

# 論文 3年間の暴露試験に基づくアルカリ溶脱とASR膨張の関係性の検討

俵積田 新也\*1・山田 一夫\*2・小川 彰一\*3・佐川 康貴\*4

**要旨:** アルカリ骨材反応 (ASR) に関する暴露試験では試験体の寸法が小さい場合に試験体からアルカリが溶脱し、膨張が小さくなる可能性がある。そこで、3年間暴露を行った小型の円柱試験体 ( $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ) の分析を行いアルカリ溶脱の影響を調べた。その結果、試験体の内側から表層部にかけてアルカリ溶脱を示す濃度勾配を確認できたほか、暴露地が高温多雨であるほどアルカリの移動が促進され溶脱の程度が大きくなると考えられた。本研究で行った3年間の暴露試験では、大型試験体 ( $400 \times 400 \times 600\text{mm}$ ) に比較し小型試験体 ( $\phi 100 \times 350\text{mm}$ ) では膨張率はより低く、アルカリ溶脱によりASR膨張が停滞した。

**キーワード:** アルカリ骨材反応, ASR, 暴露試験, アルカリ溶脱, 寸法依存性

## 1. はじめに

アルカリ骨材反応 (ASR) は、骨材の反応性だけに依らず反応性骨材の混合率、アルカリ総量のほか気温や降水量といった環境条件など様々な要因の影響を受ける。そのため、骨材のみの反応性ではなく実配合のコンクリートを用いた試験が推奨されており、コンクリートプリズム法などの様々な室内促進試験<sup>1)</sup>が提案されている。また、実環境におけるASR膨張とこれらの試験法との相関性を確認し、より適した促進試験法を確立する必要がある。そのために実環境でのASRによる劣化との比較が重要で、国内外の様々な地域で暴露試験や促進試験が行われている<sup>2), 3)</sup>。

暴露試験において、試験体の寸法はASRによる膨張に大きな影響を与えることが確認されており、試験体の寸法が小さい場合、アルカリ溶脱の影響でASRが抑制されることが指摘されている<sup>4)</sup>。小川ら<sup>2)</sup>の行ったペシマム現象を示す骨材を用いた試験体での暴露試験において、コンクリートブロック ( $400 \times 400 \times 600\text{mm}$ ) とより小型の円柱試験体 ( $\phi 100 \times 350\text{mm}$ ) の暴露期間1.5年での膨張率に2倍近くの差が確認された。また、暴露試験におけるアルカリ溶脱は試験体の寸法のほか、気温や降水量などの環境条件の影響を受け、その程度が変化することが考えられる。

本研究では暴露試験における、試験体寸法とASR膨張の関係性を確認した後、小型の試験体におけるアルカリ

溶脱の進行を確認した。また、同配合による暴露試験を北海道、福岡、沖縄の3箇所で行い、環境条件による影響を確認した。用いた試験体は小川らにより作製された試験体<sup>2)</sup>であり、筆者らの行った分析は全て暴露開始後から3年経過した試験体である。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料

結合材には普通ポルトランドセメント (OPC) を、一部の水準ではフライアッシュ (FA) を混合した。化学組成を表-1に示す。反応性骨材には東北地方産のオパールを含む安山岩砕石 (以下, N) と、四国産の微晶質〜隱微晶質石英を含む砂質片岩 (以下, EH) の2種類を使用した。それぞれの化学法 (JIS A 1145) とモルタルバー法 (JIS A 1146) の試験結果および物性を表-2に示す。骨材Nは反応性が高くペシマム混合率<sup>5)</sup>が存在し、本研究では混合率10%で使用した。骨材EHは両試験法で無害と判定されるが遅延膨張性を示すことが確認されており<sup>6)</sup>、本研究では混合率100%で使用した。

### 2.2 試験水準および配合

#### (1) 試験水準

本研究で実施した試験水準を表-3に示す。骨材Nを用いた水準では、結合材の15mass%をFAで置換して使用した水準も作製した。表-3に示す3水準を3地点で暴露し、水準名は {反応性骨材および混合率 (FA) -アル

表-1 結合材の化学組成

	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	化学組成 (mass%)									
			Ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
OPC	3.16	3360	2.32	20.53	5.13	3.02	64.24	0.91	2.12	0.34	0.33	98.90
FA	2.30	4170	1.55	61.68	24.43	3.96	2.70	1.26	0.34	0.87	1.19	98.00

\*1 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (学生会員)

\*2 国立環境研究所 汚染廃棄物管理研究室 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

\*3 株式会社太平洋コンサルタント 営業推進部 博士 (工学) (正会員)

\*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 骨材の反応性および物性

骨材	化学法 (mmol)	モルタルバー法 (26週)	表乾密度 ( $g/cm^3$ )	吸水率 (%)
N	Sc=784, Rc=149	0.233%	2.53	2.02
EH	Sc=40, Rc=46	0.053%	2.69	0.69

表-3 試験水準

水準名	反応性骨材	反応性骨材 混合率	アルカリ総量 ( $kg/m^3$ )	FA (mass%)
N10-3.0	N	10	3.0	-
N10-3.0-FA15	N	10	3.0	15%
EH100-5.5	EH	100	5.5	-

カリ総量-暴露地}とする。各水準で長さ測定用にコンクリートブロック (400×400×600mm) 1 体と円柱試験体 (φ100×350mm) 3 本を作製した。N10-3.0 のコンクリートブロックでは RFID ひずみ計測システム<sup>7)</sup>を用い、試験体内部のひずみと温度を測定した。また、化学分析、強度試験用に φ100×200mm の円柱試験体を長さ変化用とは別に複数作製した。

(2) 配合

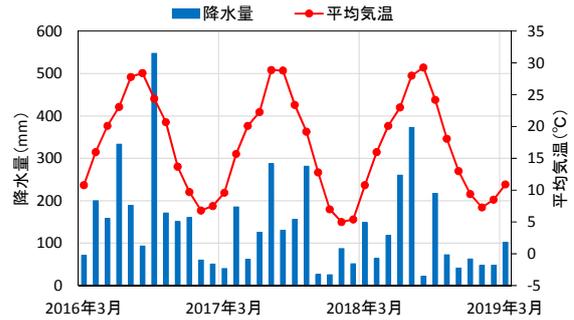
配合は、水結合材比 W/B=50%、単位水量 160kg/m<sup>3</sup>、細骨材率 s/a=45%とし、スランプ 18.0±2.5cm、空気量 4.5±1.5%となるように AE 剤および AE 減水剤を用いて調整した。アルカリ総量は表-3 に示す値となるように NaOH 溶液を練混ぜ水に添加して調整した。アルカリ総量は膨張を発現させることを考慮して決定した<sup>3), 8)</sup>。

2.3 暴露地の環境

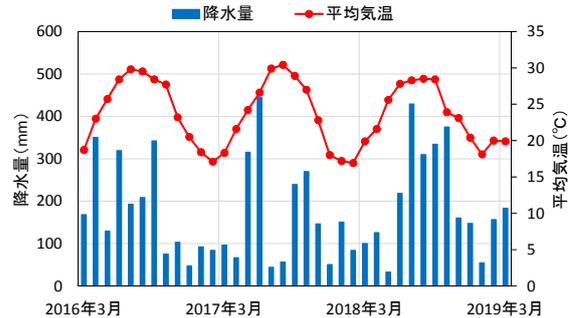
暴露地は、福岡は九州大学伊都キャンパス (福岡市)、沖縄は琉球大学 (中頭郡西原町)、北海道は紋別町コムケ湖近辺の海岸の 3 地点とした。いずれも雨がかりや日射を遮るものがないコンクリートスラブ上に、北海道のみ地面に直接設置した。各地の飛来塩分量は測定しておらず、本研究では外部から試験体へのアルカリ供給は考慮出来ていない。各暴露地近郊のアメダスによる平均気温と降水量のデータ<sup>9)</sup>を図-1 に示す。特徴として沖縄と福岡は北海道に比べ降水量が多いことと、各地の平均気温 (福岡 : 17.1°C, 沖縄 : 23.8°C, 北海道 : 6.49°C) に違いがあることが分かる。沖縄は他の 2 地点に比べ高温多湿であり、ASR およびアルカリ溶脱が促進されやすいと予想できる。一方で、北海道ではアルカリ溶脱による影響が他の 2 地点に比べ小さいことが考えられる。

2.4 膨張率測定方法

コンクリートブロックと円柱試験体の膨張率の測定は JIS A 1129 に従い、コンタクトゲージを用いて材齢ごとに測定した長さから算出した。図-2 に示す位置に長さ測定用のプラグ (基長約 250mm) を埋め込み、各プラグ間の長さ変化を平均した値を用いて試験体の膨張率を算出した。温度補正には RFID センサより得られる内部温度の測定結果を用いた。



(a) 福岡 (観測所 : 前原)



(b) 沖縄 (観測所 : 那覇)



(c) 北海道 (観測所 : 紋別小向)

図-1 暴露地の月別の平均気温と降水量 (気象庁データ)

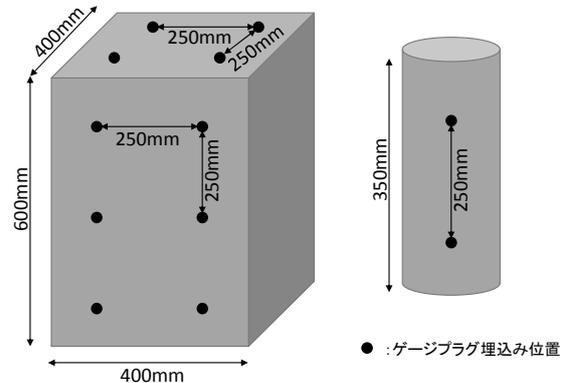


図-2 試験体形状寸法

## 2.5 アルカリ溶脱の検討

### (1) 水準

アルカリ溶脱の程度を確認するため、一部の水準で試験体中の水溶性アルカリの測定と電子プローブ微小分析 (EPMA) を用いた断面の面分析を行った。高温多湿で ASR やアルカリ溶脱が促進されると予想される沖縄の 3 水準と、それらが緩慢であると考えられる EH-5.5-北海道で測定結果を比較し、ASR と環境条件によるアルカリ溶脱への影響を確認した。

### (2) 水溶性アルカリの測定

水溶性アルカリの測定は総合技術開発プロジェクトの示す手法に準拠して行った。乾式のコンクリートカッターを用いて、円柱試験体の中心部から厚さ 20mm 程度の円盤を 2 枚切り出し、それぞれ水溶性アルカリ測定と後述の EPMA 分析に用いた。採取した円盤を図-3 のように切断しそれぞれを内側と外側の試料とした。試料を 300 $\mu$ m 程度に粉砕し、試料 10g と 40 $^{\circ}$ C の蒸留水 100ml を 200ml のポリエチレン製の容器に入れ、40 $^{\circ}$ C の恒温槽に入れ 30 分間攪拌し、水溶性アルカリを溶出させた。溶液を化学法 (JIS A 1145) と同様の方法でろ過し、酸性に調整したものを測定試料とした。原子吸光光度計を用いて、Na, K の濃度を測定した。炭酸化したセメントペーストにアルカリが吸着され、その領域では水溶性アルカリ量が低下することが考えられる<sup>10)</sup>ため、試験体から厚さ 20mm の円盤に切り出した際に中性化試験を行い、中性化深さを確認した。

### (3) EPMA を用いた分析

$\phi 100 \times 200$ mm の円柱試験体を観察台に収まるサイズに乾式のコンクリートカッターを用いて切断し (図-3)、試料をメタクリル樹脂で包埋した後、断面を乾式で研磨した。分析面に導電性を与えるため炭素を蒸着し、EPMA による面分析を行い、Na, K の濃度分布を測定した。

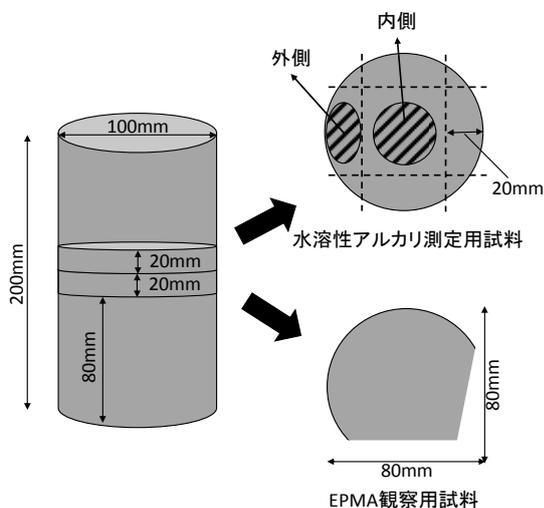


図-3 各試験用試料

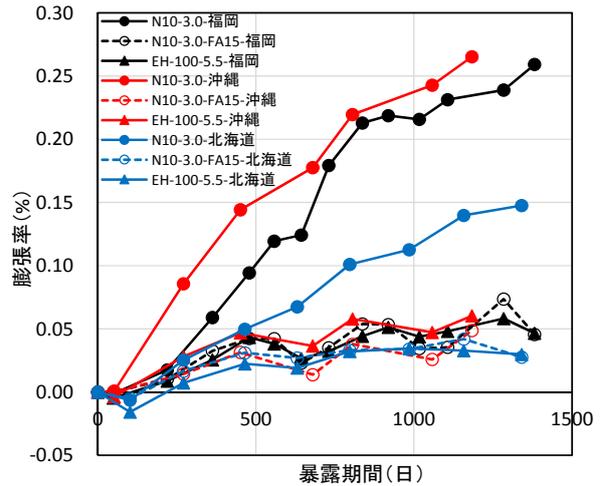


図-4 (a) 膨張率の経時変化 (コンクリートブロック)

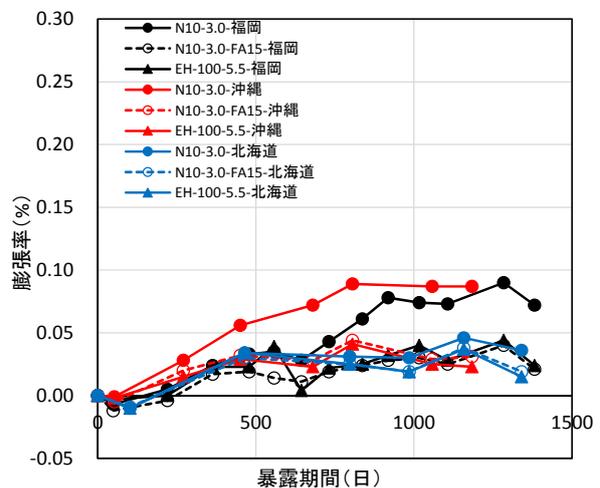


図-4 (b) 膨張率の経時変化 (円柱試験体)

## 3. 結果および考察

### 3.1 膨張率

図-4 (a) にコンクリートブロックの、(b) に円柱供体の膨張率の経時変化をそれぞれ示す。N10-3.0 は 3 箇所とも膨張しており、暴露地によって膨張率に差異が生じた。高温多湿である沖縄で最も高い膨張率を示しており、北海道では沖縄、福岡と比較して膨張率は低いが 0.15% まで膨張している。高温による反応促進と降雨による水分供給が膨張に影響を与えたと考えられる。どの暴露地においても、N10FA15-3.0 (図中の破線プロット) では ASR による膨張は認められず、低温環境では FA の反応性が低下し、ASR 抑制効果が低下する可能性を想定したが、N10-3.0 と比較して FA の抑制効果を確認できた。遅延膨張性を示す EH100-5.5 においても膨張は確認されず、骨材 EH ではより長期材齢での評価が必要となる。

コンクリートブロックと円柱試験体の膨張率を比較すると、コンクリートブロックで最も膨張していた N10-

3.0-沖縄 (0.265%) と同じ配合の円柱試験体は膨張率 0.10%未満<sup>3)</sup>であった。また、N10-3.0-沖縄と福岡の円柱試験体は暴露期間 800 日以降膨張が停滞しているが、コンクリートブロックでは暴露後 1000 日以降も膨張傾向にあり、アルカリ溶脱の影響が考えられる。N10-3.0-北海道では、低温や降雨量が少ない影響で反応が緩慢であったことにより、ASR に用いられる前にアルカリが溶脱し、膨張が生じなかったことが考えられる。N10FA15-3.0 と EH100-5.5 ではコンクリートブロックと同様に膨張を確認できなかった。

### 3.2 水溶性アルカリの測定結果

温水抽出による水溶性アルカリの測定結果、および配合時点でのアルカリ量の計算値を図-5 (a), (b) に示す。

#### (1) 水溶性 Na 量

Na<sup>+</sup>量は全ての水準で内側より外側が低い値を示し、外側の Na<sup>+</sup>から試験体外に溶脱していることが考えられた。さらに、外側ではすべての水準で同程度の値を示す結果となった。外側のアルカリが溶脱し Na<sup>+</sup>量が低下したことで、試験体内部から表面にかけて濃度勾配が生じ、内側の Na<sup>+</sup>が外側に移動したことが考えられる。また、EH100-5.5 の沖縄と北海道で比較すると、内側の Na<sup>+</sup>量は北海道の方が高い。暴露地の気温および降水量が高いほど、試験体内でのアルカリイオンの移動が促進されたことにより、Na<sup>+</sup>量に差が生じたことが考えられる。

#### (2) 水溶性 K 量

K<sup>+</sup>量に関しても N10FA15-3.0-沖縄を除いて Na<sup>+</sup>と同様に内側と外側で濃度勾配を確認できた。Na<sup>+</sup>の結果と異なる特徴として、内側の K<sup>+</sup>量は、N10-3.0-沖縄が EH100-5.5 より多い点と、N10FA15-3.0-沖縄において内側と外側で K<sup>+</sup>量が他の 3 水準より多いことが挙げられる。この要因として骨材 N や FA から K が供給されたことが可能性としては考えられるが、詳細は不明である。

### 3.3 EPMA による分析結果

EPMA 分析による Na, K の測定結果を中性化試験の結果と合わせて図-6 に示す。試験体中のアルカリの移動や分布に着目するため、図-6 に示す分析結果はセメントペーストに相当する部分のみを表示している。また、表示の濃度は酸化物 (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) としての質量パーセント濃度である。なお、中性化測定面は破断面であり、EPMA の測定面とは対応していない。

#### (1) 中性化

図-6 よりいずれの水準でも顕著な中性化は認められなかった。ただし、試験体のごく表面に限定されているものの、着色していない部分も認められ、局所的には中性化している可能性がある。

#### (2) Na<sub>2</sub>O 濃度

N10FA15-3.0-沖縄を除くすべての水準で、内側と比較

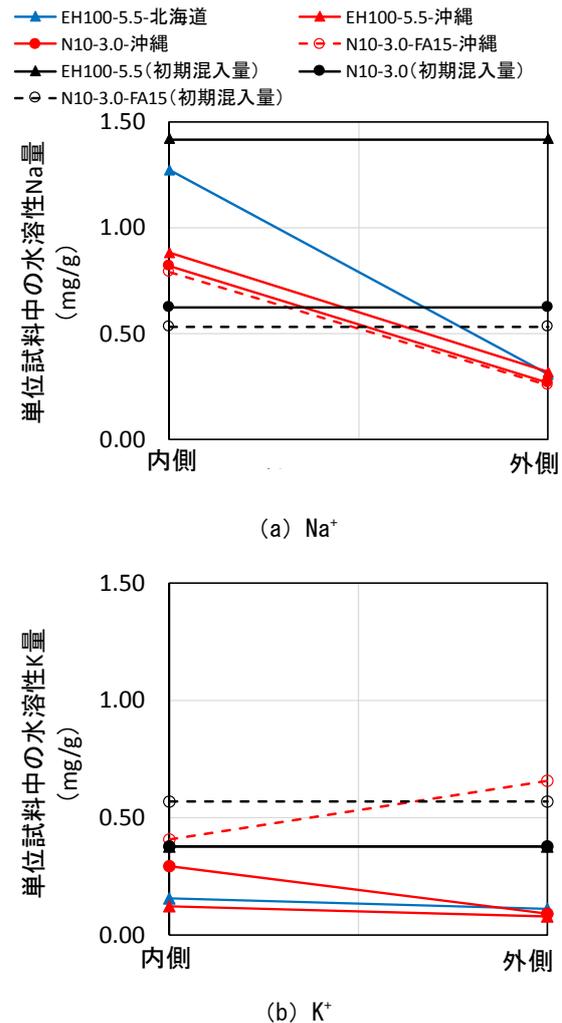


図-5 水溶性アルカリの測定結果

し表層の 10~20mm の濃度が低いことが確認できる。N10FA15-沖縄でも外側の濃度が低い、その領域は 5~10mm 程度であり、溶脱の程度が小さいことが分かる。FA の添加により組織が緻密になりアルカリ溶脱が抑制されたことが考えられる。また、外側の濃度で水準毎に大きな差は見られないが、内側の濃度は水準で異なり、最も高い水準は EH100-5.5-北海道、最も低い水準は反応が進行している N10-3.0-沖縄であった。N10-3.0-沖縄では反応の進行に伴いアルカリが消費されたことが考えられる。反応によるアルカリ消費が少ないと考えられる EH 骨材を用いた 2 水準では、環境条件により内部のアルカリ濃度に差が生じたことが予測できる。ここまでの傾向は上記の水溶性アルカリの測定結果で得られた傾向と概ね一致しており、アルカリ溶脱の影響が確認された。また、N10FA15-3.0-沖縄を除いて、試験体の表層部分で局所的に濃度が高い部分が数水準で確認された。EH100-5.5 の水準でより濃縮度は高い。

#### (3) K<sub>2</sub>O 濃度

Na と同様に内側より外側の濃度が低い傾向が確認

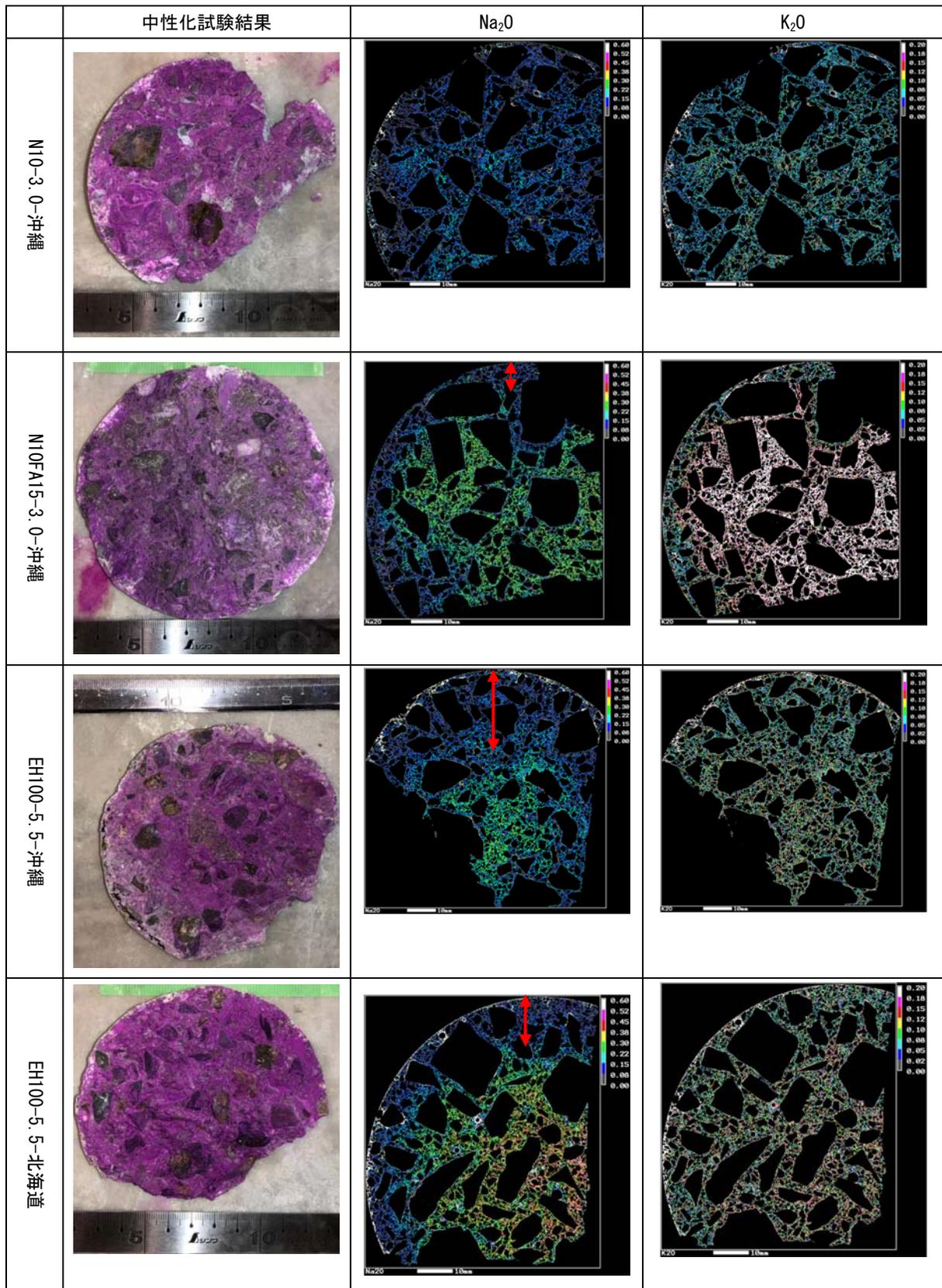


図-6 中性化試験および EPMA 測定結果

できたが Na ほど明確な差は見られなかった。試験体のアルカリ総量を調整する際に NaOH 溶液を用いているため、Na と比較して低い濃度になっており、濃度勾配も小さくなったことが考えられる。N10FA15-3.0-沖縄では水

溶性アルカリの測定結果では見られなかったが、内側と外側でアルカリ溶脱と考えられる濃度勾配を確認できた。また、ほかの水準より高い濃度を示しており、これは表-1 から分かるように FA の高濃度の K<sub>2</sub>O に起因す

るものと考えられる。

水溶性アルカリの測定結果では、内側の K<sup>+</sup>量は、N10-3.0-沖縄が EH100-5.5 と比較して多い結果となったが、EPMA の結果では EH100-5.5 の方が K<sub>2</sub>O 濃度はわずかに高い結果となり、Na で見られた傾向と同様に、反応が進行している水準でよりアルカリ量が少ない結果が得られた。反応に伴うアルカリ消費や、ASR の進行により組織が破壊され、イオンの移動が容易になったことが考えられる。

また、表層部において Na の濃縮が見られた位置と一致して K の濃縮も見られた。炭酸化したセメントペーストはアルカリ吸着の能力が高く<sup>11)</sup>、表層部における高濃度の Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O はその影響によるものだと考えられる。

### 3.4 暴露試験におけるアルカリ溶脱

以上の試験結果より得られたアルカリ溶脱の影響と、暴露試験での環境条件や膨張率から、暴露試験におけるアルカリ溶脱が ASR に与える影響を考察する。

EH100-5.5 の沖縄と北海道における、EPMA の観察結果を比較すると、どちらもアルカリ溶脱による濃度勾配が確認できた。膨張率に差は無く、反応によるアルカリ消費の影響が小さいと考えられる両水準において、沖縄ではより内部の Na<sub>2</sub>O 濃度が低い結果であった。これより、高温または多雨であるほどアルカリ溶脱の程度が大きいことが確認できた。

円柱試験体において、試験体からアルカリが溶脱していることにより、コンクリートブロックで暴露開始から 1000 日以降も継続して膨張している配合であっても円柱試験体では膨張が停滞してしまうことが確認できた。また、試験体表層付近では、水溶性アルカリの測定、EPMA による面分析の両試験において暴露地および配合による差が見られなかった。加えて、暴露地によって試験体内部のアルカリ量に差が生じていたことより、高温多湿な地域では試験体内のアルカリイオンの移動が促進されることによりアルカリの溶脱量が増加することが考えられる。実環境での ASR による劣化を確認するためには大型の暴露試験体でなければ正しく反応を評価できないことが確認できた。

## 4. まとめ

3年間の暴露試験における ASR 膨張とアルカリ溶脱の関係を、特に試験体の φ100×200mm の円柱試験体を用いて確認した。得られた結果を以下に示す。

(1) 試験体表層のアルカリ量は暴露地および配合に関わらず、全ての水準で低い値を示した。3年間で 5~20mm 程度の溶脱が起きるが、セメント種類によりその範囲は異なる。特に FA を用いた場合アルカリ溶脱の程度が小さくなる傾向が得られた。

(2) 暴露地が高温多雨である場合、試験体内のアルカリイオンの移動が促進されることにより、アルカリ溶脱の程度が変化することが確認された。暴露場所の影響とアルカリ溶脱の影響が加味されるので、小型試験体の試験結果を横並びで評価できない。

(3) 反応性骨材の反応性が低い場合、ASR による膨張が起きる前に反応に使われるアルカリが溶脱し、特に小型の試験体では ASR 膨張を生じない場合がある。

(4) 暴露試験において試験体の寸法が小さい場合、アルカリ溶脱の影響により ASR 膨張を正しく評価できない。

## 参考文献

- 1) 佐川康貴, 山田一夫, 烏田慎也, 小川彰一: コンクリートブリズムを用いた 60℃加速養生によるアルカリシリカ反応性の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1120-1125, 2014
- 2) 小川彰一, 山田一夫, 佐川康貴, 俵積田新也: アルカリ骨材反応試験体の各地曝露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.887-892, 2019
- 3) Lindgard, J. et al.: The EU "PARTNEAR" Project - European standard tests to prevent alkali reaction in aggregates: Final results and recommendations, Cement and Concrete Research, Vol.40, No.5, pp.611-635, 2010
- 4) Thomas, M. et al.: Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete, Cement and Concrete Research, Vol.36, pp.1842-1856, 2006
- 5) 内村中ほか: ペシマム現象を伴う ASR を生じた場合にいける FA の抑制効果, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.806-807, 2012
- 6) 鳥居和之監修, 山田一夫編集: コンクリート診断 ASR の的確な診断/抑制対策/岩石学的評価, p.233, 森北出版, 2017
- 7) RFID ひずみ計測システム: <https://www.taiheiyocement.co.jp/rd/rfid/hizumi/index.html> (閲覧日: 2019年1月13日)
- 8) ペシマム現象を示す骨材を用いたコンクリートの佐川康貴, 山田一夫, 烏田慎也, 江里口玲: 加速試験および暴露試験における膨張挙動, コンクリート工学論文集, Vol.25, pp.135-145, 2014
- 9) 気象庁: <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (閲覧日: 2019年1月13日)
- 10) Haga, K., Watanabe, S., Yamada, K.: Quantification of interaction between alkali metal ions and C-(A-)S-H/cement paste for a wide range of ion concentrations, Proceedings of 15th Congress on the Chemistry of Cement, 339, 2019