

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# コンクリート中のアルカリ量を 精度よく推定する

コンクリート構造物の劣化原因の1つであるアルカリシリカ反応(ASR)に関する評価を行うためには、硬化コンクリート中のアルカリ量(ASRに影響するナトリウムおよびカリウムの量)を把握する必要があります。しかし、従来はこの手法が確立されておらず、水溶性アルカリ量等からASRによる劣化を推定するに留まっていた。そこで、硬化コンクリート中のアルカリ量を、骨材からの溶解アルカリ量を考慮して、コンクリートを酸で溶解することにより求める手法を開発しました。



**鶴田 孝司**  
Koji Tsuruta  
材料技術研究部  
コンクリート材料研究室  
主任研究員  
[専門分野] コンクリート  
構造物の維持管理



**上原 元樹**  
Motoki Uehara  
材料技術研究部  
コンクリート材料研究室  
主任研究員  
[専門分野] 無機材料,  
新材料探索



**水野 清**  
Kiyoshi Mizuno  
材料技術研究部  
コンクリート材料研究室  
主任研究員  
[専門分野] 土・水の科学

## 目的

アルカリシリカ反応(以下、ASRという)とは、コンクリート中のアルカリ(ナトリウムおよびカリウム)と骨材中の反応性珪物などの化学反応です。この反応により生成した物質がコンクリート内部で吸水膨張することによって、コンクリートにひび割れや鉄筋破断などの劣化現象が生じます(図1)。ASRを抑制するために、現在ではコンクリート中のアルカリ総量を $3.0\text{kg/m}^3$ 以下にするなどの対策がとられています。しかし、上記の対策を講じて建設されたコンクリートにおいても、ASRによる劣化が生じた事例があり、このような劣化を確実に防ぐためには、 $3.0\text{kg/m}^3$ 程度のアルカリ総量を含むコンクリートにおいて、アルカリシリカ反応が進行しやすいかどうかを知ることが必要です。そのためには、 $3.0\text{kg/m}^3$ 付近のアルカリ総量を精度よく分析することが必要です。

今までの研究では、コンクリート中のアルカリ総量を分析する方法として、ふっ酸による溶解法<sup>1)</sup>や水溶性アルカリ量などによる方法<sup>2)</sup>が試みられましたが、いずれも推定誤差が大きい確

にアルカリ総量を測定することは難しいとされてきました。そこで本研究では、コンクリートの試料を酸で溶解し、骨材からの溶解アルカリ量の影響を補正することにより、硬化コンクリート中のアルカリ総量を求める手法を開発し、その適用方法を検討しました<sup>3)</sup>。

## コンクリート中のアルカリ量とは

コンクリートには様々な材料が使われていますが、アルカリ量に大きく関わる材料はセメントと骨材です。このうちASRに大きく影響するのはセメントペースト中のアルカリ量であり、これを求めることが本研究の目的です。なお、セメントペースト中のアルカリ量を $1\text{m}^3$ あたりの重さで表したものをアルカリ総量と呼びます。現在のASRに対する規制も、このアルカリ総量を用いています。

## 測定手法

図2に酸での溶解によるアルカリ総量測定手法の概念を示します。コンクリートにおける全体のアルカリ量(A)は、セメントペースト中のアルカリ量



図1 ASRによるコンクリートの劣化事例

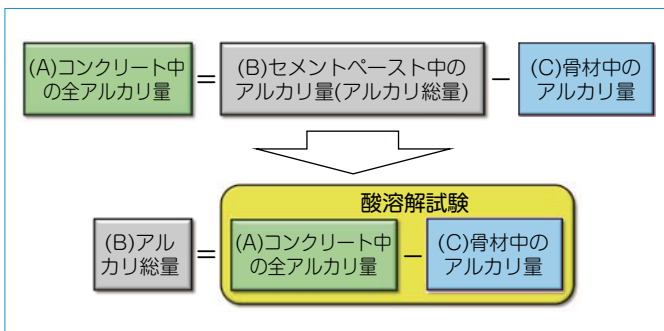


図2 酸での溶解によるアルカリ総量算出の概念

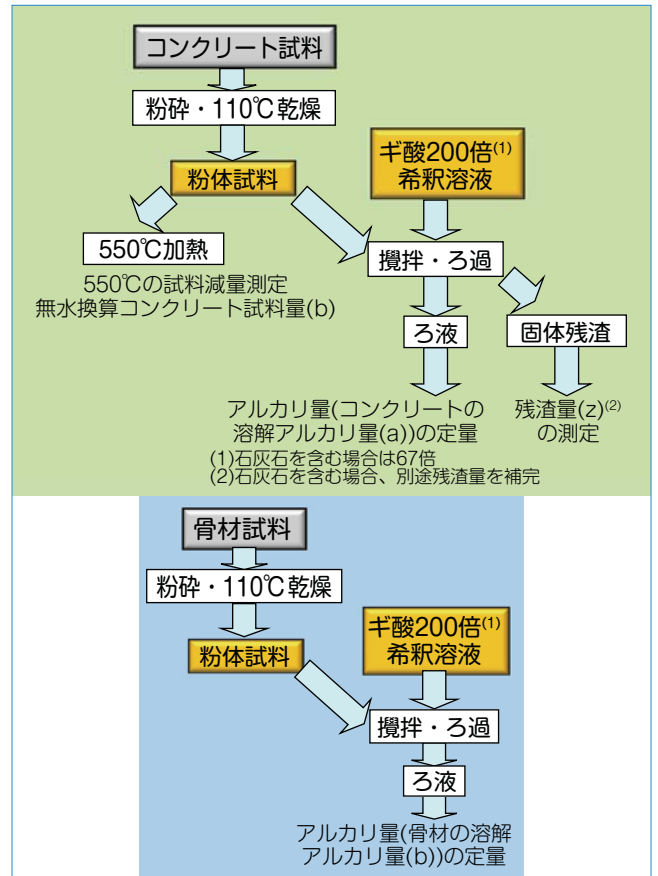


図3 硬化コンクリート中のアルカリ量測定フロー

(B) と、骨材中のアルカリ量 (C) との合計です。ここで骨材中のアルカリ量とは、骨材を酸で溶解した時に溶け出すアルカリ量のことです。この手法では、前述のように (B) のアルカリ総量を求めることが目的となります。この (B) は、コンクリート試料を酸で溶解することにより (A) を、使用骨材が入手できる場合には骨材の試料を酸で溶解することにより (C) をそれぞれ求め、その配合に応じて (A) から (C) を差し引くことにより求めることができます。

この方法によりアルカリ総量を求める場合の問題点として、骨材中のアルカリ量が、セメントのアルカリ量に比べて誤差として無視できない量であることが挙げられます。コンクリート中の骨材は重量比でセメントの6倍程度であるため、これを考慮すると、骨材中のアルカリ量は多いものでセメントのアルカリ量とほぼ同じくらいの量に

なります。このため、硬化コンクリート中のアルカリ総量を正確に推定するには、酸での溶解により骨材から溶解するアルカリ量をできる限り小さくし、かつ、その量を精度よく把握する必要があります。

これらの条件をできる限り満たすように試行錯誤をし、酸での溶解による試験の条件を設定しました。例えば溶解に用いる酸の種類は、骨材から溶解するアルカリ量をできる限り小さくするために、弱酸であるギ酸を200倍に希釈したものを用いました。酸での溶解による硬化コンクリート中のアルカリ量測定フローを図3に示します。なお、骨材に石灰石が含まれている場合は、石灰石がギ酸に溶解してしまうため、ギ酸の濃度を3倍(67倍希釈)にするとともに、別途骨材中の石灰石量を求める必要があります。

図3のフローで測定した値(図中に

おける (a), (b), (d) および (z) を用いて、次の数式で硬化コンクリート中のアルカリ総量を求めます。

$$\text{アルカリ総量} = \left\{ a - d \times \left( \frac{z}{b} \right) \right\} \times \frac{1}{(b-z)} \times c \quad \dots\dots (1)$$

- ここで
- a: コンクリートのアルカリ量 (g)
  - b: 無水換算コンクリート試料量 (g) = 110°C 乾燥試料量 - 550°C の試料減量
  - d: 骨材のアルカリ量 (g)
  - z: 残渣量 (g)
  - C: 単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>)

### 精度の検証

図3示した試験方法の精度を確認するために、アルカリ総量が既知 (3.9kg/m<sup>3</sup> ~ 5.2kg/m<sup>3</sup> の4種類) のモルタル供試体を用いて酸での溶解による試験を実施し、アルカリ総量を測定しました。試

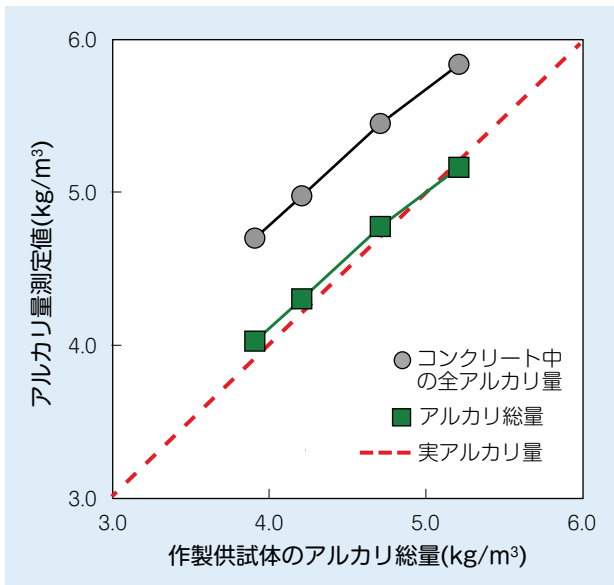


図4 モルタル供試体による酸での溶解による試験結果

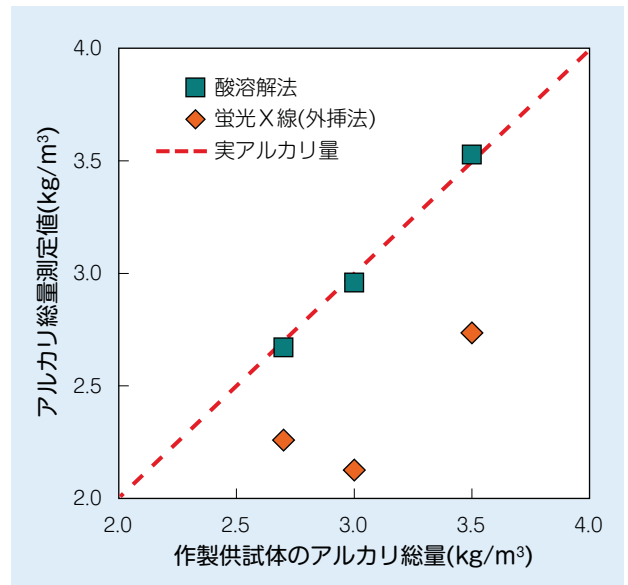


図5 酸での溶解による方法と蛍光X線(外挿法)との比較

験結果の一例を図4に示します。

コンクリート中の全アルカリ量は、骨材中のアルカリ量を含んでいるために、作製供試体のアルカリ総量に比べて高い測定値を示しています。ここから骨材中のアルカリ量を差し引いたアルカリ総量は、実アルカリ量とほぼ一致しています。この誤差はおよそ $\pm 0.1\text{kg/m}^3$ であり、モルタル供試体においては高い精度でアルカリ総量が推定できることがわかりました。

また、アルカリ総量が比較的低いコンクリート供試体 ( $2.7\text{kg/m}^3 \sim 3.5\text{kg/m}^3$  の3種類) を用いて、酸での溶解による方法と、従来の手法の1つである蛍光X線(外挿法)<sup>4)</sup>の2種類の方法でアルカリ総量を測定しました。試験結果の一例を図5に示します。酸での溶解による方法でのアルカリ総量の測定値は、すべての供試体において実アルカリ量とほぼ一致しています。これに対して、蛍光X線(外挿法)では、いずれも実アルカリ量と測定値との差が酸での溶解による方法に比べて大きくなりました。このことから、酸での溶解による方法は、 $2.7\text{kg/m}^3 \sim 3.5\text{kg/m}^3$ 程度の低いアルカリ量においても従来の方法である蛍光X線(外挿法)に比べて精度よく

硬化コンクリート中のアルカリ総量を測定できることがわかりました。

### 実構造物への適用

酸での溶解による方法を、新設のコンクリート構造物のアルカリ総量測定に適用するために、実際の高架橋建設現場において、コンクリート打設時に同時に採取した6種類のコンクリート供試体を用いてアルカリ総量を測定しました。図6にアルカリ総量の測定結果と、打設したコンクリートに使用されたセメントの含有成分などが記載された試験成績書から算出したアルカリ総量を示します。いずれの供試体についても、アルカリ総量の測定値が試験

成績書からの計算値と近い値となっていることから、これらの現場では設計通りのアルカリ総量をもつコンクリートが使用されたことが確認できました。

このように、新設構造物など骨材を別途入手できる場合は、今までは材料の試験成績書でしか調べるることのできなかった硬化コンクリート中のアルカリ総量を、本手法により精度よく推定できることがわかりました。

### 既設構造物への応用の検討

既設構造物のうちコンクリートに使用されている骨材が入手できない場合、この方法では骨材の溶解アルカリ量を酸での溶解による試験によって求める

#### ※ 「アルカリ骨材反応」と「アルカリシリカ反応(ASR)」

どちらも同じ意味ではないか、と思われている方もいるようですが、厳密にはこの2つの言葉の意味は異なります。「アルカリ骨材反応」は、コンクリート中でアルカリと骨材に含まれる反応性鉱物などが反応する現象の総称です。「アルカリ骨材反応」の種類の1つとして、アルカリとシリカ分( $\text{SiO}_2$ )を主成分とする反応性鉱物などが反応するASRがあります。なお、「アルカリ骨材反応」の他の種類として、従来は「アルカリ炭酸塩反応」や「アルカリシリケート反応」があるとされていましたが、最近の研究によりこれらの反応がいずれもASRとして説明できることがわかったことから、2007年版のコンクリート標準示方書において「アルカリ骨材反応」から「アルカリシリカ反応(ASR)」に用語が改められました。

ちなみに「アルカリ骨材反応」は現場では略して「アル骨」と呼ばれていますが、「アルカリシリカ反応」は「アルシリ」とは呼びにくく、今でも「アル骨」と呼ばれることが多いように思われます。

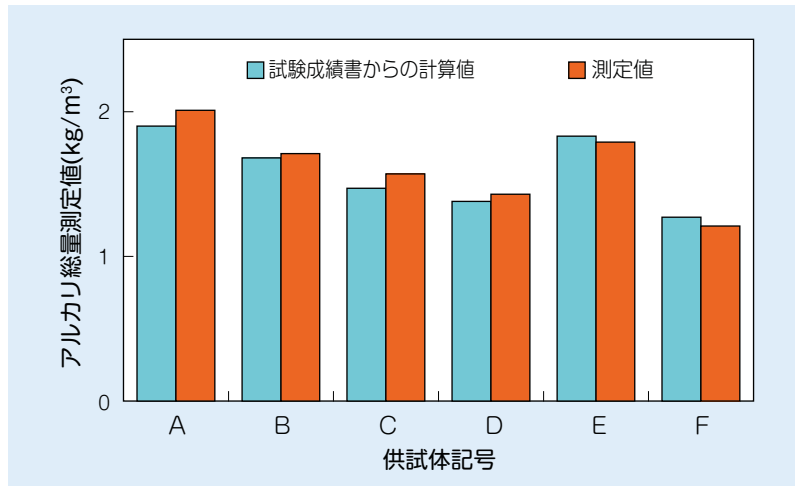


図6 新設コンクリート供試体中のアルカリ総量の測定結果

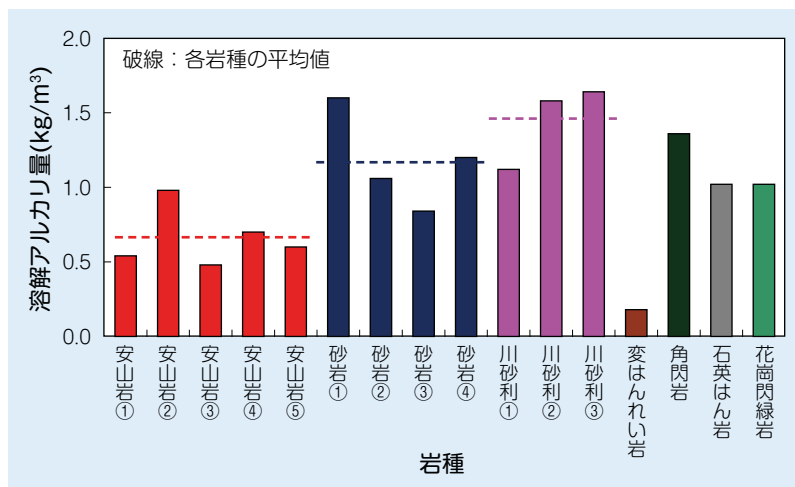


図7 骨材の溶解アルカリ量(単位骨材量2000kg/m<sup>3</sup>として算出)

ことができません。この場合には、溶解アルカリ量と骨材の種類や鉱物組成などとの関係をデータベース化しておくことで、溶解アルカリ量のわからない骨材について、種類や鉱物組成などから溶解アルカリ量を推定する手法を考案しました。そこで、データベース化の可能性を検討するため、様々な種類の骨材を図3の骨材試料のフローにより溶解した時のアルカリの溶解量を測定しました。

その結果を図7に示します。溶解アルカリ量の傾向としては、安山岩が比較的小さく、砂岩や川砂利が大きい傾向がありました。この結果と、一般的な配合のコンクリート(単位骨材量約2000kg/m<sup>3</sup>)において、骨材の溶解量

0.01%の差が、およそ0.2kg/m<sup>3</sup>程度のアルカリ総量の誤差となることを考慮すると、およそ±0.4kg/m<sup>3</sup>程度の誤差でアルカリ総量が推定可能であると考えられます。ただし、同じ種類の骨材でも含まれる鉱物の種類によっては、溶解アルカリ量に大きな差が生じる可能性もあることから、精度を上げるためには今後も検討を行う必要があります。

#### まとめ

コンクリートと骨材を酸で溶解することで、骨材を別途入手できるコンクリートについては、アルカリ総量3.0kg/m<sup>3</sup>程度のより小さい領域において、硬化コンクリート中のアルカリ

総量を従来の手法より高精度に推定できることがわかりました。[RRR]

#### 文献

- 1) 河合研至ほか：硬化コンクリート中のアルカリ量の推定に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，9-1，pp.651-656，1987
- 2) 河合研至ほか：セメント中の水溶性アルカリ量，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.35-39，1991.8
- 3) 鶴田孝司ほか：酸溶解による硬化コンクリート中のアルカリ量測定手法，鉄道総研報告，Vol.24,No.8，pp.11-16，2010
- 4) 立松英信ほか：蛍光X線法によるアルカリ量・塩素量の推定，土木学会第45回年次学術講演会，V-212，pp.450-451，1990