

令和元年6月9日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04393

研究課題名(和文) 微細構造の理解に基づく内部膨張反応で劣化した構造物の診断と性能予測

研究課題名(英文) Diagnosis and prognosis of structure affected by internal swelling reactions based on microstructural analysis

研究代表者

川端 雄一郎 (Kawabata, Yuichiro)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・主任研究官

研究者番号：10508625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：アルカリシリカ反応(ASR)や遅延エトリンガイト生成(DEF)などのコンクリートの膨張劣化(ISR)に対する診断技術および予測技術の構築に関する研究を行った。まず診断技術として、ASRでの骨材およびペーストの微細損傷やDEFのギャップの生成など、その劣化の特徴を評価した。次に、ASRに関して、微細構造を反映した予測モデルを構築し、既存の数値解析に実装した。さらに、膨張予測のための試験法を検討した。また、数値解析と本試験法との併用によって、野外に暴露されたコンクリートの膨張挙動を概ね予測することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果として、コンクリートの劣化現象に対して、微細構造の観点からアプローチし、種々の機器分析で様々な現象を解明することができた点は学術的意義が大きい。また、工学的観点で、室内試験と数値解析の併用によってコンクリートの膨張を概ね予測できるようになったことは、将来的な構造物の効率的な維持管理や長寿命化に寄与することができる点は社会的にも意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：The methods for diagnosis and prognosis of concrete affected by Internal Swelling Reactions (ISRs) such as alkali-silica reaction (ASR) and delayed ettringite formation (DEF) have been investigated in this study. Firstly, the characteristics of microstructural damage of aggregate and paste in the case of ASR and gap formation in the case of DEF were evaluated. Then the model reflecting the microstructural damage was established and implemented in the numerical analysis developed. In parallel, the testing method for predicting expansion of concrete was also developed. As a result, expansive behavior of concrete block exposed to the field was fairly simulated by combining the numerical analysis and laboratory test.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート アルカリシリカ反応 遅延エトリンガイト生成 診断 予測 維持管理

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

アルカリシリカ反応 (ASR) や遅延エトリンサイト生成 (DEF) などのコンクリートの膨張劣化は構造物にひび割れや変形を生じさせることで使用性に影響を与える他、極端な場合には鉄筋の降伏・破断等による安全性の低下を招く場合がある。既設コンクリート構造物では、このような内部膨張反応 (ISR) の原因を適切に診断し、その結果を基に構造物の性能評価・予測を行って維持管理することが重要である。

ISR が生じた構造物の維持管理にあたって、コンクリートの微細構造の変化を理解し、その上でコンクリートの劣化状態を診断し、また今後の挙動を予測することが重要である。本研究では、診断技術と予測技術に着目した。診断技術では、劣化原因とその寄与度を適切に把握する必要がある。また予測技術では、微細構造の変化を考慮したモデルを構築するとともに、予測モデルのパラメータを推定するための工学的試験法が必要である。

### 2. 研究の目的

以上の背景から、本研究は「微細構造の理解に基づく内部膨張反応で劣化した構造物の診断と性能予測」の構築を目指し、以下を目的とした。

- (1) 損傷機構の理解に基づく ISR の微細構造診断技術の構築
- (2) 微細構造を反映した予測モデルの構築と数値解析への実装
- (3) ISR 膨張予測のための工学的試験法の考案

### 3. 研究の方法

本研究では、主に以下の検討を行った。

#### (1) ISR の微細構造診断技術の構築

ASR によるコンクリートの微細損傷を評価するため、温度の異なる促進試験を実施し、そのコンクリートから分析用のサンプルを作製し、画像解析により骨材内部やセメントペーストの損傷状態を評価するとともに、マクロに計測された膨張率と比較することで、膨張挙動に及ぼす微細損傷の影響を検討した。また、セメントペーストやモルタルおよびコンクリートについて、 $SO_3$  を負荷した上で高温履歴を与え、DEF を生じさせるとともに、経時的に分析を行うことで、微細構造の変化をとらえた。さらに、セメントの一部をフライアッシュ (FA) や高炉スラグ微粉末 (BFS) で置換したサンプルに対して各種分析を行うことで、微細構造の変化を整理し、その抑制メカニズムを検討した。

#### (2) 微細構造を反映した予測モデルの構築と数値解析への実装

コンクリート内部での微細損傷発生後の ASR ゲルの流動等を考慮したモデルを構築し、数値解析モデルに実装した。また、温度やアルカリ総量を変化させたコンクリートの促進試験の結果を用いてモデルのパラメータを同定し、温度やアルカリ総量がモデルのパラメータに及ぼす影響について整理した。

#### (3) ISR 膨張予測のための工学的試験法の考案

コンクリートの膨張挙動を予測するための工学的試験法について検討し、その試験データを用いて数値解析を行い、暴露試験等と比較することで、妥当性を評価した。

### 4. 研究成果

本研究の主な成果を以下に示す。

#### (1) ISR の微細構造診断技術の構築

温度の異なる促進試験を行ったコンクリートからサンプルを切り出し、SEM の反射電子像で分析した。十 mm 程度の骨材全体の微細損傷を評価するため、倍率 800 倍で複数の画像を  $12 \times 12$  枚 (=144 枚) 撮影し、その画像からモンタージュを作成し、骨材内部での損傷の分布や損傷率 (= 骨材面積に対する損傷部の面積率) を画像解析で求めた (図-1)。

その結果、特に膨張が顕著になった後、骨材の微細損傷の程度と膨張率には相関がないことが確認された。また、温度が高くなると、セメントペースト部の損傷が少なくなることが明らかになった。

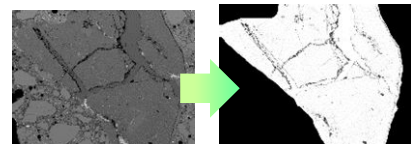


図-1 モンタージュ画像解析

このメカニズムとして、骨材内部での微細損傷が発生した後の ASR ゲルの流動が微細損傷の程度や分布、ひいてはコンクリートの膨張挙動に影響していることが考えられた。これらの結果から、気温の変動を強く受ける構造物では微細構造分析の結果から過去の膨張率を推定することは難しい可能性があることがわかった。ただし、ASR 発生の有無という観点では、骨材の微細損傷を定量することで評価ができると考えられた。

また、DEF 膨張挙動を測定しながら、AI の挙動や内部水和物の化学組成を XRD や固体 NMR、SEM/EDS で評価した。その結果、内部水和物の S/Ca が高く、また  $^{27}Al$ -NMR における 4ppm のピーク強度が大きいほど、DEF の膨張ポテンシャルが高いことが明らかになり、これらの手法が DEF の診断を行う上で有用と考えられた。また、X 線 CT を用いた DEF が生じたコンクリ

ートを分析した結果、コンクリート表面で確認されたひび割れは表面から約 10mm でとどまっております。内部には骨材とセメントペースト界面の隙間 (= ギャップ) が生成していること、またサンプルに対するギャップ量から推定される膨張率と実際の膨張率には概ね相関があることが確認された。したがって、X 線 CT で得た画像に対して画像解析を行うことで、コンクリートが過去に生じた膨張率を推定できる可能性があることがわかった。ただし、本実験は無拘束状態での検討結果であり、現在追加で拘束状態での実験を行っているが、現時点では膨張率が十分でなく、今後の課題である。

さらに、FA や BFS による ASR および DEF の膨張抑制効果について検討を行い、微細構造の観点から評価した。ASR では BFS の置換により ASR ゲルが生成されず、また水和物へのアルカリ (Na + K) 固定量が増加していることを明らかにした。また、FA および BFS の DEF 抑制効果について、長期養生した試験体を分析した結果、内部水和物の S/Ca は比較的高い状態にあり、FA および BFS を置換した場合でも DEF 膨張ポテンシャルを有している可能性が高いこと、ただし硬化体の緻密化により物質移動抵抗性が飛躍的に高まっていることで DEF が抑制されている可能性が高いこと (遅延効果)、が明らかになった。また、骨材界面にギャップが生成されておらず、DEF 膨張を生じていないことが確認された。

以上の結果から、本研究で検討した微細構造診断技術でコンクリートの膨張・損傷を概ね評価することができた。

### (2) 微細構造を反映した予測モデルの構築と数値解析への実装

本検討では、上記の ASR に関する検討結果を基に、ASR ゲルの膨張効率低下モデルを提案した。過去のモデルでは、ASR ゲルの単位生成量と膨張率を線形と仮定していたが、微細損傷に伴う膨張効率の低下を考慮したモデルを構築し、数値解析に実装した。また、温度やアルカリ総量が異なるコンクリートの ASR 膨張挙動の結果を用いて本モデルのパラメータを同定し、ASR ゲルの膨張効率に及ぼす温度およびアルカリ総量の影響を評価した。その結果、温度高く、またアルカリ総量が多いほど膨張効率が低下することが明らかとなった。また、応力作用下での ASR 膨張挙動に関するマクロモデルに対して損傷モデルを導入し、コンクリートの ASR 膨張挙動を再現した。その結果、損傷モデルを導入することで実験データに対して比較的整合した結果が得られることがわかった。

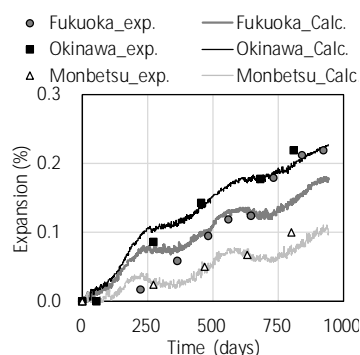


図-2 膨張解析

さらに、下記の工学的試験法のデータを用いて屋外のコンクリートの膨張挙動を予測するための数値解析手法を構築した。紋別、福岡、沖縄に暴露した同一配合のコンクリートブロックの膨張挙動のシミュレーションを行い、実験結果を概ね再現できることを明らかにした(図-2)。

果を用いてモデルのパラメータを同定し、温度やアルカリ総量がモデルのパラメータに及ぼす影響について整理した。

### (3) 微細構造を反映した予測モデルの構築と数値解析への実装

ASR 膨張の予測のための試験法について検討した。試験法として、日本コンクリート工学会の研究委員会 (JCI-TC115FS) で提案された試験法をベースに、コンクリートを被覆する湿布について、アルカリ溶液の濃度を検討し、新たな濃度設計方法を提案した。本試験で得られた膨張率と野外暴露試験の結果を比較した結果、高い相関が確認され (図-3)、本試験法の有用性が示された。また、上述の通り、数値解析手法と併用することで、コンクリートの暴露される環境に応じた膨張挙動を概ね予測することができた。

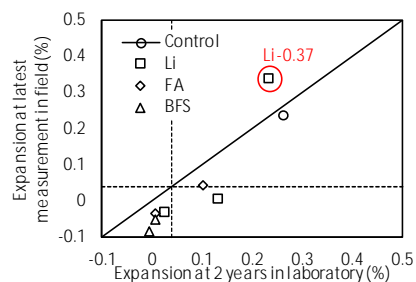


図-3 室内試験と野外試験の比較

DEF について、残存膨張を予測するための試験法を検討した。コンクリート中のアルカリを早期に溶脱させるためにコンクリートから厚さ 15mm 程度の円盤状のサンプルを作製し、水中に浸漬して直径方向の膨張率を計測した。その結果、膨張初期段階ではコンクリートの残存膨張性を若干低く評価するのに対して、膨張が進行し始めた段階ではコンクリートの膨張率と整合した結果を示すことがわかり、DEF 膨張の残存膨張性を推定する試験方法として有用である可能性が示された (図-4)。

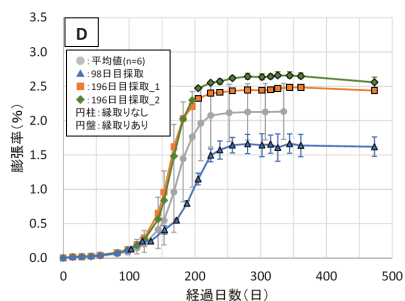


図-4 残存膨張試験

これらの研究成果を取りまとめ、論文等で発表した。また、これらの成果を発展されるため、今後の研究課題を整理した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計20件)

- (1) Y. Kawabata, K. Yamada, S. Ogawa, Y. Sagawa: Numerical simulation of the expansion behavior of field-exposed concrete blocks based on a modified concrete prism test, Proc. of Int. Conf. on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019) Durability, monitoring and repair of structures, pp. 230-237, 2019, 査読有
- (2) K. Yamada, Y. Kawabata, S. Ogawa, K. Shibuya, J. Etoh, A. Teramoto, G. Igarashi, I. Maruyama: Optimization of the concrete prism test for ASR expansion by alkali-wrapping and a new approach assessing the alkali reactivity of concrete for nuclear facilities, Proc. of Int. Conf. on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019) Durability, monitoring and repair of structures, pp. 152-159, 2019, 査読有
- (3) 小川彰一, 川端雄一郎, 渡邊禎之: フライアッシュによる DEF 抑制効果に関する検討, セメント・コンクリート, No.864, pp.28-34, 2019, 査読無
- (4) 川端雄一郎, 羽瀧貴士, 忽那惇, 与那嶺一秀: 海水練りコンクリートの ASR 膨張に対する高炉スラグ微粉末の抑制効果 < 第 46 回セメント協会論文賞受賞論文 >, セメント・コンクリート, No.864, pp.42-47, 2019, 査読無
- (5) 川端雄一郎: 空隙水のアルカリ制御による ASR に対する材料設計, コンクリート工学, Vol. 56, No. 5, pp.426-430, 2018, 査読無
- (6) Y. Kawabata, K. Yamada, G. Igarashi and Y. Sagawa: Effects of solution type on alkali release from volcanic aggregates -Is alkali release really responsible for accelerating ASR expansion? -, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp. 61-74, 2018, 査読有
- (7) Y. Kawabata, K. Yamada, Y. Sagawa and S. Ogawa: Alkali-Wrapped Concrete Prism Test – New Testing Protocol Toward a Performance Test against Alkali-Silica Reaction-, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp.441-460, 2018, 査読有
- (8) Y. Kawabata and K. Yamada: Understanding of the expansion mechanism by ASR and its impact on testing method and expansion estimation, Conference in honor of centennial of laboratory of construction materials and 60<sup>th</sup> birthday Prof. Karen Scrivener, pp.121-124, 2018, 査読無
- (9) Y. Kawabata: Diagnosis on Expansion of Heat-Cured Precast Concrete Blocks Due to Delayed Ettringite Formation in Japan, Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on the Durability of Concrete Structures, TIM-02, 2018, 査読有
- (10) 川端雄一郎, 羽瀧貴士, 忽那惇, 与那嶺一秀: 海水練りコンクリートの ASR 膨張に対する高炉スラグ微粉末の抑制効果, セメント・コンクリート論文集, Vol. 71, pp. 323-330, 2017, 査読有
- (11) 川端雄一郎, 山田一夫, 柳川貴光, 江藤淳二: アルカリラッピングしたコンクリートプリズム試験におけるコンクリートの ASR 膨張挙動のモデル化, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 17, pp. 491-496, 2017, 査読有
- (12) 川端雄一郎, 山本貴士, 山田一夫: コンクリート構造物の ASR 制御に向けた設計と維持管理の考え方, 性能規定に基づく ASR 制御型設計・維持管理シナリオに関するシンポジウム論文集, pp.291-298, 2017, 査読無
- (13) Y. Kawabata, K. Yamada and S. Ogawa: Modeling of environmental conditions and their impact on the expansion of concrete affected by alkali-silica reaction, Swelling Concrete in Dams and Hydraulic Structures, Sellier, Grimal, Multon and Bourdarot (Eds.), pp. 163-175, 2017, 査読有
- (14) K. Yamada, Y. Kawabata, S. Ogawa, K. Haga, Y. Sagawa, T. Ochiai: Importance of alkali-wrapping for CPT, Swelling Concrete in Dams and Hydraulic Structures, Sellier, Grimal, Multon and Bourdarot (Eds.), pp. 68-79, 2017, 査読有
- (15) Y. Kawabata, J.-F. Seignol, R.-P. Martin and F. Toutlemonde: Macroscopic chemo-mechanical modeling of alkali-silica reaction of concrete under stresses, Construction and Building Materials, Vol. 137, pp.234-245, 2017, 査読有
- (16) Y. Kawabata and K. Yamada: The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali-silica reaction at the pessimum proportion, Cement and Concrete Research, Vol. 92, pp.1-15, 2017, 査読有
- (17) Y. Kawabata, N. Yoshida, S. Ogawa and K. Yamada: External sulfate attack in Japan: a review, Proc. of Int. Workshop on external sulfate attack, pp. 83-92, 2016, 査読有
- (18) Y. Kawabata, J.-F. Seignol, R.-P. Martin and F. Toutlemonde : Influence of creep and stress states on alkali-silica reaction induced-expansion of concrete under restraint, Proc. of 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 15ICAAAR2016\_032, 2016, 査読有
- (19) Y. Kawabata, R.-P. Martin, J.-F. Seignol and F. Toutlemonde: Modelling of evolution of transfer properties due to expansion of concrete induced by internal swelling reaction, Proc. of 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 15ICAAAR2016\_033, 2016, 査読有
- (20) Y. Kawabata, K. Yamada, S. Ogawa, R.-P. Martin, Y. Sagawa, J.-F. Seignol and F. Toutlemonde :

Correlation between laboratory expansion and field expansion of concrete: Prediction based on modified concrete expansion test, Proc. of 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 15ICAAR2016\_034, 2016, 査読有

〔学会発表〕(計7件)

- (1) 小川彰一, 青山弥佳子, 山田一夫, 川端雄一郎: セメントペーストを用いた DEF 膨張メカニズムの研究, 第70回セメント技術大会講演要旨, 2016
- (2) 川端雄一郎, 小川彰一, 高橋晴香, 渡邊禎之: 遅延エトリンガイトによる膨張に対するフライアッシュの長期的抑制効果, 土木学会第72回年次学術講演会, pp.925-926, 2017
- (3) 渡邊禎之, 吉野徹, 川端雄一郎, 高橋晴香, 小川彰一: 固体 NMR を用いた遅延エトリンガイト生成によるモルタルの膨張に及ぼすフライアッシュの抑制効果の検討, 原子力学会2017年秋の大会, 2H09, 2017
- (4) 小川彰一, 高橋晴香, 川端雄一郎, 渡邊禎之: フライアッシュによる DEF 抑制効果に関する検討, 第72回セメント技術大会講演要旨, pp.218-219, 2018
- (5) 川端雄一郎, 染谷望, 田中豊, 河村直哉: 室内試験および屋外暴露試験による ASR 抑制対策の比較, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, V-338, pp.675-676, 2018
- (6) 川端雄一郎, 小川彰一, 高橋晴香, 渡邊禎之: DEF 膨張に対する高炉スラグ微粉末の長期抑制効果, 第73回セメント技術大会講演要旨, pp.262-263, 2019
- (7) 与那嶺一秀, 川端雄一郎, 小川彰一, 柴田真仁: DEF の生じたコンクリートに対する残存膨張性の評価方法の検討, 第73回セメント技術大会講演要旨, pp.264-265, 2019

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 山田一夫

ローマ字氏名: Kazuo Yamada

研究協力者氏名: 小川彰一

ローマ字氏名: Shoichi Ogawa

研究協力者氏名: Francois Toutlemonde

研究協力者氏名: Jean-Francois Seignol

研究協力者氏名: Renaud-Pierre Martin

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。