

アルカリシリカ反応(ASR)が 発生したコンクリート構造物の 調査・診断法と対策に関する手引き(案)

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)
金沢支店 道路技術部 試験研究課

① はじめに

この手引きは、これまでに富山県内の高速道路の下部構造（橋台および橋脚、C-Box）を対象に実施した調査結果を元に、ASR劣化した構造物の調査・診断方法を提案するものです。

ASR劣化したコンクリート構造物の維持管理の問題解決の一助となれば幸いです。

令和5年7月

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)

金沢支店 道路技術部 試験研究課

河尻 留奈

お問合せ先

石川県金沢市駅西本町3-7-1 〒920-0025
r.kawajiri.a@c-nexco-hen.jp

② アルカリシリカ反応(ASR)とは

北陸地方では、コンクリート構造物の使用・環境条件が厳しいため、顕著な劣化が進行しており、特に富山県内では多くのASR劣化した構造物が確認されています。1986年のASR抑制対策¹⁾により、コンクリート中のアルカリ総量を $3\text{kg}/\text{m}^3$ にするなどの対策が講じられてきたものの、1986年以降に建設されたコンクリート構造物でもASR劣化が散見されています²⁾。また、ASR補修として、従来より表面被覆材による塗装やエポキシ樹脂によるひび割れ注入が実施されてきましたが、再びひび割れが発生するなどの再劣化を繰り返しているのが現状です。

この背景には、潜在膨張性を判定する基準がないために、正確な診断が行われてこなかったことが考えられます。ASRによる劣化構造物の調査・診断と対策の決定には、「ひび割れなどの変状がASRによるものか（原因究明）」、「今後のASRの進行がどの程度であるか（劣化予測）」が必要です。



方向性のない亀甲状のひび割れが発生

② アルカリシリカ反応(ASR)とは



T型橋脚の掛違いのある張出部に発生したひび割れとASRゲルの滲出

5

② アルカリシリカ反応(ASR)とは



ボックスカルバートの坑口およびウィング付近に発生したひび割れ

6

② アルカリシリカ反応(ASR)とは

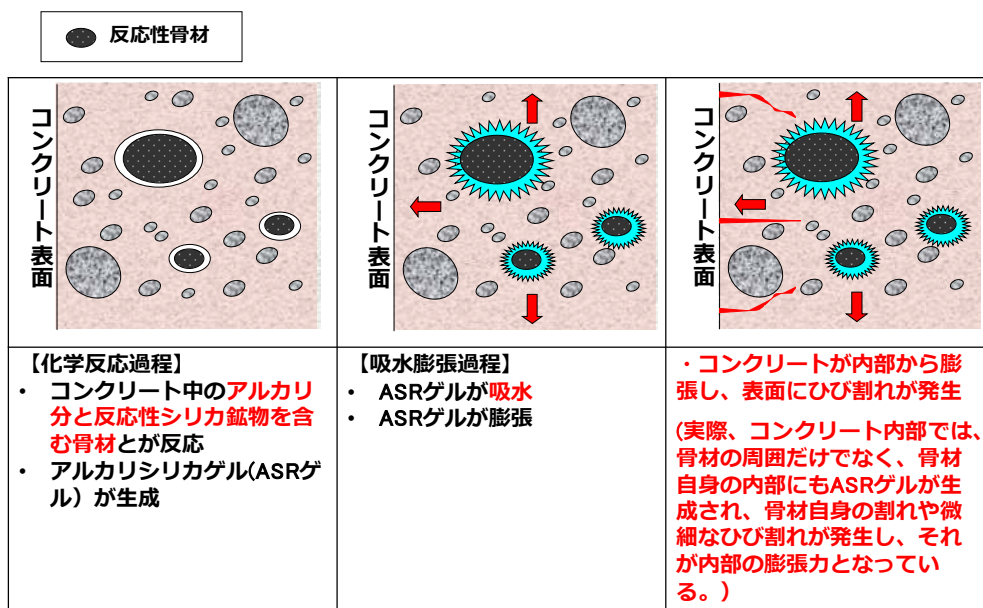


ポステンPCT桁の下フランジ部に発生したひび割れ

7

③ ASRのメカニズム

アルカリシリカ反応（以下、ASR）とは、コンクリート中の反応性骨材がアルカリ性水溶液と反応して、コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる現象です。骨材に含まれる反応性シリカやガラス質物質とセメントの水和反応の過程で生成した水酸化アルカリ(NaOH, KOH)との化学反応により、ASRゲル(Na(K)-Ca-S-H)が生成されます。このASRゲルが吸水膨張する性質を持ち、コンクリート全体が異常に膨張してひび割れや変形、変色などを発生させます³⁾。

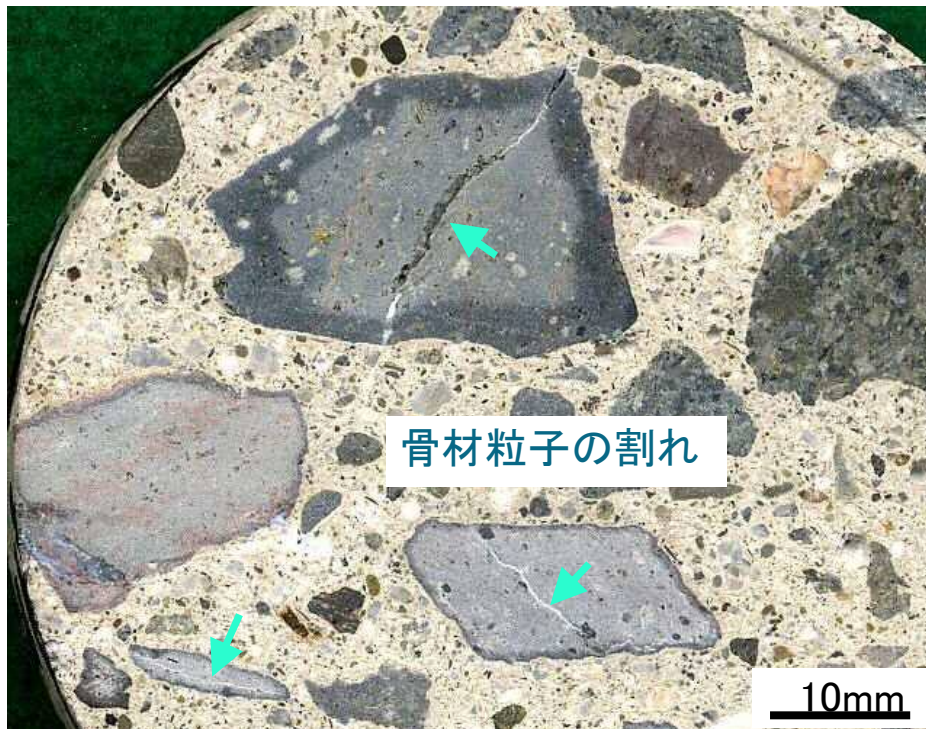


※反応性骨材とは、アルカリ分と反応しやすい安山岩、流紋岩等の岩石

8

③ ASRのメカニズム | 【事例】ASRによる骨材粒子の割れと微細なひび割れ

目視による切断面の観察

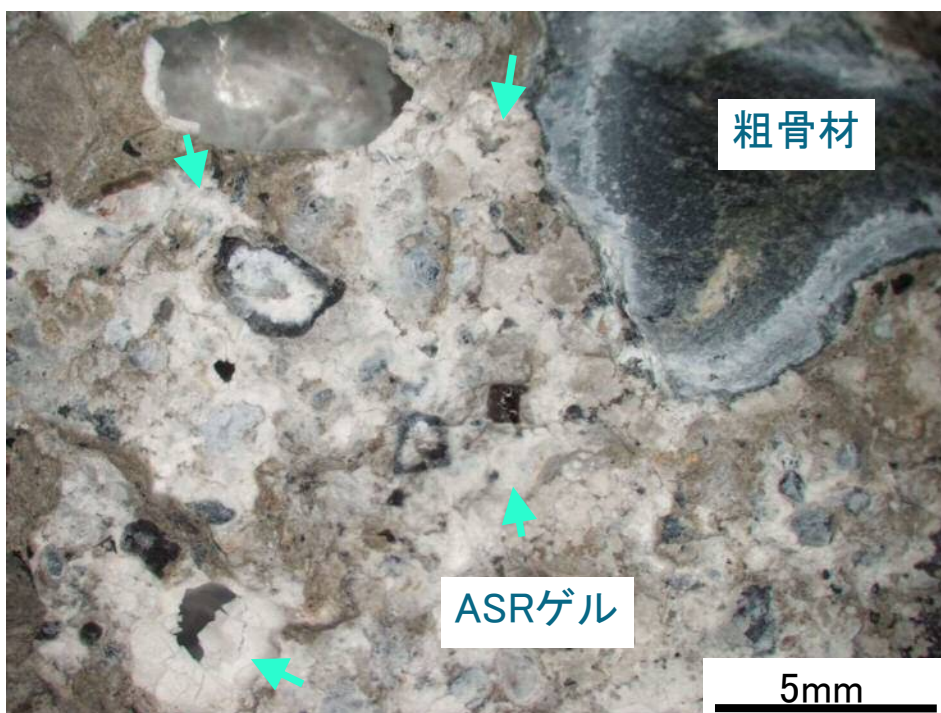


ASRによる骨材粒子の割れと微細なひび割れ⁴⁾

9

③ ASRのメカニズム | 【事例】ASRによる骨材粒子の割れと微細なひび割れ

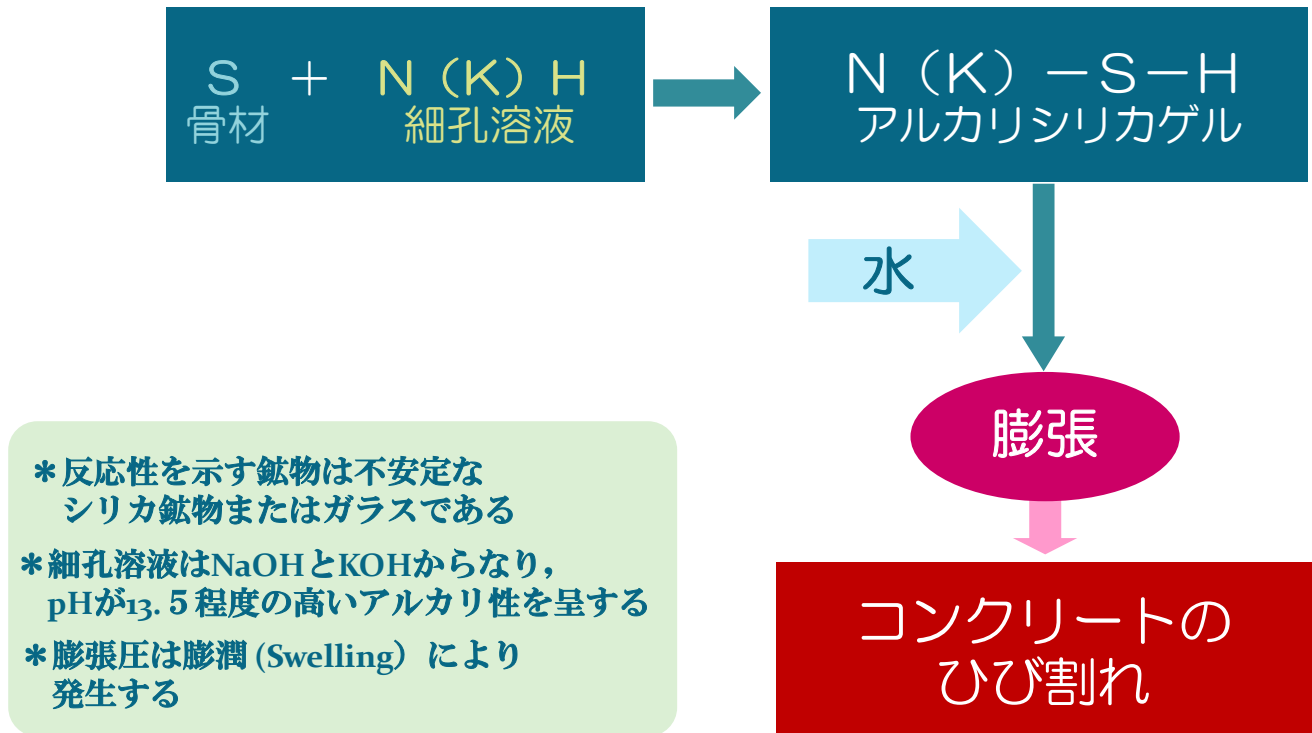
実体顕微鏡による破断面の観察



破断面では反応性骨材とセメントペーストにASRゲルが分布⁴⁾

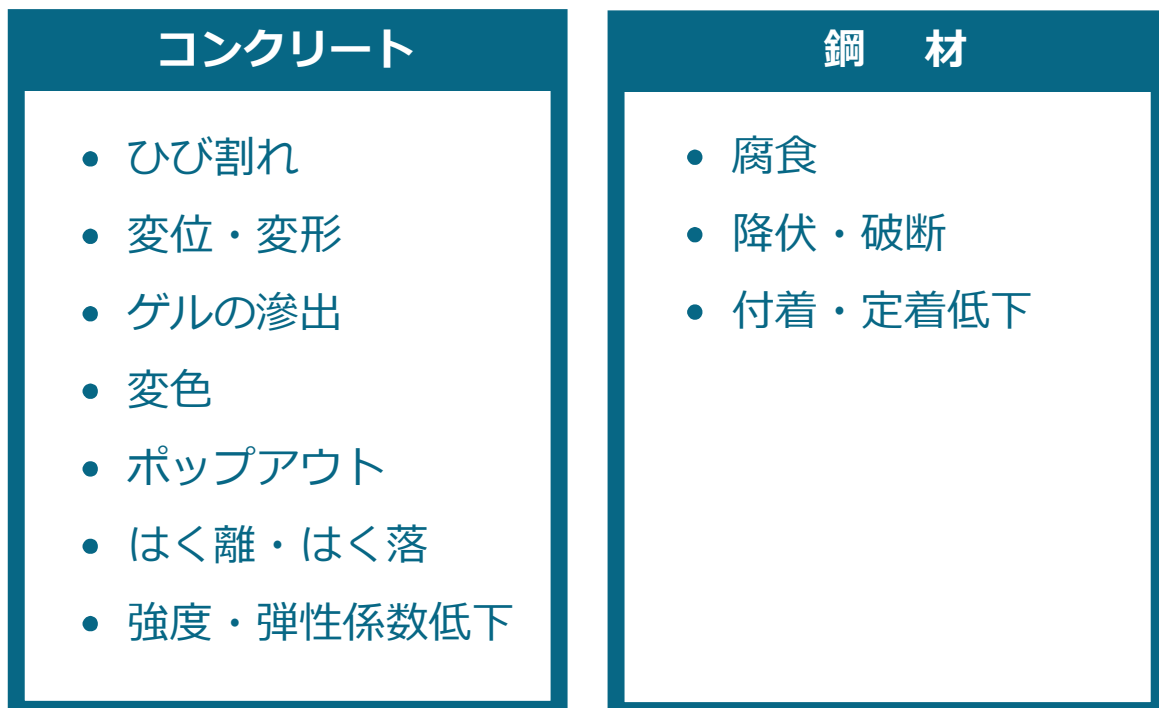
10

③ ASRのメカニズム | ひび割れ発生メカニズム



11

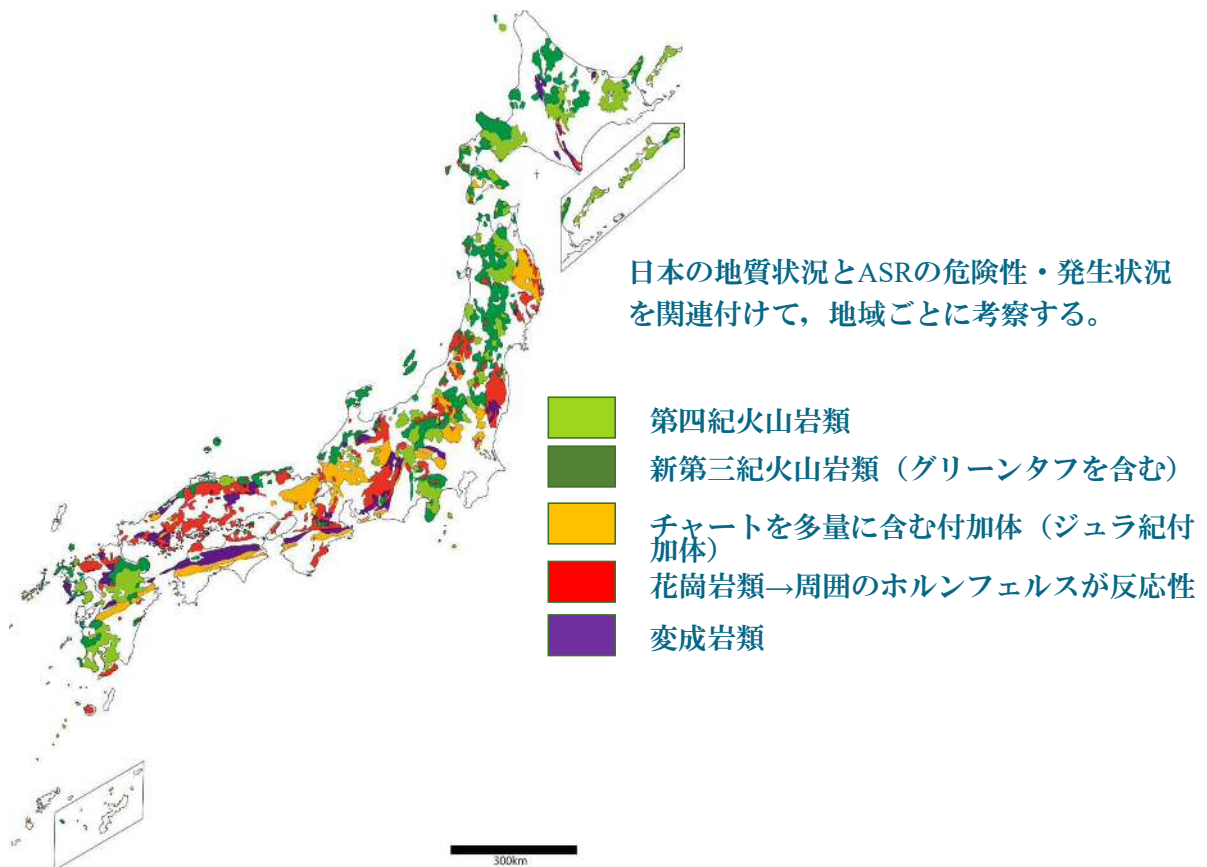
③ ASRのメカニズム | コンクリート構造物のASRによる劣化形態の特徴



※無筋, RC構造物, PC構造物ごとの区別が必要

12

◆日本の代表的な反応性骨材の分布



ASRと関係の深い岩石の分布図⁵⁾

13

④ ASRの調査・診断法

●ASR劣化構造物の評価方法⁶⁾

巨視的・微視的な状態観察を組み合わせた調査を行うことで、構造物の劣化要因と劣化度に合わせた対策法の選定が可能です。

項目	概要
構造物の外観観察	橋台のひび割れ発生状況を目視観察
コアの外観観察	骨材の割れ、全体のひび割れ発生状況や断裂状況を目視観察
促進膨張試験	採取したコアを温度80°Cの1N・NaOH溶液に浸漬し、浸漬後14日時点の膨張率を評価
コア(薄片)の岩石学的試験	採取したコアを厚さ20 μ mに成形し、偏光顕微鏡によりコンクリートの微細組織を観察 ※必要に応じて実施
水溶性アルカリ量の測定	採取したコアを総プロ法に準拠して水溶性のNa ⁺ およびK ⁺ イオンの測定値より等価Na ₂ Oを試算
圧縮強度および静弾性係数	採取したコアによる圧縮強度および静弾性係数試験 (JIS A 1108)

14

④ ASRの調査・診断法 | ASRの有無を調べる各種試験



コアの膨張量の測定



アルカリ量の測定



圧縮強度・静弾性係数試験



コンクリート薄片試料の作製



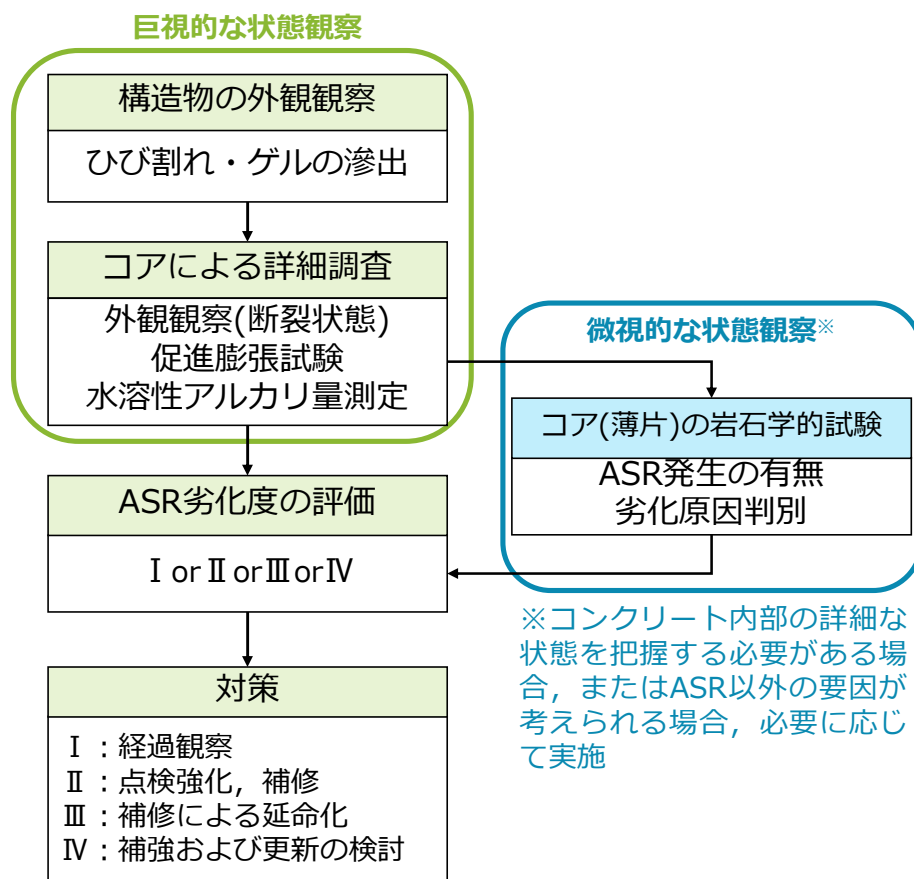
偏光顕微鏡による観察



EPMAによるゲルの組成分析

15

④ ASRの調査・診断法 | 調査・診断・対策の体系⁷⁾



16

④ ASRの調査・診断法 | 構造物の外観観察

●構造物(橋台)の外観観察によるASR劣化度の判定-1^{7), 8)}

巨視的な状態観察として、ASR劣化した橋台の外観観察を実施したところ、ASR劣化度に応じて4段階に分類することができました。

I 健全

(Sound)



ASRのひび割れが
発生していないもの

II 軽微

(Slight)



構造物の隅角部などにASRのひび割れがごく一部発生しているもの

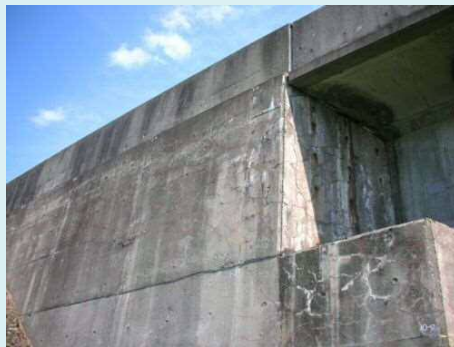
17

④ ASRの調査・診断法 | 構造物の外観観察

●構造物(橋台)の外観観察によるASR劣化度の判定-2^{7), 8)}

III 中程度

(Moderate)



ASRのひび割れが構造物の約1/3以上の面積で発生しているもの

IV 深刻

(Severe)



ASRのひび割れが広範囲に多数発生し、段差やずれも認められるもの

18

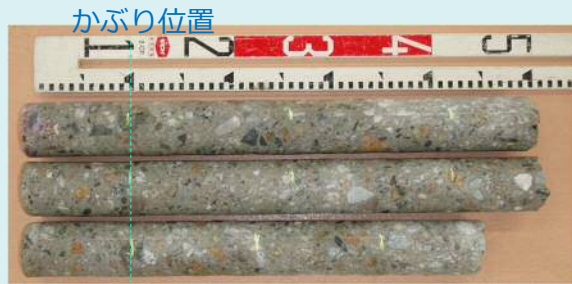
④ ASRの調査・診断法 | コアの外観観察

● 構造物 (橋台) から採取したコアによるASR劣化度の判定-1 ^{7), 8)}

巨視的な状態観察として、ASR劣化した橋台から採取したコアについても、外観観察によりASR劣化度に応じて4段階に分類することができました。

I 健全

(Sound)



骨材およびその周囲にASRの痕跡が認められないもの、反応性岩種がほとんど観察されないもの（とくに、北陸地方は安山岩粒子（黒色および灰色）に注目する）

II 軽微

(Slight)



骨材およびその周囲にASRの痕跡が一部に認められるもの、またコアの開封時に骨材から少量のASRゲルの滲出（水あめ状）が観察されるもの

ASRの痕跡：反応環、ひび割れ、ゲルスポットなど

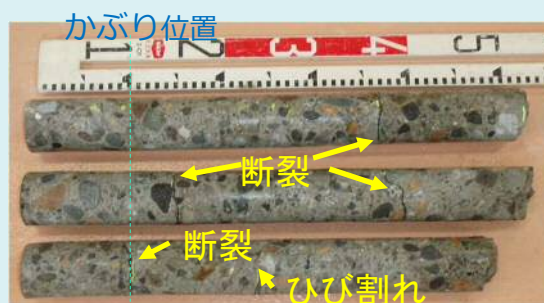
19

④ ASRの調査・診断法 | コアの外観観察

● 構造物 (橋台) から採取したコアによるASR劣化度の判定-2 ^{7), 8)}

III 中程度

(Moderate)



骨材およびその周囲にASRの痕跡が明瞭に認められるもの、またコアの開封時に骨材からASRゲルの滲出（水あめ状）が観察されるもの、採取コアの1本以上がかぶり部分（鉄筋位置）で破断しているもの

IV 深刻

(Severe)



骨材およびその周囲にASRの痕跡が全面的に認められるもの、コアの開封時に骨材からASRゲルの滲出（水あめ状）が観察されるもの、採取コアがかぶり部分（鉄筋位置）で全数（3本）が破断し、さらに内部にて圧壊しているものがあるもの（破断面にはASRゲルの析出が観察される）

20

④ ASRの調査・診断法 | コア(薄片)の岩石学的試験(必要に応じて実施)

●コアの偏光顕微鏡観察による薄片観察に基づくASR劣化度の評価⁴⁾

微視的な状態観察として、採取したコアの薄片観察を実施したところ、ASR劣化度に応じて4段階に分類することができました。

ASRの程度				
分類	I	II	III	IV
ASRの観察結果	骨材の反応リムの形成と骨材周辺のASRゾル/ゲルの滲出	骨材粒子内にASRゲルに充填された膨張ひび割れが生成	ASRゲルに充填された膨張ひび割れが骨材から周囲のセメントペーストへ進展	密集したひび割れ網の形成と骨材から離れたセメントペーストの気泡内へのASRゲルの頻繁な浸入
偏光顕微鏡観察				

21

④ ASRの調査・診断法 | 促進膨張試験のためのコアの採取方法

ASR劣化したコンクリート構造物の潜在膨張性を判断するために、促進膨張試験(80°Cの1N・NaOH溶液に浸漬)により評価を行います。試験に使用するコアは、以下の大きさ・位置から採取します。

●コアの促進膨張試験(NaOH溶液浸漬法)によるコアの採取方法⁹⁾

下部構造に関しては、

1. 地上1.5mの中央位置(ひび割れ箇所を避ける)から直径55mmおよび長さ200mm以上のコアを3本採取する
2. 膨張測定用の試験体はかぶり部分(80mm)より内部(基長:100mm)から切り出す
3. 骨材のASR試験(促進モルタルバー法(ASTM C 1260))の判定に準拠して、浸漬期間2週での膨張率にて判定する



22

④ ASRの調査・診断法 | コアの促進膨張試験における評価基準値

コアの膨張率やASR劣化度、構造物のASR劣化度を総合して分類したところ、膨張率に応じて下表に示すような傾向が確認されました⁸⁾。なお、膨張率の閾値はASTM C1260の判定基準を考慮しています。

膨張率(14日) ^{※1, 2}	潜在膨張性の判定
0.05%未満	構造物の現在および将来の維持管理にて、ASRは問題とならない(潜在膨張性なし)。
0.05%以上0.10%未満	反応性岩石が少ないまたはほとんど無い(潜在膨張性は極めて小さい)。
0.10%以上0.20%未満	反応性岩石を少量含有するが、遅延膨張性骨材の膨張挙動を示す。ASRはほぼ収束している(潜在膨張性は小さい)。
0.20%以上	反応性岩石を多く含有しており、とくに、0.4%以上はASR膨張が継続する。急速膨張性骨材の膨張挙動を示す(潜在膨張性は大きい)。

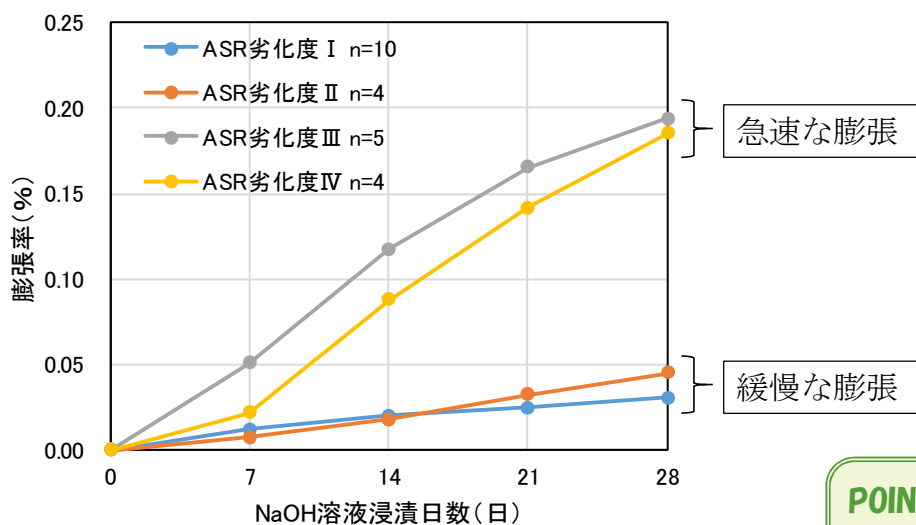
※1 ASTM C1260の判定結果と対応させたもの。

※2 0.05%未満は「非ASR」と扱う。それ以外は「認ASR」とする。


23

④ ASRの調査・診断法 | コアによる詳細調査(促進膨張試験)

構造物のASR劣化度とコアの促進膨張率との関係より、構造物のASR劣化度ⅠおよびⅡ(緩慢な膨張)とⅢおよびⅣ(急速な膨張)のもので両者の区別が明確になりました。



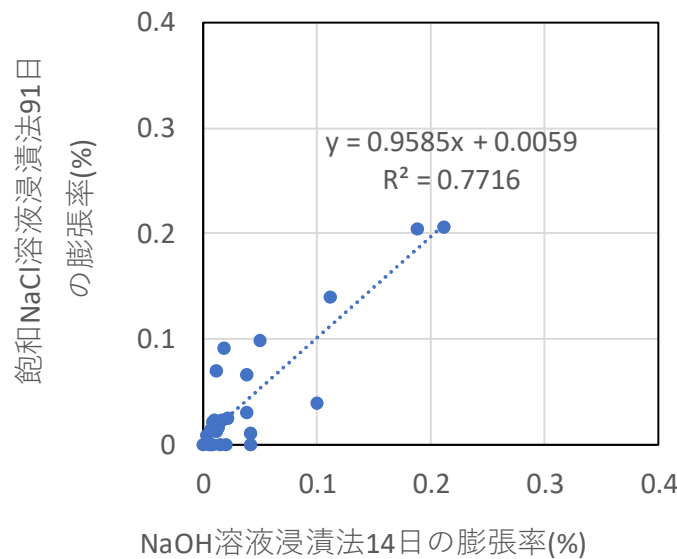
構造物のASR劣化度とコアの促進膨張率との関係¹⁰⁾

POINT  対策が必要か不要かの判断ができる!

24

④ ASRの調査・診断法 | コアによる詳細調査(促進膨張試験)

温度50°C, 飽和NaCl溶液浸漬法による膨張率と温度80°C, 1N・NaOH溶液浸漬法による膨張率を比較すると, 一定の相関関係を確認できました。

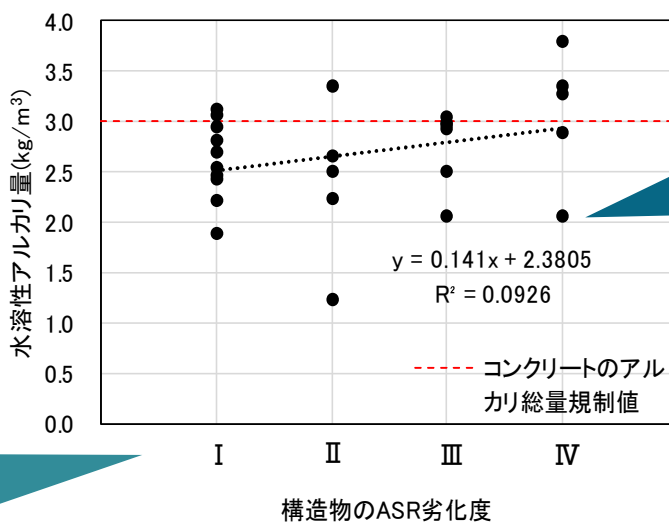


POINT 浸漬期間14日での早期判定が可能!

NaOH溶液浸漬法14日および飽和NaCl溶液浸漬法91日における膨張率の関係

④ ASRの調査・診断法 | コアによる詳細調査(水溶性アルカリ量)

コンクリートのアルカリ量は, 構造物のASR発生の有無に影響する重要な要因の一つです。下図の調査結果では, 全てのASR劣化度の分類においてアルカリ総量規制値3.0kg/m³以上の水溶性アルカリ量のものが確認されました。



ASR劣化度ⅢやⅣの構造物は, 水溶性アルカリ量がすべて2.0kg/m³以上であった

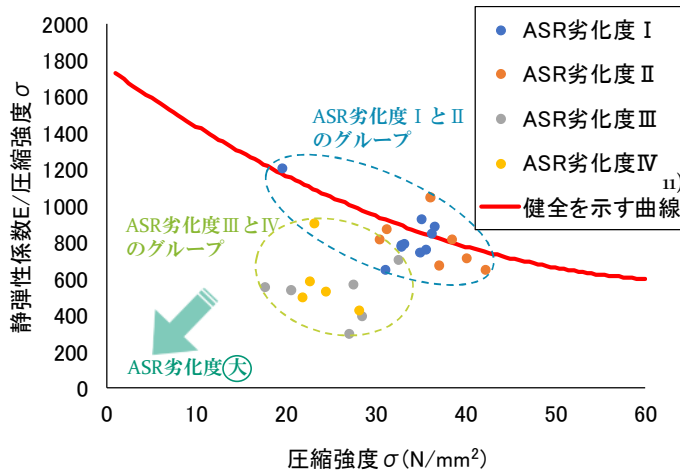
ASR劣化度が大きくなると水溶性アルカリ量も大きくなる傾向が認められた

構造物のASR劣化度と水溶性アルカリ量の関係¹⁰⁾

POINT BB(高炉セメントB種)を使用したコンクリートは水溶性アルカリ量 2.0kg/m³以下となることが確認されています

④ ASRの調査・診断法 | コアによる詳細調査(圧縮強度試験および静弾性係数試験)

圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度の関係より、ASR劣化を判断できます。
この図は、測定点が健全なコンクリートを示す曲線から原点に近づくほどASRによる劣化が進行していることを示しています。



ASR劣化度 I および II が曲線付近にプロットされているのに対し、ASR劣化度 III および IV は原点方向に多数プロットされている

POINT

対策の判断が明確に！
*ASR劣化度 I と II の構造物は補修しない、ASR劣化度 III と IV の構造物は本格的な補修を行う

ASR劣化度別の圧縮強度および静弾性係数/圧縮強度の関係¹²⁾

⑤ ASRの対策 | 北陸自動車道でのASR対策事例

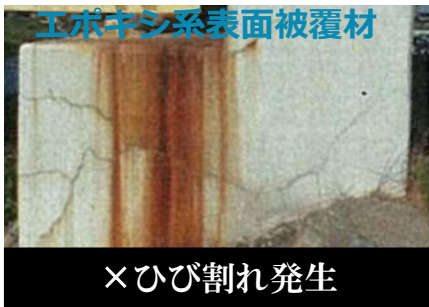
北陸自動車道におけるASR対策の経緯

西暦	内容
1982～1983年	・ASRによる劣化が判明
1982年頃	・砺波IC～富山IC下部工やBOXに亀甲ひび割れ
1984年	・ASTM法(化学法・モルタルバー法)の取り入れ
1985年	・調査開始
1986年	・建設省総合技術開発プロジェクト(総プロ)の策定 ・化学法・モルタルバー法の義務付け ・ASR抑制対策(低アルカリ型セメント、混合セメント、アルカリ総量規制) ・富山県内の跨道橋に防水ライニングとひび割れ注入の実施
1988～1989年	・ひび割れ注入、防水ライニングによるアルカリ骨材反応の抑制工事→再劣化
1993年	・富山県内のトンネルでPAE系ポリマーセメントモルタルの塗布 ・富山県内の橋梁でコンクリート表面に亜硝酸リチウムの塗布
1994年	・水対策の実施 (伸縮装置の非排水化、壁高欄縁石部の止水、中央分離帯開口部の覆工、橋台・橋脚の支承周りの防水)
1996年	・凍結防止剤の影響が判明 ・富山県内の橋梁及びカルバートボックスにてケイ酸ナトリウム系含浸材の試験施工→再劣化
1999～2000年	「北陸自動車道 コンクリート構造物補修補強対策に関する検討」 (丸山久一先生を委員長に調査判定法および補修方法マニュアルを策定)
2001年	・富山地区でポリマーセメントによる断面修復を実施
2002年	・富山県内の橋梁で外ケーブルによる中央ヒンジ構造の連続化
2003年	・NHK報道「ASRによる鉄筋破断の衝撃」 ・かぶり除去後、増筋し、コンクリートで増厚する工法 ・内部鉄筋の破断状況調査の実施→鉄筋破断なし
2004年	・ASRによる鉄筋応力の調査
2005年	・土木学会アルカリ骨材反応対策小委員会報告(宮川豊章先生を委員長に実施、土木学会)
2006年	・福井地区で表面膨張量測定
2008年	・富山県内の橋梁の鉄筋破断を確認 ・ASR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・補強のガイドライン(近畿地方整備局) ・鉄筋破断原因究明・ASRに関する調査指針(案) ・作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制効果と診断研究委員会の実施 (鳥居和之先生を委員長に実施、日本コンクリート工学会)
2014年	・ASR診断の現状とあるべき姿研究委員会の実施 (山田一夫氏を委員長に実施、日本コンクリート工学会)
2019年	・富山県内の橋梁橋台にて亜硝酸リチウム圧入工法の実施→ASR抑制効果の検証

⑤ ASRの対策 | 北陸自動車道での補修事例と効果の検証

表面被覆工法

ウレタン系⇒塗膜厚大，伸びが良い
増し鉄筋コンクリート⇒鉄筋が引張応力を負担



29

⑤ ASRの対策 | ASR劣化構造物の補修(表面被覆工)の課題～その1～¹³⁾

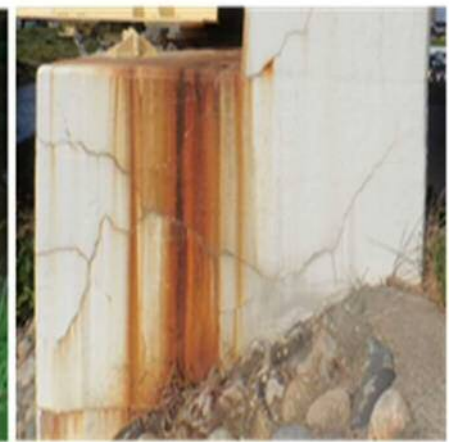
- ひび割れ注入と表面被覆工を実施してきたが，**再劣化**を生じるものが多い
- しかし，健全な状態を維持しているものもある→**施工時期と材料，工法の選定**が重要
- **塗膜厚の厚い被覆材（アクリルゴム系，ウレタン系など）**が推奨される



供用(昭和50年)から12年後の状況



第1次補修(昭和63年)から17年後の状況



2次補修(平成17年)から10年後の状況

橋台の表面被覆工(エポキシ系)のASRによる再劣化の事例

30

⑤ ASRの対策 | ASR劣化構造物の補修(表面含浸工)の課題～その2～¹³⁾

- カルバートボックスのひび割れにポリウレタン系弾性シーリング材の充填を実施した後、**シラン・シロキサン系の表面含浸材(撥水)**を塗布
⇒効果に幅がある材料と認識すべき、安かろう、悪かろうもある
⇒同時に、躯体内部に水抜きパイプを設置 **排水処理は必要**
- **シラン・シロキサン系表面含浸材**は紫外線などによる性能低下に注意
⇒**耐用年数(10年程度)の見極めが必要**
- ケイ酸ナトリウム塩系塗布材は**ASRを促進する**(炭酸ナトリウムを含有、さらにCSHの増殖効果は疑問(?))



(1)補修前

(2)補修後

(3)ひび割れ充填工と導水工

31

⑤ ASRの対策 | ASR劣化構造物の補修(断面修復工法)の課題～その3～¹³⁾

ビニロン繊維補強コンクリートによる断面修復と鉄筋増強

**ASRによる再劣化がなく、
20年程度の効果を確認**

- ひび割れが発生したかぶり部分を完全に除去し、鉄筋を新たに配置後、繊維補強コンクリート(ビニロン繊維0.5%混入)により部分的に打ち替える
⇒**RC巻きたて補強との併用可**
- 構造物の下部工鉄筋(橋台、ボックスカルバート、橋脚)には降伏点を超える、引張り応力が作用しているため、追加鉄筋の配置により**既設鉄筋の応力負担を軽減**できる
- 表面処理工法よりも高価な工法であるが、**メンテナンス費用を軽減**できる

コンクリート巻立てによる断面修復法と現況⁶⁾

構成	コンクリート巻立て		
	追加鉄筋 D13@300	既設鉄筋 D16@300	追加鉄筋D13@300
		既設鉄筋 D13@300	
	30	70	29 34
	はつり取り		
構造物名	N, O	P	Q
供用年	1975	1975	1980
補修年	2003	2004	2003
部位	橋台(部材厚 2m)		
現況	良好	一部損傷	良好
コア採取位置	直接日射の影響を受けない、凍結防止剤の影響を受ける、地盤より0.3m程度の高さの位置、表面から30cm程度の深さ		

※2015年12月での状況

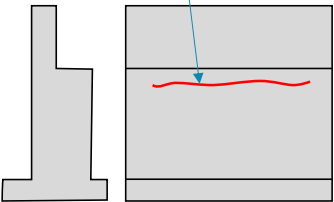
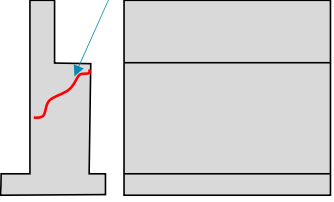
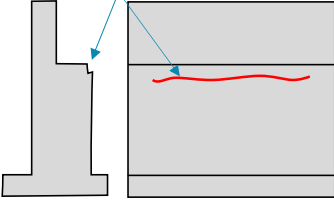






北陸自動車道の橋台(富山県)での実施例

32

⑤ ASRの対策 | ASR劣化構造物の鉄筋破断の調査^{14)~18)}

鉄筋破断は、以下の点に着目して判断を行います。

<p>橋台堅壁上部の鉄筋曲げ加工部付近に幅2mm以上の連続した水平ひび割れが発生している※</p>	<p>ウイングの隅角部より斜め方向（45度）にひび割れが発生している</p>	<p>ひび割れ箇所に段差やズレが観察される</p>
<p>幅2mm以上のひび割れ</p> 	<p>斜め方向のひび割れ</p> 	<p>段差, ズレ</p> 
 		

※よりかぶりの小さい箇所に発生しやすく、橋台天端に発生する場合があります

33

⑤ ASRの対策 | ASR劣化構造物の鉄筋破断に対する対策(フレア溶接および添え筋)

鉄筋破断の対策

- 鉄筋破断が発生した橋台やフーチングでは、構造的に支障がない範囲で、広くかつ深くコンクリートをはつり取る。
- 鉄筋腐食がある箇所は防錆剤による処置を鉄筋に実施する。
- 添え筋で繋いだ破断箇所をフレア溶接などにより補強する。
- 断面修復材にはポリマーセメントモルタルなどの既設部分との付着の良好なものを選択する。
- 埋め戻し土をセメント改良土（BB，FB）にすると、躯体への地下水の浸透を防ぐ効果が期待できる。



フーチングの鉄筋破断事例



橋脚柱部材の鉄筋破断事例



橋台の添え筋による補強

34

●本手引き(案)を作成するにあたって使用したデータ (北陸自動車道)

No.	構造物名	部位	骨材水系		目視レベルでのASR劣化	圧縮強度 σ (N/mm ²)	静弾性係数 E (kN/mm ²)	静弾性係数/ 圧縮強度 σ/E
			粗骨材	細骨材				
1	富山1	橋台	小川	小川	I	35.1	32.5	925.9
2					III	27.1	8.0	295.2
3	富山2	橋台	小川	小川	I	35.6	26.9	755.6
4	富山3	橋台	黒部川	黒部川	II	42.2	27.2	644.5
5	富山4	橋台	黒部川	黒部川、片貝川	III	17.6	9.6	545.5
6	富山5	橋台	早月川	早月川	II	36.0	37.6	1044.4
7					IV	22.7	13.2	581.5
8					II	40.1	28.4	708.2
9					IV	23.2	20.9	900.9
10	富山6	橋脚	早月川	早月川	II	38.5	31.2	810.4
11	富山7	橋脚	早月川	早月川	I	32.8	25.6	780.5
12	富山8	橋脚	神通川、早月川	神通川、早月川	IV	24.5	12.9	526.5
13	富山9	橋脚	神通川、早月川	神通川、早月川	IV	21.9	10.8	493.2
14	富山10	橋台	常願寺川	常願寺川	II	37.0	24.6	664.9
15					III	28.5	11.2	393.0
16	富山11	橋台	神通川	神通川	III	20.6	11.0	534.0
17	富山12	C-Box側壁	常願寺川、神通川	常願寺川、神通川	III	27.6	15.5	561.6
18	富山13	橋台	庄川	庄川	I	31.0	19.9	641.9
19	富山14	橋台	不明	不明	不明	24.8	28.2	1137.1
20	石川1	橋台	庄川	庄川	II	30.5	24.7	809.8
21	石川2	橋台	手取川	手取川	III	32.5	22.7	698.5
22	石川3	橋台	手取川	手取川	I	33.1	26.0	785.5
23	石川4	橋台	手取川	手取川	II	31.3	27.2	869.0
24	福井1	橋台	九頭竜川	九頭竜川	IV	28.1	11.8	419.9
25	福井2	橋台	足羽川	足羽川	I	34.9	25.9	742.1
26	福井3	橋台	日野川	日野川	I	19.6	23.5	1199.0
27	福井4	橋台	葉原・刀根	葉原・三国	I	36.2	30.5	842.5
28	福井5	橋台	不明	不明	I	32.9	25.4	772.0
29	福井6	橋台	不明	不明	I	36.6	32.3	882.5

35

●本手引き(案)を作成するにあたって参考にした論文-1

1. 土木研究センター：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，pp.79-294，1989.
2. 鳥居和之，野村昌弘，参納千夏男，広野真一：中部地方における反応性骨材の岩石・地質学的調査とフライアッシュコンクリートの地域実装，コンクリート工学，Vol.59，No.4，pp.321-328，2021.
3. 川村満紀：現場技術者のためのASR対策ノート，中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社，pp.9-10，2010.
4. 広野真一：偏光顕微鏡によるセメント，骨材から成るコンクリートの組織観察，中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)技術講演会資料，2022.
5. 広野真一，山田一夫，佐藤友美，鳥居和之：わが国の代表的な反応性骨材とASRの発生に関するデータ整理，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，2016.
6. 野村昌弘：北陸地方におけるコンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する研究，金沢大学学位請求論文，2007.
7. 可計皓規，河尻留奈，名古屋通義，鳥居和之：富山県内の高速道路橋から採取したコアによるアルカリシリカ反応性と潜在膨張性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.76，pp.580-585，2023.
8. 河尻留奈，稲葉尚文，可計皓規，石川裕一，鳥居和之：コンクリート構造物から採取したコアのアルカリシリカ反応性と潜在膨張性の評価に関する研究，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，第21巻，pp.520-525，2021.
9. 河尻留奈：塩害およびアルカリシリカ反応による複合劣化を受けた積雪寒冷地における道路橋の調査・診断および対策に関する研究，金沢大学学位請求論文，2023.
10. 河尻留奈，小塚正博，鳥居和之：構造物のASR劣化度とコンクリートの水溶性アルカリ量および潜在膨張性との関係，令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会，V-654，2023.
11. 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書(IIIコンクリート橋・コンクリート部材編)・同解説，2017.
12. 小林一輔，森弥広，野村健二：圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法，土木学会論文集，No.460，pp.151-154，1993.
13. 野村昌弘，鳥居和之：北陸地方におけるASR劣化構造物の補修工法の適用性とその評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1065-1070，2016.

36

●本手引き(案)を作成するにあたって参考にした論文-2

14. 国土交通省近畿地方整備局：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），ASRに関する対策検討委員会，2008.
15. 小松原昭則，鳥居和之：アルカリシリカ反応により鉄筋破断が発生したRC橋脚の詳細調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.646-651, pp.976-981, 2012.
16. 大代武志，広野真一，野村昌弘，鳥居和之：富山市周辺の橋梁のASR劣化と骨材の岩石学的特徴に関する調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.991-996, 2013.
17. 樽井敏三，鳥居和之：アルカリシリカ反応による鉄筋の破断機構，材料と環境，Vol.59, No.4, pp.117-120, 2010.
18. 湊俊彦，鳥居和之：コンクリート構造物の鉄筋破断および配筋不良のASR劣化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.989-994, (2010)

1 N・NaOH 溶液への浸漬法（通称、カナダ法）によるコアの「潜在膨張性」試験における判定結果の解釈とその利用における留意点

2023. 8. 21

金沢大学名誉教授

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）TA

鳥居和之

（1） コンクリート構造物の「残存（潜在）膨張性」を正確に推定する方法はない

アルカリシリカ反応(ASR)が発生したコンクリート構造物では、劣化過程（劣化区分）とその進行速度を評価することが必要になるが、塩害や中性化による鋼材腐食などと異なり、ASR 及び凍害に関しては土木学会・維持管理標準などでもそれらが明確に定義されていない。言い換えれば、継続的なモニタリングや目視による点検結果により、コンクリート構造物の劣化過程（劣化区分）が分からない場合には、維持管理で要求される補修・補強さらに更新などの対策を決定する、明確な判断基準がないのである^{注1}。しかし、何らかの方法でもっともらしい理屈とその手順を示すことが要求されている。この理由は主に維持管理の予算確保（要求）のためである。このため、コンクリート構造物から採取されたコアによる促進膨張試験が適用されてきた経緯がある。しかし、最近はその実施例が大きく減ってきている。その理由も単純で、費用対効果から判断すると、コアによる劣化過程の予測精度が良くないことによるものである。

当初、国土交通省（建設省）は JIS A1146 の養生条件（温度 40℃、湿度 95%以上）の湿気槽に保管した状態で、比較的大きなコア（直径 75 mm または 100 mm）を使用したコアの膨張率（0.05%以上を「残存膨張性有り」とする^{注2}）による評価がなされていた。しかし、実際の構造物での劣化の進行状況との関係がまったく対応していなかった。すなわち、このコアによる促進膨張試験で「残存膨張性（潜在膨張性）^{注3}無し」と判定された構造物でも ASR による劣化が進行していたのである。このため、補修（当時はエポキシ樹脂系の表面被覆工が多かった）を実施した構造物での再劣化（塗膜のひび割れや剥がれ）がわずかに数年で発生し、再補修が実施されることになった。これらの再劣化は北陸自動車道や能登有料道路（現、のと里山海道）でも多く経験していることである。当時の補修の効果は、大きなひび割れ（幅 0.5 mm 以上）への注入に留めて、構造物の目視による経過観察（ひび割れ幅の拡大がないか、また、ひび割れが進展していないか）を継続することにより判断していた。近年、JSCE や JCI の報告書などでは「残存膨張性」の用語を使用せず、敢えて「潜在膨張性」に読み替えている。

注1 昭和 50 年代後半に ASR が阪神地方や北陸地方にて発見されて以降、コンクリート構造物の継続的なモニタリングが実施されてきたのは、北陸自動車道、阪神高速自動車道、

能登有料道路（現、のと里山海道）の3路線のみである。これらの路線では40年から50年にわたる、長期の構造物の維持管理のデータが蓄積されている。コアによる評価は実構造物でのASR劣化度とコアの促進膨張試験での膨張率との関係から評価することが必要である。このような観点から、北陸自動車道のコア調査のデータをまとめることが重要であり、今後、エンジ名古屋（株）コンクリート試験室の実績（外部からの委託試験）に活かすことができる。

注2 コンクリートの膨張率とひび割れの発生に関しては、コア試験での目視によるひび割れの観察がまず重要である。すなわち、0.035%から0.04%のコアの膨張率で微細なひび割れが表面に発生し、0.10%になるとひび割れが目視レベルで骨材やセメントペーストなどに明瞭になる。コアにおける判定基準値（0.05%と0.10%）もこの目視による結果との整合性にに基づいている。逆に言うと、このような膨張率でもコアにひび割れなどが発生していない場合には測定自体の信頼性に問題があることになる。モルタルバー法(JIS A1146)におけるモルタルバーの膨張率の測定でも同様に言えることである。

注3 日本コンクリート工学会のASRの診断とあるべき姿研究委員会(山田一夫委員長、2014.7)では、「残存膨張性」を「潜在膨張性」(以下、この用語を用いる)に変更している。この理由は、促進膨張試験にて得られる測定値は、実際の自然環境下のものと大きく異なっていることによる。また、骨材のASR試験に準拠した促進環境下での試験、例えばASTM C1260(促進モルタルバー法)に準拠した測定では、「コンクリートのASR発生の可能性(有無)」を評価していることが基本になっている。この認識は「残存(潜在)膨張性の有無や大小」と同様に実務上有効となる。

(2) コアの採取および試験体の準備における疑問点(留意点)の数々

a) カナダ法による測定の意味

通称、カナダ法やデンマーク法では、それぞれ1N・NaOH溶液(80°C)及び飽和NaCl溶液(50°C)に浸漬した場合のコアの膨張率によりコンクリートの潜在膨張性を評価することになっている。これらの試験では、コア試験体の中心にまで溶液が完全に浸透し、コンクリート内の未反応の骨材(反応性珪物)と溶液が十分に反応していることが本試験法における判定の際の前提条件になっている。エンジ名古屋(株)コンクリート試験室では、カナダ法の場合には0.10%(3週)の膨張率を基準に「残存膨張性」を判定してきた。この値は、道路公団時代に実施したコンクリート構造物の調査結果(ASR劣化度の区分と岩石学的評価)を根拠として、野村昌弘氏の学位請求論文¹⁾(平成19年、金沢大学)やT.Katayama氏の研究論文(J. of Materials Characterization, 2004)にデータが公表されている。T.Katayamaの研究論文²⁾では「Potential reactivity of aggregates in concrete」として試験の解釈(意味)が記載されている。従って、この試験で判定しているものは、非常に厳しいアルカリ雰囲気(実際の構造物とは異なる使用・環境条件)の中で、「コンクリート中に反応しうる骨材(反応性珪物)が残存しているか否か」または「コンクリートにASRがそもそも発生

しているか否か」を評価しているものであると解釈すべきである。さらに、カナダ法によるコアの試験も ASTM C1260 での骨材の試験法を順守すると、同様に 14 日材齢（2 週）での判定基準をコアに適用すべきであると考えられる。判定材齢が短くできれば、コア試験の手間暇を減らすことができるからである。ちなみに、AS（オーストラリア基準協会）での評価基準値（0.10%（3 週））は遅延膨張性を示す石英珪岩（Quartzite）を対象にしており、北陸地方での急速膨張性を示す骨材（安山岩や流紋岩など）とは岩石や含有鉱物の種類が異なるので、基準値の適用には注意が必要になる。

参考文献

- 1) 野村昌弘、北陸地方におけるコンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する論文、金沢大学学位請求論文、平成 19 年 3 月
- 2) T. Katayama et.al. : Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol. 53, pp. 105-122, 2004

b) コアの大きさ及び長さの影響（これは重要である）

コアは直径 55 mm、長さ 200 mm を標準として、かぶり部分（50 mm）を除いた、それよりも内部（測定長：100 mm）を測定用に使用することになっている。通常、コンクリート構造物では、内部での ASR による膨張によりかぶり部の鉄筋（拘束）には大きな引張応力が発生しており、かぶり部は引張、それより内部は圧縮の応力状態にある（かぶり部分でコアが断裂するのは応力状態が圧縮から引張へと変化することによる）。実際に ASR が発生しているのは内部のコンクリートであるとの認識が必要である。同時に、構造的な判断として、表面の巨視的なひび割れ（かぶり深さの半分で止まることが多い）と内部の微細なひび割れ（骨材周囲に発生した顕微鏡により識別できるひび割れ）との区別への理解も必要である。試験の際には、コアの直径は粗骨材の最大寸法との関係で決めている。北陸地方のコンクリートでは、砂利は通常 25 mm、碎石は通常 20 mm の寸法が標準である。このため、この値の 2 倍以上を確保することの理由から、直径 55 mm（当時は 2 inch のコアビットがなく、特注品であった）が決められている。ちなみに、直径 50 mm のコアで実施すると、粗骨材がよく反応しているものではコアが内部で破壊（断裂）することを多く経験している。したがって、フーチングや砂防ダムなどのような粗骨材の最大寸法が 40 mm のものは、測定自体にかなり無理があり、測定精度も劣ることに注意が必要である。

c) コンクリートの配合及びセメントの種類の影響

カナダ法を適用するコンクリートは、設計基準強度が 21N または 24N クラスの普通ポルトランドセメント (N) または早強ポルトランドセメント (H) を使用したコンクリートを想定している。この条件において、カナダ法では 14 日材齢にて NaOH 溶液が試験体の中心部ま

で完全に浸透していることを確認している。ちなみに、カナダ法とデンマーク法とのアルカリ雰囲気の違い、すなわち 1N・NaOH 溶液と飽和 NaCl 溶液（フリーデル氏塩の生成過程で醸成されるアルカリ雰囲気はカナダ法よりも小さく、0.3N 程度であり、コアの材齢やセメントの種類にも影響されること、さらに NaCl 溶液のコアへの浸透にはかなり時間（4 週以降）に膨張が進行する）が必要であること、を良く理解しておくべきである。高炉セメント（BB）やフライアッシュセメント（FB）の場合には溶液が完全に内部まで浸透するのに時間がかかるので、当然、判定基準値もこのことを考慮して決定することになる。国土交通省の直轄道路などでは、昭和 50 年代後半より下部工（橋台や橋脚）及び基礎工（フーチング）などには高炉セメント（BB）が積極的に使用されてきている。また、この 10 年ほど、北陸地方ではフライアッシュコンクリートが地方道や北陸新幹線などの新設工事にて使用されてきている。このことはコアの試験開始時の事前調査にて十分に把握しておくべきである。

注 4 例えば、富山県内の T 橋梁の PC 上部工では、ASR がごく軽微であるにも関わらず、カナダ法で試験したコアは大きな膨張率を示している。すなわち、構造物の ASR の発生状況とコアの試験結果が一致しなかった。この理由は、PC 配合（水セメント比 35%程度）ではコンクリート内が自己乾燥状態で、ASR が水分不足により抑制されていたが、カナダ法の試験時に NaOH 溶液に晒されることで、新たな ASR が未反応の骨材に発生したことによるものである。このような PC の上部工では使用・環境条件が大きく変わらなければ、ASR が途中からさらに進行することはないので、「補修などの対策が今後とも必要ない」と判断できる。

（3）コンクリートの膨張率の評価をどうするのか

カナダ法においてコアが膨張するメカニズムは、1N・NaOH 溶液がコンクリートの浸透し、未反応の岩石中の反応性珪物と 1N・NaOH 溶液が接触し、骨材に新たな ASR ゲルが生成されることによるものである。コンクリートの ASR による膨張率（進展期及び加速期）はほぼ ASR ゲルの生成量に比例することが知られている。確かに、ASR ゲルの化学組成 ($\text{Na}_2(\text{K}_2\text{O})-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) も膨張率に大きく関与する。ASR ゲルが骨材中からセメントペーストのひび割れへと移動する過程（加速期及び劣化期）で、ASR ゲル中の CaO 分が多くなると、ASR ゲルの膨張性や流動性が大きく低下することが知られている。これが ASR の収束時期（非膨張性）と判断される。近年、SEM-EDS により、骨材からセメントペーストに至る、ASR ゲルの化学組成の変化を調べて、ASR の劣化過程や収束時期を評価することが実施されている。しかし、骨材周囲のごく微視的な ASR ゲルの分析結果から、コンクリート全体の劣化過程をどこまで正確に推定できるかは疑問であり、さらなる検討が必要である。このような分析の際により重要なことは、未反応の岩石がどの程度コンクリート中に残存しているかの判定であり、コアのカナダ法は、基本的に、骨材の ASTM 試験と同じ、厳しい反応条件において、「残存する岩石の ASR の反応性を調べていることに他ならない」と理解すべきである。

a) 構造物からのコアの採取位置と使用・環境条件の把握が必要である

例えば、同一の橋台や橋脚からコアを採取した場合にも、雨がかりや日射条件の関係で ASR が進行している箇所（劣化大）とほとんど進行していない箇所（劣化小）とが存在する。さらに、北陸自動車道などでは凍結防止剤の散布状況（桁端部やジョイント、中分など）も影響している。この場合、カナダ法で試験すると前者（劣化大）よりも後者（劣化小）のコアの膨張率がより大きくなる傾向がある。すでに指摘したように、これはコンクリートの ASR の反応率（反応性岩石の残存率）の相違によるものである。橋台や橋脚、カルバートボックスなどの調査ではコアの採取位置の使用・環境条件を明確に記載しておくことが重要になる。橋台や橋脚では、その中央部の地上 1.5 m の高さで、ひび割れなどが無い箇所をコア採取位置に選定している。同様に、同一箇所から採取したコアの膨張率は ASR が進行している場合にはコンクリート内の反応性の岩石は年数とともに次第に減少するので、促進膨張試験で求めたコアの膨張率も経過年数とともに次第に低下する傾向にある。北陸自動車道の熊野川や神通川、庄川などの代表的な橋梁では 20 年前、10 年前の試験値がすでにあるので、同一の試験法でコアの膨張率の経時的な変化を調べることにより、構造物の ASR 劣化度が評価でき、維持管理（対策の決定）において非常に有意義である。ちなみに、常願寺川や神通川水系の反応性骨材の多くは 40 年または 50 年が経過した段階でも「コンクリートの ASR 膨張は未だに終了（収束）していない」と判断されている。

注 5 橋台の調査では堅壁で抜いたコアとウイングから抜いたコアでは膨張率が大きく相違する。これは背面土砂からの水分供給と日射による乾湿の繰り返しに影響している。当然、北陸自動車道（4 車線）では現地での調査においてジョイントや中分からの飛来塩分（凍結防止剤）の局所的な影響箇所を調べておく必要がある。

（4） それでは、コアの潜在膨張率と構造物の維持管理との関係をどうみるのか

やはり、骨材の ASR 試験（ASTM C1260）とカナダ法による 1 N・NaOH 溶液によるコアの判定基準を整合させておくべきであると考え。これまで、0.10% 以上（21 日材齢）を「残存膨張性有り（無し）」の判定基準に使用していたが、14 日材齢での判定基準に改めるべきであると考え。いたずらに、判定基準日を長くすることは測定費用および手間暇から良くない（無駄である）ことであると考え。東海環状自動車道の骨材調査でも骨材の ASR 判定を ASTM C1260 での 14 日材齢にするようにした。平成 29 年度に実施した北陸自動車道（富山地区）の調査では、300 本ものコアを試験する機会があり、カナダ法でのコアの判定基準の全体像が少し分りかかってきた。

その一方で、この判定基準は今後とも検証を続ける必要がある。他の地域や異なる骨材での検証を通して、カナダ法による評価の実用性と有効性が高まり、北陸地方以外でもカナダ法による評価を普及させることができるものと期待している。北陸自動車道での反応性骨材は川砂・川砂利（陸砂・陸砂利）であるが、能登有料道路で使用された安山岩砕石や東海

地方でのチャートや頁岩の砕石ではカナダ法でのコアの膨張が遅れて発生するので、コアによる判定基準の材齢を遅らせること（例えば、3週または4週での判定）が必要になると考える。

a) 反応性岩石の種類と反応性鉱物

北陸地方の反応性岩種は、急速膨張性岩石（安山岩、流紋岩、流紋岩質溶結凝灰岩など）と遅延膨張性岩石（堆積岩（チャート、頁岩、砂岩）、深成岩（花崗岩、閃緑岩、斑レイ岩））からなるが、北陸自動車道や能登有料道路の ASR は主に安山岩が主要な反応性の岩種となっている。また、反応性鉱物に関しては、安山岩や流紋岩にはオパール（非晶質シリカ）や活性度の高いシリカ鉱物（クリストバライトやトリディマイト）が含有されており、これらの反応性鉱物が存在する場合には少ないアルカリ量（アルカリ雰囲気）でも ASR が発生することが分かっている。

b) 富山県内の地域性の区分

富山県内の北陸自動車道の構造物では、富山地区（常願寺川及び神通川（骨材の潜在的反応性大、構造物劣化度 Severe））→高岡地区（庄川及び小矢部川（骨材の反応性中、構造物の劣化度 Moderate））→新川地区（早月川及び黒部川（境川や）小川などの河川を含む）骨材の反応性小、構造物の劣化 Slight）の順番で、構造物の劣化度を目視により判別することが可能である。東海北陸自動車道の砺波地区（庄川及び小矢部川上流域）は骨材の岩種がまだよく分からないこと（今後、骨材の岩石学的調査が必要である）と、供用後まだ15年から20年程度しか経過していないので、すでに40年以上が経過した北陸自動車道の本線とは単純に比較ができない。その一方で、北陸自動車道では、石川県や福井県、滋賀県内の一部での使用骨材は砂利・砂であるので、同一の判定基準が適用できると考える。

c) コアの潜在膨張性試験結果の新しい判定基準（案）の提案

ASTM C1260（促進モルタルバー法）の基準値との整合性を考慮して、浸漬材齢14日（2週）でコアの潜在膨張性およびASRの可能性を評価する判定基準（案）を提案すると、以下のようなになる。この判定基準（案）は構造物の対策と対応させながら今後ともさらに検証を続けたいと考える。少なくとも、単純に、0.10%以上（3週）をコアの「残存膨張性の有り（無し）」の基準とする従来のものよりは根拠が明白である。

コアのカナダ法による判定基準（案）注6

- a. **0.10%未満**（反応性岩石がもともと少ないまたは無い、さらに**0.05%未満**は構造物の現在及び将来の維持管理について何もASRによる問題が無い）→砺波地区及び庄川の一部地区の骨材が該当する
- b. **0.10%以上0.20%未満**（反応性岩石を含有するが、全体的には遅延膨張性骨材の膨張挙

動を示す（隠微晶質石英または微晶質石英）、ASR はほぼ収束しており、ASR 劣化も軽微である）→現時点で顕著な ASR 劣化が発生していない構造物は経過観察（定期観察）のみで十分である。

- c. **0.20%以上**（反応性岩石を多く含有しており、すでに ASR が進行している。急速膨張性骨材の膨張挙動を示す。水回りの措置や大きなひび割れに着目した補修と補修後の経過観察が必要である。この際に補修後にひび割れの増加や塗膜の損傷がないことをまず確認する。特に、**0.40%以上**は常願寺川や神通川からの反応性の高い安山岩が含まれており、構造物の ASR 劣化度が深刻で、コンクリートの膨張も継続している。このような状況では、基礎構造物（フーチング）や橋脚架け違い部、橋台の隅角部などに鉄筋破断を伴う大きな損傷やコンクリートの脆弱化が発生している可能性が高い。架け替えや部分的打ち替えなどの根本的な対策を前提とし、現地の状況により緊急的な措置（供用制限）の検討が必要になる。富山県内の M 橋梁および S 橋梁の橋脚張り出し部でのせん断補強筋の破断や K 橋脚のケーソンの破壊などの深刻な ASR 事例がこの事例に該当すると考える。

以上

注 6 関連する文献

- 1) 河尻留奈 ほか：コンクリート構造物から採取したコアのアルカリシリカ反応性と潜在膨張性の評価に関する研究、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、第 21 巻、pp. 520-525、2021
- 2) 本合弘樹 ほか：コンクリート構造物から採取したコアによるアルカリシリカ反応性の岩石学的評価、セメント・コンクリート論文集、No. 75, pp. 255-262, 2022
- 3) 河尻留奈 ほか：高速道路コンクリート床版の塩害とアルカリシリカによる複合的劣化機構の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol. 44, No. 1, pp. 622-627, 2022
- 4) 可計皓規 ほか：富山県内の高速道路橋から採取したコアによるアルカリシリカ反応性と潜在膨張性の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol. 76, pp. 580-585, 2023
- 5) 河尻留奈 ほか：北陸山間地域における道路橋 RC 床版の複合劣化の実態調査と対策の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol. 76, pp. 640-645, 2023