

論文 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

河村直哉^{*1}・川端雄一郎^{*2}・片山哲哉^{*3}

要旨：本論は、施工後約 20 年経過した空港コンクリート舗装で生じた ASR の発生原因について、調査結果を報告するものである。コンクリートのアルカリ収支の検討によると、セメント由来のアルカリ総量は 3.0kg/m^3 を下回っていたにも関わらず、ASR によるひび割れが生じた。ASR の発生原因は、きわめてアルカリ反応性の高いオパール等を含む山砂が細骨材に含まれていたことによるペシマム現象であり、骨材からのアルカリ溶出が ASR を促進させたことが推察された。これらの結果から、現行の ASR 抑制対策および空港コンクリート舗装における点検方法について考察した。

キーワード：ASR, 空港コンクリート舗装, 岩石学的評価手法, アルカリ収支

1. はじめに

国土交通省の通達によると、1986 年以降、コンクリート構造物に対するアルカリシリカ反応 (ASR) の抑制対策は、3 つの対策のいずれかを満たすことにより行われている。その結果、ASR によるコンクリート構造物の劣化は減少し、抑制効果は顕著であったと考えられてきた。しかしながら、対策がなされた構造物であっても、近年、ASR による構造物の劣化事例が報告され始めている。尾花ら¹⁾は、PC 舗装の ASR による劣化事例を検証しており、コンクリートのアルカリ総量が規制値を満足しているものの、ASR が発生したことを報告している。また、Katayama ら²⁾は、規制値を満足するコンクリートと満足しないコンクリートの劣化原因を詳細に検討しており、現行の対策では、ASR を抑制できない骨材が存在することを指摘している。以上のように、ASR によるコンクリート構造物の劣化が現在でも生じているのが現状である。

ところで、日本の空港施設では、ASR により劣化したコンクリート構造物に関する調査事例は未だ少なく、ASR の発生状況や原因はほとんど明らかにされていない。特に、航空機荷重が作用するコンクリート舗装では、ASR による舗装の変状やその進行過程が明らかにされておらず、現状では ASR に関する有用な舗装の点検方法はない。このことから、空港舗装における ASR の発生状況を把握し、劣化の原因や特徴を整理することは、抑制対策や点検方法の提案に繋がり、航空機運用の安全性向上に資すると考えられる。

ASR の生じた原因を明らかにするためには岩石学的手法を用いた評価が重要である。Katayama ら²⁾は、先進的な岩石学的手法を用いて ASR による劣化構造物の調査を行うことにより劣化原因を特定しており、その有効性を示している。その後、林ら³⁾や濱田ら⁴⁾などにより岩石学的評価がコンクリート構造物の ASR 劣化事例に

適用されており、その有効性が証明されてきた。

本論では、ASR 抑制対策がなされた空港コンクリート舗装の ASR 劣化事例について、岩石学的評価に基づき発生原因を調査し、その結果に基づき現行の ASR 抑制対策および空港舗装における点検方法について考察した。

2. 調査概要

2.1 調査対象舗装

調査対象とした空港舗装は、施工後約 20 年が経過した無筋コンクリート舗装 (以下、NC 舗装) である。深さ約 13cm に鉄網、深さ約 25cm にはダウエルバーが配置されている。施設の立地条件および使用目的より、凍害や凍結防止剤散布はなく、輪荷重の作用頻度も低い。目視で表面にひび割れが発生していない版 (以下、健全部) と発生した版 (以下、非健全部) が確認された。ひび割れが発生した NC 版は、全コンクリート版の約 4 割であった。これらのコンクリート版に使用された骨材は、同時期に同一プラントから搬入されたものである。本研究では、健全部および非健全部よりコアを採取し、比較検討することによりひび割れの発生原因を調査した。

2.2 調査項目

(1) 舗装表面の観察

舗装表面の状態が場所により異なることから、舗装表面におけるひび割れの有無や程度を肉眼により観察した。

(2) 採取コアの観察

採取したコアを 1~2 日間封緘し、コア側面における反応生成物やひび割れなどの変状を肉眼により観察した。なお、非健全部のコアの採取位置は、隅角部のひび割れ箇所より採取した。

(3) 偏光顕微鏡による薄片観察

健全部と非健全部より採取したコアを用いて、鏡面研磨薄片 ($2.5 \times 3.5\text{cm}$, 厚さ $15 \sim 20\mu\text{m}$) を作製し、同一視

*1 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造研究領域空港舗装研究チーム 修士(システム生命科学) (正会員)

*2 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造研究領域構造研究チーム 博士(工学) (正会員)

*3 (株) 太平洋コンサルタント 解析技術部 前 川崎地質 (株) 博士(理学) (正会員)

野で透過光・反射光の切り替えが可能な反射偏光顕微鏡で観察(×25～×200)を行った。ひび割れ等の変状箇所把握、骨材の種類(粗骨材、細骨材)、ASR 反応の有無と進行程度に基づき劣化度を確認し、反応した骨材の岩種と鉱物の特定、生成物の存在状態を明らかにした。

(4) アルカリ収支の検討

健全部および非健全部より採取したコアのアルカリ収支を、Katayamaの方法²⁾に従い検証した。まず、粗骨材に起因するアルカリおよびモルタルに起因するアルカリを区別するために、採取コアを粗骨材およびモルタルに分離し、総プロ法⁵⁾に準拠して、それぞれの水溶性アルカリ量を測定した。次に、エネルギー分散型スペクトル分析装置(EDS:加速電圧15kV、ビーム電流0.12nA)により、鏡面研磨薄片内の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)の化学組成を定量分析し、最小アルカリ量を求めた。この値には、コンクリートの混練時に溶解する硫酸アルカリのアルカリ量が含まれていない。そのアルカリ量を補正して、セメント由来のアルカリ総量を推定するとともに、仮定を用いてセメントの水溶性アルカリ量に換算した²⁾⁶⁾。このように推定したセメント由来のアルカリ総量と、粗骨材やその他の部分(細骨材や混和剤)の水溶性アルカリ量(コアの水溶性アルカリ量から、セメント起源と粗骨材の水溶性アルカリ量を差し引く)を合計し、コンクリートのアルカリ総量を求めた。

(5) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

健全部および非健全部より採取したコアを用いて、コ

ンクリート圧縮強度試験(JIS A 1108)および静弾性係数試験(JIS A 1149)を実施した。

(6) 促進膨張試験(カナダ法)

健全部および非健全部より採取したコアを用いて、促進膨張試験(いわゆるカナダ法:直径50mm、長さ130mm、80°C、1規定のNaOH溶液に浸漬)⁹⁾を実施した。

3.調査結果

3.1 舗装表面の観察結果

写真-1 から写真-3 に、調査対象舗装の表面状態を示す。写真-1 では、表面にひび割れが発生していないコンクリート版を確認することができる。また、写真-2 および写真-3 では、ひび割れが生じたコンクリート版を示している。隅角部にひび割れが局所的に発生していた箇所(写真-2)や隅角部から目地に沿って円弧状のひび割れ(いわゆるDクラック)が発生していた箇所(写真-3)が認められた。また、隣接する版では隅角部のひび割れの程度が異なっていた。以上のことから、コンクリート版の劣化程度には差のあることが推定された。写真-4 には、ひび割れ箇所の拡大写真を示す。ひび割れからの生成物の析出やポップアウトが確認された。

3.2 採取コアの観察結果

写真-5 および写真-6 に、健全部および非健全部から採取したコアを示す。健全部のコア側面にはひび割れは認められないが、細骨材のまわりにASRゲルが滲出し、細骨材がポップアウトしている箇所も認められた。一方、非健全部のコアには水平方向にひび割れが発生していた。

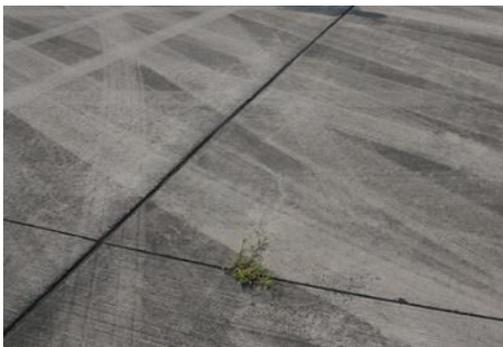


写真-1 ひび割れのないコンクリート版



写真-2 隅角部にひび割れが発生したコンクリート版



写真-3 円弧状に進展したひび割れ



写真-4 ひび割れの拡大写真

鉄網およびダウエルバーの深さではコアが破断し、下側は多数のひび割れによりコアの原形を留めていなかった。

また、骨材には反応リムの生成、ASRゲルの滲出およびポップアウトが確認された。これらは、ASRを特徴づける現象であることから、当該舗装では表面のひび割れの有無に関わらず、ASRが発生したことが示唆された。

3.3 偏光顕微鏡による薄片観察の結果

表-1に、健全部および非健全部から採取したコアにおいて観察された、細骨材および粗骨材の岩種と鉱物の種類、ASRの進行状況、劣化度を示す。表中のASRの頻度は、各進行段階の鉱物の頻度を表している。進行状況は、以下の5段階の反応の進展度に基づき判定した²⁾⁶⁾。

[1] 骨材の反応リム形成



写真-5 健全部より採取したコア



写真-6 非健全部より採取したコア

表-1 ASRの進行状況

| | 岩種 | ASR進行段階 → | | | | 劣化度 評価 | | |
|---------|------|------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------|-----|---|
| | | [1] | [2] | [3] | [4] | | [5] | |
| | | 骨材 反応リム | セメントペースト 滲み・取巻き | 骨材 ひび割れ・ゲル充填 | セメントペースト 気泡・ゲル充填 | | 顕微鏡 | |
| 健全部 | 粗骨材 | チャート | + | | | | | |
| | 細骨材 | 安山岩 | | ○ | | | | 1 |
| | | デイサイト | ○ | | | | | 1 |
| | | 流紋岩質溶結凝灰岩 | ○ | | | | | 1 |
| | | 珪質泥岩 | + | | ○* | ○ | | 3 |
| | | 放散虫珪質泥岩 | + | | ◎* | ◎ | ○ | 3 |
| | | 凝灰質砂岩 | + | | ○* | ○ | ○ | 3 |
| | | 放散虫チャート | + | | | | | 1 |
| | チャート | ○ | | | | | 1 | |
| 総合評価 | | | | | | 2 | | |
| 非健全部 | 粗骨材 | チャート | + | + | | | 1 | |
| | 細骨材 | 安山岩 | ○ | + | ○ | ○ | | 2 |
| | | 変質安山岩 | | + | ○ | ○ | ○ | 3 |
| | | デイサイト | ◎ | ◎ | | | | 1 |
| | | ガラス質流紋岩 | ◎ | ○ | ○ | ○ | ○ | 3 |
| | | 流紋岩 | ○ | ○ | | | | 1 |
| | | 流紋岩質溶結凝灰岩 | ○ | | | | | 1 |
| | | 凝灰岩 | ○ | | ◎* | ◎ | ○ | 3 |
| | | 凝灰質泥岩 | | | ◎* | ◎ | | 3 |
| | | 泥岩 | + | + | ○* | ○ | ○ | 3 |
| | | 石灰質泥岩 | ○ | | ◎* | ◎ | ○ | 3 |
| 放散虫珪質泥岩 | + | | ◎* | ◎ | ○ | 3 | | |
| チャート | ○ | ○ | + | | | 1 | | |
| 総合評価 | | | | | | 3 | | |

水色：火山岩および火山性堆積岩，ASRの頻度：◎ 顕著；○ あり；+ 痕跡程度 *：ポップアウトした骨材で確認劣化度の評価（顕微鏡観察結果）：3 顕著（加速期、劣化期）；2 中程度（進展期）；1 軽微（初期・潜伏期）

- [2] 骨材周辺の ASR ゲルの取巻き
 - [3] 骨材内のひび割れ・ASR ゲル充填
 - [4] 骨材からセメントペーストに進展したひび割れ・ASR ゲル充填
 - [5] セメントペースト内の離れた気泡への ASR ゲル充填
- なお、反応と損傷の関係は岩種ごとに異なるため、ASR の進行段階とは別に、ひび割れの密度や幅に基づき劣化度を判定した。例えば、進行段階が同様であっても非健全部の安山岩は劣化度が低く、健全部のポップアウトを生じた珪質泥岩はひび割れの密度や幅が大きいため劣化度が高い。健全部および非健全部の劣化度を土木学会の標準示方書の分類に合わせて評価すると²⁾、今回の健全部は進展期、非健全部は加速期・劣化期と判断される。

(1) 健全部

健全部のコンクリートの粗骨材はチャートを主体とする砕石で、砂岩も混入していた。細骨材は山砂であり、火山岩、泥質堆積岩および火山岩起源の鉱物片より構成されていた。ASR が顕著であったのは、泥質堆積岩（珪質泥岩、放射虫珪質泥岩および凝灰質砂岩）の砂であった。これらには、図-1 に示すように反応リムの内側に同心円状のひび割れ、および骨材内部から周囲のセメントペーストに向かう放射状の膨張ひび割れが生じており、ひび割れに ASR ゲルが充填されていた。放射虫珪質泥岩では、オパール質の放射虫化石が反応していた。

(2) 非健全部

非健全部のコンクリートの骨材は、健全部とほぼ同様であったが、チャート粗骨材砕石の比率が高く、ASR を示す細骨材の数が多いうえに、劣化度も高かった。最も顕著な反応はポップアウトで、泥質堆積岩（放射虫珪質

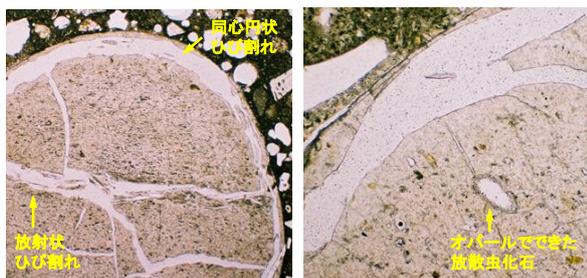


図-1 健全部コアで観察された放射虫珪質泥岩

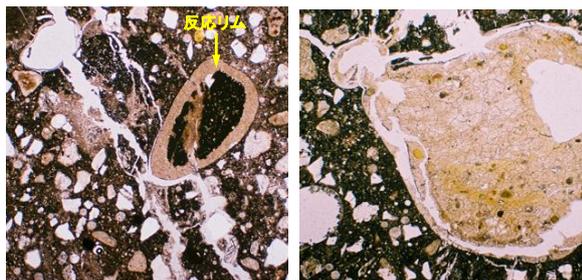


図-2 非健全部コアの薄片の観察結果

(左：ガラス質流紋岩、右：放射虫珪質泥岩)

泥岩、凝灰質泥岩、泥岩および石灰質泥岩) に集中している。この他に、火山岩（安山岩、変質安山岩、ガラス質流紋岩）にも反応が認められた。図-2 の左図には、反応リムの顕著なガラス質流紋岩を示す。火山ガラスが反応したもので、骨材の内部からセメントペーストに向かって ASR ゲルで充填されたひび割れが生じている。このひび割れは、コンクリート中に生じた平行なひび割れに連続しており、薄片観察によると周囲のセメントペーストは炭酸化していた。これは ASR により生じたひび割れに沿って、雨水の侵入と乾燥が長期間繰り返されたものと推定される。図-2 の右図にはポップアウトが生じた放射虫珪質泥岩を示す。同心円状のひび割れや放射状の膨張ひび割れが生じ、セメントペーストまで進展したひび割れや気泡内を ASR ゲルが充填している。他の泥質堆積岩と同様、オパール質の放射虫化石が反応していた。

3.4 アルカリ収支の検討結果

表-2 に未水とセメント粒子（クリンカー部分）の最小アルカリ量と水溶性アルカリ量の測定結果、セメント由来のアルカリ総量の推定結果を示す。セメント由来のアルカリ総量は、健全部で 2.3kg/m³、非健全部で 2.5kg/m³ であり、ほぼ同量であった。粗骨材とその他の材料（細骨材・混和剤など）に由来する水溶性アルカリ量の合計（コンクリートからセメント由来の水溶性アルカリ量を除いたもの）は、0.5~0.7kg/m³ であった。このことから、

表-2 コンクリートのアルカリ収支

| | クリンカー (EDS) | | | | セメント | | | |
|------|-------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 最小アルカリ | | 全アルカリ | | 水溶性アルカリ | | Na ₂ Oeq | |
| | Na ₂ O | K ₂ O | Na ₂ Oeq | Na ₂ Oeq | Na ₂ Oeq | Na ₂ Oeq | | |
| | % | % | % | % | % | kg/m ³ | kg/m ³ | |
| 健全部 | 0.43 | 0.21 | 0.56 | 0.73 | 0.68 | 2.28 | 1.37 | |
| 非健全部 | 0.42 | 0.29 | 0.61 | 0.79 | 0.74 | 2.49 | 1.49 | |
| | 粗骨材 (分離) | | その他 | | コンクリート | | | |
| | 水溶性アルカリ | | 水溶性アルカリ | | 水溶性アルカリ | | 総量 | |
| | Na ₂ O | K ₂ O | Na ₂ Oeq | Na ₂ Oeq | Na ₂ O | K ₂ O | Na ₂ Oeq | Na ₂ Oeq |
| | % | % | kg/m ³ | kg/m ³ | % | % | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 健全部 | 0.02 | 0.03 | 0.44 | 0.03 | 0.05 | 0.04 | 1.84 | 2.75 |
| 非健全部 | 0.03 | 0.03 | 0.54 | 0.13 | 0.06 | 0.05 | 2.16 | 3.16 |

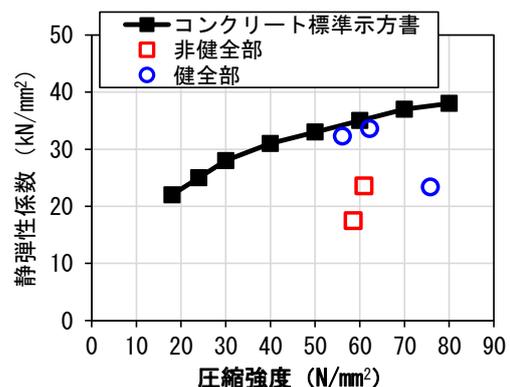


図-3 圧縮強度および静弾性係数試験の結果

コンクリートの総アルカリ量は健全部で 2.8kg/m^3 、非健全部では 3.2kg/m^3 となり、非健全部はやや多目であった。

3.5 強度試験結果

図-3 に圧縮強度試験および静弾性係数試験の結果を示す。健全部および非健全部における圧縮強度の平均値は、 64.7N/mm^2 および 59.7N/mm^2 であった。非健全部の強度は、健全部の強度と比較すると 1 割程度小さいが、明確な差があるとは言えない。静弾性係数の平均値は、健全部で 29.8kN/mm^2 、非健全部では 20.5kN/mm^2 であった。非健全部は、健全部の静弾性係数と比較して 3 割程度小さかった。また、コンクリート標準示方書に示される値と比較すると、非健全部より採取した全てのコアおよび健全部の 1 か所で静弾性係数の低下が認められた。

3.6 促進膨張試験の結果

図-4 に促進膨張試験の結果を示す。コア試料の膨張率は、健全部において 0.12%、非健全部においては 0.11% であった。Katayama による残存膨張性の判定は、「材齡 21 日の膨張率が 0.10% 以上の時、残存膨張性があり」とされる⁶⁾。よって、健全部および非健全部ともに残存膨張性ありと判定された。膨張量が比較的小さいのは、粗骨材のチャートがアルカリ溶液中に溶解したためであるが、ここではチャート以外が主要な反応性岩種のため、その膨張性の評価に本法を適用しても問題はない。

3.7 調査結果のまとめ

以上の調査結果をまとめると以下の通りである。本研究で調査したコンクリート舗装の細骨材には、流紋岩中の火山ガラスや泥質堆積岩中のオパールが含まれていた。オパールはペシマムの顕著な鉱物であり⁷⁾、ASR が生じていたことから、コンクリート版の劣化原因は、ペシマムを示す反応性骨材による急速膨張性 ASR であると推定された。また、EDS による最小アルカリ量の測定結果より、コンクリート中のセメント由来の総アルカリ量は 3.0kg/m^3 を下回っており、既往の研究¹²⁾と同様に、総量規制値を満足するコンクリートであっても、上記の反応性骨材が含まれることで ASR が生じたことを確認した。さらに、粗骨材に由来する水溶性アルカリ量を加えると、コンクリート中のアルカリ総量は $2.8\sim 3.2\text{kg/m}^3$ に達する。したがって、セメント由来のアルカリ総量が規格値を満足しても、骨材にオパール等の反応性の高い鉱物が含まれる場合や、骨材からのアルカリが供給される場合、将来的に ASR による膨張が生じる可能性が示唆された。

また、非健全部では ASR 劣化が進行しており、その結果、静弾性係数の低下が生じたと考えられる。一方、外観上健全部においても ASR は生じており、場所によって静弾性係数の低下も認められた。現段階で健全部の表面にひび割れは認められないが、カナダ法で残存膨張性があると判定されたことから、将来的にコンクリート版が

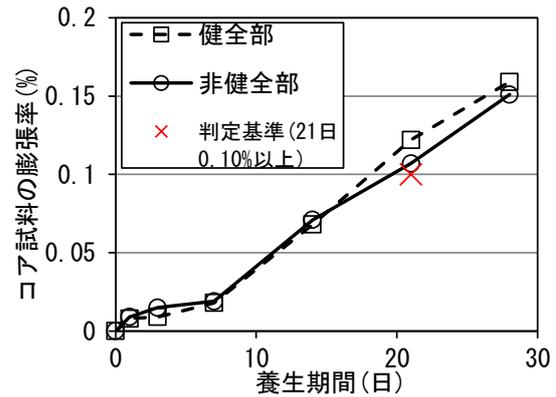


図-4 促進膨張試験の結果

更に ASR により劣化することで、舗装表面にひび割れが発生する可能性が示唆された。よって、今後適時適切に対策を行う必要があると考えられる。

4. 考察

4.1 ASR 抑制対策におけるアルカリ総量

本調査結果を基に、ASR 抑制対策におけるアルカリ総量について、カナダの規格⁸⁾に従って考察する。カナダにおける ASR 抑制対策は、骨材のアルカリシリカ反応性、構造物の暴露条件および供用期間に応じて定められている。空港舗装が常時水分の供給を受けやすいこと、供用期間が 20 年であること⁹⁾を考慮すると、空港舗装における ASR 抑制対策はセメント由来のアルカリ総量で 1.2kg/m^3 、 1.8kg/m^3 または 2.4kg/m^3 のいずれかの規制が設定されることとなる。上述のように、空港舗装では、セメント由来のアルカリ総量 2.5kg/m^3 で舗装表面にひび割れが発生していたことを考えると、オパールのような高反応性の骨材が含有されたコンクリートに対しては 2.4kg/m^3 以下に設定する必要がある。ただし、 2.3kg/m^3 においてコンクリート版の表面にひび割れは発生していなかったが、内部でオパールの反応が生じており、今後膨張が進行する可能性があった。したがって、供用期間 20 年以上の構造物においてはセメント由来のアルカリ総量 2.4kg/m^3 では十分に ASR を抑制できない可能性があるため、 1.8kg/m^3 以下の対策とする必要がある。

また、我が国における現行の抑制対策では、セメント由来のアルカリを主としたアルカリ総量が規定されており、骨材や外部からのアルカリ供給については考慮されていない。しかしながら、実際には粗骨材から約 0.5kg/m^3 のアルカリ供給があり、過去に報告された値⁶⁾と近い。よって、今後骨材からのアルカリ供給も考慮して初期のアルカリ総量を低く設定する必要があると考えられる。

4.2 舗装の劣化進行過程に基づく点検方法

空港コンクリート舗装における定期的な点検では、舗装表面のひび割れ等の変状の有無が点検されている。し

かしながら、それらの発生原因は十分に考慮されておらず、ASRの可能性が考えられることはほとんどなかった。そこで、調査結果に基づき空港コンクリート舗装のASRによる劣化の進行過程を推察することで、舗装表面のひび割れを発見した際の点検方法を考察する。まず、推察されるASRによる劣化進行過程は以下の通りである。

- 1) コンクリート内の骨材でASRが生じ、コンクリートが膨張する。コンクリート版間には10mm程度の目地があるため、初期では版全体がほぼ均一に自由膨張し、表面にひび割れはほとんど発生しない。
- 2) 目地が閉塞すると、膨張の影響を受けやすい隅角部でコンクリート版が互いに接触し、応力集中が生じる。これにより隅角部にのみひび割れが発生する。
- 3) ASRによる膨張が更に進行すると、版の端部も接触し、ひび割れが目地に沿って進展し、Dクラックが発生する。
- 4) コンクリート版表面へのひび割れ発生により、水分の供給量が多くなるため、版端部においてASRが促進され、ひび割れ発生が促進される。

以上のことから、舗装の点検時に舗装版の隅角部にひび割れが認められた場合、まずは次回以降の点検でひび割れの進展の有無を評価する必要がある。進展が認められた場合には、従来、発生要因はASR以外（例えば、凍害）または未詳とされることがあったが、ASRを疑い、詳細調査を行う必要がある。ASRが進行すると、ダウエルバー周辺にひび割れが生じ、荷重伝達機能の低下や段差の発生を招き、ひいては荷重支持性能や走行安全性能が低下する。ASRの初期段階では、ただちに舗装の性能低下につながるわけではないが、性能低下が認められる以前に補修等の対策を実施する必要がある。対策方法や実施時期については今後の課題としたい。

5.まとめ

本研究は、岩石学的評価に基づきASRの生じた空港コンクリート舗装の発生原因を調査した。その結果得られた知見は以下の通りである。

- 1) 本研究で調査した空港コンクリート舗装の劣化原因は、コンクリートに使用された細骨材中の火山ガラスおよびオパールペシマムによる急速膨張性ASRであったと推定された。
- 2) 舗装に使用されたコンクリート中のセメント由来のアルカリ総量は、健全部で 2.3kg/m^3 、非健全部で 2.5kg/m^3 と推定された。このように、セメント起源のアルカリ量に基づく総量規制値 3.0kg/m^3 を下回っていたとしても、ASRが発生することを確認した。またアルカリ総量 2.3kg/m^3 であっても、オパールの反応が認められ、残存膨張性もあると判断されたこ

とから、ASRが進行する可能性が高いと考えられた。

- 3) コンクリート中の骨材起源の水溶性アルカリ量は $0.5\sim 0.7\text{kg/m}^3$ と推定された。これを含めたコンクリートのアルカリ総量は、健全部で 2.8kg/m^3 、非健全部で 3.2kg/m^3 であった。骨材からのアルカリ溶出がASRを促進させると考えられた。
- 4) 本調査結果から、ASR抑制対策および空港舗装における劣化進行過程に基づいた点検方法を考察した。

6.参考文献

- 1) 尾花祥隆, 鳥居和之: プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材におけるASR劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1065-1070, 2008
- 2) Katayama T, Oshiro T, Sarai Y, Zaha K, Yamato T: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa, southwestern Japan, 13th ICAAR, Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008
- 3) 林建佑, 河野克哉, 山田一夫, 原健吾: 石灰岩碎石と海砂を使用したコンクリート構造物のアルカリ骨材反応による劣化診断, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1249-1254, 2009
- 4) 濱田秀則, 佐川康貴, 井上祐一郎, 林健佑: 堆積岩を粗骨材として用いたコンクリート構造物のASRによる劣化事例, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1073-1078, 2011
- 5) 建設相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>, pp.141-142, 1988
- 6) Katayama T, Tagami M, Sarai Y, Izumi S and Hira T: Alkali-aggregate reaction under influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol.53, pp.105-122, 2004
- 7) Katayama T: Petrography of alkali-aggregate reactions in concrete –reactive materials and reaction products– Proceedings of the East Asia Alkali-Aggregate reaction Seminar, Tottori, Japan, Supplementary papers, pp. A45-A59, 1997
- 8) CSA A23.2-27A: Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete. In CSA Standard A 23.2-09 Test methods and standard practices for concrete, Canadian Standards Association, pp. 371-384, 2009
- 9) 国土交通省航空局(監): 空港舗装設計要領, (財)港湾空港建設技術サービスセンター, 2006