧、破壊力学に基づく損傷による膨張圧の逸散、試験体からのアルカリ溶脱などがモデル化されている。現時点で公表されていないが、このモデルは近年マクロスケールの解析にまで拡張されつつある。また、最近では、ASR に関する基本的な化学反応から反応速度・ゲル生成までを構築する試みが Saouma らによってなされている<sup>8)</sup>。

これらの研究の多くでは、国内で開発された魚本・古澤・大賀 (U.F.O.) モデルが参照されている<sup>9)</sup>。この U.F.O. モデルは、拡散律速による反応進行を前提としたもので、骨材の各粒径での反応を膨張に結び付ける ASR に関する数値解析の初期の研究である。近年では、セメント系水和物と空隙水のアルカリ相互作用を U.F.O.モデルに実装し、ペシマム条件でフライアッシュの ASR 抑制効果が低下するメカニズムの解明に活用された事例がある<sup>10)</sup>。

マルチスケールのアプローチとして、Takahashi ら<sup>11)</sup>は、ASR に関する化学反応と水分・アルカリの質量保存則による生成 ASR ゲル計算モデルと、コンクリートの非線形構造解析モデルを組み合わせることで、拘束条件下での ASR 膨張の異方性が再現可能な膨張モデルを提案している (図-2)。モデルによって、一軸拘束試験体ならびに RC はりで適切な膨張異方性とひび割れ発生が計算されることが示されており<sup>11), 12)</sup>、現在は RC 床版の疲労寿命など、ASR 膨張の構造性能への影響についての検討が進められている<sup>13)</sup>。但し、ASR ゲルの生成速度について、アルカリ濃度や温度・湿度依存性等は考慮されるものとなっているが、骨材の反応性(反応速度係数)につい

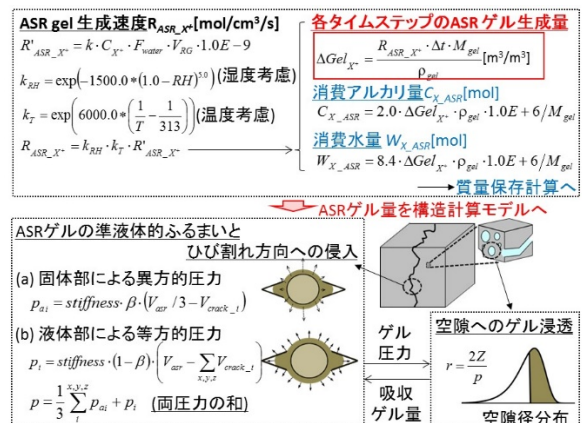


図-2 DuCOM-COM3による膨張モデル

ては骨材毎に大きく値が異なるために、骨材毎に値を取得する必要がある。このような場合に CPT 等の促進材料試験の結果を用いることが有用であると考えられる。

### 3. ASR 劣化構造物の構造性能評価

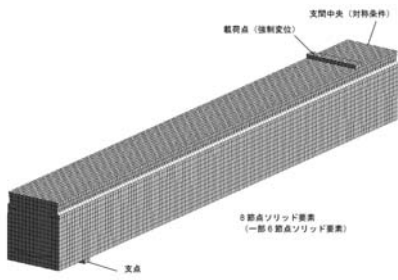
#### 3.1 ASR 劣化構造物の性能評価の現状

ASR が生じたコンクリートにおいては、弾性係数や圧縮強度等の力学特性が低下することが知られている。一方、構造物としての性能は大きく低下しないといった知見もある。従来、ASR 劣化したコンクリート構造の性能については、主として部材を対象とした実験により検討されているが、実構造物を対象とした場合には、その規模の大きさから実験を行うことは容易ではない。また、将来に亘る性能の変化を把握するには、実験のみでは十分な情報を得ることは困難である。したがって、ASR 劣化構造物の性能を解析により評価できることが望まれる。

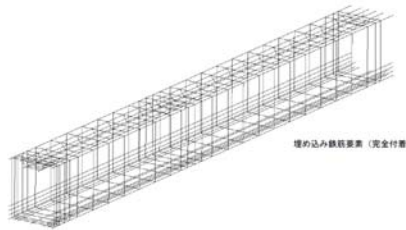
ASR 劣化の問題を解析により評価する試みは、近年国内外において精力的に行われている。とりわけ海外においては、電力関連施設において ASR が生じており深刻な問題となっている現状がある。それらの構造物を維持管

表-2 解析手法の特徴

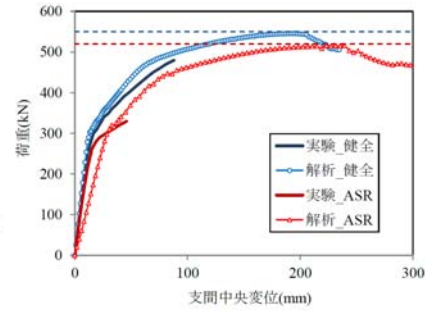
		解析手法 A	解析手法 B	解析手法 C	解析手法 D
基本情報	解析コード	Midas FEA	DIANA	自主開発	自主開発
	コンクリート構成則	全ひずみひび割れモデル	全ひずみひび割れモデル	格子等価連続体モデル <sup>19)</sup>	弾塑性破壊モデル <sup>20)</sup>
	補強筋	軸要素	埋込鉄筋要素	軸要素	RC 要素により定義
ASR のモデル化	ASR 膨張	熱ひずみとして考慮	非考慮 PC 構造の場合は PC 鋼材応力として考慮	損傷理論に基づいた膨張予測モデル <sup>21)</sup>	Biot 固液二相モデルに基づいたモデル <sup>18)</sup>
	材料劣化	非考慮	コアの材料試験に基づいて考慮(表面と内部を別々に考慮)	膨張量に依存した劣化係数により主軸 3 方向独立に考慮	膨張圧によってひび割れが生じることにより考慮
	その他の特徴	—	—	ASR 膨張の結果、コンクリートおよび補強筋に生じる初期応力ならびに初期ひずみを考慮	ひび割れ中の ASR ゲル占有比率により、せん断伝達に関わるひび割れ幅、引張軟化係数を変化



(a) 要素分割図

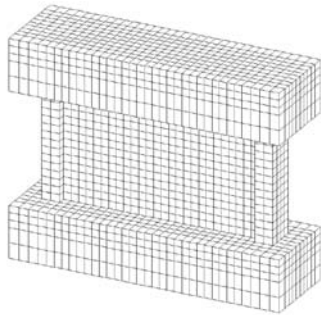


(b) 鋼材のモデル化

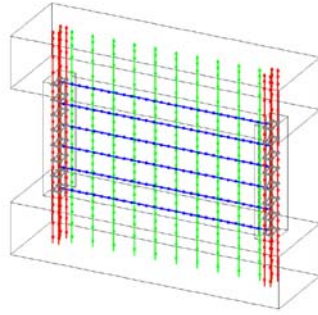


(c) 荷重-変位関係

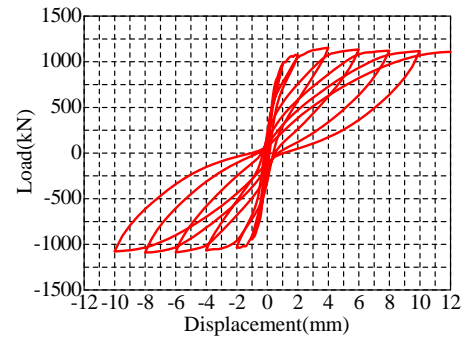
図-3 解析コードBによるPCはりの解析結果



(a) 要素分割図



(b) 鋼材のモデル化



(c) 荷重-変位関係 (ASR 劣化供試体)

図-4 解析コードCによるRC壁の解析結果

理する上で、構造物内部の応力状態や変形の評価および予測が必要となり、解析が重要な役割を果たしている。ここでは、ASRの進行に伴う構造物の変状を予測することに注力されており、骨材の化学反応やゲルのモデル化など、微視スケールあるいは準微視スケールで定式化された構成モデルが数多く提案されている<sup>14)</sup>。水分や温度等の環境作用の影響、クリープ等の時間依存挙動に対するモデル化も行われている。一方で、外力作用に対する構造性能についての検討も、近年、行われつつある<sup>15)</sup>。

それに対して、我が国においては、橋脚のはり部や柱部でASR劣化が顕在化するケースが見られたこともあり、ASR劣化に伴う構造性能の変化の観点での研究が行われてきた。主たる目的が構造性能の評価ということもあり、ASR劣化による材料特性の低下を考慮した構造解析が行われている<sup>16)</sup>。これらは、ASRの現象そのものを直接モデル化していないものの、劣化による構造性能の変化についての傾向をある程度把握できることもあり、ASR劣化した構造物の安全性を評価する上で、一定の知見を与えてきたといえる。ただし、時間軸上で見た場合の構造性能の変化を評価することは困難であり、あくまでも定性的な評価となることは否めない。近年では、ASR膨張の影響を考慮した解析<sup>17)</sup>や、ASRにより生じるゲルの影響などを考慮した解析<sup>18)</sup>など、ASR特有の現象を考慮することで時間軸を意識した解析も行われつつある。

### 3.2 ASR劣化部材の性能評価に関する共通解析

性能評価WGでは、種々の解析手法を用いてASR劣化部材を対象とした共通解析を行い、現状の解析における解析レベルについて把握するとともに、解析上の課題等について議論した。

#### (1) 解析手法

解析には4通り(汎用コード2通り、自主開発コード2通り)の異なる手法を用いた。いずれも3次元有限要素解析である。解析手法の特徴を表-2に示す。解析手法ごとにASRのモデル化の違いがあり、特に自主開発プログラムでは特徴的なモデルが用いられている。

#### (2) 解析対象

解析は、1軸応力場としてみなせるPCはり平面応力場となるRC壁を対象とした。PCはりには、ASR劣化したプレテンションPCホロー桁<sup>22)</sup>を選定した。実際に供用されていた橋梁のPC桁で、自由膨張量等の情報はないが、概観観察やコア強度等の情報は得られている。RC壁には、ASR劣化した耐震壁の実験供試体<sup>23)、24)</sup>を選定した。ASRの促進試験が行われており、自由膨張量やASR劣化後の力学特性などの情報が得られている。どちらの対象も、健全供試体と比較されている。

#### (3) ASR劣化構造物の性能評価の要点

解析結果の一例を図-3および図-4に示す。解析結果の詳細は本報告では割愛するが、いずれの解析手法を

用いた場合でも ASR 劣化後の特徴的な挙動をある程度評価できることが示された。すなわち、ある任意の ASR 劣化状態にある構造物の性能を評価する際には、劣化状態を適切に考慮することにより、どのような解析コードでも性能予測は可能であるといえる。ただし、ASR 劣化状態をどのように把握し、それをどのように解析に取り入れるのかについては、個々の解析コードにより異なるため、十分な配慮を要する。とりわけ、ASR 劣化の異方性や強度低下などは、解析においては膨張量と関連付ける場合が多い。実験では ASR 劣化の初期からの膨張履歴を得られることができるが、実構造物においては過去の膨張履歴は不明であるため、例えばコア強度やひび割れ密度などから劣化状態を推定するといった手段もある。

### 3.3 解析とモニタリングの連携について

前述のように、実構造物の性能を評価する上では、構造物の現状を適切に把握することが重要である。一方、ASR 劣化構造物の将来における性能予測を行うためには、劣化状態の予測が必要となる。その場合には、2章で言及した CPT による膨張予測や4章で取り上げるモニタリングデータの活用などが考えられ、適切な方法について十分議論する必要がある。

構造物の維持管理を行う上では、数値解析とモニタリングの連携が望まれる。現状の数値解析手法を用いれば、膨張に伴う変形やひずみをモニタリングすることにより、将来に亘る膨張や劣化の進展を推定できる可能性はある。また、過去の予測とモニタリングによる実挙動を比較することで、解析手法の妥当性の確認と解析パラメータの修正を行うことができる。加えて、予備解析により膨張挙動の特徴やクリティカルとなる領域を判断することができれば、計測位置や計測項目等のモニタリングメニューを提示することも可能である。

現実的には、モニタリングの有無は構造物の重要度と膨張のリスクとの関係で判断するものとする。ASR に対する様々な対策があり、それらの1つに数値解析が含まれるようにすることが、解析による性能評価の今後の課題であるといえる。

## 4. 既存 ASR 劣化構造物の維持管理シナリオのあり方

### 4.1 維持管理シナリオに向けての活動方針

ASR 劣化構造物の維持管理では、劣化機構が複雑で不明な点も残されており、その対策手法が確立されていないのが現状である。その間、学協会や構造物管理者団体では、数多くの報告書、維持管理指針、マニュアル等の整備が行われ、劣化実態、補修・補強などの対策、さらには維持管理手法も漸次改善されている。WG2 では、ASR を対象とした性能規定型の維持管理の導入に向けて、その方法論に関する議論を行った。その結果、対象

となる構造物あるいは部材の ASR 膨張とその予測が重要であるとの結論に至った。そこで、膨張挙動を知るためのモニタリングの活用実態と対策の現状を整理し、技術的課題を解決するための維持管理シナリオを提案することとした。なお、ここで言うモニタリングとは、膨張率といった長さ変化だけでなく、ひび割れの増加や進展、環境条件の把握も含むものである。

これまで JCI では、「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」、「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」の2つの委員会において、維持管理、診断の現状とその課題解決への活動が実施されている。そこでは、一般的レベルと高度レベルの診断手法が提示され、また、ASR 診断での原因の特定に関する最新の方法論が示されている。しかし、現実の維持管理において、どのように ASR 膨張やその進展性を把握し、対策を実施するのかについて、数多くの課題が残されている。このような維持管理における現状の課題解決のため、FHWA (米連邦高速道路局)、IFSSTAR (仏道路橋梁中央研究所) など国外の主要な維持管理手法と、我が国の高速道路、道路整備局の維持管理手法に関する情報収集を行った。また、対策効果の現状把握のため、土木学会、日本コンクリート工学会、日本材料学会などにおける ASR に関する文献調査を行った。さらに、阪神高速道路および名古屋高速道路の維持管理の現状について、両管理者の協力を得てヒアリング調査を行った。

### 4.2 国内外の維持管理手法の比較

#### (1) 阪神高速道路の例

ASR に対して豊富な知見をもつインハウス技術者を有する阪神高速道路での、ASR 橋脚維持管理マニュアル<sup>25)</sup>の概要を図-5 に示す。日常・定期・臨時点検などからひび割れ状況があるレベルに達したもの (S, A ランク) について、主にひび割れ延長から ASR か否かを判定する。その後、外観劣化度から対策グレードの判定に基づき、詳細調査、対策、モニタリング・追跡点検を行う。これまでの ASR ひび割れ進展に関する経験を蓄積し、ASR の判定、対策レベルの判定など、ASR では難しい評価を、経験に基づく明解な判定基準により評価している。これに対し、一般の管理者が ASR に対応する場合には、ASR か否かの判断も容易でなく、現実には、他の劣化と混同されることも多いと推察される。また、対策レベルについても、どのような膨張進展があるかのバックデータがない場合には、現状、構造物における将来の膨張挙動を精度良く予測する手法は確立されていない。

阪神高速道路では、膨張に関する追跡点検や対策後のモニタリング経験による結果<sup>26), 27)</sup>が報告されている。それらの中で膨張進展とひび割れ進展、さらには鉄筋破断に至る局所的な膨張の把握などを実施しており、これら



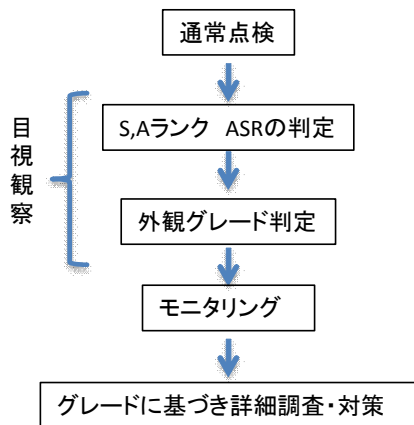


図-5 阪神高速における維持管理の流れ

のバックデータが維持管理における評価判定の判定を明示的なものとしている。さらに、補修・補強を実施したASR橋脚については、モニタリングの実施を検討するものとし、劣化グレードⅠ（劣化が最も軽微なグレード）では、原則、追跡調査を行うこととしている。これらの考え方の根底には、①ASRの膨張の進行は予想しがたいこと、②それに伴い補修・補強対策後の追跡は必須であること、があるものと考えられる。なお、多くのバックデータを有する管理機関である阪神高速道路であっても、構造物としての膨張を把握することがきわめて重要であることをヒアリングで確認している。

#### (2) IFSSTAR, FHWAにおける維持管理手法との比較

維持管理手法の比較を図-6に示す。我が国では、目視を主体とする通常点検などから、ASRの可能性が疑われる場合には、ASR判定が行われる。しかし、バックデータの少ない場合には、詳細調査などを行い、ASR判定を含み総合的な評価が行われることが多い。その後、対策選定、実施の流れとなる。

IFSSTAR<sup>28)</sup>、FHWA<sup>29)</sup>でも、通常点検、ASRの判定、詳細点検の要否やレベルを含む判定、詳細点検、対策選定の流れにある。しかし、判定の初期段階で、やや長期期間のモニタリングを行って膨張進展傾向を把握する手順が含まれているのが特徴である。FHWAでは、最低2～3年程度、IFSTAでは最低1年程度の膨張計測を行い、膨張速度を見極めて、維持管理を行うことを基本としている。また、現状の膨張の程度を把握するためのひび割れ幅計測を、いずれの期間にも設けている。それらモニタリング手法の詳細は、委員会報告書で紹介した。現実のひび割れ幅測定では、ひび割れの状態による相違、例えば析出物のあるようなものや、ひび割れ幅の動態が大きいもの、あるいは個人的な誤差など、その精度や作業時間などの問題点が議論の中で指摘された。FHWAでは、ひび割れ幅以外に現状の膨張を把握するための手法がいくつか示されている。しかし、決定的な手段とはいえず、

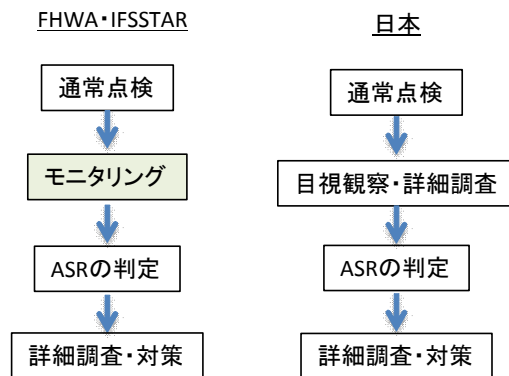


図-6 維持管理手法の比較

この方法については試行錯誤の段階にあると言える。

2章で示したように、現時点の膨張量を知ることは解析による性能把握を行う上で重要なファクターである。膨張量を得るための技術については、今後の課題ではあるものの、モニタリング、あるいは変状（ひび割れ状態）などの時間的な変化をまずは把握しておくことで、ASR膨張解析との相補的フィードバックが可能となり、今後のASR膨張による構造性能と膨張制御に基づくASR維持管理へ導くものとなる。その意味において、膨張挙動を適切に把握するモニタリングは必須のものとなる。

#### 4.3 対策の検証とモニタリング手法

WG2では、ASR対策の現状について文献調査を実施した。対策の変遷を図-7に示す。ASR早期劣化問題の初期の時点では、ASR膨張の原因である水分供給の遮断を重視し、ひび割れ追従性を持つ表面保護工が主な対策として実施された。しかし、10～15年経過後、対策後の膨張によって再変状を生じた事例も報告されるようになり、水分逸散が可能な撥水系の表面処理であるシラン・シロキサン系の含浸材の適用、あるいは透湿性を持つポリマーセメント系との併用が実施されている。他方、再変状を防止するため、伸び能力の高い弾性ゴム系の表面被覆による対策も実施されている。表面保護工による対策の効果のその後は、部材の寸法、水分供給条件、対策時における膨張余力などによって大きく異なる。しかし、追跡調査やモニタリングを実施することはそれほど多くなく、その検証が十分に行われているとは言えない。また、被覆系の表面保護以外にも、FRPシートおよび断面修復などが剥落防止などの目的で適用されることもあるが、追跡事例は少ないようである。いずれの対策においても、対策箇所以外、例えば背面からの水分供給や部材厚が大きい場合には部材中に残存する水分による再膨張が問題となっている。ただし、それらの状況を十全に把握することは困難で、ここでも、対策の効果の検証のためのモニタリングの重要性が示唆された。

一方、2000年以降、鉄筋破断の報告により、構造性能

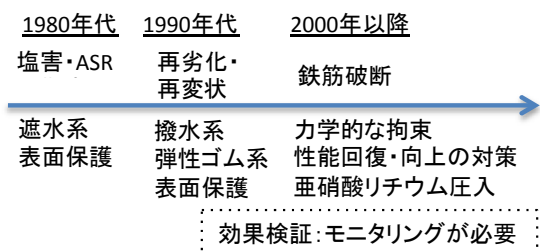


図-7 対策手法の変遷

への影響が懸念されるに至った。このため、力学的な拘束による対策（プレストレスの導入、鋼材拘束、FRPシート等による拘束）、あるいは耐震対策などの構造性能の向上を含む補強対策が実施されるようになった。また、ASR 反応そのものを停止させることを意図したリチウム圧入工法なども開発された。土木学会小委員会の報告書では、鉄筋破断への対応の必要性の有無に応じて、対策シナリオを2つに分類する考え方が提示された。

従来の補修の考え方とは異なり、力学的な拘束、あるいは構造性能を向上させるような対策については、モニタリング等が実施されているものもあり、それらの対策の検証が現在も継続的に行われている。ただし、これらの膨張挙動を標準的に把握する手法は確立されていないため、試行錯誤の段階にある。WG2では、現状のモニタリング技術（装置、手法）について、国内外を問わずその情報収集を行い、それらのモニタリングにおける結果や手法などを報告書でとりまとめた。

#### 4.4 既存 ASR 劣化構造物の維持管理シナリオの提案

##### (1) 前提条件

ここで示す維持管理シナリオは、既存構造物を維持管理するにあたって、ASR に関するバックデータの蓄積が少ない、あるいはそれらがなく、ASR 経験を有するインハウス技術者がいない管理体制を前提としたものである。また、橋梁定期点検要領<sup>30)</sup>に基づき、5年に一度の近接目視による定期点検が実施されることを想定している。このような条件下では、WG2での検討結果から、有効性の示されている岩石学的試験や促進試験の実施は必ずしも現実的でなく、構造物や部材を通して膨張の状態や進行を把握することを維持管理の中心に据えざるを得ない。

##### (2) 維持管理シナリオの提案

委員会が提案する維持管理シナリオの概要を図-8に示す。特徴は、ASR が疑われた場合に、詳細調査・対策の前にモニタリングで ASR による膨張の進行を把握し、対策後も追跡モニタリングを実施することである。

通常点検（日常点検・定期点検）は、例えば橋梁では、橋梁点検要領に基づき実施されるため、この段階においてひび割れなどの変状が記録される。それらの変状に ASR の特徴が確認された場合、あるいは劣化機構は ASR

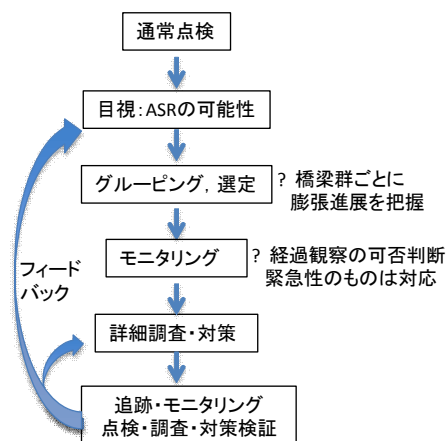


図-8 維持管理シナリオ（委員会案）

と特定できないものの変状の進行性が認められた場合には、ASR の判定を要するものとしてグルーピングを行う。周辺の類似の構造物でも ASR が生じている可能性が高いため、建設年、発生部材や構造、材料（特に配合、骨材）、環境の共通性や特徴の有無について文献（書類）調査を実施する。同様の状態にある代表的なものを抽出（選定）する。モニタリングにはコストを要するが、このような代表抽出によって、モニタリングデータは対象とする構造物群に活用可能なデータとなる。なお、剥落防止など緊急対応が必要な場合には対策の検討が必要で、経過観察が可能かの判断を事前に行うものとする。

モニタリング選定箇所において、膨張の進展の有無、進展のある場合は速度を把握するためのモニタリングを2~3年程度実施する。可能であるなら、同一箇所における環境条件（温度、水分供給）をモニタリングする。膨張の進展を確認した後、それらに基づき、詳細調査および対策の要否、対策の選定を行う。対策を行った場合には、効果の検証のためのモニタリングを行うことを原則とする。モニタリングが不可能な場合にも、膨張の進展を把握できる方法で追跡点検を行うのが望ましい。

#### 5. ASR 制御型設計・維持管理関係シナリオ

##### 5.1 構造物の重大性レベルとリスクレベル評価

「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」<sup>1)</sup>で提案された構造物の重要性、要求性能などに応じて、ASR が発生した場合の影響度を考慮した重大性レベルを表-3に示す。レベル S4 は、超長期にわたって高い性能が要求され、ASR が厳しく抑制されなければならない構造物である。これに対し、レベル S1 は、ASR が生じても性能への影響が小さく、必要に応じて劣化部材を交換できる維持管理の容易さをもつ構造物である。

それぞれのレベルの構造物に対して、ASR の発生、進展に関するリスクレベルを評価する。同じく「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」で提案されたリスクレ

レベル評価（ここでは、詳細リスクレベル評価と呼ぶ）を表-4に示す。この評価で、「骨材の反応性」、「ペシマム配合」であるか否かは、岩石学的試験、配合試験を行わなければ判明しない。すなわち、ASRが発生したときの影響が大きい、高いレベルでの（コストのかかる）材料選定が要求される構造物と想定され、表-4のリスクレベル評価は重大性レベル S4の構造物に限られると考えられる。これに対し、S1～S3の構造物では、材料選定の段階からこのようなコストをかけることは難しいことが多い。ここで、概略リスクレベル評価を表-5に示す。S1～S3の構造物では、まず実績・経験（骨材マップ）などをもとに、概略の膨張可能性レベルを設定するのが現実的と考えられる。その結果、S3の構造物で概略 ASR リスクが高いものには、あらためて岩石学試験や配合試験の実施を検討する。試験の結果から、岩種や骨材の反応性（コンクリートの膨張性）が明らかになれば、表-4を適用して詳細リスクレベルを評価する。

### 5.2 ASR を考慮した設計・維持管理の連係シナリオ

ASR を考慮した場合の構造物の重大性レベルとリスクレベル評価に基づいて、構造物を設計、維持管理する連係シナリオ（委員会案）を図-9に示す。

#### (1) 重大性レベル S4

重大性レベル S4 の構造物については、ASR を許容しない制御、すなわち抑制が必要となるため、岩石学的試

験を必ず行う。あわせて、使用を予定する配合での膨張試験を CPT で行い、必要に応じて、混和材の適用など、抑制対策を検討する。また、維持管理段階でのモニタリングは必須であり、特に重要部位などをあらかじめ選定して実施するとよい。このとき、有限要素解析（以下、FEM）などで膨張を想定した応力、変形解析が可能となれば、モニタリング着目箇所を選定にも有用となる。

#### (2) 重大性レベル S3

重大性レベル S3 で、概略リスクレベル評価が高い場合、構造物の性能への影響が大きいことを考慮すると、岩石学的試験を伴った詳細リスクレベル評価を行うのがよい。詳細リスクレベルが高いと判明すれば、レベル S4 の構造物と同様の設計、維持管理となる。一方、詳細リスクレベルが低ければ、通常の ASR 対策で十分と考えられる。しかし、もし発生した場合の性能への影響は大きい場合、実際の配合での CPT を維持管理へ引き継ぐモニタリング用として用意しておくことを提案する。CPT で膨張可能性が得られた場合、CPT による膨張予測に基づく FEM 解析を実施できれば、応力や変形、構造性能の予測が可能となり、予防維持管理への展開も期待できる。

維持管理段階では、事前の CPT による膨張予測や FEM 解析結果の検証、修正のため、モニタリングを実施する必要がある。水分供給などの環境条件も把握することで、部位ごとに膨張の特性に変化を持たせるなどの FEM 解

表-3 構造物の重大性レベル<sup>1)</sup>

レベル	ASR の受容性	構造物への影響度	カテゴリー
S1	ASR によるいくらかの劣化は許容できる	ASR が構造物の性能や経済性、環境に与える影響度は小さい、もしくは、無視できる	部材を比較的簡単に交換できる (e.g., <30 年)
S2	中程度の ASR のリスクは許容できる	ASR が主要な劣化であれば、構造物の性能や経済性、環境に影響がある	必要に応じて補修できる (e.g., 30-100 年)
S3	小規模の ASR のリスクは許容できる	ASR が小規模でも、構造物の性能や経済性、環境に大きな影響がある	
S4	ASR は許容できない	ASR が小規模でも、構造物の性能や経済性、環境に深刻な影響がある	ASR を許容できない (e.g., >100 年)

表-4 詳細リスクレベル評価<sup>1)</sup>

			骨材の反応性			
			無	低	中	高
				遅延膨張性 (変成岩系)	急速膨張性 (非ペシマム配合) 遅延膨張性 (堆積岩系)	急速膨張性 (ペシマム配合)
乾燥	アルカリ供給なし	小部材	1	1	2	2
	アルカリ供給なし	マスコン	1	2	3	4
湿潤	アルカリ供給なし (淡水・土壌と接する)	マスコン	1	2	4	4
	アルカリ供給あり (凍害・海水・融雪剤)	マスコン	1	3	4	5

表-5 概略リスクレベル評価

			膨張の可能性		
			低	中	高
乾燥	アルカリ供給なし	小部材	1	1	2
	アルカリ供給なし	マスコン	1	2	3
湿潤	アルカリ供給なし (淡水・土壌と接する)	マスコン	2	3	4
	アルカリ供給あり (凍害・海水・融雪剤)	マスコン	3	4	5



析の利点が活かせる可能性がある。また、モニタリングで変状が確認されれば、図-8で紹介した維持管理シナリオで対応するほか、モニタリングデータの FEM への入力によって性能評価を行うことができる。

### (3) 重大性レベル S2 および S1

重大性レベル S2 で、概略リスクレベル評価が高い場合は、通常の ASR 対策を適用したうえで、維持管理段階でのモニタリングを実施する。変状が確認されれば、図-8の維持管理シナリオで対応し、必要に応じて FEM 解析による性能評価を行う。

重大性レベル S2 の概略リスクレベル評価が低い場合、あるいは重大性レベルが S1 の場合は、必要に応じて通常の ASR 対策は検討するものの、一般的な維持管理で十分対応が可能と考えられる。

以上のように、これまでの ASR は発生しないとする抑制型の設計では維持管理との関係が希薄であったが、ASR の発生をリスクと捉えることで維持管理をあらかじめ計画した設計体系が望めることを示した。このことは、事後維持管理とならざるを得なかった ASR 劣化機構に対して、予防維持管理が適用できる可能性を示すものである。ただし、リスクレベル評価の具体的な数値を示したが、現状では、これらの数値に定量的な根拠を与えることができていない。あくまでもリスクレベル大小の定性的な観点としての数値を示していると捉えていただきたい。また、この設計・維持管理連係シナリオを実現するためには、1章の試験・予測法、2章の性能評価およ

び予測技術、3章の維持管理の具現化などの個々の要素技術の確立あるいは信頼度の向上が引き続き必要である。

### 謝辞

委員会の議論を進めるにあたって、阪神高速道路(株)および名古屋高速道路公社の関係各位には、多大なご協力と寛容なご理解を賜りました。ここに謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書，2014.7
- 2) Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J. and Shehata, M.: Test Methods for Evaluating Preventive Measures for Controlling Expansion due to Alkali-silica Reaction in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.36, pp.1842-1856, 2006
- 3) Yamada, K., Karasuda, S., Ogawa, S., Sagawa, Y., Osako, M., Hamada, H., Mohd, I.: CPT as an Evaluation Method of Concrete Mixture for ASR Expansion, Construction and Building Materials, Vol.64, pp.184-191, 2014
- 4) 小田聡, 田中暁大, 山田一夫, 小川彰一, 佐川康貴：促進コンクリートプリズム試験および屋外暴露試験による ASR 膨張挙動の違いに関する研究, 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.16, pp.61-66, 2016
- 5) Larive, C.: Apports Combinés de l'Experimentation et de

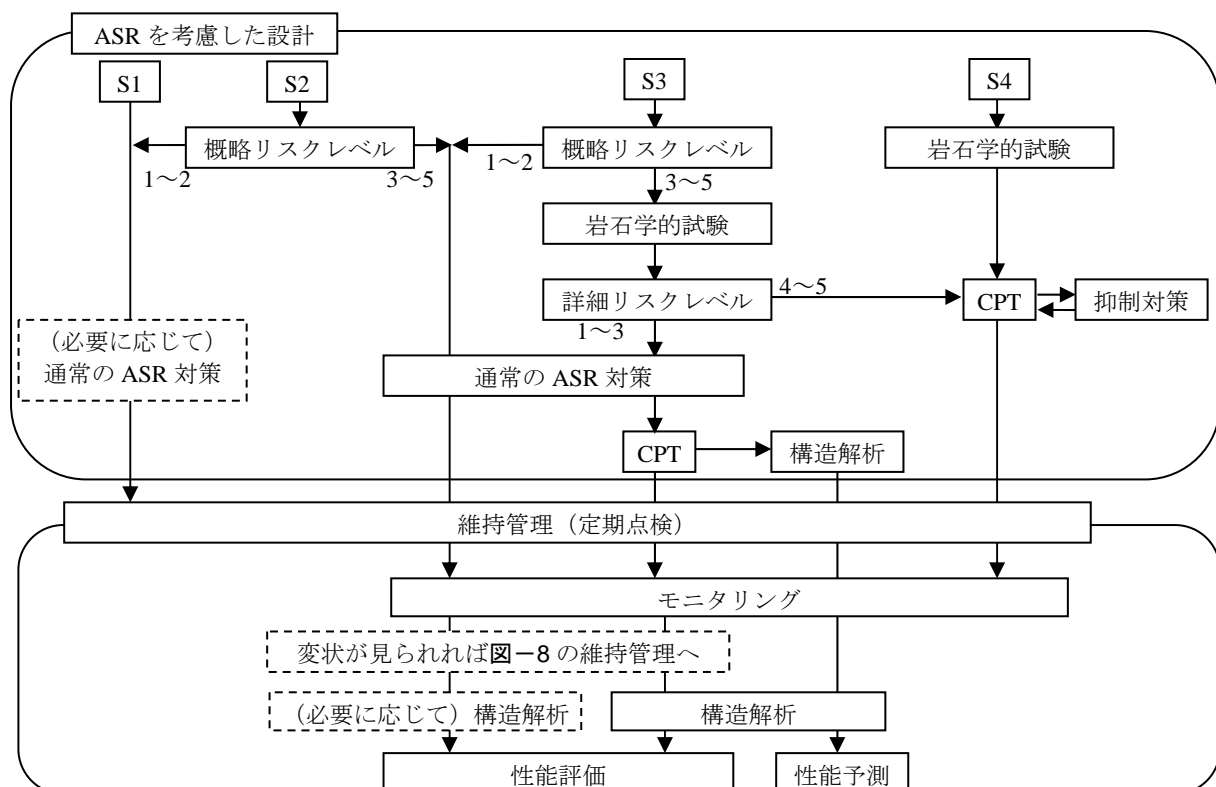


図-9 ASR を考慮した設計・維持管理連係シナリオの提案

- la Modelisation à la Comprehension de l'Alcali Reaction et de ses Effects Mecaniques, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (in French) (1998)
- 6) Kawabata, Y., Seignol, J.-F., Martin, R.-P. and Toutlemonde, F.: Macroscopic chemo-mechanical modeling of alkali-silica reaction of concrete under stresses, *Construction and Building Materials*, Vol. 137, pp.234-245, 2017
  - 7) Multon, S. and Sellier, A.: Multi-scale analysis of alkali-silica reaction (ASR): Impact of alkali leaching on scale effects affecting expansion tests, *Cement and Concrete Research*, Vol. 81, pp. 122-133, 2016
  - 8) Saouma, V. E. et al.: A mathematical model for the kinetics of the alkali-silica chemical reaction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 68, pp. 184-195, 2015
  - 9) 魚本健人, 古澤靖彦: アルカリ・シリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築, *コンクリート工学論文集*, Vol. 3, No. 1, pp. 109-119, 1992
  - 10) Kawabata, Y. and Yamada, K.: The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali-silica reaction at the pessimum proportion, *Cement and Concrete Research*, Vol. 92, pp.1-15, 2017
  - 11) Takahashi, Y., Ogawa, S., Tanaka, Y. and Maekawa, K.: Scale-Dependent ASR Expansion of Concrete and Its Prediction coupled with Silica Gel Generation and Migration, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 14(8), pp.444-463, 2016
  - 12) Takahashi, Y., Shibata, K., Maekawa, K.: Chemo-Hygral Modeling of Structural Concrete Damaged by Alkali silica Reaction, *Proceedings of the International Conference of Ageing of Materials & Structures*, pp.424-431, 2014
  - 13) 高橋佑弥, 田中泰司, 前川宏一: 固液二相モデルを用いた ASR 膨張モデルと床版疲労解析への応用, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.1, pp.1029-1034, 2016
  - 14) 例えば, Saouma, V.E.: *Numerical Modeling of AAR*, CRC Press, 2014.
  - 15) Jurcut, A.C., Vecchio, F.J., Sheikh, S.A., Panesar, D.K. and Orbovic, N.: Alkali Aggregate Reaction in Nuclear Concrete Structures Part4: Structural Shear Wall Elements, *Transactions, SMiRT-23, Division I*, Paper ID 045, 2015.
  - 16) 例えば, 日比野憲太, 渡辺忠朋, 葛目和宏: ASR 劣化を生じた RC 梁の力学的挙動解析, *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.4, pp.129-134, 2004.
  - 17) 上田尚史, 中村光, 国枝稔, 前野裕文, 森下宣明, 浅井洋: コンクリート構造物における ASR 損傷と損傷後の構造性能の評価, *土木学会論文集 E2*, Vol.67, No.1, pp.28-47, 2011.
  - 18) Takahashi, Y., Tanaka, Y. and Maekawa, K.: Chemo-hygral model for ASR expansion and its effects on fatigue lives of bridge slabs, *XIII Int. Conf. on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications*, pp.944-955, 2015.
  - 19) 田辺忠顕編著: 初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム, 技報堂出版, 2004.
  - 20) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Taylor & Francis, 2003.
  - 21) 上田尚史, 澤部純浩, 中村光, 国枝稔: アルカリ骨材反応による RC 部材の膨張予測解析, *土木学会論文集 E*, Vol.63, No.4, pp.532-548, 2007.
  - 22) 富山潤, 山田一夫, 金田一男, 伊良波繁雄, 大城武: ASR 劣化したプレテンション PC 桁の岩石学的検討に基づく ASR 診断および耐荷性能の評価, *土木学会論文集 E2*, Vol.67, No.4, pp.578-595, 2011.
  - 23) Orbovic, N., Panesar, D.K., Sheikh, S.A., Vecchio, F.J., Lamarche, C.P. and Blahoiuanu, A.: Alkali Aggregate Reaction in Nuclear Concrete Structures Part1: A Holistic Approach, *Transactions, SMiRT-23, Division I*, Paper ID 202, 2015.
  - 24) Habibi, F., Sheikh, S.A., Orbovic, N., Panesar, D.K. and Vecchio, F.J.: Alkali Aggregate Reaction in Nuclear Concrete Structures Part3: Structural Shear Wall Elements, *Transactions, SMiRT-23, Division I*, Paper ID 044, 2015.
  - 25) 阪神高速道路管理技術センター: ASR 橋脚の維持管理マニュアル, 電気書院, 2007.2
  - 26) 堀江佳平, 松本茂, 佐々木一則, 新名勉: 阪神高速道路における ASR 橋脚の維持管理の取組み, *コンクリート工学*, Vol.78, No.1, 2010.1
  - 27) 松本茂, 佐々木一則, 新名勉, 奥尾政憲, 宮川豊章: アルカリ骨材反応を生じた道路橋脚の劣化進行, *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.9, pp.195-202, 2009.10
  - 28) LCPC: Aid for the management of structures with internal swelling reactions technical guide, 2014.7
  - 29) FHWA: Report on the diagnosis, prognosis, and mitigation of alkali-silica reaction (ASR) in transportation structure, 2010.1
  - 30) 国土交通省: 橋梁定期点検要領, 2014