

# 橋梁基礎

特集 橋梁の長寿命化



# コンクリート構造物のASR抑制技術

Preventing ASR Technology

Matsumoto Shigeru Era Kazunori  
松本 茂\* 江良和徳\*\*

## 1. ASR劣化の実態、対策の必要性

ASRは1940年頃にアメリカで初めて確認され、我が国では最上川産の砂、砂利を用いた山形県のコンクリート橋でASRの疑いが高いとして1951年に報告されたのが最初とされている<sup>1)</sup>。当該論文では、104種類の骨材について実施された反応性の試験結果も併せて報告されているが、反応性を有するものは限られていたこともあり、我が国の骨材はASRを生じにくいとの考えが次第に広まったとも言われている。

1965年には鳥取県皆生海岸砂利を用いたコンクリートの被害例が報告されているが、ASRが広く注目されたのは、1982年ごろに大阪市西成区山王地区にある阪神高速道路の橋脚で確認されて以降であり、これを契機として広範な研究が行われるようになった。その結果、新設構造物については本稿で取りあげるいくつかのASR抑制対策が制定、修正され現在に至っている。

維持管理面では、コンクリートにASRを生じて鉄筋によって適切に拘束されているならばケミカルプレストレスの効果などによって部材の安全性能の問題は生じないことが実験結果から確認されたこともあり、表面保護工法による膨張抑制対策と経過観察を中心とした維持管理が一般的であった。しかしながら、2001年に初めて制定された土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕や同制定資料に鉄筋破断の事例が示されたことを一つの契機として、鉄筋の健全性確認を目的とした調査が積極的に行われるようになり、鉄筋破断の事例が報告されはじめた(写真-1)。

鉄筋の破断は橋脚の曲げ加工部で生じる事例が多いが、スターラップだけでなく主筋が破断している事例も報告されている。鉄筋が多数破断すると、部材や構造物の安全性

能の大幅な低下をもたらす可能性があること、鉄筋破断部にひずみが局所化することにより、大きなひび割れ開口が生じ、膨張に必要な水分が大量に供給される場合も考えられるなど、維持管理上も大きな課題となっている。

これに対し土木学会や日本コンクリート工学協会において委員会が設置され精力的な検討が行われたほか、各管理者でも鉄筋破断を考慮した維持管理マニュアルが作成されている<sup>2)</sup>。

鉄筋破断などの深刻な劣化は後述する種々のASR抑制対策が施工される以前に建設された構造物で生じており、それ以後建設された構造物では維持管理上問題となるようなASRが発生する可能性は非常に低くなっている。しかしながら、ASRは反応性骨材の種類や含有量、セメントの種類やアルカリ量、コンクリートの配合、水分やアルカリの供給条件、日射、雨掛かりなどによって大きく相違するものであり、抑制対策以後建設された構造物においてASRによる劣化が生じた事例も報告されている<sup>3)</sup>。これはASR抑制対策の画一的な適用には限界があることを示しているとも考えられ、より合理的なASR抑制対策について、構造物の供用環境や重要度なども考慮した広範な検討が必要であると考えられる。

## 2. ASR抑制対策<sup>4)</sup>

### 2-1 対策の変遷

我が国での対策の変遷を表-1に示す。当初は無害とされる骨材の使用が優先されたのに対して、現在では最も優先順位が低くなっているなどの相違はあるが、基本的な考えは大きく変わっていない。通達の内容が示すように、対策はASRの抑制が目的であり、ASRの発生防止ではない。これは2つの意味を持つ。すなわち、ASRは「発生の有無の問題」ではなく膨張圧力や膨張ひずみ、ひび割れ性状などの「程度の問題」であり、その程度が部材や構造物の性能に看過できない程の影響を与えるかどうかで判断されるべき問題であること、第二として、経済的合理性も考慮した上で、全てのコンクリートでASRの程度を実用上問題ないレベルに収めることは、現在の技術では不可能であるとの考えが背景にあると考えられる。

### 2-2 具体的な対策

#### (1) アルカリ総量の規制

アルカリ総量の規制はアルカリ金属イオン量の制限による細孔溶液中のpH濃度低下などにより、ASRを抑制する

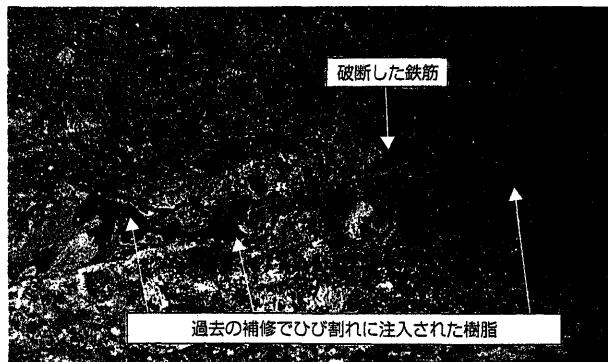


写真-1 鉄筋破断の状況 (スターラップ曲げ加工部)

\* (財)阪神高速道路管理技術センター 企画研究部 調査研究課  
\*\* 極東興和(株) 事業本部 事業推進部 補修課

キーワード：アルカリシリカ反応、アルカリ骨材反応、ASR、抑制対策、シラン系表面含浸材、亜硝酸リチウム

表-1 ASR抑制対策の主な経緯

(年)	内容
1984	建設省 技術調査室 通達「土木工事にかかるコンクリート用骨材の取り扱いについて」 ・アルカリ骨材反応でひび割れを生じた構造物に対しては遮水措置をとる。 ・過去にアルカリシリカ反応を生じたと思われる骨材に対してはASTMの試験をして確認する。
1986	建設省 技術調査室 通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」 ・骨材の選定, 低アルカリ型セメント, 抑制効果のある混合セメント等の使用, コンクリート中のアルカリ総量の抑制の4種類の対策が示される(4種類の対策のいずれでも良く, 優先順位についての記述はない) ・骨材の試験法として化学法とモルタルバー法の建設省暫定案が示される。
	JIS A 5308「レデーミクストコンクリート」 ・アルカリシリカ反応の抑制方法を購入者に報告することが義務づけられる。 ・付属書1「レデーミクストコンクリート用骨材」で付属書7(化学法)か付属書8(モルタルバー法)で試験し, 無害と判定された骨材でなければならぬとされる。ただし, 付属書6「セメントの選定等によるアルカリ骨材反応の抑制対策の方法」に示された低アルカリ型セメントの使用, 抑制効果のある混合セメントの使用, コンクリート中のアルカリ総量の抑制の対策を講じた場合には, 無害と判定されない骨材も使用可能とされる。
	JIS R 5210「ポルトランドセメント」 ・低アルカリ型が規定される。
1989	建設省 技術調査室 通達「アルカリ骨材反応抑制対策について」 ・「アルカリ骨材反応暫定対策について」の通達のうち, 抑制効果のある混合セメント等の使用に関する記述と, 化学法およびモルタルバー法の試験方法が小改訂される。
	JIS A 5308「レデーミクストコンクリート」 ・アルカリシリカ反応対策関係の記述が修正される。
1990	建設省 技術調査室 通達「コンクリート構造物に使用する普通ポルトランドセメントについて」 ・全アルカリ量の上限が0.75%と規定される。
1992	JIS A 1804「コンクリートの生産工程管理用試験方法—骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(迅速法)」
2002	国土交通省 技術調査室 通達「アルカリ骨材反応抑制対策」 ・①コンクリート中のアルカリ総量の抑制, ②ASR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の3種類とし, 土木構造物については①②を優先するとされる。
2003	JIS A 5308「レデーミクストコンクリート」 ・付属書2「アルカリシリカ反応抑制対策の方法」が見直され, 新たな付属書では, 記述の順番が「アルカリ総量を規制する抑制対策」「抑制効果のある混合セメントなどを使用する抑制対策」「安全と認められる骨材を使用する抑制対策」とされる。

対策である。JIS A 5308では、本対策を適用する場合、混和剤や流動化剤、骨材に含まれるアルカリの考慮したアルカリ総量を $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で $3.0 \text{ kg/m}^3$ 以下にすることとされている。本対策の有効性は多くの実験によって検証されており、ほとんどの場合で有効な対策とされているが、極めて反応性の高い鉱物が含まれる場合や骨材から多量のアルカリが供給される場合、外部からアルカリが供給される場合などでは、ASRが生じる場合もあるとされている。

## (2) 抑制効果のある混合セメントなどの使用

JIS A 5308で、抑制効果のある材料として挙げられているのは、高炉スラグとフライアッシュである。

### 1) 高炉スラグ

高炉スラグがASRを抑制する機構としては、セメント量の低減、ポゾラン反応生成物によるアルカリイオンの固定化、組織の緻密化が関係しているとされている。この方法によりASRを抑制する場合には、結合材中の高炉スラグ量が重要であり、少ない場合にはASR抑制効果が発揮されず、ある程度の量が必要とされている。JIS A 5308では、混合セメントを使用する場合は高炉セメントB種若しくはC種を用いることとされており、B種の場合は40%以上でなければならないとされている。国内で主に流通している高炉セメントは高炉セメントB種であるが、JISでは混合剤の分量として30~60%と規定されているため、本方法によりASRを抑制する場合には、高炉セメントB種であれば良いと言うことではなく、その分量についても注意を払う必要がある。

### 2) フライアッシュ

フライアッシュがASRを抑制する要因としては、ポゾ

ラン反応に伴う細孔溶液のpH低下によるASRゲル生成量の抑制であるとされている。

混合セメントとしてフライアッシュを使用する場合にはフライアッシュセメントB種もしくはC種を用いることとされており、フライアッシュセメントB種の場合は15%以上でなければならないとされている。

### (3) 安全と認められる骨材の使用

ASRによる有害な膨張を生じない骨材を使用することによりASRを抑制する対策である。JIS A 5308では、骨材のアルカリシリカ反応性試験(化学法またはモルタルバー法)により判定する。化学法(JIS A 1145)は調製した骨材を $80 \pm 1^\circ\text{C}$ の $1 \text{ mol/l}$ 水酸化ナトリウム溶液中に24時間浸漬させ、アルカリ濃度減少量と溶融シリカ量から反応性を評価する方法である。モルタルバー法(JIS A 1146)は、セメントの全アルカリが $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で1.2%になるよう調整した $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ のモルタルバーを作成し $40 \pm 2^\circ\text{C}$ 、95%R.H.以上の環境で6ヵ月間貯蔵して、その膨張率から反応性を評価する方法である。化学法とモルタルバー法を比較すると、前者がより厳しい結果を与える傾向があるとされているが、より短期間で結果が得られるとの理由から、もっぱら化学法が用いられている。化学法で無害でないとされた場合は、モルタルバー法による試験で判定することとされている。アルカリシリカ反応性試験の課題については別稿に譲るが、遅延膨張性骨材など特定の骨材への適用性など、残された課題もあるとされている。

1986年(6月)の通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」では、示された4種類のASR抑制対策に優先

順位の記述はなかったが、同年10月に改訂されたJIS A 5308では無害と判定された骨材でなければならないとされ、そうでない場合は他の対策を採るよう記述されていたことなどから、安全と認められる骨材への需要が急速に高まった。岩石学的に反応性を有する可能性のある骨材は日本全体に広く分布していることから、安全と認められる骨材の使用によるASRの抑制は骨材資源の有効利用の観点から見直されるべきとの気運が高まり、2002年の通達「アルカリ骨材反応抑制対策」では、本対策は優先順位が最も低い3番目に位置づけられ、JIS A 5308も翌年これに整合した内容に変更された。また、従前の低アルカリ型セメントの使用による対策は、アルカリ総量の規制による対策に包含された。

以上、我が国におけるASR抑制対策を概観したが、その内容はASRを生じにくいコンクリートを打設するための方法と捉えることができる。これ以外のASR抑制対策として、表面保護工等によって吸水膨張に必要な水分の供給を遮断し、ASRを抑制する方法も考えられる。この方法は、ASRを生じた既設構造物に対する補修対策として実施されてきたが、新設構造物でのASR抑制対策としても検討に値するものと考えられる。事実、RIREM（国際材料構造試験研究機関・専門家連合）で提案されている抑制対策には、コンクリート内部への水分の浸入を制限し十分な乾燥状態維持する方法が対策の一つとして挙げられている。さらに、リチウム塩をコンクリートに混入するなどのゲルを非膨張性のものに改質する方法も対策の一つとして挙げられており、以下にこれらの抑制対策について概説する。

#### (4) 表面保護工法による水分量の低減

表面保護工法によるASRの抑制は、供用中のASR構造物における対策として阪神高速道路公団（当時）と日本材料学会での検討や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」など1980年代前半から各機関で実施されてきたが、2005年に土木学会から表面保護工法設計施工指針（案）が発刊され、各種材料・工法が体系化されるとともに（図-1）、性能照査の考えに基づく設計方法が示され、表面保護工法に要求される性能は、表面保護工法単独ではなく、それらが適用されるコンクリート構造物に要求される性能との関係の下に検討されなければならないとの考えが示された。

ASRの抑制を目的とした表面保護工法に対する要求性能を表-2に示すが、主として必要な要求性能として防水性（遮水性）、水蒸気透過性（透湿性）が挙げられている。内部から外部への水分の蒸発を確保しつつ、外部からの水分の浸透を防ぐことにより、コンクリート内部水分量を低減させ、もってアルカリシリカゲルの吸水膨張を抑制しよう

表-2 表面保護工法に対する要求性能（対ASR）

主として必要な要求性能	防水性（遮水性）
	水蒸気透過性（透湿性）
副次的に必要な性能	塩化物イオン遮断性（遮塩性）
場合により必要な要求性能	ひび割れ追従性（柔軟性）
	はく落抵抗性

とするものである。

これらを考慮した上で同指針（案）では、ASR抑制に適した表面保護工法として表面含浸工法が挙げられている。アルキルアルコキシシランまたはオリゴマーを主成分としたシラン系表面含浸材はその代表例であり、コンクリート表面に含浸させることにより数mmの厚みの範囲に吸水防止層を形成し、水蒸気透過性（透湿性）を大きく損なうことなく、水や塩化物イオンの侵入を抑制するものである。

表面保護工法のASR抑制効果については、種々の実験によってその有効性が確認されており、十数年にわたって十分な膨張抑制効果が確認されている例もある<sup>5)</sup>。しかし、その水分量低減メカニズムからして、効果は構造物表面付近が最大であり内部に向かうほど効果は低下する。したがって、マッシブな構造物であるほど構造物全体としてのASR抑制効果は発揮されにくくなる傾向がある。このような特徴については早い段階から確認されていたが<sup>6)</sup>、他に有力な補修方法が無かったこともあり、表面保護工法による画一的な補修が繰り返されてきたきらいがある。外部からの水分、アルカリを遮断しても、コンクリート内にASRを進行させるのに十分な水分およびアルカリが存在するときは、ASRの進行を完全に停止することは困難であるともされており<sup>7)</sup>、表面保護工の適用後もASRによる劣化が進行したり、また、部分的に保護されていない箇所から構造物中への水分の浸入が見られたりした結果、再度劣化している事例も少なくないことから、表面保護工法を適用する場合には補修効果を十分に検討することが好ましいとの見解も示されている<sup>8)</sup>。また、表面保護工法を施工すると外観上は新設時と同等以上に回復するために、それ以外の性能も回復したかのような誤解を生じ、維持管理上の判断を誤る場合があると考えられる。したがって、表面保護工法を施工した場合は、ひび割れ性状などの外観上の情報だけに頼るのではなく、構造物の表面ひずみなどの指標の活用も検討する必要がある。

ASRは配合や環境条件で大きく相違するものであり、対象とする構造物が表面保護工法による水分量の低減によって、どの程度ASR膨張を抑制できるかを定量的に精度良く予測することは現状では困難である。表面保護工法によってASRを抑制できる、あるいはできないといった画一的な判断ではなく、種々の条件に応じた使い分けとさらなる技術的な蓄積が必要とされている。

#### (5) リチウムによるASR膨張抑制

MacCoyらが1951年に発表した論文において、リチウムによるASR抑制効果が初めて示された。そしてそれ以降、様々なリチウム化合物を用いたASR抑制効果に関する数多くの実験的研究が国内外でなされており、いずれの

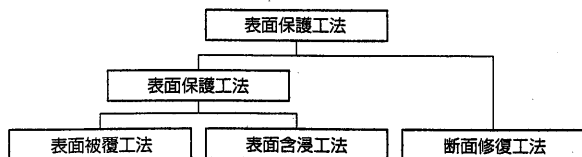


図-1 表面保護工法の分類

研究においても概ね反応性骨材を使用したコンクリート、またはモルタルを練り混ぜる段階で一定量以上のリチウム化合物を混入した場合、ASR膨張が抑制されることが検証されている。それらの研究の多くは、ASRを抑制するために必要となるリチウム量をコンクリート、またはモルタル中のアルカリ金属イオンとリチウムイオンとの比率（ $[\text{Li}/\text{Na}+\text{K}]$  モル比）にて整理しており、その値はおよそ0.5~0.8としているものが多い。

一方、リチウムによるASR抑制メカニズムに関してはいくつかの説が提案されており、まだ明確になっていない。提案されているメカニズムのひとつに、リチウムによるゲルの非膨張化が挙げられる。これはリチウムの存在下では、アルカリシリカ反応の過程で低膨張性、あるいは非膨張性の物質が生成され、有害な膨張に至らないとするものである。すなわち、アルカリシリカゲル $[\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2]$ はリチウムが介在することによって、リチウムモノシリケート $[\text{Li}_2\text{O}\cdot \text{SiO}_2]$ あるいはリチウムジシリケート $[\text{LiO}_2\cdot 2\text{SiO}_2]$ に置換される。これらは水に対する溶解性、吸湿性をもたないため、以後の膨張反応が収束するとされている。

これらの研究成果は、前述した高炉スラグやフライアッシュと同様に、コンクリートを練り混ぜる段階でリチウム化合物を混和剤として使用することが新設コンクリート構造物のASR抑制対策として効果的であることを示している。我が国において、ASR抑制対策としてリチウム化合物を事前混入する場合の指針や基準類はまだ整備されていないが、海外においては既にそのような取組みがなされている。前述のRIREMでの取組み以外にも、FHWA（米連邦道路局）では、新設コンクリートにリチウム化合物を混入してASRを抑制する場合のガイドラインの策定に取り組んでいる<sup>9)</sup>。

リチウムは、新設コンクリートのASR膨張を抑制するだけでなく、すでにASR劣化が進行しているコンクリートの補修対策としても適用することができる。数あるリチウム化合物の中で、我が国においてASR補修材として最も多く使用されているのは亜硝酸リチウムである。その理由のひとつとして、亜硝酸リチウムはリチウムによるASR抑制効果に加え、亜硝酸による鋼材の不動態被膜再生効果を併せ持つことが挙げられる。これは亜硝酸リチウムがASRと塩害の複合劣化に対しても有効であることを示す。亜硝酸リチウムを用いたASR補修工法として現在

実用化されているものには、塗布含浸工法、ひび割れ注入工法および内部圧入工法の3種類があるが、コンクリート内部へのリチウムの浸透性能を勘案すると内部圧入工法が最も補修効果の信頼性が高いとされている。内部圧入工とは、ASR劣化した構造物の表面に小径の孔を削孔し、そこからリチウム化合物を加圧注入する補修工法である。これによりリチウムがコンクリート内部の微細ひび割れや連続空隙などを通じてコンクリートの広範囲に浸透拡散し、ゲルを非膨張化することによって以後のASR膨張を抑制することができる。

このようにリチウムは新設コンクリートのASR抑制対策および既設コンクリートのASR劣化補修の両方に対して効果が期待できる。今後、適用にあたってのガイドライン整備やコスト低減に向けた取組みが必要であると考えられる。

## おわりに

ASRは配合や環境条件で大きく相違するものであり、したがって、これに対する対策の効果も一律ではない。ASRをより合理的に抑制するには、構造物の重要度や使用環境、予定供用年数などの要因も考慮した総合的な抑制対策が必要であると考えられる。

## 【参考文献】

- 1) 近藤泰夫, 北川欣一: アルカリ骨材反応に関する研究, セメント技報年報, Vol. 5, pp. 379~398 (1951)
- 2) 例えば, 阪神高速道路管理技術センター: ASR構造物の維持管理マニュアル (2007.2)
- 3) 尾花祥隆, 鳥居和之: プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材におけるASR劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 607~612 (2001.6)
- 4) 日本コンクリート工学協会: 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報告書, pp. 45~110 (2008.9)
- 5) 松本 茂, 佐々木一則, 久利良夫, 後藤年芳, 宮川豊章: 反応性骨材を用いた供試体の表面保護工による膨張抑制効果, 材料, Vol. 57, No. 10, pp. 987~992 (2009.10)
- 6) 宮川豊章, 久田 真, 菅島章文, 藤井 学: 発水剤によるアルカリ骨材膨張の抑制, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, pp. 34~39 (1988)
- 7) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], pp. 172~173 (2007.1)
- 8) ASRに関する検討委員会: アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案), pp. 38~39 (2008.3)
- 9) FHWA-HRT-06-073: Interim Recommendations for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent Alkali-Silica Reaction, Interim Report, pp. 69-74, April-November 2005