

# 論文 タイ国の高速道路で発見された熱帯地域における ASR の実態

広野 真一\*1・安藤 陽子\*2・山田 一夫\*3・鳥居 和之\*4

**要旨:** 日本の政府開発援助により、タイ国に建設された高速道路のコンクリートのひび割れによる劣化原因について、岩石学的試験に基づく分析を行った。その結果、粗骨材には花崗岩マイロナイトのものと石灰岩などを主体とするものがあり、前者に進行したアルカリシリカ反応 (ASR) の発生が認められた。観察結果は構造物の劣化とも対応し、劣化には ASR の関与が大きいと考えられた。細骨材は通常は非反応性の花崗岩であったが、軽微な ASR が発生していた。これについては、熱帯多雨地域での風化作用により溶脱したシリカから生成したオパールが原因と推察した。日本国内とは異なる熱帯気候下の特徴的な ASR が認められた。  
**キーワード:** アルカリシリカ反応, マイロナイト, 花崗岩, 風化作用, 岩石学的試験, 熱帯多雨地域

## 1. はじめに

日本の政府開発援助 (ODA) により、タイ国に建設された高速道路に、ひび割れなどを生じる深刻な劣化が発生した。この劣化原因については、タイ国内の研究機関により行われた調査結果で、アルカリシリカ反応 (ASR) とエトリンガイトの遅延生成 (DEF) の両者であるとの見解が示されている<sup>1)</sup>。一方、同研究機関から、日本の電力会社に対しても、この劣化原因についての調査依頼があり、現地での実地調査とともに、コンクリートコア試料の提供を受けた。本研究は、この調査の一環として行われたものであり、コア試料の岩石学的試験などに基づき、コンクリートの劣化原因を明らかにすることを主目的とするものである。



図-1 調査対象となった構造物の位置図

## 2. 構造物の概要と劣化状況

劣化の発生した高速道路はタイ国のバンコクとチョンブリーを結ぶものであり、全長は 55km に達する (図-1)。日本の ODA により建設され、1998 年 3 月から一部で供

用、2000 年 2 月より全線で供用されている。劣化は構造物全体の半数近くに相当する 1000 を超える Pile Cap (フーチング) と X 型 PC 橋脚の部材において、主にひび割れとして発生 (写真-1) し、とくにフーチングには調査対象の約 1 割に幅 3mm を超える顕著なものを含む、密集した地図状のひび割れが発達している。このひび割れは 2004 年には既に認識され、エポキシ樹脂注入による補修がなされたが、その後もひび割れは拡大し、新たなひび割れの発生による再劣化が確認されている。タイ国の高速道路のフーチングはタールエポキシなどの防水処理がなく、また一部は埋め戻しもされていないために、降雨時には周囲が湛水する (写真-1 の 1))。一方、橋脚のひび割れはフーチングと比較してかなり軽微である。また、上部構造 (スーパーストラクチャー) にはプレキャスト製品が使用されており、劣化は認められていない。本研究で試験したコア試料は、1998 年に建設された構造物のフーチングから採取されたものである。

## 3. 試料

コンクリート構造物の劣化程度は、タイ国での調査により、外観目視によるひび割れ密度とひび割れ幅とから、4 段階に分類されていた。本研究で使用する試料は、劣化程度の 4 段階の分類に対応した 4 地点のフーチングから採取されたコンクリートコア試料 (φ=68mm) である。劣化程度の分類と、それに対応するコア試料の名称を表-1 に示す。

## 4. 試験方法

### 4.1 岩石学的試験

#### (1) 偏光顕微鏡下での観察

\*1 (株) 太平洋コンサルタント 解析技術部 (学生会員)

\*2 (株) 太平洋コンサルタント 解析技術部

\*3 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター フェロー 工博 (正会員)

\*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)



写真-1 構造物の劣化状況

表-1 劣化程度の種類とコア試料の名称

劣化程度			
非常に顕著 (A lot of wide cracks)	顕著 (A lot of cracks)	中程度 (Few cracks)	健全 (No crack)
フーチング A	フーチング B	フーチング C	フーチング D

試料より、厚さ 15~20 $\mu$ m 程度のコンクリート研磨薄片試料を作製した。これについて偏光顕微鏡下で観察を行い、粗骨材と細骨材を構成する岩石種や構成鉱物ならびに ASR の発生・進行状況を含むコンクリート組織の観察を行った。ASR の進行状況については、Katayama et al. (2008)<sup>2)</sup> に従い、表-2 に示すように分類した。通常、ASR は 1 → 4 の順序で進行し、これが構造物の外観目視による劣化状況とも、よく対応することが確認されている。

表-2 Katayama et al. (2008)<sup>2)</sup> に基づく

ASR の進行状況の分類

分類	ASR の進行状況
1	骨材の反応リムの形成と骨材周辺の ASR ゾル/ゲルの滲出
2	骨材内のひび割れ形成と ASR ゲルの充填
3	骨材を取巻くセメントペーストへのひび割れ進展と ASR ゲルの充填
4	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 ゲルの沈殿

## (2) 走査電子顕微鏡による観察

軽微な ASR による微細な生成物については偏光顕微鏡下のみでの同定が困難なため、同じコンクリート研磨薄片試料について、走査電子顕微鏡 (SEM) による観察とエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による成分分析を行った。装置には、SEM 観察は日本電子社製 JSM-7001F を、また EDS 成分分析はオックスフォード・インストゥルメンツ社製 INCA Penta FET x3 を使用した。試料は偏光顕微鏡観察に使用した研磨薄片に、電子線の導通処理のために炭素を蒸着したものである。

## 4.2 水溶性アルカリ量の分析

水溶性アルカリ量の測定については、「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<第二編> 3.3 コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法 (案)」に準拠した。

## 5. 試験結果

### 5.1 岩石学的試験

#### (1) 偏光顕微鏡下での観察

偏光顕微鏡下での観察に先立ち、コンクリートの切断面について予察的に行った肉眼と実体顕微鏡下での観察の結果、骨材の種類として、粗骨材は最大寸法 20 mm 程度の碎石、細骨材は天然の砂であった (以下、「砂」は地質学的な粒径区分ではなく、骨材の種類としての天然の砂を指す)。劣化程度の大きい位置から採取された試料では、粗骨材に割れや ASR ゲルの滲出が認められた。一方、細骨材には ASR が疑われる顕著な現象は認められなかったものの、一部の試料で骨材粒子周辺への ASR ゲルの滲出が確認された。

コア試料より作製した研磨薄片試料の、偏光顕微鏡下

表-3 コア試料の偏光顕微鏡観察結果

コア試料	フーチング A	フーチング B	フーチング C	フーチング D
岩石種構成 (粗骨材)	花崗岩マイロナイト (4)	花崗岩マイロナイト (3)	花崗岩マイロナイト (2) 泥質ホルンフェルス (2) 石灰岩 (2), チャート (2)	石灰岩 (2)
岩石種構成 (細骨材)	花崗岩 (2)	花崗岩 (2)	花崗岩 (2)	花崗岩 (2)
コアの ASR の進行	4	3	2	2

での観察結果を表-3 に示す。表中には、それぞれの骨材を構成する岩石種と岩石種ごとの ASR の進行状況の観察結果、試料全体の ASR の進行状況の総合評価を示してある。粗骨材には、試料により花崗岩マイロナイトを主体とするものと、石灰岩または泥質ホルンフェルスを多く含むものが認められた。そして粗骨材を構成する岩石種のうち、花崗岩マイロナイトに進行した ASR が確認された。これは、コンクリート構造物の外観目視による劣化程度と、よく対応していた。花崗岩マイロナイトとは、原岩である花崗岩が断層運動の影響下で圧砕（塑性変形と破砕変形）を受けた岩石で、岩石組織はこれらの作用により部分的または全般的に細粒化している。写真-2 に、花崗岩マイロナイトと石灰岩のそれぞれに発生した ASR の偏光顕微鏡写真を示す。前者では顕著な膨張ひび割れが骨材粒子からセメントペーストに進展している（写真中の矢印）のに対し、後者では微細な膨張ひび割れが骨材粒子内部のみに認められた。これらの粗骨材は ASR 反応性鉱物として、いずれも微晶質石英を含むが、花崗岩マイロナイトでは断層運動に伴う圧砕作用により粗粒な石英から生成したもの、石灰岩では不純物として含まれる泥分に由来するものである。微晶質石英を多量に含む花崗岩マイロナイトの偏光顕微鏡下での組織を写真-3 に示す。圧砕作用により、写真の左右方向に引き延ばされたり微粒化した石英や岩石の組織がわかる。

一方、細骨材は全試料に共通で、花崗岩起源の砂であった。コンクリートの切断面において、この砂には ASR ゲルの滲出と疑われる現象が認められ（写真-4：フーチング D の例）、偏光顕微鏡下では ASR によるひび割れと疑われる極微細な脈が骨材粒子内に存在していた（写真-5）。細骨材の ASR は粗骨材と比較して軽微であり、コンクリート構造物の劣化程度とも対応していないため、大きな関与は考えられない。しかし、このような微晶質石英を含まない花崗岩に関しては、日本国内では一般に非反応性と認識され、ASR の事例も知られていないことから、ASR 発生の有無を確定するために、後述する走査電子顕微鏡による観察を行った。

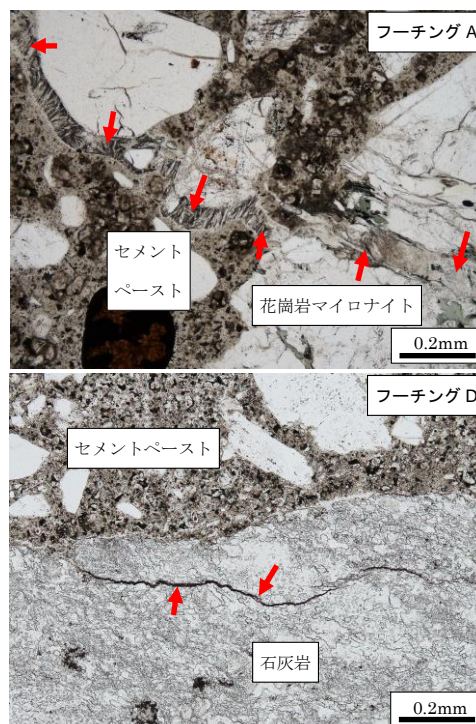


写真-2 粗骨材に発生した ASR の偏光顕微鏡写真

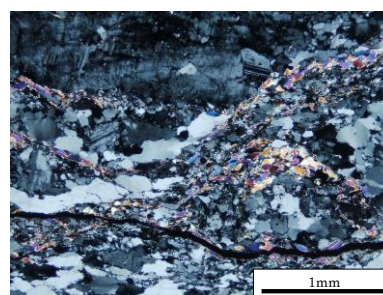


写真-3 花崗岩マイロナイトの岩石組織

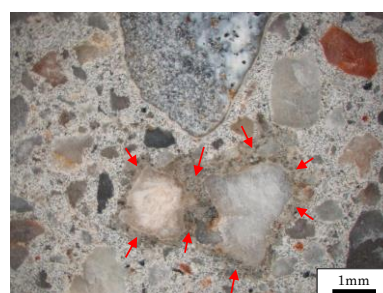


写真-4 花崗岩起源の砂と ASR ゲルの滲出

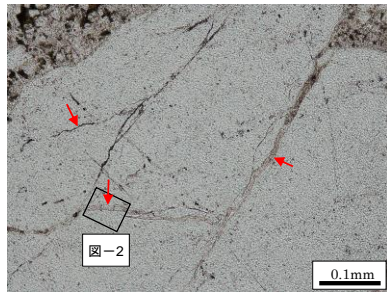


写真-5 花崗岩起源の砂に見られる脈

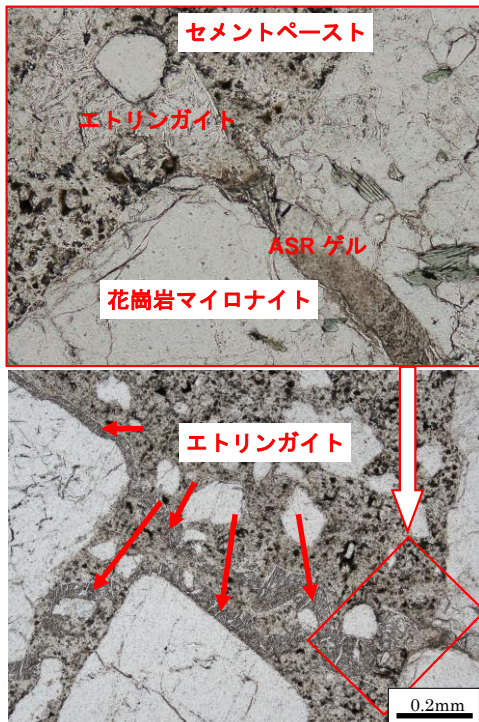


写真-6 エトリンガイトの産状（フォーチング A）

エトリンガイトは、全試料でセメントペースト中の気泡や、骨材とセメントペーストとの界面などに多く生成していた。ASR の進行したフォーチング A とフォーチング B では、骨材粒子からセメントペーストへ連続する ASR によるひび割れ内にもエトリンガイトが多く生成していた（写真-6）。

## (2) 走査電子顕微鏡による観察

ASR ゲルの滲出や極微細な脈を伴う花崗岩の細骨材粒子について、SEM-EDS による分析を行った。図-2 は写真-5 の脈の二次電子像による拡大と成分分析結果である。形態と成分から非晶質の ASR ゲルであり、脈はひび割れを ASR ゲルが充填したものであることが確かめられた。また、この花崗岩には写真-7 に示すように白雲母または黒雲母が変質し、非晶質ないし低結晶質の物質を生成している部分が偏光顕微鏡下でしばしば見られたが、このような部分の多くには図-3 の反射電子像と成分分析結果に示すように ASR ゲルの結晶化による二次生成物（ロゼット状の ASR ゲル）が生成していた。以

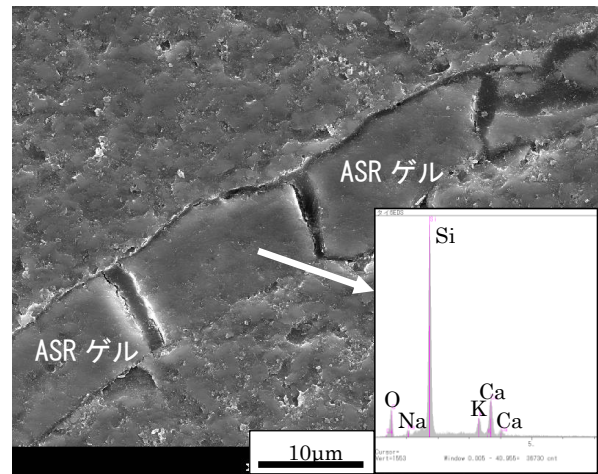


図-2 脈の二次電子像と成分分析結果

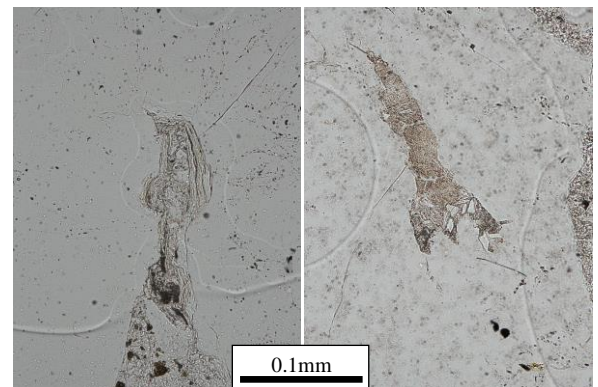


写真-7 花崗岩起源の砂に見られる雲母の変質物

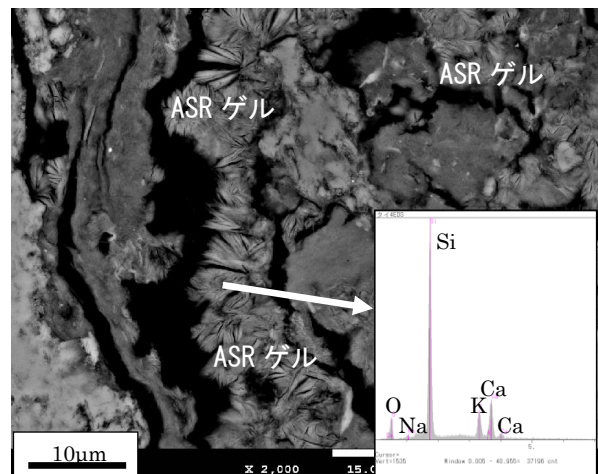


図-3 雲母の変質物付近の反射電子像と成分分析結果

上から、花崗岩の細骨材粒子に ASR が確認され、それは雲母の変質物に起因する可能性が示唆された。

## 5.2 水溶性アルカリ量の分析

等価アルカリ量 ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ) の結果を表-4 に示す。数値は、総プロ法によるアルカリの回収率補正を行ったものである。また、コンクリートの単位容積質量は  $2250\text{kg/m}^3$  と仮定してある。

アルカリ総量の推定値はいずれの試料も比較的小さく、日本国内での総量規制値  $3.0\text{kg/m}^3$  と比較しても十分に小さいものであった。

表-4 水溶性アルカリ量 ( $\text{Na}_2\text{Oeq}$ ) の分析結果

フーチング	A	B	C	D
%	0.1139	0.1126	0.0897	0.1102
$\text{kg/m}^3$	2.56	2.53	2.02	2.48

## 6. 考察

### 6.1 劣化の主要原因

フーチング A とフーチング B の粗骨材は花崗岩マイロナイトからなり、一方でフーチング C とフーチング D は石灰岩または泥質ホルンフェルスを多く含むものであった。膨張と劣化の原因であり証拠でもある ASR ゲルで充填された膨張ひび割れは、花崗岩マイロナイトの粗骨材に顕著に生成していることが確認され、これがコンクリート構造物の外観目視による劣化程度とも一致していた。花崗岩マイロナイトは、ASR 反応性鉱物として微晶質石英を多量に含んでいた。したがって、劣化には ASR が最も大きく関与していると考えるのが自然である。

なお、従来の研究に見られるように、比較的アルカリ量の少ない環境下での遅延膨張性骨材による比較的早期の ASR 劣化は温暖・湿潤な地域に特徴的なもの<sup>2)</sup>でもあり、ASR に関して日本国内より厳しい環境が推察される。

さらに、タイ国の高速道路のフーチングはタールエポキシなどの防水処理がなく、また一部は埋め戻しもされていないために、降雨時に周囲が湛水する。そのため、コンクリートへの水分供給が著しく、これも熱帯気候と相まって ASR を促進した要因と考えられる。コンクリートの湿潤状態を緩和するために、フーチングの表面防水処理と埋め戻しを行うことは、当面の ASR 抑制対策として有効であると考えられる。

### 6.2 エトリンガイトの産状と DEF との関連

全ての試料について、セメントペースト中の気泡や、骨材とセメントペーストとの界面などにエトリンガイトの生成が多く認められた。とくに、フーチング A とフーチング B では、ASR によるものであることが明らかになり、ひび割れ内にエトリンガイトが多く生成していた (写真-6)。したがって、ASR の進行した試料ではエトリンガイトがより多く観察されるが、これらは気泡や ASR によるひび割れなどの既存の空隙に生成したものである。一方、DEF による膨張は C-S-H 中にエトリンガイトが生成することで発生する<sup>3)</sup>ものであり、既存の空隙に生成したエトリンガイトは膨張とは無関係である。したがって、エトリンガイトが劣化に寄与した証拠は見出されていない。

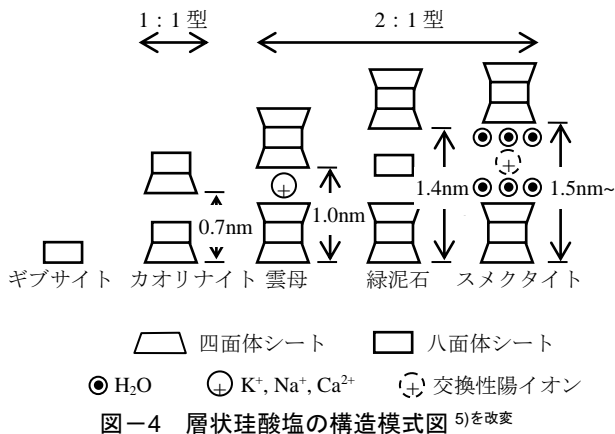
### 6.3 細骨材の ASR と反応性鉱物

粗骨材と比較して軽微であり、劣化に大きく関与したとは考えられないが、花崗岩起源の砂からなる細骨材にも ASR が認められた。微晶質石英を含まない花崗岩に関して日本国内では一般に非反応性と認識されているが、熱帯地域で風化した花崗岩が割れ目を充填したオパールにより反応性を示した事例が世界にはある<sup>4)</sup>。

本研究の観察範囲では、ASR は花崗岩の砂にしばしば見られる白雲母または黒雲母の変質により生成した非晶質ないし低結晶質な物質に伴い発生しているのが確認された。これらの物質の正体として、アロフェンやオパールなどが考えられるが、ASR 反応性鉱物である後者の成因について、以下のとおり考察する。

岩石が著しい変質を受け、オパールを生成する原因として、一般には珪化変質作用などを含む熱水変質作用が考えられる。これには岩石全体に著しい成分溶脱と珪化 (シリカの付加) が伴われる場合が多いが、本試料の花崗岩の観察結果はそのようなものではない。

次に、タイ国の温暖・湿潤な熱帯性の気候下での風化作用について考える。雲母と、その変質により生成する粘土鉱物はいずれも、 $\text{SiO}_4$  が 2 次元的に連続した四面体シートと  $\text{Al}(\text{OH})_6$  が同じく 2 次元的に連続した八面体シートとを基本的な構造とする (図-4)<sup>5)</sup>。日本国内で粗骨材や細骨材中に見られる花崗岩では、四面体シートと八面体シートが 2:1 に組み合った雲母の風化変質により、同じく 2:1 に組み合ったスメクタイトや緑泥石を生成しているのが観察される場合が多い。しかし、タイ国においては高温・多湿な環境と水質の違いなどにより 1:1 に組み合ったカオリナイトや四面体シートを持たないギブサイトを生成し、結果として溶脱・遊離した四面体シートがオパールなどのシリカ鉱物の生成に関与した可能性がある。すなわち、風化作用により生成する鉱物組み合わせは環境により異なり、とくに気候による影響としては降水量が増すにつれ、風化生成物として、スメクタイト→カオリナイト→ギブサイトのように卓越する変質鉱物が異なることが知られており<sup>6)</sup>、温度が高いことにより風化変質そのものも促進される (図-5)<sup>6)7)</sup>。一方、日本の花崗岩にも変質によりカオリナイトを多量に生じたものがあり、著しいものは陶磁器原料としても使用されているが、その多くは過去の温暖・湿潤な地質時代の風化変質により生成した化石風化殻<sup>8)</sup>または熱水変質に由来するものと考えられている。また、コンクリート用骨材として利用されることもない。したがって、日本国内で花崗岩が ASR を起こした事例はほとんどないが、とくに熱帯～亜熱帯の多雨地域では、本来は ASR 反応性を示さない岩石が風化変質することにより ASR を発生する可能性が考えられる。なお、確認のためには、変質し



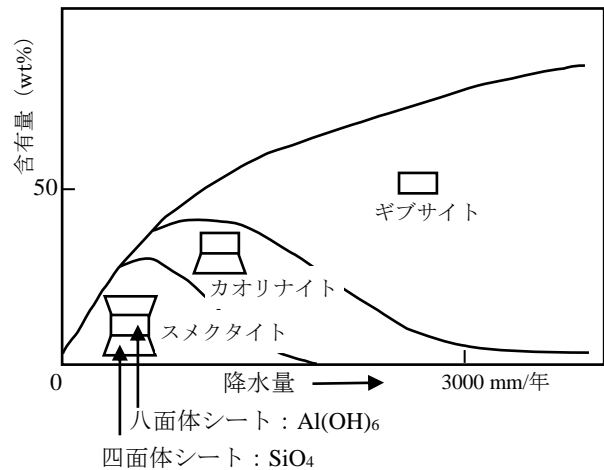
た雲母などについて、今後、詳細に分析する必要がある。

## 7. まとめ

- (1) コンクリート構造物の劣化程度と観察された ASR の進行状況、骨材岩石種などとの対応から、劣化には ASR の関与が最も大きいと考えられた。ASR は粗骨材の微晶質石英を含む花崗岩マイロナイトに、比較的アルカリ量の少ない環境下で発生していた。
- (2) いずれの試料についてもエトリンタイトの生成が多く認められた。ASR の進行した試料ではより多く観察されたが、ASR によるひび割れなどの既存の空隙に生成したためであり、エトリンタイトが劣化に寄与した証拠は見出されていない。
- (3) 細骨材の花崗岩中で雲母の変質により生成した非晶質ないし低結晶質な物質に伴い、軽微な ASR が発生しているのが観察された。これには熱帯多雨地域での風化作用が関与している可能性が考えられる。
- (4) 遅延膨張性骨材による比較的アルカリ量の少ない環境下での早期反応やオパールを生じる風化作用の可能性、などの熱帯多雨地域における日本国内とは異なる ASR の発生状況が考えられた。
- (5) フーチングの表面防水処理と埋め戻しは、当面の ASR 抑制対策として有効であると考えられる。

## 謝辞

本研究は、日本の ODA でタイ国に建設された高速道路について、電源開発株式会社による調査の一環として行われたものである。同社の鍵本広之所長代理には調査全体にわたり、多大なご尽力をいただいた。タイ国タマサート大学の Somnuk 教授には情報提供や現地調査でお世話になった。「野村昌弘の研究所」の野村昌弘代表にはアルカリ量の分析でご協力いただいた。(株)太平洋コンサルタントの片山哲哉博士には、内容を議論していただき教示を受けた。その他の関係者を含め、ご協力いた



いた皆様に深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Lalita, B., Warangkana, S., Pongsak, C. and Somnuk, T. : Diagnosis of a Combined Alkali Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation, Tammasat International Journal of Science and Technology, Vol.17, No.4, pp.22-35, Oct.-Dec. 2012
- 2) Katayama, T. et al. : 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 (ICAAR), Trondheim, Norway, pp.862-873, Jun. 2008
- 3) Thomas, M. et al. : Diagnosing Delayed Ettringite Formation in Concrete Structures, Cement and Concrete Research, Vol.38, No.6, pp.841-847, 2008
- 4) Thaulow, N. : Alkali-Silica Reaction in the Itezhtezhi Dam Project, Zambia, Proceedings of the 6th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), pp.471-477, Jun. 1983
- 5) 白水晴雄：粘土鉱物学—粘土科学の基礎—, 朝倉書店, pp.11-25, 1988.3
- 6) Barshad, I. : The Effect of a Variation in Precipitation on the Nature of Clay Mineral Formation in Soils from Acid and Basic Igneous Rocks, Proceedings Inter. Clay Conf., Jerusalem, Vol.1, pp.167-173, 1966
- 7) 吉村尚久ほか：粘土鉱物と変質作用, 地学団体研究会, pp.156-161, 2001.7
- 8) 木宮一邦：三河高原の風化殻とその形成時期—花こう岩の風化・第3報—, 地質学雑誌, Vol.87, No.2, pp.91-102, 1981.2