

# 論文 コンクリート基礎に使用された反応性骨材の岩石学的評価とコンクリートの劣化度に関する検討

野村 昌弘\*1・津田 誠\*2・平野 誠志\*3・鳥居 和之\*4

**要旨:** 橋梁や建物などの土中部・水中部におけるコンクリート基礎について、アルカリシリカ反応の実態が十分に把握されていない。本論文は、北陸地方の道路橋ケーソン基礎や建物基礎、ならびに対応する気中部の柱部材などを対象にコアを多数採取して、アルカリシリカ反応の現状を岩石学的に比較検討した。また、コアのアルカリ溶液浸漬法を用い、コンクリートの劣化度について検証した。その結果、土中部のコンクリート基礎は、気中部の柱よりアルカリシリカ反応が進行している実態が確認できた。

**キーワード:** アルカリシリカ反応, コンクリート基礎, ケーソン, 岩石学的評価, コアのアルカリ溶液浸漬法

## 1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下 ASR）による劣化は、道路橋 橋台・橋脚・床版<sup>1,2)</sup>、道路トンネル<sup>3)</sup>、PC 構造物<sup>4)</sup>、港湾空港施設<sup>5)</sup>、電力施設<sup>6)</sup>などの多岐にわたり発生が報告されている。ASR による劣化はコンクリート表面に発生したひび割れにより判断できる場合もあるが、目視が困難な土中部や水中部における基礎の ASR の実態は十分に明らかとなっていない。

筆者らは RC および SRC 造の建物（2～3 階建て）に発生した ASR の特徴について精力的に調査を実施してきた経緯がある。建物は一般に保護モルタルやタイルが張付けられており、内部コンクリートが露出しているケースは少なく、目視による ASR の発生の有無は難しい。また、保護モルタルにひび割れが発生していてもセメントの収縮による劣化と判断してしまう可能性がある。同様に、土中部の基礎についても目視することはできない。調査を行ってきた建物の基礎は、土被り 0m～2m 程度、平面的なサイズは 1m～2m、厚さ 0.5m～1m の独立フーチングであり、柱ごとに設置されている。また、柱からの荷重により引張力が作用するフーチングの下縁側には、鉄筋が配置されているものの上縁側に鉄筋が配置されていないものが多い。さらに、上縁側に鉄筋が配置されていてもφ9 の鉄筋が 200mm～300mm ピッチ程度のものである。

一方、道路橋・基礎ケーソンの ASR について、大代らは採取したコアに適用した飽和 NaCl 溶液浸漬法の結果より、常時水分の影響を受ける部位では、ASR の進行が他の部位に比較して速いことを指摘している<sup>7)</sup>。それに対して、建物基礎は土被りが浅く常時水分環境にあるわけではない。同時に気中の部位とは異なり気温の変化を

あまり受けないことから ASR の進行が遅いことも想定される。

そこで本論文では、北陸地方における水の環境の異なる 2 つの道路橋・橋脚の各部位（基礎ケーソン、梁および柱）、ならびに地盤沈下により露出した建物の部位（基礎、基礎と同一箇所の柱部材）からコアを多数採取してコンクリートの使用部材の岩石学的評価を行った。また、それぞれの部材からのコアに適用したアルカリ溶液浸漬法の結果に基づいて、コンクリートの ASR 劣化度について考察した。

## 2. 試験方法

### 2.1 コンクリートの粗骨材の岩種面積率の算出

粗骨材の岩種面積率の算出は、コア側面に現れた直径 5mm 以上の骨材を対象に岩種を目視にて判定し、岩種ごとの面積を画像処理ソフトにより算出して、その面積率を求めた。

### 2.2 アルカリ量分析

コアの深さ 200mm 程度のコンクリート片を 300 μm 未満に粉砕し、10g を 40℃の蒸留水 100ml に混合した。30 分攪拌した後、ろ過液のアルカリ濃度(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)を原子吸光度法により測定し、(Na<sub>2</sub>O+0.658K<sub>2</sub>O) eq. を算出した。

### 2.3 ASR 劣化度の岩石学的評価

ASR 劣化度の岩石学的評価は、採取したコアを所定の深さにて目視、コアに蛍光塗料含有エポキシ樹脂を含浸させて作製した断片試料（縦 40mm×横 50mm×厚さ 10mm 程度）および薄片試料（縦 40mm×横 25mm×厚さ 20 μm 程度）にて実体顕微鏡、蛍光顕微鏡および偏光顕微鏡を用いて判定した。北陸地方に発生している ASR が

\*1 (株)野村昌弘の研究所 博(工) (正会員)

\*2 石川工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 博(工) (正会員)

\*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) (正会員)

\*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 工博 (フェロー会員)

表-1 骨材からの ASR の岩石学的評価基準<sup>9)</sup>

劣化度	位置	ASR の進行状況
i	骨材	反応リムが形成されるがひび割れの発生はなし
ii	セメントペースト	骨材からのゾル・ゲルの滲出
iii	骨材	骨材内のひび割れの形成
iv	セメントペースト	セメントペーストへのゲルで充たされたひび割れの進展
v		セメントペースト中の地図状ひび割れの進展，ならびにひび割れに沿って骨材から離れた気泡内へのゲルの沈殿
vi		ゲルの充たしたひび割れのネットワークの形成

河川産骨材の安山岩の構成率に大きく依存していることに着目し<sup>8)</sup>，安山岩における岩石学的評価基準を Katayama の手法<sup>9)</sup> を参考に表-1 に示す 6 段階で区分した。

### 2.4 コアのアルカリ溶液浸漬法

コアのアルカリ溶液浸漬法は，コア（直径：55mm）を切出し整形した後，ASTM C1260-1994（促進モルタルバー法）に準拠し，温度 80℃ の 1N・NaOH 溶液に浸漬して膨張量（基長 100mm）の変化を測定した。

## 3. 道路橋 A の調査結果

### 3.1 概要

道路橋 A（富山県富山地区）は昭和 44 年（1969 年）に供用した 7 径間 PC 桁橋＋トラス橋であり，1 級河川を横断している。調査対象は逆 T 型壁式の P2 橋脚および P4 橋脚であり，基礎形式はオープンケーソン，コンクリートの設計基準強度は 21N/mm<sup>2</sup> である。P2 橋脚のケーソンは高水敷に位置することから乾湿繰返し（土被り 2m 程度），P4 橋脚は低水敷に位置することから常時水中下であり，異なる水分環境下にあることが想定された。図-1 に P2 橋脚のひび割れ状況およびコア採取位置の概要を示す。P2 橋脚では地上部にて約 30 年前にエポキシ

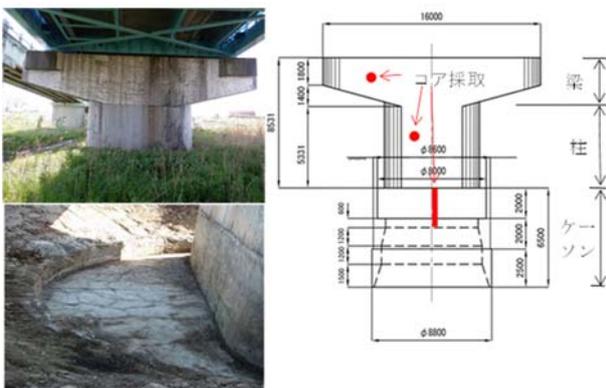


図-1 道路橋 A P2 橋脚のひびわれ発生状況とコア採取位置

樹脂系の表面被覆により補修されているが激しい ASR によるひび割れが発生し，梁部のスターラップ筋の隅角部で破断や内部コンクリートの脆弱化が確認されていた。一方，P4 橋脚では表面被覆による補修は実施されておらず，顕著な ASR によるひび割れはほとんど発生していなかった。コア（直径：55mm，長さ：300mm～2,500mm）は梁および柱の側面から，ケーソン頂版は鉛直方向から採取した。

### 3.2 粗骨材の岩種面積率およびアルカリ量

粗骨材として円磨された最大粗骨材寸法 25mm 程度の数種類の岩種が確認された。粗骨材の面積率の算出およびアルカリ量分析の結果を図-2 に示す。主な岩種は火山岩系岩石の安山岩，流紋岩および溶結凝灰岩が全体の 17%～42%，深成岩・変成岩系の花崗岩，閃緑岩および片麻岩が 53～83%，堆積岩系の砂岩および頁岩が 0～7% を占めた。反応性の岩種の合計（以下，反応性岩種計）は火山岩系岩石と堆積岩の頁岩であり，その面積率は P2 橋脚柱で 42%，P2 橋脚ケーソンで 37%，P4 橋脚柱で 26%，P4 橋脚ケーソンで 23% であった。アルカリ量は P2 橋脚で 2.4～2.7 kg/m<sup>3</sup>，P4 橋脚で 3.2～3.4 kg/m<sup>3</sup> であり，建設時における ASR のポテンシャル（反応性岩種計およびアルカリ量）は橋脚ごとで差異は認められるものの，梁，柱および基礎ではほとんど同一であるものと推定された。

### 3.3 コンクリートの ASR 劣化度の評価

採取したコアは深さ方向の 100mm～300mm 程度で破断する傾向があり，ケーソンの深さ 2m 付近では土砂化するものもあった。目視観察では，安山岩や溶結凝灰岩およびそれらの周囲でひび割れが多数確認された。所定の深さで作製した断片試料および薄片による岩石学的劣化度の判定結果を図-3 に示す。ASR 劣化度の岩石学的評価は，部位および深さごとに変化した。P2 橋脚の梁および柱では深さに関係なく，写真-1（1）に示すように，ASR 劣化度が vi まで進行しているのに対し，乾湿繰返しの環境である土中部の P2 橋脚ケーソンでは，写真-1（2），

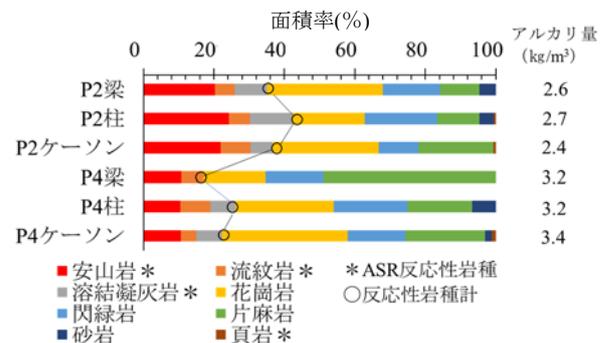


図-2 粗骨材の岩種面積率およびアルカリ量の算出結果（道路橋 A）

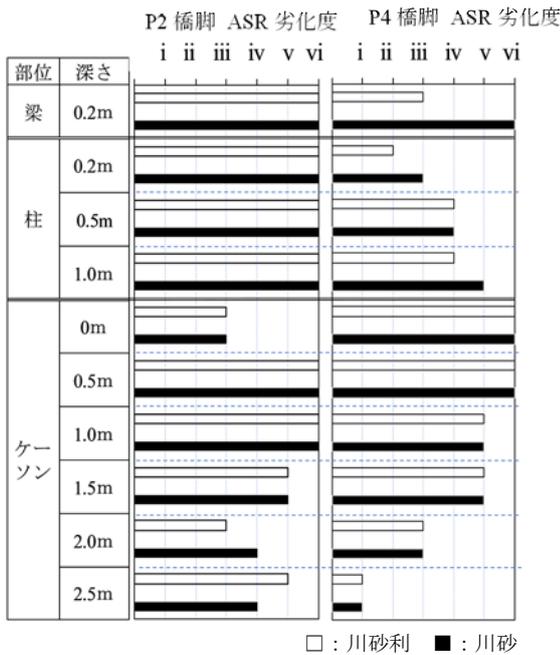


図-3 コンクリートの ASR 劣化度の判定結果

写真-1(3)に示すように、表面部から深さ 1m で ASR 劣化度が最大となり、さらに深部に向うと劣化度が軽微となった。一方、水中に位置する P4 橋脚ケーソンでは、深さ 0m および 0.5m で劣化度が vi となり、深部に向うと劣化度が軽微となった。P2 橋脚ケーソン表面部では乾湿繰返しの環境により、ひび割れが図-1 に示すように大きく開き、水位が上昇した際は深部まで水が浸透し ASR が進行、一方、P4 橋脚ケーソンは常時水中の環境であることから、表面のひび割れが P2 橋脚に比較して発生しておらず、水の浸透が抑制されたことにより深部における ASR の進行が軽微となっていると推定された。これらの深度における劣化度の違いは構造物内部の水の侵入状況に大きく影響されるものと考えられた<sup>10)</sup>。なお、コンクリート骨材は ASR 反応性が高い常願寺川と推測され、安山岩中の主たる反応性鉱物はクリストパライト、トリディマイト、火山ガラスであり、さらに砂にオパール粒子が混入しているのが特徴であった<sup>11)</sup>。

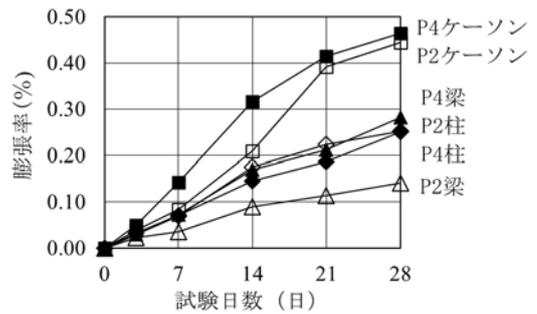


図-4 アルカリ溶液浸漬法の結果 (道路橋 A)

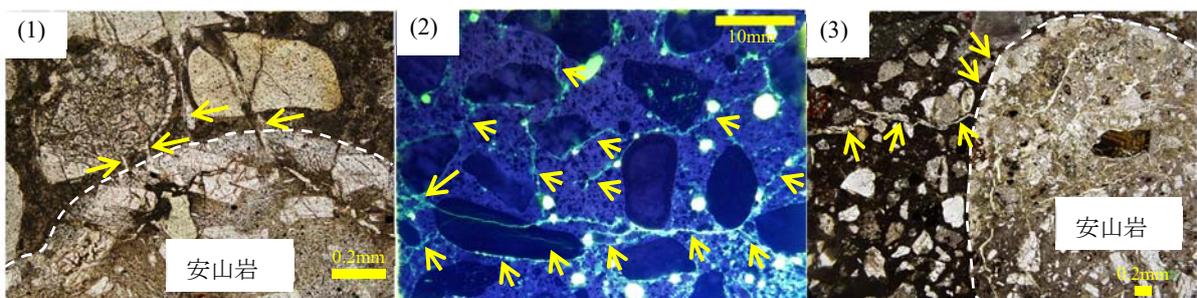
### 3.4 コアのアリカリ溶液浸漬法

コアのアリカリ溶液浸漬法により、ASR による潜在膨張性を検討した。アルカリ溶液浸漬法の結果は、ASR 反応性の岩種が多いほど膨張率が大きくなり<sup>12)</sup>、一方で、時間の経過にともない ASR による膨張が継続すると反応性の岩石が消費されるために膨張率が次第に小さくなる<sup>13)</sup>。したがって、同じ経過時間で反応性の岩種の混入が同じ程度であれば膨張率の相対的な比較が可能であると考えられる。採取したコアの深さ 200mm 程度で実施したアルカリ溶液浸漬法の結果を図-4 に示す。コアの膨張率はほぼ直線的に増加するとともに、気中に位置する梁および柱は、土中部や水中部に位置するケーソンに比較して膨張率が全体に小さく、潜在膨張性が低い傾向を示した。ASR の進行は温度依存性が高く、気中部と土中部・水中部のマクロ的な環境条件に着目すると土中部や水中部は気中部より気温の大きな変動の影響を受けないことが推定され、反応性の岩石の消費が気中部より少なく、コアの膨張率がケーソンの方で大きくなったものと考えられた。ASR の岩石学的評価ではかなり進行しているものの気中部における部位との相対的な比較から今後もケーソンでの ASR による反応が継続する可能性が推定された。

## 4. 建物 B の調査結果

### 4.1 概要

建物 B (富山県高岡地区) は昭和 53 年 (1978 年) に建



(1)P2 橋脚柱深さ 500mm 安山岩砂利からセメントペーストに進展するゲル(↓), (2) P2 橋脚ケーソン深さ 1000mm ひび割れがネットワークを形成(↓), (3) P2 橋脚ケーソン深さ 1000mm 安山岩砂利からセメントペーストに進展するゲル(↓)  
 (1)・(3): 偏光顕微鏡画像 (単ニコール), (2)蛍光顕微鏡画像

写真-1 顕微鏡観察で確認された ASR の進行状況



写真-2 建物BのASRによる劣化状況

写真-2 建物BのASRによる劣化状況

設されたSRC造の体育館であり、コンクリートの設計基準強度は21N/mm<sup>2</sup>、柱には保護モルタル等の被覆はない。また時期は不明であるが1mほど周辺が地盤沈下し、地中梁や基礎が気中部に露出していた。写真-2に示すように、柱には幅0.1~0.3mmのひび割れが縦横の2方向に発達し、基礎でも2方向の割れが認められ、最大割れ幅は10mmに達していた。柱と基礎の構造的概要を図-5に示す。柱には主鉄筋(D22)と100mmピッチで帯筋(D22)が配置され、柱の主筋は基礎内部にて杭基礎へと接合されるものの基礎には鉄筋が配置されていなかった。試験用のコア(直径:55mm、長さ:250mm程度)は、柱にて基礎天端より高さ1m程度から水平方向に、現在気中部となっている基礎では上面から鉛直方向に採取した。

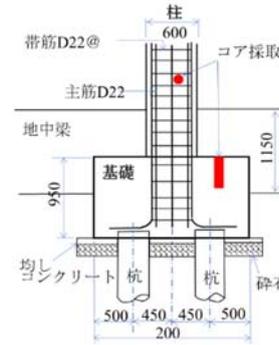


図-5 柱と基礎の接合部の概要(建物B)

#### 4.2 粗骨材の岩種面積率およびアルカリ量

粗骨材として円磨された最大粗骨材寸法25mm程度の数種類の岩種が確認された。岩種面積率の算出結果を図-6に示す。柱と基礎の岩種は火山岩系岩石の安山岩、流紋岩および溶結凝灰岩がそれぞれ49%、40%、深成岩・変成岩系の花崗岩、閃緑岩および片麻岩が41%、47%、堆積岩系の砂岩および頁岩が10%、13%を占めた。道路橋Aに比較して流紋岩や流紋岩質溶結凝灰岩の混入が多かったことから、庄川水系の川砂、川砂利が使用されたものと推定された<sup>11)</sup>。なお、反応性岩種計は柱で54%、基礎で50%であった。アルカリ量は柱で2.4kg/m<sup>3</sup>、基礎で2.3kg/m<sup>3</sup>であり、建設時におけるASRのポテンシ

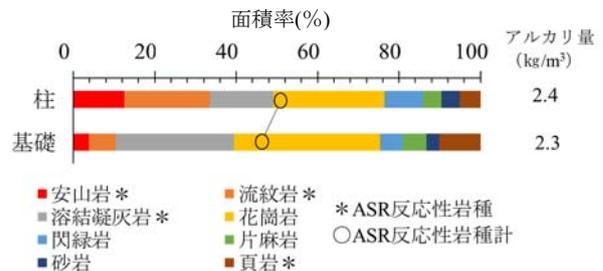


図-6 岩種面積率およびアルカリ量の算出結果

ルは、柱および基礎でほとんど同一であるものと推定された。

#### 4.3 岩石学的劣化度の評価

コアは破断することなく採取することができた。目視観察では、一部の安山岩や溶結凝灰岩でひび割れや砂の周囲にASRゲルの滲出しが確認された。顕著なアルカリシリカ反応を示すのは写真-3に示すように安山岩の砂利や砂であり、主たる反応性鉱物は火山ガラスと隠微晶

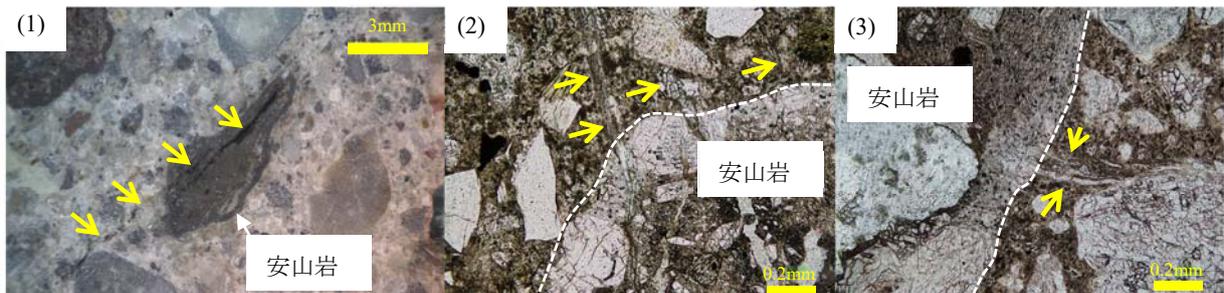


写真-3 顕微鏡観察で確認されたASRの進行状況

写真-3 顕微鏡観察で確認されたASRの進行状況

質石英であった。骨材に発生したひび割れがセメントペーストへと進展しており、岩石学的劣化度はivと判定され、柱と基礎で ASR 劣化度の大きな差は認められなかった。

#### 4.4 コアのアルカリ溶液浸漬法

コアのアルカリ溶液浸漬法の結果を図-7 に示す。膨張率の増加は、試験日数の経過とともに小さくなった。使用された骨材の河川水系が道路橋 A とは異なるものと考えられた。また、基礎の膨張率は柱の半分以下であり、潜在膨張性の傾向も道路橋 A と逆の傾向を示した。

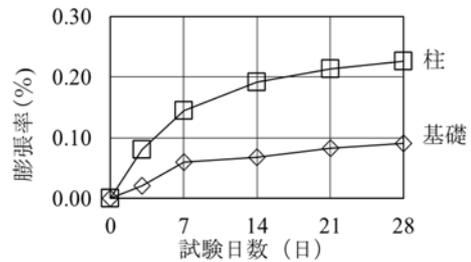


図-7 アルカリ溶液浸漬法の結果 (建物 B)

#### 5. ASR の進行性の検討

建物 B のほか 9 棟の建物 (C~K, 富山県富山地区) にて基礎および柱 (基礎直上) 16 箇所と同様な調査を実施した。対象の建物にすべて保護モルタル (厚さ 10mm~20mm) が施工されており、一部のモルタルにひび割れの発生が認められた。いずれも昭和 61 年(1986 年)のアルカリ総量規制以前に建設されたものであり、建設から調査したまでの経過時間は 38~58 年であった。16 箇所中 10 箇所の基礎でひび割れの発生が認められ、その中で基礎の上縁側に鉄筋 (φ9) が配置されていたのは 3 箇所であり、ほとんどが無筋構造であった。柱のコアは地盤から高さ 1m 程度の箇所より採取した。コアは帯筋の深さで破断するものが多くあった。

コアのアルカリ溶液浸漬法 (試験日数 21 日) における柱/基礎の膨張率の比およびそれぞれの岩石学的劣化度の関係を図-8 に示す。建物では、建物 B を含め 17 箇所中 15 箇所にて柱/基礎が 1 以上なり、基礎の膨張率が柱より小さく、建物 B とほぼ同様な傾向を示した。また、コンクリートの ASR 劣化度は、すべての調査箇所で柱と基礎が同じまたは基礎の方で高くなっているとともに、建物の 17 箇所中 8 箇所でコンクリートの ASR 劣化度が vi まで進行していた。

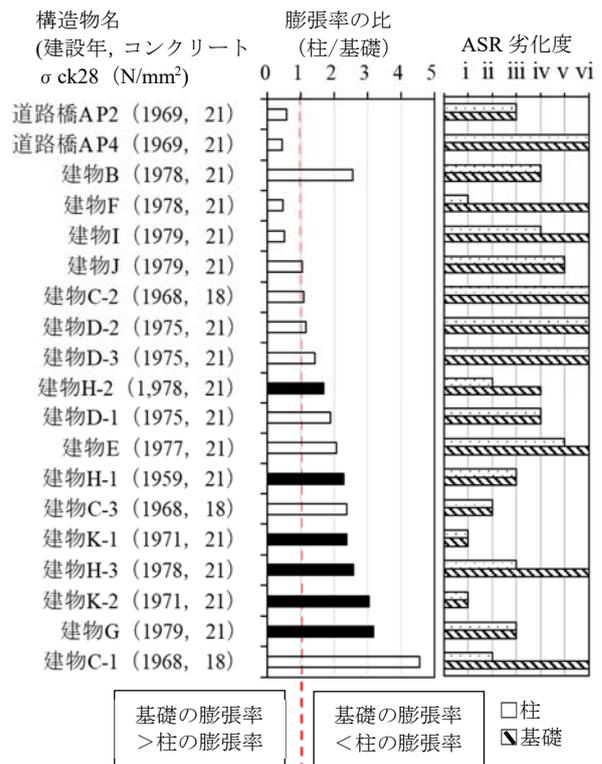
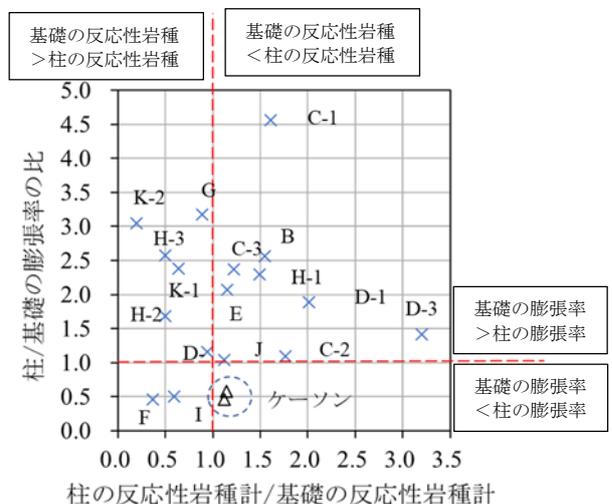


図-8 柱/基礎の膨張率 (試験日数: 21 日) の比およびそれぞれの岩石学的劣化度の関係

図-9 は、反応性岩種計における柱/基礎の比と膨張率 (試験日数 21 日) との比の関係を示したものである。建物において、柱/基礎の膨張率の比が 1 未満であったのは建物 F および I の 2 箇所のみであった。この結果については反応性岩種計の比に関係ないようであった。なお、本調査では細骨材の岩種構成まで算出してない。細骨材の影響を含め原因については本調査内では明確にできなかった。

道路橋 A のような柱やケーソンのコンクリートスランブは 8cm 程度、W/C=55%程度であるのに対して、建物のコンクリートは軟練りであり<sup>14)</sup>、スランブは 15cm 以上、W/C=60%以上と推定される。したがって、建物のコンクリートは空隙が多く、水の浸透が容易であると考えられる。また、柱やケーソンは鉄筋で拘束され ASR によ



る膨張やひび割れの発生が抑制されているものの、建物基礎は版構造となっており鉛直方向の拘束筋が配置されていないのが特徴である。このため、建物基礎は ASR による膨張によって早期にコンクリートにひび割れが発達し、水が深部まで侵入するために、劣化の進行が柱より速いものと考えられた。また、建物では静的な荷重に対しては安定であるが、地震時のような動的荷重が作用した場合、ASR が発生した基礎では十分な耐荷力を期待できないことが推定された。富山県内のように ASR 発生地域では建物基礎の配筋状況を点検時に確認するとともに ASR の実態を把握することが非常に重要と考えられた。

## 6. まとめ

コンクリート基礎の ASR に関する本調査により、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) 道路橋ケーソン基礎の ASR は、表面より深さ 0.5m～1.0m にてコンクリートの ASR 劣化度が最大となるものがあつた。これには河川水の浸透状況が影響していた。このため、コンクリート基礎にて ASR を診断する際、採取コアの深度にも留意する必要があつた。
- 2) 道路橋・橋脚の梁、柱およびケーソンでのコアのアルカリ溶液浸漬法の結果より、ケーソンの潜在膨張性が気中部の柱および梁より大きかつた。反応性岩種の構成率に差がなかつたことから、土中部・水中部のケーソンは梁や柱に比較して気温の変動の影響を受けにくいことから ASR の進行が遅くなつたものと考えられた。
- 3) 富山県内では、建物基礎でもかなり深刻な ASR が発生している実態が確認できた。コンクリートの ASR 劣化度は、すべての調査箇所ですべての柱と基礎の劣化度が同程度または基礎の方でより大きくなり、建物の 17 箇所中 8 箇所ですべてのコンクリートの ASR 劣化度が最大の vi まで進行していた。
- 4) 建物の柱および基礎でのコアのアルカリ溶液浸漬法の結果、基礎の潜在膨張性が気中部の柱より小さくなつた。建物柱は一般に保護モルタル等で被覆され乾燥状態が継続し ASR が抑制されていることや建物基礎は柱に比較して鉄筋拘束が小さく ASR による膨張で発生したひび割れから水が深部に浸透したために、柱より基礎での ASR がより進行したものと考えられた。
- 5) 富山県内などの ASR 発生地域では、建物基礎の配筋状況を点検時にまず確認するとともに、ASR の進行状況を早期に把握することが重要であつた。

## 参考文献

- 1) 野村昌弘ほか：北陸地方における反応性骨材の岩石学的特徴とコアの残存膨張性の評価、コンクリート

工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.953-958, 2011

- 2) 野村昌弘ほか：積雪寒冷地における鋼橋 RC 床版の骨材劣化の特徴、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 18 巻, pp.421-426, 2018
- 3) 麻田正弘ほか：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、コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1465-1470, 2013
- 4) 富山潤ほか：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(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.4, pp.578-595, 2011
- 5) 河村直哉ほか：岩石学的評価に基づいた空港コンクリート舗装の ASR 劣化事例解析、コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1015-1020, 2013
- 6) 麻田正弘ほか：北陸地方における水利構造物の ASR 劣化の特徴と維持管理、コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1369-1374, 2014
- 7) 大代武志ほか：川砂、川砂利を使用したコンクリートの ASR 劣化の岩石・鉱物学的調査、Cement Science and Concrete Technology, No.61, pp.310-316, 2007
- 8) Katayama, T., et al.: Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan. Materials Characterization, Vol.53, nos.2-4, pp.105-122, 2004
- 9) Tetsuya Katayama : An attempt estimate past expansion of concrete based on petrographic stage of alkali-silica reaction:Proc.30th International Conference on Cement Microscopy, pp.217-236, 2017
- 10) 鍵本広之ほか：大型コンクリート円柱における ASR 表面ひび割れの発生メカニズム、コンクリート工学年次論文集, Vol.25, pp.201-211, 2014
- 11) 大代武志ほか：富山県における ASR 劣化橋梁の実態調査とその地域特性、コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1059-1064, 2016
- 12) 野村昌弘ほか：北陸地方の河川産骨材を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価法の開発、材料, Vol.53, No.10, pp.1065-1070, 2004
- 13) Nomura, M., et al. : Evaluation of The Residual Expansivity of Cores due to Alkali-Silica Reaction in Hokuriku District, Japan , Proc. of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, CD-R 10pages, 2012
- 14) 岸谷孝一：コンクリート構造物の耐久性－建築－, コンクリート工学, Vol.15, No.9, pp.2-4, 1977