

論文 高強度 PC 桁に生じた ASR の岩石学的観察とその劣化原因の解明

安藤 陽子*1・広野 真一*2・片山 哲哉*3・久保 善司*4

要旨: 約 30 年が経過した高強度コンクリートの PC 桁に、軸方向に延びるひび割れが多数確認された。ASR の発生は細骨材の火山岩に顕著に、粗骨材の変斑れい岩にも中程度に認められた。使用セメントは早強ポルトランドセメントと推測され、AE 気泡のような微細な気泡は認められず、設計基準強度 50N/mm² で作製されたため、かなり密実なコンクリートであった。コンクリート全体のアルカリ総量は 3kg/m³ 程度であり、その大半はセメントに由来すると推測された。ASR による劣化は、主に細骨材の火山岩に含まれる急速膨張性の反応性鉱物に起因し、粗骨材に含まれる微晶質～隠微晶質石英も少量寄与していた。

キーワード: アルカリシリカ反応, 火山岩類, 変斑れい岩, 急速膨張性, 遅延膨張性

1. はじめに

設計基準強度が 50N/mm² で作製された高強度コンクリートの PC 桁(桁高さ 550mm, かぶり 65mm)が沖縄の海沿いの水路に架かる 2 つの橋(間隔約 50m)で供用されて約 30 年が経過した。橋梁 1 の桁の下面および側面には軸方向に延びる多数のひび割れが認められた(写真-1)。一方、橋梁 2 では軸方向のひび割れが下面および側面に数本認められる程度であった。本論文では、2 橋梁の PC 桁から採取したコンクリートを用いてアルカリシリカ反応(以下、ASR)の調査として、偏光顕微鏡と SEM-EDS による岩石学的観察、および促進膨張試験を行った。また、塩化物イオン濃度測定による海からの飛来塩分の有無、総プロ法によるアルカリ総量の測定も行ない、ひび割れ発生原因の解明を行った。



写真-1 橋梁 1 下面に見られる PC 桁のひび割れ

2. 試験の方法

2.1 調査対象試料

ASR 調査対象試料は、橋梁 1 の右岸側(橋梁 1 右岸)、左岸側(橋梁 1 左岸)からと、橋梁 2 の左岸側(橋梁 2 左岸)の計 3 箇所から、PC 鋼線を切断しないよう PC 桁上面か

らアスファルトを除去してコンクリートコア(φ50mm×L130mm)を採取した。なお、いずれも橋の両端から 2 列目の桁から採取した。塩化物イオン濃度測定には、橋梁 1 の劣化部(ひび割れのある桁)と健全部(ひび割れのない桁)、および橋梁 2 の劣化部(ひび割れのある桁)の PC 桁下面より採取したドリル粉末試料を用いた。

2.2 調査項目

(1) 偏光顕微鏡観察

コンクリートコアの切断面において、ASR の発生が認められる骨材を中心に鏡面研磨薄片(25×35mm, 厚さ 0.02mm)を作製し、骨材の岩種、アルカリシリカ反応の有無・進行度、ひび割れ等の変状などの偏光顕微鏡観察を行った。ASR の進行段階は、片山の方法¹⁾²⁾に従い、1) 骨材の反応リムの形成 → 2) 骨材周辺のゾル・ゲルの取巻き → 3) 骨材内のひび割れ形成・ゲル充填 → 4) 骨材を取巻くセメントペースト内のひび割れ形成・ゲル充填 → 5) 骨材から離れたセメントペーストの気泡内へのゲルの沈殿、の 5 段階で評価をした。このような薄片によるコンクリート組織の顕微鏡観察の結果に基づき、劣化進行度を 3 段階(軽微・中程度・顕著)で推定した。

(2) 促進膨張試験(アルカリ溶液浸漬法)

促進膨張試験(アルカリ溶液浸漬法)は、公益社団法人 日本コンクリート工学会「アルカリ溶液に浸漬したコア試料の ASR による膨張率の測定法(案)(アルカリ溶液浸漬法)」³⁾に準拠して実施した。実構造物から採取されたコア試料の判定は、一般には促進養生期間 21 日にて、膨張率 0.1%以上を膨張性あり(有害)、それ未満を膨張性なし(無害)とする⁴⁾⁵⁾。

(3) 塩化物イオン濃度測定

塩化物イオン濃度測定は、「JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」のうち、塩化物イオ

*1 (株)太平洋コンサルタント 解析技術部 (正会員)

*2 (株)太平洋コンサルタント 解析技術部 博士(工学) (正会員)

*3 (株)太平洋コンサルタント 解析技術部 博士(理学) (正会員)

*4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 准教授 博士(工学) (正会員)

ン電極を用いた電位差滴定法とした。塩化物イオン量 (kg/m³) は、採取したコアの平均単位容積質量約 2395(kg/m³)を用いて計算した。

(4) 水溶性アルカリ量

コンクリート中の水溶性アルカリの抽出は、総プロ法⁹⁾に準じて行った。ただし、骨材からの溶出アルカリをセメント起源と混同しないように、数値はアルカリの回収率補正は行わず、生のデータを用いた。

(5) 反応生成物の SEM 観察・EDS 定量分析

電子顕微鏡観察(SEM)には偏光顕微鏡で観察を行った鏡面研磨薄片に炭素蒸着したものを用いた。電子顕微鏡観察には日立インストロメント社製(SU5000)を、EDS 定量分析には SEM に付属の OXFORD 社製(X-MAX50)を使用した。測定条件は測定電圧:15kV, ビーム電流:0.76 nA, 測定時間:30 秒, デッドタイム:25%とし、SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, SO₃, P₂O₅を定量分析し、100%にノーマライズせずに XPP 補正した値を用いた。

コンクリート中に ASR で生じた ASR ゲルの組成と、エーライト・ピーライトの水和により生じた CSH ゲルの組成を片山の方法¹⁾に従い、[Ca/Si]-[Ca]/[Na+K]図にプロットした。ASR ゲルの組成線の延長と CSH ゲルの組成線が交錯する ASR の「収斂点」からの ASR ゲルの組成線の隔たりを確認し、ASR がどの程度終息に近づいているかの把握を行った。

3. 結果

3.1 偏光顕微鏡観察

コアの切断面を写真-2 に示し、一部拡大を写真-3 に示す。3 試料とも切断面において粗骨材、細骨材に実体顕微鏡下で ASR による膨張ひび割れが多く確認された。

鏡面研磨薄片の偏光顕微鏡写真を写真-4 に、観察の結果を表-1 に示す。3 試料とも骨材は同一であり、粗骨材はすべて変斑れい岩からなる砕石であった。変斑れい岩は、原岩(斑れい岩)の組織は保存されたまま、構成鉱物の一部が変成鉱物に置き換えられた、一種の変成岩である。細骨材は主に火山岩類(安山岩・安山岩質溶結凝灰岩など)と花崗岩起源の岩片・鉱物片(石英・長石・黒雲母など)とからなる砂であった。細骨材の砂に含まれ

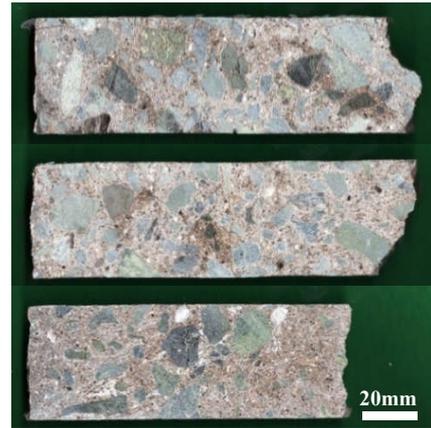


写真-2 コンクリートコア切断面
上: 橋梁1右岸, 中: 橋梁1左岸, 下: 橋梁2左岸

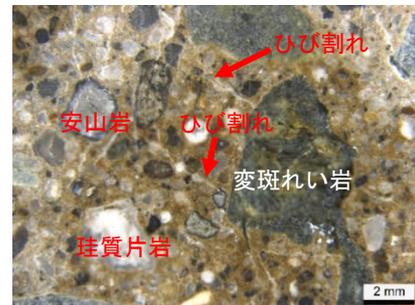


写真-3 切断面拡大 (橋梁2左岸)
左側: PC 桁上面

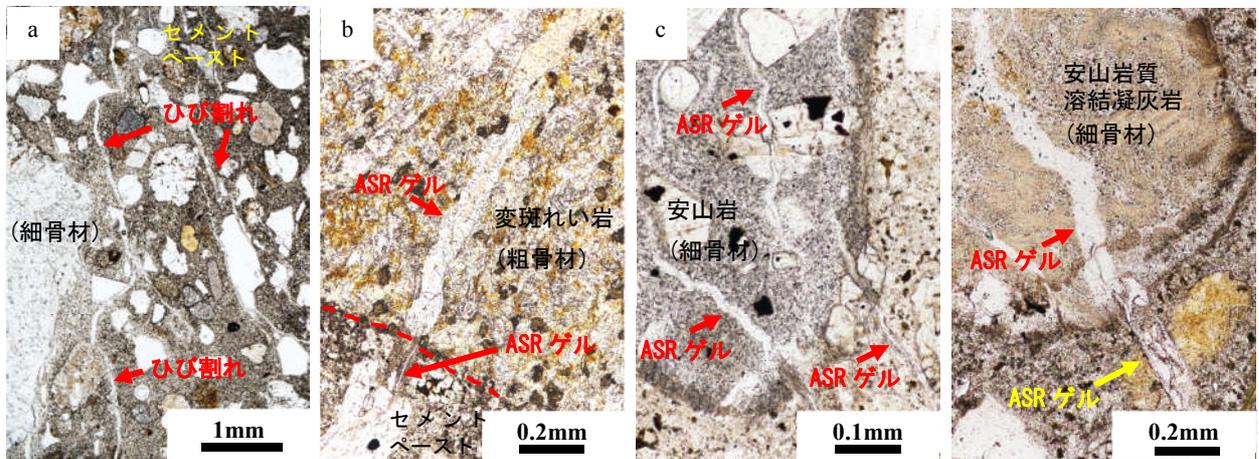


写真-4 偏光顕微鏡写真(単ニコル) a: セメントペースト中のひび割れ(橋梁1右岸), b: 変斑れい岩のASR(橋梁1左岸), c: 安山岩のASR(橋梁1左岸), d: 安山岩質溶結凝灰岩のASR(橋梁1左岸)

る安山岩は未変質ないしごく軽微な変質のものが大半である。このような安山岩は、斜長石、輝石、角閃石、不透明鉱物などの斑晶を含み、石基は急冷部でガラス、徐冷部ではクリストバライトおよびトリディマイトを含んでいる。安山岩質溶結凝灰岩は、溶結した火山ガラス片や軽石片からなる基質中に斜長石、輝石、角閃石などの結晶片を含むものである。基質にガラスを多量に含む。また気孔や空隙中にクリストバライトが晶出している粒子もある。

ASR は細骨材の火山岩類(安山岩・安山岩質溶結凝灰岩など)に顕著に、粗骨材の変斑れい岩に中程度に認められた。反応状況は、橋梁1においてコアの軸方向に直交して骨材内部からセメントペーストに向かって膨張ひび割れを生じている状態がかなり認められ、ひび割れを伝ってコンクリート中の気泡に ASR ゲルが沈殿している状態がひび割れの本数に対応し3割程度認められた。橋梁2においては骨材からセメントペーストに進展するひび割れが認められるが、橋梁1よりもひび割れは少なく、ひび割れを伝って ASR ゲルが気泡を充填する状態は1割程度であった。反応性鉱物は変斑れい岩では微晶質～隠微晶質石英、火山岩類の砂ではクリストバライト・トリディマイト・ガラスであった。これらの観察結果より、橋梁1右岸、橋梁1左岸とも反応の程度は中程度～顕著で加速期に相当、橋梁2左岸は中程度で進展期～加速期

に相当すると判断される。なお、3 試料ともセメントペーストに AE 気泡のような微細な気泡は認められず、非 AE コンクリートと考えられる。セメントペーストに高炉スラグ微粉末やフライアッシュは認められないことから、使用セメントはポルトランドセメントであり、このセメント粒子はセメントペースト中に非常に密に認められた。またセメントの特徴としてビーライトが少なく、エーライトがかなり多く認められ、使用セメントは早強ポルトランドセメントと見られる。

3.2 促進膨張試験(アルカリ溶液浸漬法)

促進膨張試験(アルカリ溶液浸漬法)結果を図-1に示す。今回試験を行った3試料は、促進期間21日でいずれも0.3%以上の膨張量であり有害判定となった。

3.3 塩化物イオン濃度測定

コンクリート中の塩化物イオン濃度試験結果を図-2に示す。この結果から、塩化物イオンの浸入はPC桁下面からひび割れの多い劣化部でも50mm程度以内、健全部では30mm以内であることがわかった。いずれも表層部の濃度は2kg/m³程度であり、劣化部、健全部ともかぶり65mmの鉄筋位置で、発錆の管理限界値とされてきた現在では安全側の値⁷⁾1.2kg/m³には達していない。なお、上面からの浸入については、今回試験を行っていないため不明である。

表-1 薄片の偏光顕微鏡観察に基づくアルカリシリカ反応の進行状況

| 構造物 | 岩種 | | アルカリシリカ反応 | | | | | 劣化度 評価 | |
|-------|-----|----------|-------------|--------------|--------------|------------|---|-----------|-----|
| | | | 進行段階 → | | | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| | | | 骨材 | ペースト | 骨材 | ペースト | | | |
| | | 反応 リム | 滲み・取り 巻き | ひび割れ ゲル充填 | ひび割れ ゲル充填 | 気泡 ゲル充填 | | | |
| 橋梁1右岸 | 粗骨材 | 砕石 | 変斑れい岩 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 2 |
| | 細骨材 | 砂 | 安山岩 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | 3 |
| | | | 安山岩質溶結凝灰岩 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ○ | 2~3 |
| | | | デイサイト | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 2 |
| | | | 珪質片岩 | | | ○ | ○ | | 2 |
| 総合評価 | | | | | | | | 2~3 | |
| 橋梁1左岸 | 粗骨材 | 砕石 | 変斑れい岩 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 2 |
| | 細骨材 | 砂 | 安山岩 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ○ | 2~3 |
| | | | 安山岩質溶結凝灰岩 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 2 |
| | | | デイサイト | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 2 |
| | | | 総合評価 | | | | | | |
| 橋梁2左岸 | 粗骨材 | 砕石 | 変斑れい岩 | ○ | ○ | ○ | ○ | + | 2 |
| | 細骨材 | 砂 | 安山岩 | ◎ | ◎ | ○ | ○ | ○ | 2 |
| | | | 安山岩質溶結凝灰岩 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 2 |
| | | | 珪質片岩 | ○ | ○ | ○ | ○ | | 2 |
| | | | 総合評価 | | | | | | |

観察による評価 アルカリシリカ反応の程度： ◎ 顕著； ○ あり； + 痕跡程度

劣化度の評価： 1 軽微(潜伏期に相当)； 2 中程度(進展期・加速期に相当)； 3 顕著(加速期・劣化期に相当)

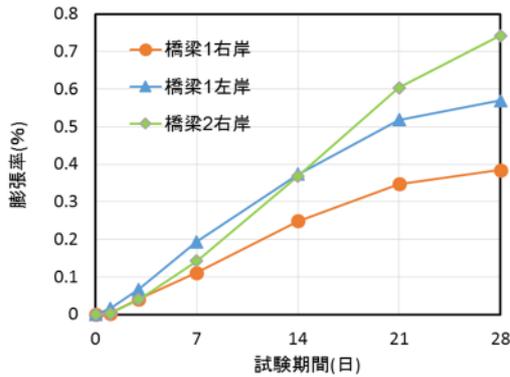


図-1 促進膨張試験（アルカリ溶液浸漬法）結果

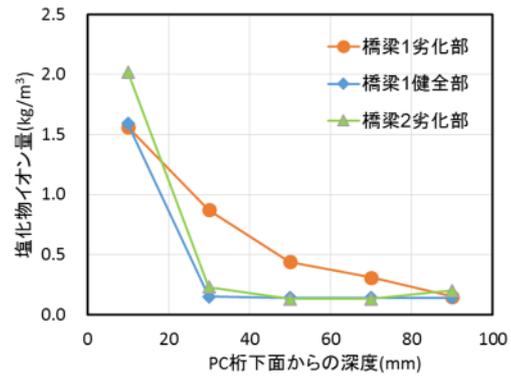


図-2 塩化物イオン濃度(Cl⁻)試験結果

3.4 水溶性アルカリ量

総プロ法による水溶性アルカリ量の測定結果を表-2に示す。3試料ともアルカリ総量は約3kg/m³程度であった。コンクリートのアルカリ総量規制値にほぼ達している。

表-2 コンクリートのアルカリ総量

| | 水溶性アルカリ量 (mass%) | | | アルカリ総量* (kg/m³) |
|-------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------|
| | Na ₂ O | K ₂ O | Na ₂ Oeq. | |
| 橋梁1右岸 | 0.086 | 0.060 | 0.125 | 2.99 |
| 橋梁1左岸 | 0.090 | 0.068 | 0.135 | 3.23 |
| 橋梁2左岸 | 0.090 | 0.066 | 0.133 | 3.19 |

*アルカリ総量の算出に単位容積質量 2395kg/m³を使用。

3.5 ASR ゲルと CSH ゲルの組成

図-3に3試料のASRゲルの組成と、エーライト・ピーライトの水和により生じたCSHゲルの組成を[Ca/Si]-[Ca]/[Na+K]でプロットした。ASRゲルの組成は1試料につき、骨材からセメントペーストに進展するひび割れ数本を10~30μm間隔で測定した。ASRゲルとセ

メント粒子のBSE像を写真-5に示す。骨材中のひび割れを充たすASRゲルの脈のなかで、セメントペーストに近い部分では非晶質のASRゲルが認められ、骨材の奥ではロゼット状に結晶化したASRゲルが認められた。図-3でロゼット状のASRゲルの組成は1本の組成線の左端を占めており、[Ca/Si]比が0.3以下、[Ca]/[Na+K]比が1程度である。非晶質なASRゲルはアルカリ含有量が高いものから、カルシウムの含有量が増加して、アルカリの低いものまであり、組成の範囲は広い。非晶質なASRゲルでは橋梁1右岸で[Ca/Si]=0.3~1.4、[Ca]/[Na+K]=0.8~30、橋梁1左岸で[Ca/Si]=0.3~1.5、[Ca]/[Na+K]=0.6~60、橋梁2左岸が[Ca/Si]=0.4~1.2、[Ca]/[Na+K]=2~40であった。CSHゲルの組成分析において、橋梁1左岸の未水和のエーライトは分析できなかった。未水和のピーライトは[Ca/Si]=2.1程度・[Ca]/[Na+K]=50程度、未水和のエーライトは[Ca/Si]=3.0程度・[Ca]/[Na+K]=150程度である。これらが水和してCSHゲルに変化すると、アルカリ(Na, K)を放出するとともにカルシウムを溶脱し、本試料ではCa/Si=1.5程度、[Ca]/[Na+K]=100-200程度に収斂することが分かる。なお、3試料ともASRゲルの組成線は、収斂点には達していなかった。

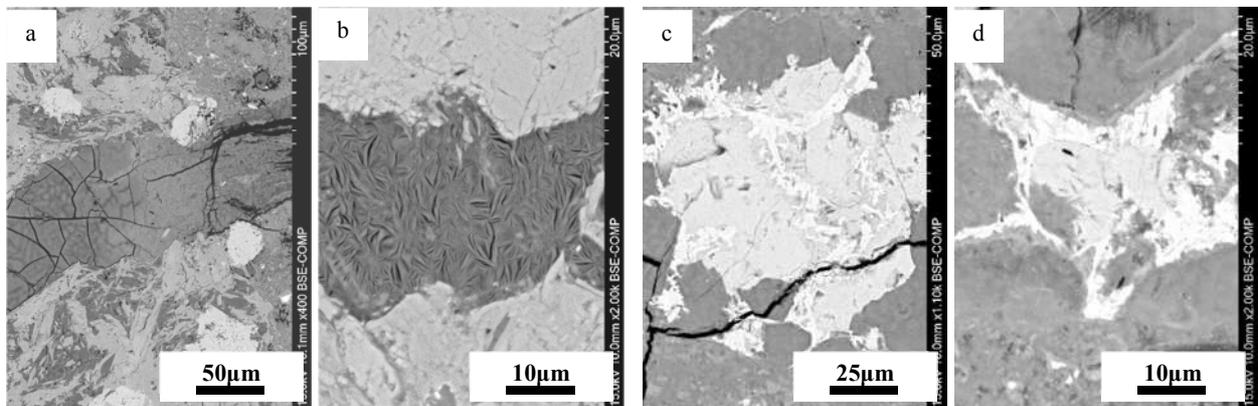


写真-5 BSE像（橋梁1右岸）a：非晶質ASRゲル，b：ASRゲルロゼット，c：未水和エーライトとその水和物，d：未水和ピーライトとその水和物

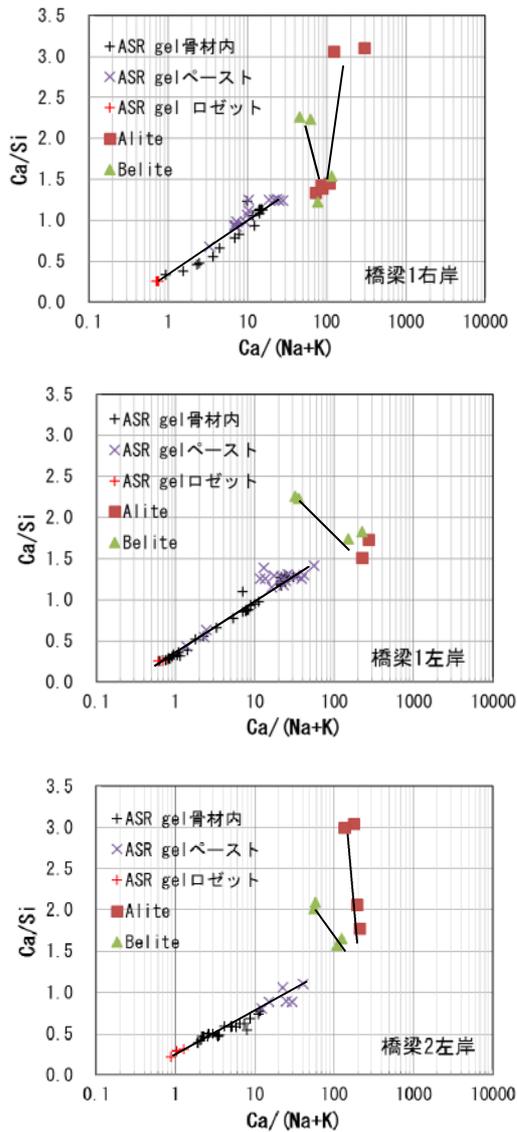


図-3 [Ca/Si]-[Ca]/[Na+K]図

4. 考察

4.1 反応性鉱物

一般に、反応性鉱物の中で、クリストバライト・トリディマイトは反応性が高く急速膨張性の鉱物、微晶質～隠微晶質石英は遅延膨張性の鉱物とされており、ガラスはその中間である⁸⁾。今回、3試料ともにほぼ同様の骨材が使用されており、細骨材の火山岩類に急速膨張性の反応性鉱物を、粗骨材の変斑れい岩に遅延膨張性の反応性鉱物を含んでいた。変斑れい岩は、本来 ASR 反応性を有するものは少ないが、今回の試料中には岩石の二次的な変質作用により生成した微晶質～隠微晶質石英を含む。

4.2 アルカリの由来

水溶性アルカリ量の分析結果から、コンクリートのアルカリ総量は3試料とも総量規制の 3.0kg/m^3 にほぼ達している。そこで、アルカリ総量に対し、セメント由来のアルカリがどのくらい寄与しているか、「3.5」で分析し

たコンクリート中に残存する未水和セメント粒子（エーライト・ビーライト・アルミネート・フェライト）の EDS 定量分析値から最小アルカリ量を求め、クリンカーの最小アルカリ量¹⁾⁵⁾を推定した結果を表-3に示す。これはクリンカー中の水溶性アルカリ（主に硫酸アルカリに由来）を除外した数値である。なお、本試料に使用されたセメントは早強ポルトランドセメントとして計算を行った⁹⁾。

表-3 未水和セメントのアルカリ量の

EDS 定量分析結果 (mass%)

| 試料 | | Na ₂ O | K ₂ O | Na ₂ O* | K ₂ O* |
|------------|------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| 橋梁1 右岸 | エーラ イト | 0.10 | 0.04 | 0.13 | 0.03 |
| | | 0.28 | 0.06 | | |
| | ビーラ イト | 0.43 | 0.19 | 0.07 | 0.04 |
| | | 0.53 | 0.34 | | |
| | アルミ ネート | 2.25 | 0.66 | 0.19 | 0.05 |
| | | 2.04 | 0.42 | | |
| | フェラ イト | 0.27 | 0.01 | 0.02 | 0.00 |
| 0.13 | | 0.06 | | | |
| 最小アルカリ量(%) | | | | 0.41 | 0.12 |
| | | | | 0.49 | |
| 橋梁2 左岸 | エーラ イト | 0.20 | 0.03 | 0.16 | 0.02 |
| | | 0.27 | 0.03 | | |
| | ビーラ イト | 0.33 | 0.39 | 0.05 | 0.05 |
| | | 0.37 | 0.32 | | |
| | アルミ ネート | 2.73 | 0.81 | 0.21 | 0.05 |
| | | 2.04 | 0.31 | | |
| | フェラ イト | 0.22 | 0.11 | 0.02 | 0.01 |
| 0.33 | | 0.09 | | | |
| 最小アルカリ量(%) | | | | 0.45 | 0.13 |
| | | | | 0.53 | |

* 早強ポルトランドセメントとしてエーライト 69%、ビーライト 14%、アルミネート 9%、フェライト 8%の含有比率を掛けたアルカリ量⁹⁾。
最小アルカリ量=Na₂O*+0.658×K₂O*

使用セメント中のクリンカー部分の最小アルカリ量 (Na₂Oeq.)は、橋梁1右岸で0.49%、橋梁2左岸で0.53%と推定された。使用されたセメントのクリンカー中の水溶性の硫酸アルカリを、表-3で推定した最小アルカリに補正(2割増し)を行うと⁵⁾、セメント中の全アルカリ量 (Na₂Oeq.)は、橋梁1右岸で0.59%、橋梁2左岸で0.64%程度と推定される。本 PC 桁は設計基準強度が 50N/mm^2 で作製されていることから、単位セメント量は圧縮強度 50N/mm^2 程度の一般的な PC 製品の範囲にある 450kg/m^3 と仮定した¹⁰⁾。コンクリート中のセメント由来のアルカリ量は橋梁1右岸が 2.66kg/m^3 、橋梁2左岸が 2.88kg/m^3 となる。

総プロ法の結果と EDS によるコンクリート中のセメント由来のアルカリ量を比較すると、コンクリートの水溶性アルカリの大半はセメント由来であると推察される。コンクリートのアルカリ総量に対し、セメント由来のアルカリだけでは 0.3kg/m^3 程度アルカリが不足する分は、

粗骨材や細骨材に含まれる長石などからの溶出アルカリ、海水によるアルカリの供給、硫酸アルカリなどの仮定の誤差が寄与した可能性が考えられる。

4.3 ASR の進行状況

一般に、ASR ゲルは組成がアルカリに富むもの(図-3の左側に位置する)ほど膨張性があるが、反応の進行に伴い、ゲル内のアルカリがセメントペーストのカルシウムと交換して、CSH ゲルの組成に近づいていく。ASR ゲルの膨張性は、カルシウムに富むにつれて低下し、「収斂点」に達しCSH ゲルの組成に至ると消失する^{1),2)}。図-3で、橋梁1の右岸、左岸とも、アルカリに富む左端からASR ゲルの組成線が延びているが、収斂点には達していない。橋梁2左岸の組成線もアルカリに富む左端から延びているが、橋梁1左岸、橋梁1右岸の2試料よりも組成線は収斂点までの隔たりがやや大きい。偏光顕微鏡による組織観察の結果でも、橋梁1は右岸、左岸ともASRの進行段階は加速期で、劣化の程度は中程度～顕著、橋梁2左岸は、ASRの進行段階は進展期～加速期で、劣化の程度は中程度と評価されることから、ゲルのEDS分析の結果と調和する。

4.4 膨張試験結果との相関

3試料とも骨材およびセメントは同一のものが使用されていると見られ、偏光顕微鏡観察による反応の程度の差は、主に使用された環境の水がかりや日照の違いなどの影響によるものと考えられる。膨張試験結果は、最もASRが進行していた橋梁1右岸で膨張量が少なく、最も反応の程度が低い橋梁2左岸では、膨張量が多いことから、この膨張量はさらにアルカリが供給された場合の反応余力を示していると考えられる。

5. まとめ

- (1) 高強度PC桁には、粗骨材に変斑れい岩の砕石が使用され、細骨材には火山岩類(安山岩・安山岩質溶結凝灰岩など)と花崗岩起源の岩片・鉱物片からなる砂が使用されていた。
- (2) ASRは粗骨材の変斑れい岩と細骨材の安山岩にセメントペーストに進展したひび割れが頻繁に認められた。
- (3) ASRは橋梁1右岸、橋梁1左岸ともASRは中程度～顕著で加速期に相当、橋梁2左岸は中程度で進展期～加速期に相当するものであった。
- (4) コンクリートのアルカリ総量は $3.0\sim 3.2\text{kg/m}^3$ であり、十分にASRを生じるアルカリが含まれていた。この中でセメントに由来するアルカリ総量の推定値が $2.7\sim 2.9\text{kg/m}^3$ で、その殆どを占めていた。残りの 0.3kg/m^3 程度は、骨材の長石などからのアル

カリの溶出、海水によるアルカリの供給、硫酸アルカリなどの仮定の誤差が影響していると考えられる。

- (5) ASRによる劣化の原因は、細骨材の火山岩類に含まれる反応性の高いクリストバライト・トリディマイト・ガラスが主要なものであるが、粗骨材の変斑れい岩に含まれる微晶質～隠微晶質石英も反応に寄与していた。

参考文献

- 1) Katayama, T., et al.: Late-Expansive ASR due to Imported Sand and Local Aggregates in Okinawa Island, Southwestern Japan. Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAR), Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008
- 2) Katayama, T.: Late-expansive ASR in a 30-year old PC structure in Eastern Japan. Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAR), Austin, Texas, USA. p.10, paper 030411-KATA-05, 2012
- 3) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術 14, 2014
- 4) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013, p.95, 2013
- 5) 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
- 6) 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報告書<第2編>3.3 コンクリート中の水溶性アルカリ金属の元素方法(案), 1988
- 7) 土木学会編：2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編 耐久性照査型], 2012
- 8) 片山哲哉：アルカリシリカ反応入門 アルカリシリカ反応の診断方法, コンクリート工学, Vol.52, No.12, 2014
- 9) セメント協会：セメント化学雑論, セメントの諸比率・係数の工学的意味, pp.34-38, 1985
- 10) 独立行政法人土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム, (社)プレストレス・コンクリート建設業界協会：PC部材の軽量・高耐久性化に関する共同研究報告書-テストハンマーによるPC部材のコンクリート強度推定に関する検討一, 共同研究報告書, 2003