

機関番号：13102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760346

研究課題名（和文）フライアッシュによるアルカリ骨材反応抑制対策の実用化研究

研究課題名（英文） Research for practical application on preventive measure against ASR with use of fly ash

研究代表者

田中 泰司（TANAKA YASUSHI）

長岡技術科学大学 工学部・助教

研究者番号：40377221

研究成果の概要（和文）：まず、フライアッシュがコンクリートのアルカリシリカ反応の抑制に効果があることを実験により確認した。次に、高炉スラグやシリカヒュームなどとの比較や、組み合わせて使用した場合の効果についても確認を行った。また、化学分析を通じて反応性骨材の反応速度の評価を行った。一次元拡散モデルに基づく数値計算モデルに、測定した反応速度を組み込むことで、モルタルの膨張挙動が予測可能となることを示した。提案する数値計算法を用いて長期予測を行うことで、混和材の抑制効果が定量評価できることが示された。

研究成果の概要（英文）：It is experimentally verified that fly ash has preventive effect against ASR (Alkali Silica Reaction). Blast furnace slag and silica fume are compared with fly ash with regard to the preventive effect while the combination use of these materials is also examined in this study. The reaction rate of reactive aggregate is evaluated through the chemical analysis. By using this reaction rate, the length change of mortar bar is able to be predicted with the numerical model which is based on the one-dimensional diffusion model. Preventive effect of additive is able to be evaluated by predicting the length change of mortar for long term with the proposed numerical method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
22 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料、施工、建設マネジメント

キーワード：①建築構造・材料、②岩石・鉱物・鉱床学、③土木材料

1. 研究開始当初の背景

わが国では 1980 年代にコンクリート構造物のアルカリ骨材反応が深刻な問題となり、劣化機構の解明と対策・補修方法の確立に向けて精力的な研究が行われてきた。1986 年には JIS A5308 に ASR 抑制対策が取り入れられた。JIS では抑制対策として、①コンクリート中のアルカリ総量を規制する抑制対

策、②アルカシシリカ反応抑制効果のある混合セメントなどを使用する抑制対策、③安全と認められる骨材を使用する抑制対策、の 3 つが提起されている。

①、③を組み合わせた抑制対策が、現在わが国では一般的に採用されているが、ごく稀に①③の両方を満たす場合でもアルカリ骨材反応が生じる場合があるという指摘もあ

る。アルカリ骨材反応の抑制をより確実にするために、アルカリ総量の規制値を引き下げたり、モルタルバー法の判定基準を厳しくすべきとの意見があるものの、仮にそうした場合には、条件を満たす配合を設計できなくなる恐れもある。近年では高強度コンクリートの使用や再生骨材を使用する場合のアルカリ骨材反応抑制対策など、従来とは異なる課題も表面化しつつある。そして、これらの新しい課題に対しては従来のような①総量規制と③安全な骨材の使用、という対策方法では対応しきれない状況にあり、従来法とは異なる抑制対策の提案がのぞまれている。

岩石学的な評価などを駆使して③「安全な骨材の使用」をより確実なものとするのが、アルカリ骨材反応を根治する方法としては正道であるものの、その実行性には困難が付きまとう。なぜなら骨材の品質を正確に求めるためには、莫大な労力と検査コストが必要となるからである。たとえば骨材の採掘サイトにはいくつもの地層が含まれるので、少なくともそれぞれの地層に対して品質検査を行う必要がある。しかしアルカリ骨材反応の抑制対策という一事に対して、これだけの追加コストを払うことは工業的には許容できないことである。

JISにおいても提起されている②アルカシシリカ反応抑制効果のある混合セメントなどを使用する抑制対策、は他の2つの対策方法に比べれば採用実績が少ない。それは①総量規制や③安全な骨材の使用に比べて効果の程度と抑制機構が不明確であることや、早期強度・中性化速度などの他の性能が低下することが主たる原因であると考えられる。

アルカシシリカ反応抑制効果のあるものの例としてはフライアッシュがそのひとつに挙げられる。フライアッシュによる抑制機構としては、第一にセメントをフライアッシュに置換することによるアルカリ総量の低下が挙げられるが、それだけにはとどまらない。フライアッシュのポゾラン反応が進行することで水酸化カルシウムが消費されることもアルカリ骨材反応の抑制には効果的である。Chatterji(1979)や岸谷ら(1984)は、細孔液中の水酸化カルシウム濃度が小さくなると、アルカリ骨材反応が抑制されること、水酸化カルシウムが存在しない場合にはアルカリ骨材反応による膨張が生じなくなることを実験的に示している。また、本申請者らは、電気化学的に高濃度のアルカリ集積が生じた場合であってもフライアッシュが混和されている場合には膨張量が顕著に低下することを明らかにした(田中ら, 2008)。

このようにフライアッシュはアルカリ骨材反応の抑制に有効であるものの、なぜ水酸化カルシウムがないと体積膨張が生じなくなるのかという疑問に対する答えは見つか

っていない。また、確実にアルカリ骨材反応が抑制されるフライアッシュの混和率に関する統括的な研究は未だない状況である。

2. 研究の目的

コンクリートで生じるアルカリ骨材反応は、JISをはじめとした抑制対策によって解決がはかられてきたが、高強度コンクリートや再生コンクリートを対象とした場合には既往の抑制対策で解決を図ることが難しく、新たな課題となっている。一方、フライアッシュは過去にはコンクリートダムにおいて、その特性が生かされ利用されたが、現在はその役目を終えつつある。このような状況において本研究では、フライアッシュが有する性能を有効に利用すべく、フライアッシュを主体としたアルカリ骨材反応抑制対策法の具体的な方法の提案と、抑制効果の立証および抑制機構の解明を目的として、研究を実施する。

3. 研究の方法

(1) フライアッシュによる ASR 抑制効果の確認

フライアッシュによる ASR 抑制効果を確認するために、モルタルバーを製作し、長期間にわたり(最大1年)、長さ変化を計測した。試験因子は、フライアッシュの種類、混和材の種類、混和材添加量、骨材の種類、アルカリ量とした。フライアッシュの種類は産地(3種類)と品質(Ⅱ種、Ⅳ種)の異なる計4種類で実験を行った。混和材の種類は、フライアッシュに加え、高炉スラグ微粉末、シリカヒューム、シリカ質微粉末の計4種類とした。添加量は、混和材の種類に応じて10~90%の間で、適宜調整した。アルカリ量は、モルタル体積あたり6~22kg/m³の範囲で適宜調整した。これに加えて、混和材の組み合わせ使用の効果についても、モルタルバー法によって確認した。

(2) 細孔溶液の元素分析

フライアッシュをはじめとする混和材による ASR 抑制メカニズムを明らかにすることを目的として、細孔溶液の元素分析を実施した。まず、数種類の混和材を使用して、モルタル試験体を製作した。次に、モルタル試験体を圧搾し、内部の細孔溶液を抽出した。最後に、ICPにより元素分析を行った。

(3) 反応性鉱物の反応速度の検討

反応性鉱物の反応速度について検討するために、アルカリ溶液中での反応性骨材からの溶解シリカ量とアルカリ消費量の化学分析を行った。温度、時間、アルカリ濃度、骨材粒径を試験因子とした。

(4) 数値解析モデルによる長期膨張予測

魚本らが提案している、一次元拡散反応則に基づく膨張予測モデルを拡張することで、数値計算によって、ASRによる膨張挙動を再現した。また、混和材による抑制効果についても、評価可能な数値計算方法の提案を試みた。

(5) その他の実験

反応性骨材に含まれる反応性鉱物の同定のために、X線回折を行った。また、基本的な物理特性を把握するためにモルタルの強度試験も実施した。

4. 研究成果

(1) フライアッシュによる ASR 抑制効果の確認

フライアッシュによる ASR 抑制効果を確認するために、モルタルバーを製作し、長期間にわたり、長さ変化を計測した。その結果の一例を図-1に示す。セメントを、フライアッシュで置き換えると、置換率が10%以上の範囲では、置換率を大きくするほど、膨張ひずみが抑制されることが示された。

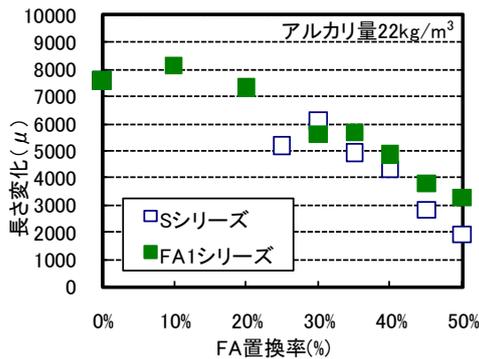


図-1 フライアッシュの置換率と8週間目の長さ変化の関係 (S, FA1 は産地の異なる JIS II 種灰)

このような抑制効果はフライアッシュの産地によらず、品種が同じであれば、ほぼ同等であることが示された。

このほかに、モルタルバーの膨張量測定試験から、以下の研究成果が得られた。(1) フライアッシュ使用量を増加することで、膨張反応が生じない限界アルカリ量が増加する。(2) セメントの種類に関しては、早強セメントと普通セメントでは違いがほとんどないものの、それらに比べると低熱セメントを使用した場合には、膨張量が若干小さくなる。(3) 水紛体比が小さい場合には、若干ながら膨張量が大きくなる。(4) フライアッシュやシリカヒュームといった、シリカ系の混和材の抑制効果の大小は、比表面積によって整理

可能である。(5) 高炉スラグ微粉末にも ASR 抑制効果があるが、フライアッシュの方が抑制効果は大きい。(6) 複数の混和材を使用した場合の抑制効果は、個々の材料を使用した場合の抑制効果が足し合わされると考えてよい。(7) 膨張を抑制させるための混和材使用量は、反応性骨材の種類に依存する。

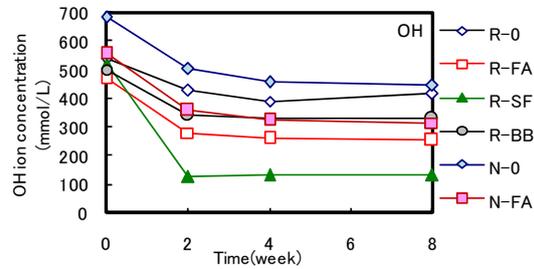


図-2 養生日数と細孔溶液中の水酸化物イオン濃度の関係 (R は反応性骨材, N は普通骨材を表す)

(2) 細孔溶液の元素分析

フライアッシュ (N-FA, R-FA)、高炉スラグ微粉末 (R-BB)、シリカヒューム (R-SF) をセメントに30%体積置換したモルタルの細孔溶液の水酸化イオン濃度を図-2に示す。混和材がない場合 (N-0, R-0) と比べると、どの混和材を使用しても水酸化物イオンは減少することがわかる。また、その減少量が大きいほど、モルタルバー法における膨張量は小さくなることから、混和材による主たる抑制メカニズムは、混和材が硬化過程でアルカリを消費することにあることが明らかとなった。

(3) 反応性鉱物の反応速度の検討

反応性鉱物の反応速度について検討するために、アルカリ溶液中での反応性骨材からの溶解シリカ量とアルカリ消費量の化学分析を行った。図-3に測定結果の一例を示す。

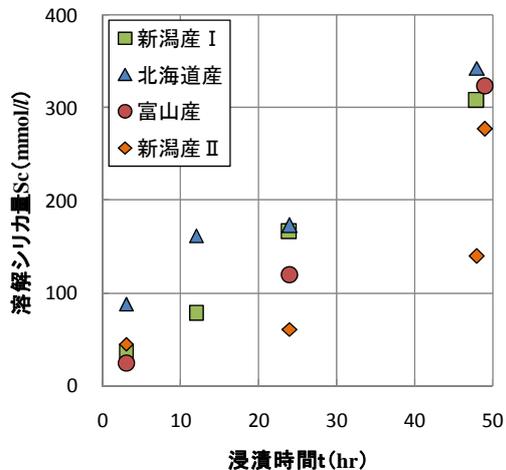


図-3 1Nアルカリ溶液への浸漬時間と骨材25gあたりからの溶解シリカ量の関係

いずれの骨材においても、時間にはほぼ比例して溶解シリカ量が増加することが明らかとなった。このほかに、以下に挙げる研究成果が得られた。(1)反応速度はアルカリ量に比例する。(2)反応速度の温度依存性はアレニウス則で整理できる。(3)骨材粒径の影響はほとんどない。

(4) 数値解析モデルによる長期膨張予測

化学分析によって得られた反応速度を用い、一次元拡散反応則に基づく膨張予測モデルを拡張することで、ASRによる膨張挙動を数値計算によって再現した。図-4に、本研究で開発した数値計算手法による予測結果と、実験値の比較を示す。この図から、提案手法は、異なるアルカリ量であっても、実験値を適切に予測できることがわかる。同様に、混和材による抑制効果についても、定量評価可能なモデルを組み込み、その妥当性を検証した。

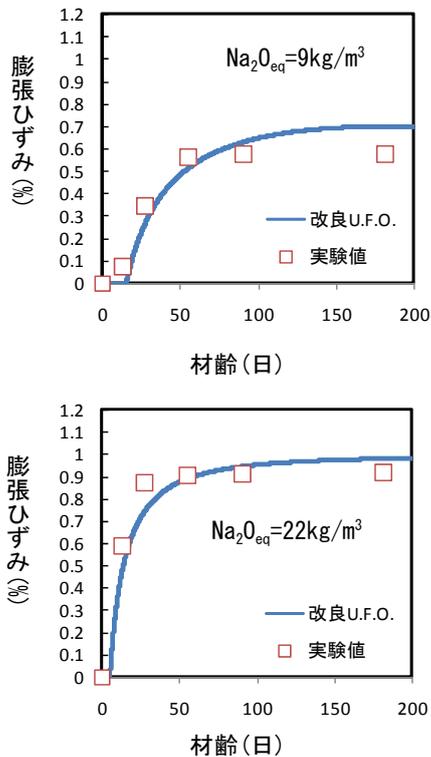


図-4 膨張量予測モデルによる計算値と実験値の比較

開発した数値計算モデルを用いて、50年間のモルタルの膨張挙動予測を行った結果を図-5に示す。このように、本研究で提案した数値計算モデルを用いれば、施工後数年経ってから、有害な膨張反応が生じるような現象を、事前に予測することが可能となる。また、そのような膨張反応に対して、どのよ

長さ変化(%)

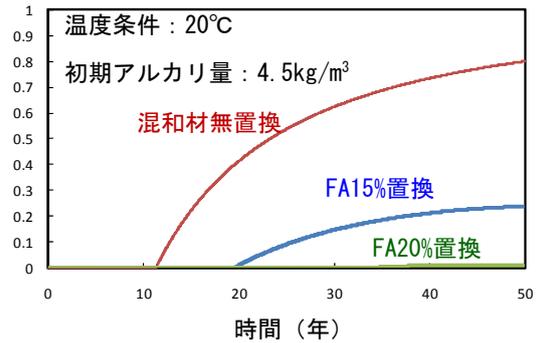


図-5 長期予測による混和材の膨張抑制効果

うな対策を行えば、十分な抑制効果が得られるのかをシミュレートすることができる。ただし、本研究では骨材寸法の影響について検討をしきれなかった。そのため、モルタルに対しては十分に適用可能であるものの、コンクリートの膨張挙動の予測に課題が残った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 速水悠二、田中泰司、アルカリ環境レベルと骨材反応性に応じたフライアッシュによるアルカリ骨材反応抑制対策の実験的検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 31、2009、1303-1308
- ② Yasushi TANAKA, Yuji HAYAMIZU and Takumi SHIMOMURA, Fly ash concrete as the preventive measure against ASR in electrochemical desalination, Proceedings of 4th International conference on construction materials, 査読有、Vol. 4, 2009, 941-946
- ③ Y. Tanaka and Y. Hayamizu, Side effect of electrochemical desalination in concrete structures, Service life design for infrastructure, 査読有、Vol. 2, 2010, 715-722
- ④ 田中泰司、速水悠二、須藤卓哉、混和材の組み合わせがアルカリシリカ反応抑制効果に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、査読有、Vol. 64、2011、406-412
- ⑤ 村中誠、田中泰司、速水悠二、化学法における時間・温度・骨材粒径の影響と反応速

度論による評価、セメント技術大会概要集、
査読無、Vol. 65、2011、310-311

- ⑥ 臼井裕規、下村匠、田中泰司、フライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性の照査技術の構築、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 32、2010、395-400
- ⑦ 神田麻衣子、田中泰司、下村匠、収縮性骨材を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性、土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集、査読無、Vol. 28、2010、304-307
- ⑧ 須藤卓哉、田中泰司、腐食ひび割れを有するコンクリート部材の押し抜きせん断試験、土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集、査読無、Vol. 28、2010、338-341
- ⑨ 神田麻衣子、田中泰司、下村匠、骨材の体積変化特性がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響、セメント技術大会概要集、査読無、Vol. 65、2011、212-213
- ⑩ 須藤卓哉、田中泰司、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷機構、セメント技術大会概要集、査読無、Vol. 65、2011、122-123

[学会発表] (計 5 件)

- ① Yasushi TANAKA, Fly ash concrete as the preventive measure against ASR in electrochemical desalination, 4th International conference on construction materials, 2009年8月26日, 名古屋国際センター(名古屋市)
- ② Y. Tanaka, Side effect of electrochemical desalination in concrete structures, 2nd International symposium on service life design for infrastructure, 2011年10月5日, Delft Univ. Tec. (the Netherlands)
- ③ 臼井裕規、フライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性の照査技術の構築、コンクリート工学年次大会 2010、2011年7月7日、ソニックシティ(さいたま市)
- ④ 神田麻衣子、収縮性骨材を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性、第28回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会、2011年11月25日、ハイブ長岡(長岡市)
- ⑤ 須藤卓哉、腐食ひび割れを有するコンクリ

ート部材の押し抜きせん断試験、第28回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会、2011年11月25日、ハイブ長岡(長岡市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 泰司 (TANAKA YASUSHI)
長岡技術科学大学 工学部・助教
研究者番号：40377221

以上