

論文 遅延膨張性骨材を有したコンクリート橋の ASR 劣化事例の考察

森 裕介*1・富山 潤*2・宮城 敏明*3・知念 正昭*4

要旨：供用 27 年経過したポストテンション方式 PC3 径間中空床版橋の橋脚において最大ひび割れ幅 2.0mm のひび割れが多数確認された。偏光顕微鏡観察および SEM 観察・EDX 分析の結果、ひび割れの発生要因は、隠微品～微晶質石英等の反応性鉱物による遅延膨張性 ASR であると推定した。本橋では、劣化の著しい進展が見られたため、顕微鏡観察で確認されたひび割れ内部のエトリンサイト生成に着目して DEF の膨張確認として飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浸漬法を実施したが膨張は示さなかった。損傷が著しく進展した要因としては、主に環境要因（水分供給）、コンクリートの圧縮強度（密実性）、細骨材のペシマム混合率が考えられた。

キーワード：遅延膨張性 ASR, DEF, 促進膨張量試験, 偏光顕微鏡観察, SEM 観察・DEX 分析

1. はじめに

沖縄県は、高温多湿の亜熱帯圏に属しており、四方が海に囲まれた島嶼県であるため、県全域が過酷な塩害環境である。さらに県内では、塩害による劣化損傷のほか、コンクリート用細骨材として使用されている一部の海砂に、アルカリシリカ反応（以下、ASR と称す。）が確認されている¹⁾。特に県内の ASR は、遅延膨張性の ASR を有している。その一要因としては、過去に輸入された台湾花蓮産骨材や沖縄本島新川沖産海砂に含有される微晶質石英や隠微品質石英等の反応性鉱物が挙げられている。沖縄県内の海砂に起因した ASR 劣化は、これまで限定的かつ軽微である報告が多かったものの、2020 年（供用後 27 年経過）に 3 巡目の定期点検が実施された沖縄県内のポストテンション方式 PC3 径間中空床版橋（以下、K 橋と称す。）では、橋脚部において、最大ひび割れ幅 2.0mm とひび割れが著しく進展しており、これらは遅延膨張性 ASR であると疑われた。この ASR 進行を受けて、K 橋では、ASR 対策として亜硝酸リチウム内部圧入工が部分的に適用され、補修効果の検証がなされている²⁾。しかしながら、ASR が顕著に進行した要因については結論づけられていない。沖縄県内の構造物における ASR 劣化現象の適切な予測と対策には、遅延膨張性 ASR 特有の劣化組成について把握し、得られた知見を補修対策へフィードバックする必要があると著者らは考えている。

そこで本研究では、遅延膨張性 ASR が疑われた K 橋において、偏光顕微鏡観察および SEM 観察・EDX 分析を用いて劣化要因を推定した。さらに、K 橋でひび割れが顕著となった要因を環境要因やコンクリートのアルカリ量、圧縮強度、細骨材のペシマム混合率から考察した。

2. 対象橋梁の調査概要

2.1 対象橋梁の概要

調査対象とした K 橋は、竣工年 1993 年、全長 63m、全幅 5m、構造形式はポストテンション方式 PC3 径間連続中空床版橋の方杖ラーメン橋である。図-1 に K 橋の側面図を示す。K 橋は、沖縄県本島南部の海岸線から約 5.1km 内陸部に位置しており、H29.11 月道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋コンクリート部材編では、塩害対策区分は A-II（塩害の影響を受ける）に該当する。写真-1 には、P2 橋脚の劣化状況、図-2 に橋脚の外観調査結果を示す。ひび割れ幅の計測は、2012 年および 2020 年の調査でクラックスケールにて実施した。2012 年の調査では、部分的なひび割れに留まっており、ひび割れ幅についても最大 1.3mm 程度であった。一方 2020 年の調査では、2012 年と比較してひび割れ幅および延長は増大していた。鉄筋腐食の評価として、塩分含有量試験および中性化試験を実施したが、塩分量は $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を下回っており、中性化深さにいたっては、0mm であったことから、ASR によってひび割れが進展したものと考えられた。また、橋脚部からコンクリートコアを採取し圧縮強度試験を実施したところ、設計基準強度 $40\text{N}/\text{mm}^2$ に対して、圧縮強度は、約 $45\text{N}/\text{mm}^2$ であった。なお、設計基準強度は、土木工事設計要領第 1 編共通編・河川編により想定した。

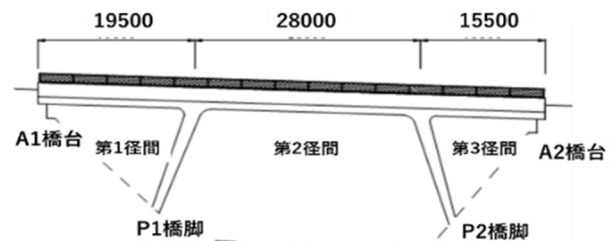


図-1 K 橋 側面図

*1 極東興和（株）営業本部営業部補修営業課（正会員）

*2 琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース 教授（正会員）

*3 （株）興洋エンジニアリング（正会員）

*4 MicroRange 代表

2.2 試験方法

試験は、RILEM AAR-6³⁾の手法に沿ってコアの目視観察、実体顕微鏡観察、偏光顕微鏡観察、SEM 観察・EDX 分析を実施した。図-3 に試験に用いたコンクリートコア試料の採取位置を示す。試験には、P2 橋脚から採取したφ50mm、L=150mm の3本 (No.1～3) を用いた。

(1) 目視観察

目視観察には拡大鏡を使用し、コア外周に露出した骨材について、反応リムの有無、セメントペーストへのASR ゲル/ゾルに浸み出し、セメントペーストのひび割れ状況などの ASR 徴候の有無を観察した。また、画像解析ソフトを用いて、主に 5mm 以上の粒子を粗骨材、5mm 以下の粒子を粗骨材として岩種構成比率を算出した。

(2) 実体顕微鏡観察

コアを切断し、切出したチップを研磨した後、骨材周囲の反応リムの有無やひび割れ状況を観察した。

(3) 偏光顕微鏡観察

実体顕微鏡で観察したチップから厚さ 20μm 程度の薄片試料を作製した。細骨材の岩種構成比は、偏光顕微鏡にオートマチック・ポイントカウンターを取り付け、細骨材の粒子を岩種ごとにポイント集計し求めた。

(4) SEM 観察・EDX 分析

偏光顕微鏡観察に使用した薄片試料を用いて、ASR ゲルの形態や化学組成のほか、光学顕微鏡で観察が難しいセメントペースト中の微細ひび割れを観察した。

3. 試験結果

3.1 目視観察・実体顕微鏡観察結果 (岩種構成比)

図-4 に細骨材の岩種構成比を示す。粗骨材では、No.1, No.2, No.3 のいずれも結晶質石灰岩が 99.7%以上を占めていた。これらは、ASR 非反応性の粒子に該当する。一方で、細骨材には、粗骨材と同種の結晶質石灰岩が 43～52%含まれており、その他はシルト岩や粘土岩、弱変成砂岩等で構成されていた。シルト岩や粘土岩等は、ASR 反応性の粒子に該当する。これらの No.1, No.2, No.3 の試料において粗骨材・細骨材ともに存在する結晶質石灰岩は、目視観察の結果、角礫～亜角礫状であることから、碎石由来であると考えられる。

写真-2 に実体顕微鏡観察によって得られたコア切断面のひび割れ状況を示す。細骨材周囲において、骨材からセメントペーストに至るひび割れが生じており、ひび割れ内部には白色析出物が認められた。ひび割れ幅はセメントペースト部から骨材内部にいくにつれて細くなる傾向であった。また、写真-2 D) では、反応リムおよび細骨材界面を縁取る白色物が確認された。

3.2 偏光顕微鏡観察結果

実体顕微鏡観察でひび割れが発生した骨材周囲にて偏



写真-1 K橋 P2橋脚の劣化状況

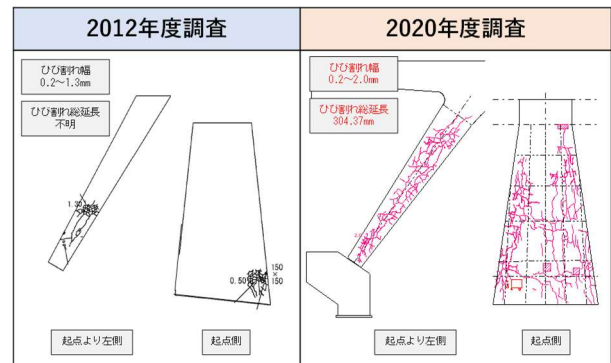


図-2 P2橋脚損傷図

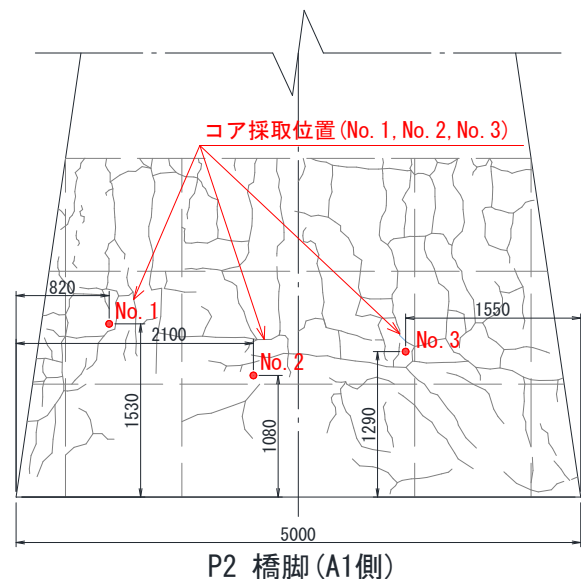


図-3 コア採取位置図 (顕微鏡観察)

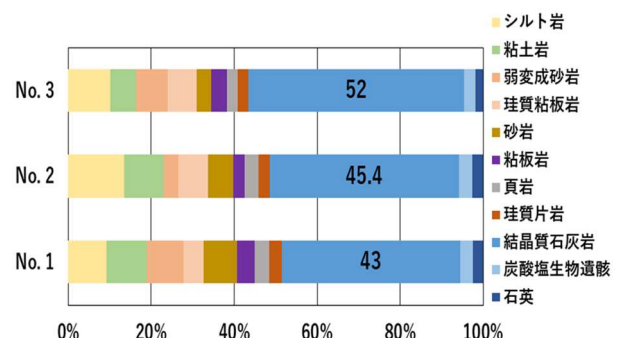
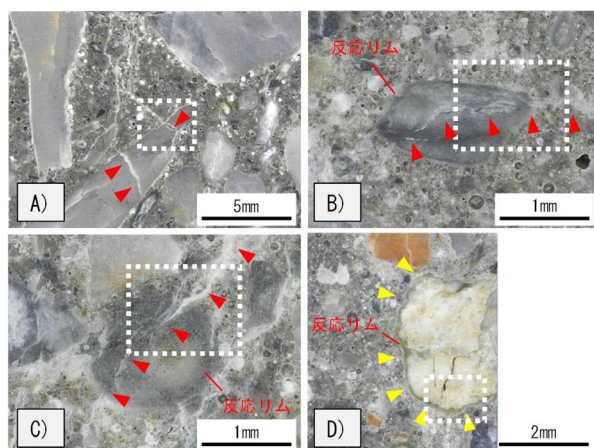


図-4 細骨材の岩種構成比



写真中の点線枠は偏光顕微鏡観察範囲を示す。

写真-2 コア切断面のひび割れ状況

- A) 粗骨材を貫通するひび割れ（結晶質石灰岩）、B) （シルト岩）、C) 細骨材を貫通するひび割れ（粘土岩）、D) 細骨材界面を縁取る生成物（珪質粘板岩）

光顕微鏡観察を実施した。写真-3 に偏光顕微鏡観察結果を示す。粗骨材は、ほぼ方解石のみで構成されていた。方解石の主成分は、カルサイト (CaCO_3) である。一方、細骨材では、主に隠微晶～微晶質石英、石英、絹雲母、緑泥石で構成されていた。反応性岩種には、隠微晶～微晶質石英の反応性鉱物が含まれていることから、写真-3 B)、C) に生じた骨材からセメントペーストに至るひび割れは ASR によって発生したものであると推察される。写真-3 A) では、粗骨材を貫通するひび割れおよび粗骨材周囲のひび割れが見られるが、これは他所より生じたひび割れが伝達して発生したものであると推察される。また、セメントペースト中のひび割れ内部には、エトリンガイトと推察される針状結晶が存在していた。

3.3 SEM 観察・EDX 分析結果

ASR の徴候が顕著な各種粒子を対象として、反応生成物である ASR ゲルの存在について SEM 観察・EDX 分析を実施した。図-5 に一例として粘土岩における SEM 観察・EDS 分析によって得られた化学組成を示す。細骨材からセメントペーストに至るひび割れ内部において、ロゼット状からゲル状の生成物で充填されていた。これらのゲルは典型的な ASR ゲルの成分である Si, Ca, Na, K で構成されていた。ASR ゲルの形態は、骨材側ではゲル状を示しており、骨材内部ではロゼット状へ変化するが、その中間の形態も存在していた。また、セメントペースト付近では、針状結晶が見られ、エトリンガイトがひび割れ内部に充填されているケースが多く確認された。

ASR ゲルの生成段階を把握するために、ひび割れ内部に確認されたゲル状の物質について EDX による組成分析（半定量分析）を行った。加えて、CSH ゲルの分析も実施した。図-6 に一例としてコア No.2 における ASR ゲル

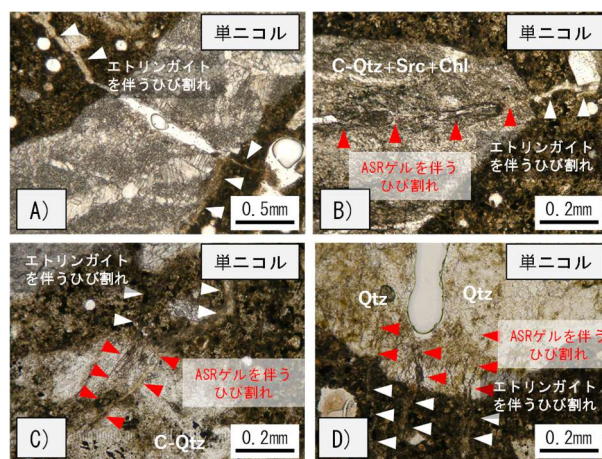


写真-3 ひび割れ発生周囲の偏光顕微鏡観察結果

- A) 結晶質石灰岩、B) シルト岩、C) 粘土岩、D) 珪質粘板岩

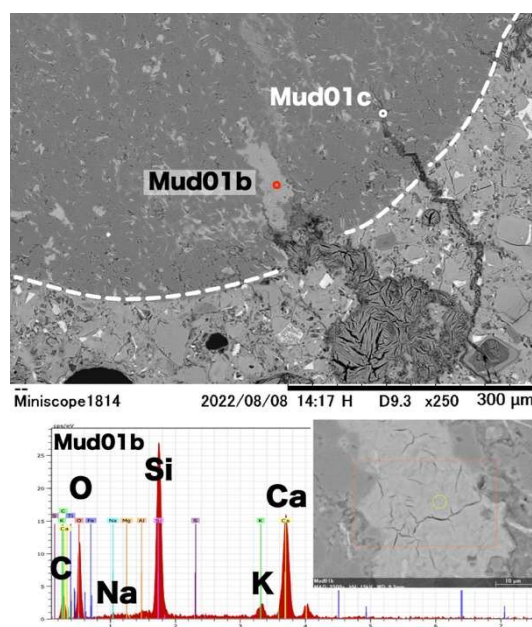


図-5 粘土岩における ASR ゲルの組成性状と化学組成（定性分析）

ルおよび CSH ゲルの主な組成を $[\text{Ca}/\text{Si}] / [\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})]$ として示す。一般的な CSH ゲルは $\text{Ca}/\text{Si}=1.5$, $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})=100\sim200$ 程度であり、ASR ゲルの組成値が CSH ゲルの組成値に近ければ ASR は収束する傾向にあることを示している^{4,5)}。本分析での各試料の CSH ゲルの値は Ca/Si が $1.5\sim2.5$ 程度、 $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ が $40\sim300$ 程度であった。これを基準にみると、セメントペースト内のひび割れや空隙を充填する ASR ゲルの値は Ca/Si が概ね $1.0\sim2.0$ 、 $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ が概ね $10\sim100$ に分布しており、CSH ゲルに近似する傾向にある。骨材内の ASR ゲルでは、 Ca/Si が 0.5 以上、 $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ が 1.0 以上のグループがあり、このグループは CSH ゲルに近似する傾向にある。一方、 Ca/Si が 0.1 以下、 $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ が 1.0 以下

のグループがあり、これらは Si、Na および K を多く含むことから、生成初期の流動性の高いゲルと考えられる。骨材内のロゼット状の ASR ゲル(ゲル状との中間的な形態を含む)では、Ca/Si が概ね 0.1~1.0、Ca/(Na+K)が概ね 1.0~10 に分布する。ロゼット状の ASR ゲルは、経年によってゲルが結晶化したものとされ、膨張性を失ったと考えられている⁹⁾。以上より、ASR ゲルは概ね CSH ゲルに近似する傾向にあり、結晶化したロゼット状のものも存在することから、ASR 発生から経年しているものと考えられる。一方で、高濃度 Si、高濃度 Na+K なゲルも存在することから、近年でも ASR が継続していたことが推察される。

3.4 ASR 進行度の推定

3.1, 3.2, 3.3 の試験結果をふまえて Katayama らの判定⁶⁾に基づき ASR の進行度を推定した。粗骨材では、ASR の徴候が見られないことから、ASR 進行度はいずれのコアでも 0 (なし) と判定した。一方、細骨材では、骨材周囲の反応リムが見られたことに加えて、比較的多くの粒子で骨材からセメントペーストに至るひび割れが生じており、骨材のひび割れ内部は ASR ゲルが充填されていたことから、ASR 進行度はいずれのコアでも 3 (中程度)であると判断した。

4. 劣化程度の考察

4.1 残存膨張性の検証

各種顕微鏡観察の結果、K 橋の劣化要因は ASR によるものだと推察されたが、将来的な ASR 膨張のポテンシャルを検証するために、促進膨張量試験を実施した。試験に用いたコアは、P2 橋脚 (A1 側) から偏光顕微鏡観察で用いたコアの近傍で採取した。コンクリートの促進膨張量試験である JCI-S-011-2017 では、遅延膨張性 ASR の膨張が検出されないとの報告がなされている⁷⁾ため、アルカリ溶液浸漬法を実施した。試験方法は「アルカリ溶液に浸漬したコア試料のアルカリシリカ反応による膨張率の測定方法 (案) (アルカリ溶液浸漬法)」⁸⁾に準拠した。図-7 に促進膨張量試験結果を示す。P2-3 および P2-4 は、判定基準⁹⁾ 21 日において基準値の 0.10%に達しており有害と判定となった。また、P2-4 においては、膨張率が 0.20%と最も大きい数値を示した。一方で、P2-5 については、膨張率が 0.09%であることから無害域に該当するが、21 日から 28 日までの膨張率の伸び量は、他の 2 つのコア供試体より大きく、28 日では 0.23%の膨張率を示した。以上の結果を総合的に考えると、促進膨張量試験の結果は有害と判断でき、前述したひび割れの進展の要因を裏付ける結果が示された。

遅延膨張性のポテンシャルは確認されたものの、前述した通り、これまで沖縄県内の遅延膨張性骨材による

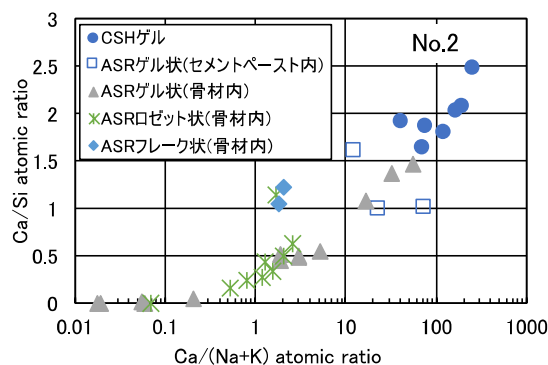


図-6 ASR ゲルおよび CSH ゲルの組成

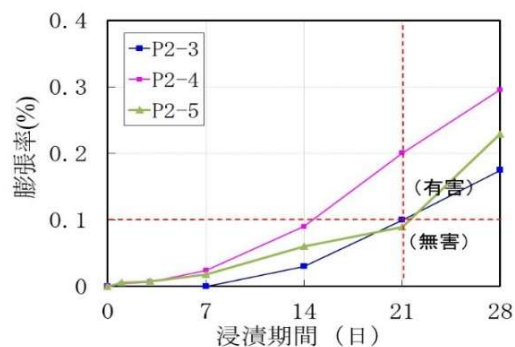


図-7 促進膨張量試験結果 (アルカリ溶液浸漬法)

ASR 劣化は軽微であったとされている。K 橋にて劣化が顕著となった要因としては、遅延膨張性骨材のひび割れ部にエトリンガイトが充填されていることが見られたことから、エトリンガイトの遅延生成による膨張・劣化(以下、DEF と称す。)によって ASR ひび割れを促進させた可能性も考えられる。DEF では、過剰な硫酸塩と蒸気養生を行った場合に発生することが多いため、工場製作のプレテンション PC 桁等で見られる可能性が高いが、JCI 報告¹⁰⁾では、高強度コンクリートを使用した柱部材で DEF 発生の可能性が示されている。また、当時の県内での施工環境は高温多湿であったことが想定されるため、DEF が ASR を促進していることが考えられる。そこで、DEF による膨張ポテンシャルを検証するために、飽和 Ca(OH)₂ 溶液浸漬法による促進膨張量試験を実施した。Thomas¹¹⁾らは、飽和 Ca(OH)₂ 浸漬法では ASR が膨張せず DEF であれば膨張を示すと報告がなされており、これにより DEF による劣化が推定できると考えられる。図-8 に飽和 Ca(OH)₂ 溶液浸漬法¹¹⁾による促進膨張量試験結果を示す。試験に用いたコアは、P1 橋脚から採取した φ 70mm、L=150mm の 3 本 (P1-1, P1-2, P1-3) を用いた。試験では通常 φ 50mm が用いられるが、今回は φ 70mm のコアを用いたため、コア径による膨張の過小評価が懸念された。そのため、浸漬期間を通常の 28 日間に対して 56 日間まで延長した。結果として、アルカリ溶液浸漬法

では、14日目付近から膨張傾向が見られた一方で、飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浸漬法では浸漬7日までに多少の膨張傾向は見られたものの、7日以降で膨張は収れんしており、その膨張率はアルカリ溶液浸漬法と比較して極めて小さかった。したがって、ひび割れ内部に充填されたエトリンガイトは、ASR ひび割れを促進させるほどのポテンシャルは有していないものと考えられた。

4.2 劣化が顕著となった要因の考察

(1) 供用環境による影響

K 橋の橋脚にて ASR 劣化が著しく進行した要因を考察する。まず、K 橋の供用環境を整理すると、K 橋は県内でも内陸部に位置している。したがって、前述した塩化物イオン量試験結果も踏まえると、飛来塩化物イオンによるアルカリ供給量の影響は小さいものと考えられる。一方で、県内は、高温多湿環境であるため、水分供給量は本土と比較して多いもの予想される。K 橋の橋脚では、著しい進展が見られたものの、PC 中空床版の下面側では、橋脚ほどのひび割れ発生やその進展は見られなかった。これは、斜πラーメン橋の橋脚が雨水の水掛り部となっていたためだと考えられる。また、橋脚下端では、草木の茂みが多くコンクリートが乾燥しにくい環境であったため、コンクリートが常に高含水状態となり ASR 劣化が促進されているものと考えられる。

(2) 推定アルカリ量による影響

前述した通り、飛来塩分量の影響は小さいものと考えられるが、K 橋は、高強度コンクリートであることからセメント量が多く、建設当時のアルカリ量は高かったものと推察される。Regourd¹²⁾らは、エトリンガイトの生成がひび割れを生じさせることで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が溶解して OH が増大することを報告しており、これが ASR を生じやすくさせると考察されている¹³⁾。したがって、遅延膨張性 ASR で劣化が顕著となった要因をアルカリ量の観点から推察した。アルカリ量の試験で用いたコアは、P1 橋脚から2箇所採取し、アルカリ溶出の影響が懸念されることから、表層から250～300mm 深部を試験として用いた。「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」(総プロ法)によって抽出されたアルカリ量は、P1-1 で $1.7\text{kg}/\text{m}^3$ 、P1-7 で $1.8\text{kg}/\text{m}^3$ であった。図-9 にアルカリ量の推定結果を示す。総プロ法におけるナトリウムの回収率は60%、カリウムの回収率は80%¹⁴⁾とされていることから、これに基づきアルカリ量を補正すると P1-1 で $2.7\text{kg}/\text{m}^3$ 、P1-7 で $2.8\text{kg}/\text{m}^3$ であり、現行のアルカリ総量規制値 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 未満となることが示された。以上のことから、過剰なアルカリ量によって損傷が著しく進展したとは考えにくい結果となった。

(3) 細骨材ペシマム混合率による影響

次に細骨材のペシマム混合率に着目した。遅延膨張性

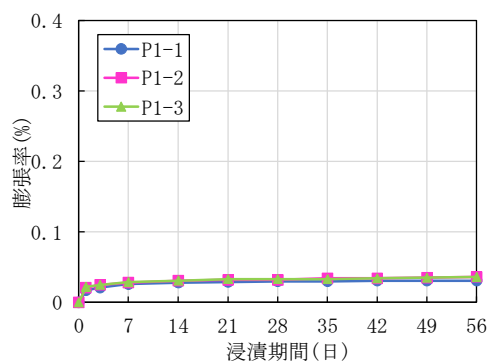


図-8 促進膨張量試験結果 (飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浸漬法)

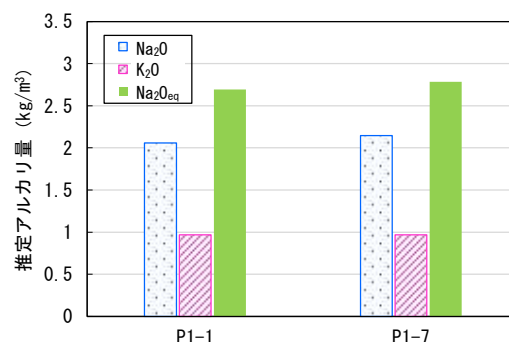


図-9 アルカリ量の推定

ASR にはペシマム現象は顕著ではない⁸⁾ことが知見として挙げられるが、沖縄県で使用されている細骨材は粒度調整のため、海砂と石灰岩砕砂の混合砂を用いることが多く、Katayama らの報告⁹⁾では、沖縄県の海砂 (反応性) と石灰岩砕砂 (非反応性) にペシマム混合率を示す事例が示されている。また、文献¹⁾では、アルカリ溶液浸漬法の結果、海砂と石灰岩砕砂の混合率によって膨張が大きく異なっており、その質量比が 1:1.5 の時に最も膨張が大きくなることを示している。これに対して、K 橋では、反応性と非反応性の比率が約 1:0.8～1:1.2 程度である。したがって、ペシマム混合率が一要因となって、損傷が顕在化したと推察されるが、結論に至るためには今後の検討が必要である。

(4) 遅延膨張骨材による反応形態

堆積岩や変成岩などの遅延膨張性骨材の場合、骨材中の鉱物自体も反力障壁となるほか、骨材周囲の C-S-H がひび割れを閉塞し、二次的な反力障壁となることが指摘されている¹⁵⁾。K 橋では、細骨材に堆積岩であるシルト岩や粘土岩が確認され、骨材やセメントペーストを貫通するひび割れが認められた (写真-2)。そこでは一般的に反応性鉱物とされる隠微晶～微晶質石英が緻密に固結しており、これらが ASR ゲルの膨張圧に対する反力障壁となることで、コンクリート構造物にひび割れが発生したものと推察される。

以上の結果を整理すると、K 橋においてひび割れが著しく進展した要因としては、水分供給、ペシマム混合率、コンクリートの圧縮強度（密実性）が考えられる。

5. まとめ

K 橋に生じたひび割れの発生要因について、岩石学的手法を用いて考察した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 細骨材は、隠微晶～微晶質石英、石英、絹雲母、緑泥石で構成されていた。それらは反応性鉱物として隠微晶～微晶質石英が含まれており、ひび割れ発生要因は、遅延膨張性 ASR であると推測された。
- (2) EDX 分析の結果、ASR ゲルは、ロゼット状とゲル状が混在していたことから、近年まで ASR が進行していたことが予想された。
- (3) SEM 観察の結果、骨材周囲を主としたエトリンガイトの生成が確認されたことから、DEF の可能性を疑って飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浸漬法を実施したが、膨張ポテンシャルは確認されなかった。
- (4) ひび割れが著しく進展した要因としては、水分供給、コンクリートの圧縮強度（密実性）、ペシマム混合率、が考えられる。

謝辞

沖縄県における ASR 劣化事例の調査として、八重瀬町役場の皆様には現場提供をご快諾いただきました。この場をお借りして深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 富山潤，大城武，新城竜一，金城和久：遅延膨張性を示す細骨材に起因したアルカリ骨材反応に関する基礎研究と抑制対策，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp. 1049-1054，2011
- 2) 宮里昂志，富山潤，宮城敏明，森裕介，知念正昭：遅延膨張性 ASR により劣化したコンクリート橋における亜硝酸リチウムの膨張抑制効果検証，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 23 巻，Vol. 23，pp. 467-472，2023.10
- 3) Godart, B., de Rooij, M. and Wood J.G.M.: Guide to diagnosis and appraisal of AAR damage to concrete in structures. Part 1 diagnosis (AAR6.1). Springer, Berlin, p.89, 2013.
- 4) (社)日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書，p.132，2008
- 5) 片山哲哉：アルカリシリカ反応入門 3 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，pp.1083-1090，2014
- 6) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., and Yamato, T.: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan. Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008.
- 7) 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会：報告書，(社)日本コンクリート工学協会，2008.9
- 8) (公社)日本コンクリート工学会：ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書，p205-319，2014.7
- 9) 鳥居和之，山田一夫：コンクリート診断，2017
- 10) (公社)日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2019
- 11) Thomas, M. et al.: Diagnosing Delayed Ettringite Formation in Concrete Structures, Cement and Concrete Research, Vol.38, pp.841-847, 2008.
- 12) M. Regourd, H. Hornain, P. Poitevin: The Alkali-Aggregate Reaction-Concrete Microstructural Evolution, Proceedings of the 5th International Congress on Alkali Aggregate Reactions, Cape Town, S252/35, 1981.
- 13) Y. Shimada, V.C. Johansen, F. MacGregor Miller, T.O. Mason: Chemical Path of Ettringite Formation: A Literature Review, Portland Cement Association, 2005.
- 14) 西政好，池田隆徳，佐川康貴，林建佑：遅延膨張性骨材による ASR 劣化事例および骨材の ASR 反応性検出法の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，2010
- 15) 川端雄一郎，広野真一，岩波光保，加藤絵万：岩石学的観察に基づく ASR による各種反応性骨材の損傷形態と損傷過程の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011