

# 論文 石川県におけるトンネルの ASR 劣化状況と対策に関する実態調査

麻田 正弘<sup>\*1</sup>・鳥居 和之<sup>\*2</sup>

**要旨：**トンネルの老朽化や経年劣化が原因となり覆工コンクリート片のはく離・はく落が生じると、第三者被害を引き起こすことになるため、トンネルの維持管理はきわめて重要である。そこで、石川県内における道路トンネルについて、アルカリシリカ反応（以下、ASR）による劣化に着目した外観目視による調査を実施した。その結果、建設年代や施工方法と ASR 劣化の関係、反応性骨材の地域分布と ASR 劣化トンネルの分布、トンネルの ASR 劣化部位の特徴、ASR 補修対策の実態などが明らかになった。

**キーワード：**ASR, 経年劣化, トンネル, 反応性骨材, 補修対策, 覆工コンクリート

## 1. はじめに

北陸地方は安山岩や流紋岩などの火山岩系の反応性骨材が広く分布しており、ASR で劣化した構造物が数多く確認されている<sup>1)</sup>。近年、石川、富山、福井の各県では、橋脚や橋台の下部構造に ASR 劣化が生じた橋梁の分布状況が取りまとめられている<sup>2),3),4)</sup>。このようなデータマップは劣化構造物を維持管理していく際に非常に有効である。一方、橋梁と並ぶ主要な道路構造物としてトンネルが挙げられる。全国のトンネルと橋梁の箇所数、および延長の割合を示すと図-1 のようになる。トンネルの箇所数は道路構造物数のうちわずか 6% であるが、その延長は 28% を占めており、道路構造物としてトンネルの重要性がうかがえる。さらに、老朽化や経年劣化によりトンネルの覆工コンクリート片のはく離・はく落が生じた場合には、第三者被害を引き起こす可能性がある。また、ASR が発生したコンクリートの付着強度は拘束筋

がない場合に低下するとの指摘もあり<sup>6)</sup>、無筋構造の覆工コンクリートに ASR が生じた場合、覆工コンクリートの内面にアンカーボルトで設置されている換気施設や照明器具のボルトの引抜き耐力の低下が懸念される。従って、トンネルの維持管理はきわめて重要と言える。そこで、ASR が発生したトンネルの実態を把握するために、石川県内の道路トンネルの 120 箇所において外観目視による ASR の劣化状況に関する実態調査を実施した。

本研究の目的は、石川県内における ASR が発生したトンネルの分布状況と ASR の劣化程度を把握し、反応性骨材の地域分布との関連、トンネル劣化部位の特徴および対策の実態などを明らかにすることにより、ASR が発生したトンネルを維持管理する際の基本的な考え方を呈示している。

## 2. 石川県内のトンネルの外観目視による調査

### 2.1 外観目視の調査方法

トンネルに発生する劣化損傷の原因は、周辺地山の外力の作用によるものと覆工コンクリートの材料劣化によるものに分類される<sup>7)</sup>。いずれの劣化損傷も覆工コンクリートのひび割れやはく離・はく落という形態で表面化する。ASR が発生したトンネルの外観目視調査を行うにあたって、外観目視観察の項目を表-1 のように定め、ASR による劣化とそれ以外の損傷を区分することとした。まず、ひび割れおよびコンクリートの表面状態に着目し、それぞれ 1 項目以上該当するものを選定したう

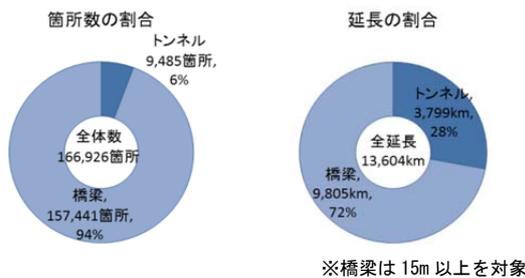


図-1 全国のトンネルと橋梁の箇所数および延長の割合<sup>5)</sup>

表-1 外観目視調査による ASR の判定項目

ひび割れに着目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 亀甲状あるいは網目状にひび割れがある。</li> <li>・ 鉄筋の拘束方向に沿った一方向に卓越したひび割れがある。</li> <li>・ 無筋構造で水平方向に延びるひび割れがある。</li> <li>・ 日射および降雨の影響により、乾湿の繰り返しを受ける箇所にひび割れが発生している。</li> </ul>
表面状態に着目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ひび割れから白色の析出物が見られる。</li> <li>・ ひび割れからアルカリシリカゲルが滲出し、コンクリート表面が局部的に水に濡れているような色をしている。</li> <li>・ コンクリート表面全体が茶褐色に変色している。</li> </ul>

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程 環境科学専攻 (正会員)

\*2 金沢大学大学院 理工研究域 環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)



ASRの亀甲状ひび割れ コールドジョイントのひび割れ  
写真-1 ひび割れの発生原因の一例

で、総合的に ASR が発生したトンネルの判定を行った。外観目視調査におけるひび割れ原因の一例として、写真-1 に ASR による亀甲状のひび割れとコールドジョイントによるひび割れの違いを例示した。外観目視調査ではこのような点に留意して ASR が発生したトンネルの判定を行った。

## 2.2 外観目視調査の結果

### (1) 地域ごとのトンネル数と ASR の発生状況

石川県は行政上の区分から、奥能登地域、中能登地域、および加賀地域に分けられる。地域ごとのトンネル数を図-2 に示す。図-3 には石川県内で ASR が発生したトンネル数を示している。ASR が発生したトンネルの割合は 29% となり、約 3 割のトンネルで ASR が発生していることになる。

### (2) トンネルの施工方法と ASR の発生状況

トンネル施工方法による区分、すなわち在来工法か NATM かの施工方法別に、ASR が発生したトンネル数およびその割合を図-4 に示している。これらの図によると、在来工法では全体の 46%、すなわち 5 割近くのトンネルで ASR が発生していることが理解できる。

### (3) トンネルの建設年と ASR の発生状況

トンネルの建設年を 10 年ごとに区切り、施工方法別

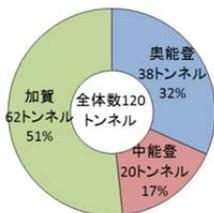


図-2 石川県の地域ごとのトンネル数



図-3 ASR が発生したトンネル数

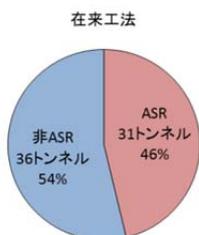


図-4 施工方法別の ASR が発生したトンネルの割合

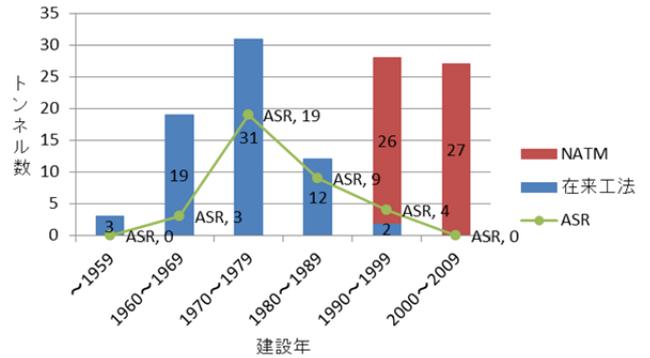
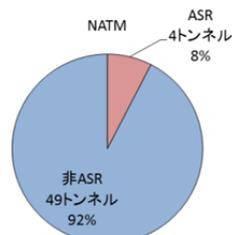


図-5 建設年、施工方法別のトンネル数、および建設年別の ASR が発生したトンネル数

のトンネル数を図-5 に表した。この図には ASR が発生したトンネル数も記載している。これより、以下の点が指摘できる。

1) 1970 年 (S45 年) ～1989 年 (H1 年) の 20 年間に建設されたトンネルでは、65% (28 箇所/全 43 箇所) のトンネルで ASR が発生している。これは、ASR 劣化トンネルを目視判断する際に、建設年代が 1 つの指標となることを示している。

2) 1990 年 (H2 年) を境にして ASR の発生割合は減少している。これは 1989 年 (H1 年) に制定された JIS A 5308 の ASR 抑制対策<sup>8)</sup>が効果をあげていると考えられる。

3) 1990 年 (H2 年) を境にしてトンネルの施工方法が在来工法から NATM へ移行している。これは、平成元年に技術基準<sup>9)</sup>が改訂され、NATM が標準工法になったことによるものと考えられる。ASR の発生割合が減少しているのは、施工方法が NATM への移行したことも 1 つの理由として挙げられる。NATM は覆工コンクリートと吹付けコンクリートの間に防水シート(0.8mm)が設けられ、覆工コンクリートへの地山からの湧水がなくなり、ASR を促進させる水分の供給が抑えられたことによると考えられる。一方、吹付けコンクリートはトンネル完成後、直接目視できないが、急結剤に含まれる多量のアルカリや、地山からの十分な水の供給で、吹付けコンクリートに ASR の発生が懸念されてきた。しかし、吹付けコンクリートの ASR 発生の事例は十分に検証されていない。

4) 1990 年 (H2 年) 以降、NATM で施工された 4 つのトンネルで ASR が発生している。今後、ASR 抑制対策効果の検証が必要であることを示唆している。

## 3. ASR が発生したトンネルの地域的分布状況とコンクリート用骨材の産地および需要・供給状況

### 3.1 ASR 劣化トンネルの地域的分布状況

石川県における ASR が発生したトンネルの地域的分布を図-6 に示す。外観目視調査を実施した 120 箇所のトンネル位置を ASR の発生の有無、施工方法別に区分し

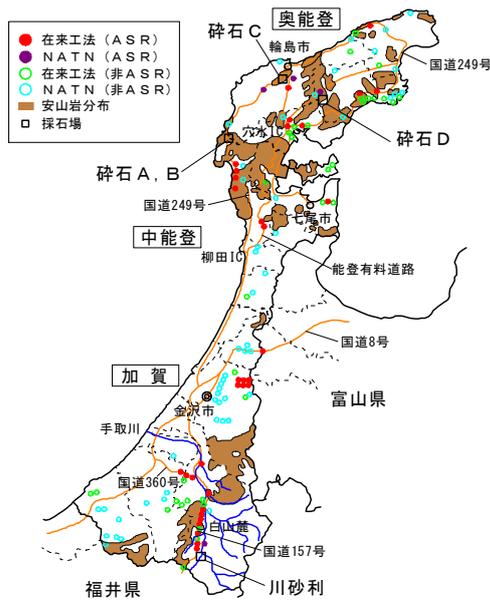


図-6 ASRが発生したトンネルの地域的分布状況

プロットしている。また、石川県の代表的な反応性骨材である安山岩の岩体分布を記載している。安山岩の岩体は、能登半島の北部に帯状に分布しているものと白山麓に分布しているものがある。この図よりASRが発生したトンネルは、安山岩の岩体とほぼ重なり合うように分布していることが理解できる。

ASR劣化トンネルの分布状況について、奥能登地域では能登半島北部を外周する国道249号や能登半島を横断する県道・市道などのトンネルにASRが発生している。中能登地域では、国道249号や七尾市周辺のトンネルにASRが発生している。ASR劣化橋梁が多く存在する能登有料道路<sup>10)</sup>(柳田ICから穴水IC)のトンネルにもASRが発生している。加賀地域では、金沢市近郊の石川・富山県境付近の国道や高速道路、および白山麓に向かう国道157号や白山市から小松市へ向かう国道360号のトンネルにASRが発生している。

### 3.2 コンクリート用骨材の産地と需要・供給状況

奥能登地域および中能登地域では、1970年(S45年)頃までは建設工事が少なく、その地域の中小河川から砂利、砂を洗浄してコンクリート用骨材に使用し、現地でコンクリートを製造していた。このため、1970年より以前のトンネルでASRを発生させているものは少ない。その後、1970年以降から国道249号、国道159号や能登有料道路などで、大規模な建設工事が相次いで始まり、コンクリートの需要が高まるとともに、生コン工場でのコンクリートの製造および出荷が始まった。一方、能登地域で生コンの製造とほぼ同時に能登の安山岩砕石が使用され始めた。安山岩砕石に関しては、旧門前町産、輪島市産および旧能都町産が代表的な採石場となっている。七尾市周辺では富山県の新湊港から海上輸送した庄川産

の川砂、川砂利と能登産の安山岩砕石と混合して使用されてきた。

一方、加賀地域では、手取川扇状地(川北町、旧美川町)の陸砂利および陸砂をコンクリート用骨材として使用してきている。これらの骨材はASRの劣化事例は報告されていない。これに対して手取川上流部(手取川ダムより上流)では、支流の川砂利および川砂に山崩れや土石流の発生により、火山岩系の岩石が紛れ込んでいる。これらには、安山岩や流紋岩とともに溶結凝灰岩が含まれており、この地域の骨材の岩石学的な特徴と言える。また、金沢市近郊でASRが発生したトンネルには富山県庄川産あるいは神通川産の川砂利および川砂が使用されていると推察される。

## 4. ASRが発生したトンネルの実態調査

### 4.1 ASRが発生したトンネルのひび割れの特徴

ASRが発生したトンネルの実態調査の一例を写真-2に示す。ASRによる劣化部位は覆工と坑門に分けられる。実態調査の結果より、写真(a)に示すような覆工の劣化は、坑口付近のみであることが確認された(図-7(a))。これは坑口付近の覆工は降雨や日射の影響を直接受けるのに対して、トンネル内部ではコンクリート表面の相対湿度が坑口に比べて低く<sup>11)</sup>、また温度変化も小さいために、ASRが発生しにくいと推察される。それに対して、坑門の劣化は写真(c), (d), (f)に見られる表面の亀甲状のひび割れが特徴的であるが、写真(b)のような坑門天端に背割れを生じている場合もある(図-7(b))。背割れの原因はASRによる膨張を拘束するスターラップやかぶせ筋が配筋されていないためである。背割れはコンクリート片はく落の危険性が高く、維持管理においては建設図書による配筋の確認や坑門背面まで回り込んだ外観目視を行うなど十分に留意すべきである。

### 4.2 使用骨材のアルカリシリカ反応性

写真-2に示した、ASRが発生したトンネルに使用されたものと同じ産地の骨材について、そのアルカリシリカ反応性を調べた試験結果を表-2に示す。さらに、化学法(JIS A 1145)およびモルタルバー法(JIS A 1146)の判定結果を図-8および図-9に示す。化学法の判定結果より能登産の安山岩砕石A~Dはすべて潜在的有害(ASTM C 289)の領域にプロットされ、ペシマム混合率を有することが確認されている<sup>1)</sup>。また、手取川産の川砂利は化学法の判定ライン付近に位置しているが、モルタルバー法では「無害でない」と判定された。手取川産の骨材を使用したトンネルEではASRが発生しており、手取川産の川砂利の一部にはモルタルバー法でASR反応性を判定する必要があることがわかる。



写真-2 ASRが発生したトンネルの実態調査の事例

※ ( ) 内は骨材産地

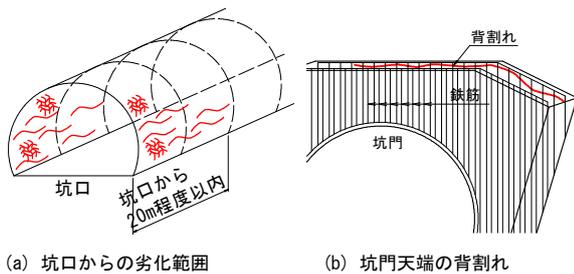


図-7 ASRが発生したトンネルの劣化の特徴

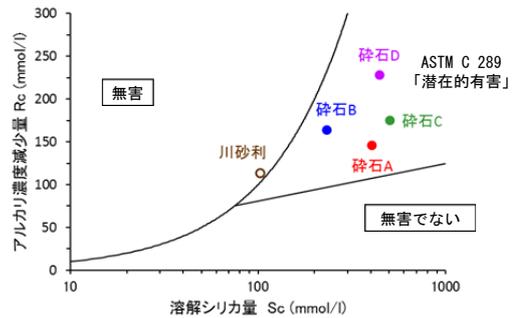


図-8 化学法 (JIS A 1145) による判定結果

### 4.3 在来工法でASRが発生したトンネルのアルカリ量

在来工法における覆工コンクリートの単位セメント量は施工性を得るために $270\text{kg/m}^3$ を確保していた<sup>12)</sup>。建設当時のセメントの等価アルカリ量は約 $0.8\%$ であることが調べられており<sup>13)</sup>、これよりコンクリート中のアルカリ量は約 $2.2\text{kg/m}^3$ になる。すなわち、在来工法でASRが発生したトンネルは、現行のJIS A 5308のASR抑制対策としてのアルカリ総量規制値 $3\text{kg/m}^3$ を下回っていたことになる。しかし、ASRが発生したのは、海岸線に位置するトンネルでは外部からアルカリ(NaCl)が供給され

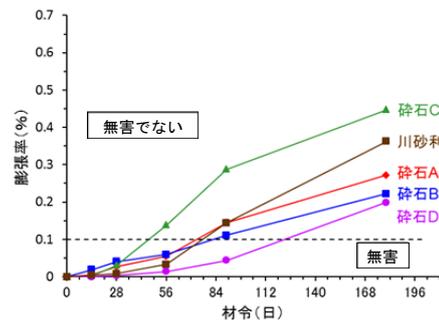


図-9 モルタルバー法 (JIS A 1146) の膨張挙動給され

表-2 骨材のアルカリシリカ反応性試験

地域	骨材の産地	骨材の種類	対象トンネル	ASR 発生 の有無	化学法 (JIS A 1145)				モルタルバー法 (JIS A 1146)	
					Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	Sc/Rc	判定	膨張量 (%)	判定
能登	旧門前町	安山岩砕石 A	トンネル A	有り	405	146	2.77	無害でない	0.272	無害でない
	"	安山岩砕石 B	トンネル B	有り	233	164	1.42	無害でない	0.222	無害でない
	輪島市	安山岩砕石 C	トンネル C	有り	505	175	2.89	無害でない	0.447	無害でない
	旧能都町	安山岩砕石 D	トンネル D	有り	444	228	1.95	無害でない	0.199	無害でない
加賀	手取川産	川砂利	トンネル E	有り	102	114	0.89	無害	0.362	無害でない



(g) 覆工コンクリート（旧門前町産） (h) 竹割り式坑門（輪島市産） (i) 覆工コンクリート（旧能都町産） (j) 面壁式坑門（手取川産）

写真-3 ASRが発生したNATMの実態調査事例

※（ ）内は骨材産地

ること、また骨材から多量のアルカリが溶出することなどが原因と考えられる。ASR抑制対策におけるアルカリ総量規制値に対して、このような点を考慮すべきである。

#### 4.4 NATMの覆工コンクリートに発生したASRの特徴

1990年以降、NATMによるトンネル施工が標準化してからASRの発生は少なくなった。これは在来工法からNATMへの施工法の変化とともに、1989年のASR抑制対策が効果を上げていると考えられる。しかし、写真-3に示すように実態調査のなかでNATMにより施工されたトンネルのうち、4つのトンネルでASRによる劣化が確認された。これら4つのトンネルに使用された骨材は表-2と同じ産地のものであるため、ASR抑制対策については、アルカリ総量規制値(3kg/m<sup>3</sup>)、または化学法による「無害」の判定によるものであった。しかし、能登産の安山岩砕石からは多量のアルカリがコンクリート中に溶出すること<sup>14)</sup>、ペシマム混合率の問題があることなど、現行のASR抑制対策によるアルカリ総量規制値(3kg/m<sup>3</sup>)や「無害」と判定された骨材の使用に限界があることを示している。このような反応性の高い骨材やペシマム混合率に注意が必要な骨材に対するASR抑制

対策には混合セメント（フライアッシュ、高炉スラグ微粉末）の使用が適切と考えている。

#### 5. 補修対策の実態調査

##### 5.1 ASR補修対策の実施例

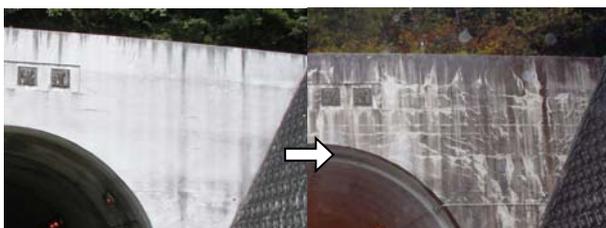
ASRで劣化したトンネルの補修事例は坑門工以外では少ない。これは、覆工コンクリートは圧縮部材であり、ひび割れが直ちにトンネルを不安定にするものではないこと、覆工コンクリートの力学的挙動が明確でなく<sup>9)</sup>、耐荷性能の評価ができないこと、などが理由として考えられる。本研究では、実態調査で明らかになった坑門工のASR補修対策の実施例を示したうえで、ASRが発生したトンネルに対する補修の基本的な考え方を提案する。まず、写真-4に4つの補修事例を示す。写真(k)はASRで劣化した面壁式の坑門工全体を打換えた事例である。再劣化はなく確実性の高い方法である。写真(l)は竹割り式の坑門工の側壁に、はく落防止ネット工を設けた事例である。第三者被害への対策として有効である。写真(m)は、面壁式の坑門工全面をブラストした後、防水目的でポリマーセメントモルタルを塗布した事例である。補修



施工前 → 打ち換え後  
(k) 坑門の打換え工



施工前 → ネット設置後  
(l) はく落防止ネット工



補修直後 → 再劣化  
(m) ポリマーセメントモルタル塗布工



再劣化（西面） → 再劣化（東面）  
(n) 表面防水ライニング工（ガラス繊維接着工併用）

写真-4 ASR補修対策の実態調査事例

後、8年経過した時点で再劣化が見られた。坑門工を含めトンネルを構成する部材はすべて片面を地中に接しているため、ASR補修対策として水分の供給を絶つための表面被覆工はコンクリート内部を乾燥させることにはならない。また、このような補修を行うことで外観から経過観察が困難になる場合がある。写真(n)は、面壁式の坑門工に表面防水ライニング工（ガラス繊維シート接着工併用）を施したが、5年経過した時点から再劣化が見られた事例である。

## 5.2 補修対策の提案

実態調査で明らかになった坑門工のASR劣化に対する補修事例から判断して、以下のような補修対策および維持管理方法を提案する。

- ・維持管理上、まず第三者被害を防止するはく落防止対策を優先させる。
- ・水の供給を絶つために実施した表面被覆工や防水工は再劣化するケースが多くあり、その後の経過観察も困難になることから実施すべきでない。
- ・坑門工などコンクリートの劣化が著しい場合には、打換え工の選択がもっとも有利となる。

## 6. まとめ

本研究では、石川県内の道路トンネル120箇所の外観目視調査を実施し、ASRが発生したトンネルの劣化状況と対策の実態を明らかにすることができた。

本研究で得られた主要な結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 石川県内全体でASRが発生したトンネルの割合は29%であった。この数値は、在来工法のみを対象にすれば46%であり、1970年～1989年の20年間に建設されたトンネルを対象にすれば65%であった。
- (2) ASRが発生したトンネルに使用された反応性骨材は、奥能登地域が安山岩砕石、中能登地域が安山岩砕石と一部富山県産の川砂、川砂利、加賀地域が手取川水系の川砂利、川砂と金沢市内の近郊が富山県の神通川産の川砂利および川砂であった。
- (3) ASRが発生したトンネルの劣化範囲は、降雨や日射、温度変化などの影響から坑門と坑口付近であることが確認された。
- (4) 現行のJIS A 5308のASR抑制対策後のNATMで施工されたトンネルの覆工コンクリートにもASRによる劣化が確認された。
- (5) ASRで劣化したトンネルの補修対策として実施した表面被覆工は再劣化するケースがほとんどであった。とくに、劣化が著しい坑門コンクリートの全面打換え工法は、長期的な維持管理上において有利であった。

謝辞：トンネルの実態調査は、真柄建設株式会社の方々のご協力を得て実施しました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 鳥居和之, 野村昌弘, 本田貴子: 北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.185-197, 2004.8
- 2) 鳥居和之, 大代武志, 山戸博晃, 平野貴宣: 石川県の反応性骨材とASR劣化構造物のデータベース化, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1017-1022, 2008.7
- 3) 大代武志, 平野貴宣, 鳥居和之: 富山県の反応性骨材とASR劣化橋梁の特徴, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.1, pp.1251-1256, 2007.7
- 4) 丑屋智志, 出口一也, 野村昌弘, 鳥居和之: 福井県の骨材のアルカリシリカ反応性とASR劣化橋梁に関する調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1007-1012, 2011.7
- 5) 国土交通省道路局監修: 道路統計年報 2011
- 6) 社団法人土木学会: アルカリ骨材反応対策小委員会報告, pp.II-88, 2005.8
- 7) 社団法人日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧, pp.13-19, 1993.11
- 8) 日本工業規格: JIS A 5308 付属書2 アルカリシリカ反応抑制対策の方法, 1989.12
- 9) 社団法人日本道路協会: 道路トンネル技術基準(構造編), pp.91-124, 1989.6
- 10) 湊俊彦, 鳥居和之: 能登有料道路のASR劣化橋梁と反応性骨材の岩石学的特徴, 材料, Vol.59, No.10, pp.781-786, Oct, 2010
- 11) 久保善司, 平俊勝, 野村昌弘, 鳥居和之: ASRにより損傷したコンクリート構造物の内部湿度分布について, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1635-1640, 2002.6
- 12) 社団法人日本道路協会: 道路トンネル便覧, pp.115-117, 1975.1
- 13) 野村昌弘, 西谷直人, 清水隆司, 鳥居和之: 実構造物における骨材からのアルカリ溶出の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.791-796, 2006.7
- 14) 山戸博晃, 南 善導, 大代武志, 鳥居和之: 石川県産骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1257-1262, 2007.7