A Study on the Investigation and Diagnostic Techniques of ASR in concrete and the Durability of Pavement in Expressway

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/42284

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



論　文　要　旨

高速道路におけるコンクリートの ASR 調査診断技術と舗装の耐久性向上に関する研究

A Study on the Investigation and Diagnostic Techniques of ASR in concrete and the Durability of Pavement in Expressway

金沢大学大学院自然科学研究科

環境科学専攻

環境創成講座

氏　名　　小松原 昭則

In this study, the ASR deterioration of concrete structures of Hokuriku expressway, using the core taken from the structures, corresponding to various test results including residual expansion test of core and river systems use aggregates revealed the process of deterioration due to ASR of each structure. And the method of repairing a concrete structure deteriorated by ASR, the suitability of repair method and the repair material according to the degree of progress of ASR obtained from the results of the residual expansion test for each repair method on the basis of the past repair case was evaluated. Furthermore, by examining the fracture cases of steel bar caused by ASR in detail, the cause that led to the fracture are revealed from the stress occurred in the steel bars, the quality of the steel bars and the observation of the fracture surface.

Also, the concrete used for paving, reasonable temperature stress calculation method has been proposed a temperature stress occurred in the continuous reinforced concrete pavement from the measured value of the strain in the test pavement.

１．研究の背景および目的

1980 年頃から顕在化した ASR 問題は，建設省総合技術開発プロジェクトおよび日本コンクリート工学協会のアルカリ骨材反応調査研究委員会による全国的な調査によって，ASR による劣化を受けた構造物はわが国の幅広い地域に分布しており，反応性骨材も火山岩，堆積岩および変成岩を起源とする多種多様な岩種のものが存在することが明らかになった．同時に骨材の ASR 試験法や ASR に対する抑制対策とともに，ASR 劣化構造物の調査・診断，補修・補強方法なども提案された．その後，骨材の ASR 試験法の普及により，反応性骨材が排除されるとともに，ASR のもう一つの要因である，セメントのアルカリ量も粘土原料の選別により低アルカリ形のレベルである 0.6%程度まで減少していった．これらの対策が効果を発揮して，ASR 抑制対策の確立以後，新設構造物での ASR の発生は確実に少なくなってきた．一方，1970 年代，1980 年代に建設された ASR 劣化構造物では，経年劣化の進行とともに，表面塗装による補修が実施されたが，外部からの水分を遮断しても ASR の進行を完全に停止させることができず，再劣化を生じるものが現われてきた．ASR に対する補修工法の確立は現在でも未解決な問題であると言える．

本研究では，北陸自動車道のコンクリート構造物の ASR 劣化過程について，反応性骨材の岩石・鉱物学的特徴とその分布をもとにした耐久性診断，ASR によって鉄筋破断した RC 構造物のコンクリートおよび鉄筋の詳細調査から鉄筋破断に至った経緯の検証，さらに，ASR の補修工法について，コンクリートの ASR 膨張の継続性を把握するとともにアルカリ量や岩石・鉱物学的な知見から，コンクリートの性状を確認することにより，北陸地方の高速道路の ASR 構造物を維持管理する上で必要とされる補修工法の適合性を提案することを目的とした．

また，本研究では高速道路の舗装の耐久性向上について実施した．高速道路の舗装は現在アスファルト舗装が主流である．アスファルト舗装の損傷にはわだち掘れに代表される機能的な損傷と路盤や路床の損傷を原因とする構造的損傷に大別される．新東名や新名神を建設するにあたり，後者の構造的損傷のリスクを低減し高い耐久性と走行の安全性・快適性を求めた．そこで，新たな舗装構造として連続鉄筋コンクリート舗装版をベースとし，

表層にアスファルト混合物を施工するコンポジット舗装を採用した．しかし，このコンポジット舗装は当時明確な構造設計法がなかったことから，その設計法の開発が急務であった．

本研究では，高速道路の舗装に関して，コンポジット舗装のベースとなる連続鉄筋コンクリート舗装について，コンクリート版に発生する温度応力について検討し，温度応力算定式を開発することを目的としている．

２．高速道路における ASR の調査診断

構造物の維持管理では，その性能を許容範囲内に保持するために，どのタイミングでどのような補修や補強を実施するかを判断する必要がある．そこで本研究では，ASR 劣化構造物の最適な補修時期と補修方法を把握するため，2008（平成 20）年から 2010（平成 22）年にかけて，富山県，石川県および福井県（滋賀県の一部を含む）の 24 の北陸自動車道のコンクリート構造物（橋台，C-Box，RC スラブ，PC 桁）からコアを多数採取して，コンクリート ASR 劣化度に関する一連の調査研究を実施した．また，反応性骨材の岩石学的評価の実施と過去の調査（1998（平成 10）年～1999（平成 11）年）で実施したコアによる試験の結果との関連性について検討した．さらに，コアの ASR ゲルの化学組成を EPMA で調べて，コアの NaOH 溶液浸漬法および実構造物のモニアリングの結果と合わせて，構造物の ASR の進行過程について評価した。

調査対象は，北陸地方を通過する北陸自動車道における 24 の構造物である．これらの構造物は各地域（富山県，石川県，福井県，一部滋賀県）を代表する河川水系の骨材を使用している．河川産の骨材は，河川流域およびその採取場所により岩種構成が大きく変化し，ASR と関係する火山岩（安山岩，流紋岩，溶岩凝灰岩など）以外にも，深成岩（花崗岩，閃緑岩，斑れい岩など），堆積岩（砂岩，頁岩など）などの多種多様な岩種が骨材中に混在している．このため，それぞれの構造物は ASR の劣化状況が異なっており，その劣化度を目視によって 4 段階（OK，C，B，A）に区分した．なお，これらの構造物が位置する高速道路は，1972 年（昭和 47 年）～1983 年（昭和 58 年）に供用しており，この時期はわが国で高濃度のアルカリ（1%程度）を含有するセメントが流通していた時期でもあった．

本研究では，北陸地方の反応性骨材の岩石・鉱物的特徴とその分布状況を明らかにし，この地方の骨材に適したASRの評価法について検討するとともに，ASR構造物の劣化過程を把握した．本研究により得られた主要な結果は以下のとおりである．

(1) 北陸地方では，常願寺川水系（富山県）や九頭竜川水系（福井県）の河川産骨材を使用したことにより，一部の構造物に劣化度の高いASRが発生していた．この地方のASRには，川砂および川砂利中の安山岩の構成率が関係していた．

(2) 外観のASR劣化状況と薄片観察による結果がほぼ対応していたことから，通常の点検における外観目視から，構造物内部の劣化状況が推定できるものと考えられた．なお，コアの薄片による劣化度は，外観よりも先行する場合があったことから，構造物から定期的にコアを採取して薄片観察することによって，ASRの劣化の進行の予測精度を向上できる．

(3) NaOH溶液浸漬法および飽和NaCl溶液浸漬法による残存膨張性試験において，通常は反応しない岩種がASRを誘発させて過大な膨張を示す場合があった．このため，コアの膨

張率が0.1%を超える場合，岩種構成率やアルカリ量を同時に確認して，異常な膨張のでないことを確認する必要があった．なお，NaOH溶液浸漬法による膨張率が0.1%未満（試験日数21日）であった場合は，構造物の残存膨張性がないことが確認できた．このため，定期的なNaOH溶液浸漬法による残存膨張率の確認は，ASR構造物の残存膨張性を把握する上で有効な手段であった．

(4) ASRの劣化進行を考慮した補修・補強の設計を行う際に，NaOH溶液浸漬法および飽和NaCl溶液浸漬法による試験終了後のコアの圧縮強度および静弾性係数の値を確認することが有効であった．

(5) ASRゲルの化学組成を分析した結果，反応性の川砂は早期にASRを生じるが，長期にわたって反応が継続するものではなかった．また，EPMAによる定量分析のけっか，吸水膨張性が高いASRゲルであると判断されるのは，本研究の範囲において，Ca/Siが0.2以下程度であった．

(6) ASR ゲルの化学組成，NaOH 溶液浸漬法による残存膨張率および鉄筋に発生したひずみ量の結果から，ASR 劣化度の高い常願寺川水系の骨材を使用した構造物は，供用から 30 年以上経過した現在においても ASR による膨張が継続していた．一方，九頭竜川水系の骨材を使用した構造物は，ASR による膨張がほぼ収束したものと判断できた．

３．ASR により鉄筋破断が発生した RC 橋脚の詳細調査

北陸地方では，アルカリシリカ反応（以下 ASR）による過大な膨張により鉄筋が破断する事例が多く報告されている．鉄筋の破断の多くは RC 橋脚であるが，フーチングや橋台での破断事例も報告されている．北陸地方の事例で共通することは，凍結防止剤の影響を受けること，日射および降雨の影響を受けること，鉄筋の曲げ加工部や圧接箇所であること，鉄筋の節の形状が竹節状であること，電炉鉄筋であることが挙げられる．

富山県内の高速道路の道路構造物は，コンクリートのはく落片対策として，重要交差箇所を主体に補修対策が進められていた．その中の掛違い橋脚のパラペットに鉄筋破断が確認された．パラペットは，伸縮装置からの漏水があり，冬期に散布される凍結防止剤の影響を長年にわたって受けていた．このため，ここ 10 年間で ASR によるひび割れが急速に発達し，鉄筋腐食にともなう浮き等の劣化も顕在化してきていた．破断が確認された鉄筋は，D16 のせん断補強筋であり，建設時の記録から，高炉メーカーが製造した鉄筋であることが判明している．

本調査では，鉄筋破断が確認された橋脚のコンクリートの劣化の特徴を調べるとともに，骨材の岩石学的特徴と構造物から採取したコアおよび鉄筋の力学的性質を詳細に検討した．さらに，RC 橋脚から取り出した鉄筋の材質を電炉鉄筋と比較検証した．

従来，高炉メーカーで製造された鉄筋は，じん性が高いので，ASR 膨張による破断の可能性は低いと考えられていた．本調査により得られた主要な結果をまとめると以下のとおりである．

(1) 破断した鉄筋は，D16 のせん断補強筋および配力筋の曲げ加工部であり，鉄筋の節形状は竹節であった．

(2) 鉄筋破断が確認された箇所では，コンクリート表面に幅 1mm 程度の ASR によるひび割れが水平方向に発生していた．

(3)コンクリートは ASR によるひび割れの発生と拘束の低下により，設計基準強度 24N/mm² に対して，20N/mm² 程度に低下していた．
(4)鉄筋破断箇所では，伸縮装置からの漏水により凍結防止剤の影響を受けており，断面欠損を伴った腐食が発生していた．
(5)コンクリート中の川砂および川砂利中の安山岩粒子がともに激しく反応を生じていた．また，偏光顕微鏡観察より，ASR ゲルはセメントペースト中のひび割れを充填し，ゲルスポットが観察された．
(6)鉄筋切断法により RC 橋脚の D16 の鉄筋には 1,800μ のひずみの発生が確認された．この値より発生応力を推定したところ 370KN/mm² が作用しており，鉄筋の降伏点（SD295A 規格）を超えていた．
(7)現地で回収した鉄筋の材質試験より，鉄筋の降伏点は 370N/mm² であった．しかし，化学組成より N（窒素）の含有量が 0.014%と大きいことから，高炉メーカーで製造された鉄筋であるが，電炉鉄筋に類似した化学組成であった．
(8)鉄筋の曲げ半径を測定した結果，曲率（R/D）は 1.1 であり，設計の 2.0 を満足していなかった．また，曲げ加工部には節に沿ったひび割れと圧延方向にひび割れが発生していた．
(9)鉄筋破断面の SEM 観察より，曲げ加工時に発生したひび割れを起点にして 3 段階の脆性的な破壊が生じていた．
(10)鉄筋破断の主たる原因は，鉄筋に N（窒素）が多く含有されていたことによるじん性の低下，鉄筋の曲げ半径が小さいことによるひび割れの発生，さらに凍結防止剤の影響による過大な ASR 膨張の発生が複合したことによるものと考えられた．

４．高速道路の ASR 補修工法の効果の評価

高速道路の ASR 構造物の補修は 1988 年よりひび割れ注入と表面被覆を実施してきたが，補修後数年で表面被覆材にひび割れやふくれが発生することが多くあり，コアによる残存膨張性の評価と現場での ASR による劣化の実態が相違する結果となった．このような理由で，15 年ほど前よりコアによる残存膨張性の評価手法として外部からアルカリを供給する NaOH 溶液浸漬法（温度 80℃，１N・NaOH 溶液浸漬）を採用した経緯があった．同一の構造物に NaOH 溶液浸漬法を定期的に実施することによって ASR 挙動，すなわち収束や継続の方向性を判断できる可能性が確認されている．

その一方で，2001 年から第 3 者に対するコンクリート片のはく落防止や鉄筋の腐食抑制を目的として，ひび割れ注入と表面被覆工法，断面修復工法，コンクリート巻立てなどによる第 2 次補修が実施されてきているものもある．これらの補修材料の中には数年でひび割れが発生したものもあれば，10 年経過後も健全な状態を保っているものもある．したがって，構造物における残存膨張性の傾向やコンクリート性状を把握することによって，構造物に適合した補修工法や材料を選定できる可能性が考えられた．

そこで本研究では，補修を行ったいくつかの工法別に，「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」を補修前と補修後約 10 年後のデータで比較した．これにより，コンクリートの ASR 膨張の継続性を把握するとともにアルカリ量や岩石・鉱物学的な知見から，コンクリートの性状を確認することにより，北陸地方の ASR 構造物を維持管理する上で必要とされ

る補修工法の適合性について整理する手法を提案した．

調査対象とした構造物は，富山県内の道路構造物である．これらの構造物はほぼ同じ水系（常願寺川および神通川）の河川産骨材を使用しており，冬期間には凍結防止剤の影響を受けている．補修は，表面被覆工法として，アクリルゴム系，ポリウレタン系，ウレタン系，エポキシ系，3 種類の連続繊維シート，ケイ酸塩系の表面含浸材，また断面修復工法として，ポリマーセメントモルタルおよびコンクリート巻立てである．

ASR による膨張挙動は反応性岩種の種類やその含有量，アルカリ量，鉄筋による拘束，水および日射等の影響により異なるが，時間の経過に伴いある一定の膨張量に収束すると考えられている．残存膨張量はある一定値に収束する膨張量から，その時点の構造物における膨張量の差に相当する．ここでは，残存膨張量の将来的な方向性をコアによる NaOH 溶液浸漬法で 2 回測定することで把握した．各 NaOH 溶液浸漬法により得られた試験日数 21 日における膨張率の差から調査のインターバルより，「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」が時間の経過とともに 1 次関数で減少すると仮定し，残存膨張性の収束する期間，すなわち収束予想年数とした．

本調査の主要な結果をまとめると以下のとおりである．

(1) 表面被覆工法および連続繊維シートの適合性について

1) 収束予想年数が 28 年以上と予測された場合でも，アクリルゴム系やウレタン系の塗装（中塗材の塗布量が 2,000g/m² 以上のもの）は比較的良好な状態を継続していた．この際に，中塗材の塗布量を十分に確保することでひび割れ追従性が確保され，損傷のリスクが低減された可能性も考えられた．
2) 収束予想年数が 9 年以下と予測された場合でもポリウレタン系やエポキシ系の塗装(中塗材の塗布量が 700g/m² 以下のもの）では比較的早期に損傷が発生した．中塗材の塗布量を十分に確保しなかったことによりひび割れ追従性に乏しく，損傷が発生した可能性も考えられた．
3) 収束予想年数が 7 年と予測された場合，連続繊維シートは比較的良好な状態を継続していた．

(2)ケイ酸塩系の表面含浸材の適合性について

1) 収束予想年数が 5 年以下と予測された場合でも本調査で追跡した表面含浸材は，主剤（Na_2SiO_3）のアルカリ濃度が高く，そのアルカリがコンクリート内部へ拡散・浸透することにより，ASR を促進する可能性があった．
2) 本材料の特性としてのひび割れを CSH により充填する機能は確認できず，また，ASR の進行を抑制する効果も認められなかった．

(3)ポリマーセメントモルタルによる断面修復の適合性について

1) ポリマーセメントモルタルによる断面修復を湿式吹付工法および注入打設工法と比較した場合，収束予想年数に関係なく注入打設工法による断面修復は，比較的良好な効果が継続していた．
2) 躯体内部における ASR の劣化状況がほぼ同じであったことから，初期に発生した乾燥収縮や自己収縮によるひび割れを抑制することで，ポリマーセメントモルタルによる断面修復の損傷リスクを低減できた．

(4)コンクリート巻立てによる断面修復の適合性について

1) 収束予想年数が 10 年以下と予測された場合，コンクリート巻立てによる断面修復は良好な状態が継続した．一方，収束予想年数が 30 年以上と予測した場合，損傷が発生するリスクがあった．
2) ASR 構造物の配力筋には降伏点を超えるような多大なひずみが発生していた．補修時には躯体内部の鉄筋の耐力を十分に考慮した設計が必要と考えられた．

５．高速道路の連続鉄筋コンクリート舗装の温度応力の解析と設計法

連続鉄筋コンクリート舗装(以下CRCP)の設計は，横ひび割れを制御するための鉄筋量の決定と，供用後の交通荷重に抵抗するための版厚の決定とから成る．前者については佐藤の研究があり，我が国のコンクリート標準示方書舗装編にもその成果が盛り込まれている．後者では，CRCPの力学的挙動の正確な予測に基づいて横ひび割れ縁部の荷重応力と温度応力を算定し，それらを用いて縦ひび割れを対象とした疲労解析を行う必要がある．しかしながら，横ひび割れを有するCRCPの構造は不連続となるため力学的な取り扱いが難しく，適切な応力算定法が確立されていない．

このようなことから，著者らは有限要素法に基づいた解析モデルの開発を進めてきた．このモデルは，コンクリート版をWinkler地盤上の弾性平板によってモデル化したもので，CRCPの横ひび割れは3つの線形ばねモデルに基づいた目地・ひび割れ要素で対応する．横ひび割れの荷重伝達能力を表すパラメータであるばね定数については，載荷実験における実測とFEM解析によって同定し，その概略値を明らかにした．また，この解析モデルが荷重応力に対して十分な精度を持つことを確認している．しかしながら，CRCPの温度応力については依然明確な算定手段がなく，コンクリート舗装の温度応力式を準用せざるをえない．このようなことから，CRCPの温度応力についての検討が急務であり，温度応力算定法の開発が本研究の目的である．

本研究においては，高速道路に施工された CRCP 区間の一部に計測装置を埋め込んだ試験区間を設け，コンクリート版内のひずみと温度を連続して測定した．これらのひずみを平均，そりおよび非線型成分に分離し，おのおのの成分について温度との関係を調べて温度応力の検討を行った．特にそり成分については，FEM モデルによる解析を行い，このモデルが温度応力の算定においても有用であるかどうかについても検討した．さらに，これらの検討結果に基づいて CRCP の温度応力算定式（5.1）を提案した。

$$\sigma_t = A\left(\sigma_{curling} - \frac{\mu E \alpha T}{1-\mu^2}\right) \qquad (5.1)$$

σ_t ：温度応力

A ：内部応力による低減係数（実測値との関係から A=0.75 を提案）

$\sigma_{curling}$ ：FEM によって計算される横ひび割れ縁部のそり応力

μ ：コンクリートのポアソン比

E ：コンクリートの弾性係数

α ：コンクリートの線膨張係数

T　　：コンクリート版の温度

この算定式はFEMによるそり解析を基本とし，CRCPに特徴的な長手方向の拘束を加味した．さらに，内部応力の効果を0.75という低減係数によって考慮している．提案された温度応力式は，コンクリート舗装のそれと同様の値を与えるが，FEMを基本としていることから汎用性が高く，あらゆる構造条件に適用が可能である．

平成２７年　１月２７日

学位論文審査報告書（甲）

１．学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

高速道路におけるコンクリートのASR調査診断技術と舗装の耐久性向上に関する研究

２．論文提出者　(1) 所　　属　環境科学専攻

(2) 氏（ふり）　名（がな）　小松原（こまつばら）　昭則（あきのり）

３．審査結果の要旨（600～650字）

本学位申請論文に対して審査員全員で面接と試問を行うとともに、審査委員会にて論文の内容を検討し、審査方針を決定した。平成27年1月27日に開催した口頭発表並びに同日に開催した審査委員会にて次のように決定した。小松原昭則氏は、北陸自動車道路（滋賀県から富山県境まで）のASR劣化橋梁とその使用骨材の現地・机上調査を通して、北陸地方における代表的な反応性骨材の岩石学的特徴と構造物の部位（橋脚、橋台、PC・RC桁）のASR劣化度との関係について詳細に調べている。本研究の成果により、北陸自動車道路で使用されたコンクリート用骨材、とくに河川産の川砂利や川砂に混入する安山岩粒子の量がコンクリートのASR劣化度に密接に関係していることを明らかにしている。また、北陸自動車道路で適用された補修材料や工法の適否を判断できる評価手法を提案し、北陸自動車道路のASR劣化構造物の維持管理計画に役立てている。さらに、高速道路舗装の耐久性向上を目指して、連続鉄筋コンクリート舗装の温度応力とその設計手法についても実験的・解析的に検討している。本学位請求論文は、北陸自動車道路でのコンクリート構造物のASR抑制対策と維持管理に大きく貢献するものであり、研究内容は工学的に有用な知見を多く含んでいることから、本学位申請者は博士（工学）に値するものと判定した。

４．審査結果　(1) 判　　定（いずれかに○印）○合　格　・　~~不合格~~

(2) 授与学位　　博　士（工学）