

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2016

課題番号：15H05531

研究課題名(和文)ゲル・液状物質の膨張による劣化が生じるコンクリート構造のマルチスケール耐久性力学

研究課題名(英文)Multi-scale durability mechanics of concrete structures deteriorated by gel-liquid expansion

研究代表者

高橋 佑弥 (Takahashi, Yuya)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・講師

研究者番号：10726805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：ゲル・液状水による膨張劣化が生じる鉄筋コンクリート構造物の挙動予測のために、材料・構造統合解析システムに新たなモデルを実装し、耐久性力学が評価可能な解析システムを構築した。アルカリ骨材反応による膨張性ゲル生成と、凍結融解作用による空隙水の凝固と膨張に関する化学-物理統合モデルを作成し、それらの複合劣化が計算可能なシステムを達成した。さらに、非破壊検査と数値計算を組み合わせることで、膨張劣化が生じた既存の鉄筋コンクリート床版を対象とした余寿命予測を予測する手法について提案した。

研究成果の概要(英文)：In order to predict the structural behavior of reinforced concrete deteriorated by gel or liquid water expansion, new models are installed to the existing material-structural coupled calculation system. The chemo-mechanical models for the expansive alkali silica gel and the volumetric changes due to frozen pore water are developed. As a results, the integrated calculation system can deal with the durability mechanics of concrete structures including the problem of combined deterioration of alkali silica reaction and freeze-thaw cycles. With the developed calculation system, the method to predict the fatigue lives of existing deteriorated reinforced concrete are proposed with the combination of simulation techniques and non-destructive testing methods.

研究分野：工学

キーワード：耐久性力学 アルカリ骨材反応 凍結融解作用 複合劣化 疲労

1. 研究開始当初の背景

本申請者の研究グループで 1980 年代より開発されてきた、コンクリートの挙動予測を目的とした数値計算システムについて、2000 年代に行われた構造解析システムと材料熱力学システムの統合により、三次元仮想空間上でのインフラ構造物の寿命予測が可能となりつつある。さらに、近年、地球化学無機平衡モデルが材料熱力学モデルに実装され、多様なイオン種一般による化学平衡反応を考慮した材料性能変化を追跡することが可能となっている。

一方で、構造物の性能を評価する上で、構造耐久性と材料劣化の相互作用を考慮に入れる「耐久性力学」の枠組みの必要性が高まっている。この耐久性力学の議論のためには、材料劣化モデル、構造性能モデル単体ではなく、両者の時間依存性と相互作用を同時に考慮することが不可欠である。特に活発な化学反応と体積変化が生じるアルカリ骨材反応(以下、ASR)や凍害については、難易度の高い問題として残されている状況である。

このような背景のもと、本研究課題を進めることとした。

2. 研究の目的

本研究は、前述の基盤解析技術を基に、化学反応によって生成するゲル物質やひび割れ中に存在する水の体積変化が構造性能に及ぼす影響を定量的に評価することで、材料劣化と疲労荷重が複合的に作用するインフラストックの余寿命推定を可能にするシステムを目指すものである。

3. 研究の方法

(1)ASR ゲル生成の化学反応・移動現象を対象とした質量保存則の実装を行う。コンクリート中の毛細管空隙およびひび割れへのゲル流出による膨張応力解放やゲルの粘性による多軸応力下の移動の時間依存性に留意してモデル化を行う。モデルの検証と現象理解のために複数スケールで試験体を作製し、材料挙動・構造挙動の追跡を行う。

(2)ひび割れ中液状水の圧力形成モデルを利用し、相変化による急激な体積変化を新たにモデルに組み込み、凍害を取り扱い可能なシステムを構築する。

(3)実大構造物の長期性能に着目して、化学反応が耐久性力学に及ぼす影響を検討する。鉄筋コンクリート床版を対象とし、ASR 膨張と凍害が床版の疲労寿命に与える影響を検討すると共に、化学劣化が生じた既存の鉄筋コンクリート床版の余寿命予測手法を開発する。

4. 研究成果

(1)ASR による膨張劣化を対象とし、生成 ASR ゲルの流動性に着目した室内実験を行った。3D 形状測定機を用いて、従来困難であった小寸法の供試体の ASR 膨張挙動を観

察することに成功し、様々なアルカリ供給条件で 1 年超の長期間にわたる実験を実施し、ASR 膨張においてゲルの流動性に伴う寸法依存挙動が存在することを実験的に明示した(図 1)。明らかになった ASR ゲル挙動を含め、化学反応論に基づく ASR ゲル生成と応力発生モデルを作成し、統合解析システムへ組み込んだ(図 2)。

また、開発した ASR 膨張・力学モデルを用いて、膨張性ゲルが生成されたコンクリート構造の変形と力学性能変化について検討を行った。実規模 PC 梁による既往の実験の再現解析により、ASR 膨張が生じた実規模コンクリートの変形、力学性能が良好に再現できることを示すと共に、それら解析的検討から、ひび割れの存在が翻って ASR 膨張挙動を左右している可能性が示された。そこでひび割れと膨張の相互作用に関して、小規模モルタル試験体と鉄筋コンクリート梁を作成し実験を行った。先行ひび割れを有する鉄筋コン

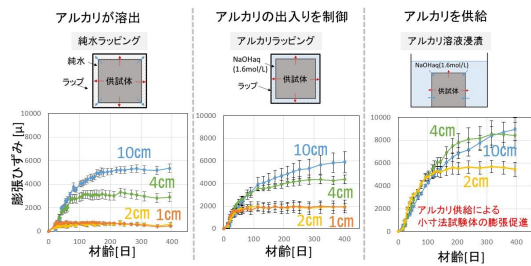


図 1 ASR 膨張の寸法依存性実験結果

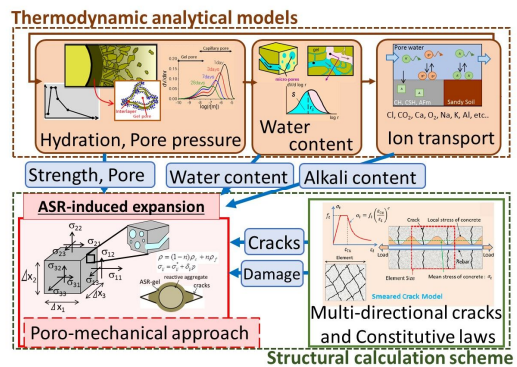


図 2 ASR モデルの解析システムへの実装

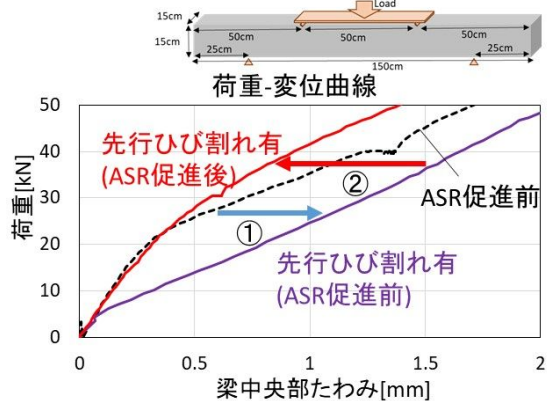


図 3 先行ひび割れを有する鉄筋コンクリート梁の載荷試験結果

クリート梁の ASR 膨張促進実験により、先行ひび割れが ASR 膨張挙動に影響を与えること、ひび割れ中の膨張性ゲルが力の伝達に寄与するために、梁の剛性が回復しうることが実験的に示された(図 3)。

(2)コンクリートの凍害を対象として、凍結融解作用による材料中の水の膨張収縮繰返しならびに損傷モデルを作成し、統合解析システムへ実装した。既に組み込まれているコンクリート材料中の空隙構造モデルを活用し、コンクリート材料中の有効空隙・間隙中の水の凝固による圧力生成モデルを作成することで、統合解析システムにおいて凍結融解作用による材料劣化を考慮可能とした。本モデルを ASR による膨張モデルと同一サブルーチン上で構築することで、ASR 膨張と凍害による複合劣化が取り扱い可能な解析システムが達成された(図 4)。既往の実験結果を対象とした解析的検討により、複合劣化の作用順序により膨張挙動・力学性能が全く異なりうることを示し、その解析的予測を検証するための実験を実施した。実験の結果、ASR 膨張は後に続く凍結融解作用による膨張を促進する傾向があるのに対し、凍結融解作用による膨張は後に続く ASR 膨張にはあまり影響を及ぼさないこと、ASR 膨張発生時に相対動弾性係数の回復が見られ、ASR ゲルが損傷を埋めた可能性があることが示された(図 5)。

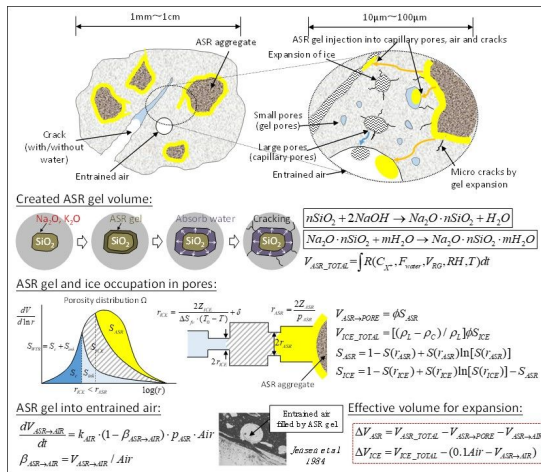


図 4 ASR-凍害複合劣化モデル

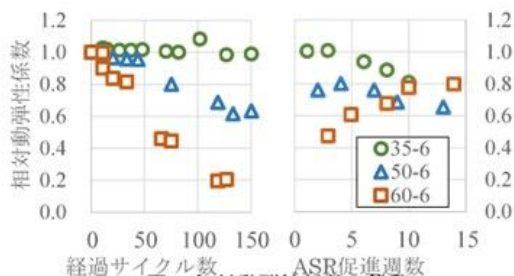


図 5 凍害後に ASR が生じた際の相対動弾性係数の回復傾向

(3)上記(1)および(2)を通じて構築されたコンクリート構造を対象とした複合劣化モデルを用いて床版の余寿命解析を実施した。各劣化の程度と複合作用の程度がどのように床版の余寿命に影響を与えるのか解析的に示した(図 6)。

加えて、材料劣化(特に ASR 膨張)が生じた既存コンクリート床版の余寿命を、非破壊検査手法と解析的アプローチを統合することで評価するデータ同化手法を検討した。床版下面のひび割れに加えて、ASR 発生の有無を非破壊検査・モニタリングによって判断することで、合理的に床版の余寿命を判定できることを示した(図 7)。

以上、コンクリート中に生じる膨張性物質に物性に応じた力学モデルを解析システムに実装し、多角的に検証することで、材料-構造相互作用を考慮した耐久性力学統合解析システムが実現された。

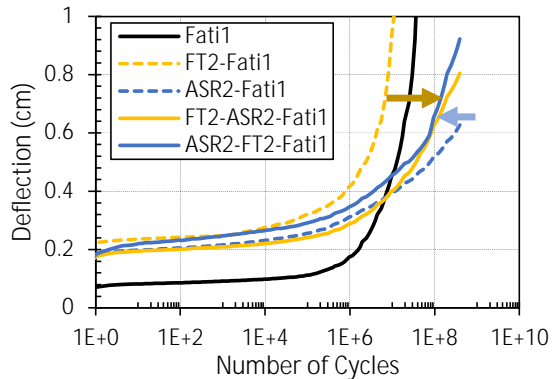


図 6 ASR と凍害複合劣化を受ける RC 床版の疲労寿命解析結果

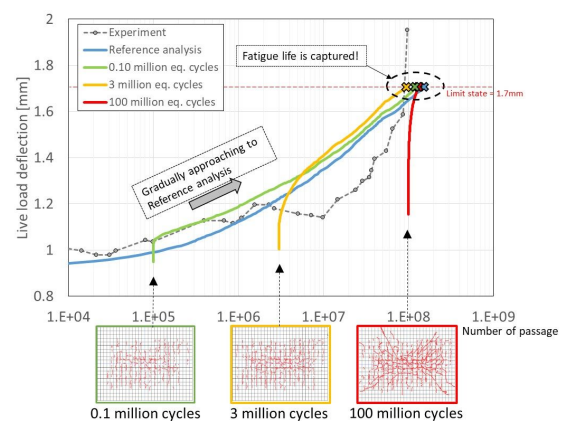


図 7 ASR 膨張が生じた鉄筋コンクリート床版を対象としたデータ同化による疲労寿命予測結果

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6件)

小川森平, 高橋佑弥, 前川宏一: ASRが生じるRC梁の膨張挙動と力学特性に及ぼす先行曲げひび割れの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, 2018, 査読有(採録決定)

Yuya Takahashi, Yasushi Tanaka, Koichi Maekawa (2018) "Computational Life Assessment of ASR-damaged RC Decks by Site-Inspection Data Assimilation" Journal of Advanced Concrete Technology, 16(1), 46-60, 査読有

Gong, F., Takahashi, Y. and Maekawa, K. (2017) "Strong Coupling of Freeze-Thaw Cycle and Alkali Silica Reaction -Multi-scale Poro-mechanical Approach to Concrete damages -" Journal of Advanced Concrete Technology, 15(7), 346-367, 査読有

Takahashi, Y., Ogawa, S., Tanaka, Y. and Maekawa, K. (2016). "Scale-Dependent ASR Expansion of Concrete and Its Prediction coupled with Silica Gel Generation and Migration" Journal of Advanced Concrete Technology, 14(8), 444-463, 査読有

Takahashi, Y., Ishida, T. (2016). "Modeling of Chloride Transport Resistance in Cement Hydrates by Focusing on Nanopores" Journal of Advanced Concrete Technology, 14(11), 728-738, 査読有

高橋佑弥, 田中泰司, 前川宏一: 固液二相モデルを用いたASR膨張モデルと床版疲労解析への応用, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1029-1034, 2016, 査読有

[学会発表](計13件)

Y. Takahashi, S. Ogawa, Y. Tanaka & K. Maekawa: Nonlinear coupling models of alkali-silica reaction and multi-directional cracked reinforced concrete, Computational Modelling of Concrete Structures, Proceedings of the Conference on Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures (EURO-C 2018), pp.353-362, 2018

F. Gong, Y. Takahashi & K. Maekawa: Computational modeling of combined frost damage and alkali-silica reaction to the durability of RC bridge decks, Computational Modelling of Concrete Structures, Proceedings of the Conference on Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures (EURO-C 2018), pp.335-344, 2018

Takahashi, Y., Taguchi, R. and Maekawa, K.: Data Assimilation for Performance Assessment of Existing Structural Concrete damaged by Alkali Silica Reactions, Fifteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, pp.1303-1311, Oct.

11-13, 2017

Fuyuan, G., Takahashi, Y. and Maekawa, K.: Modeling of the Expansion under Combined Freeze-thaw Cycles and Alkali Silica Reaction for Concrete Material, Fifteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, pp.1312-1319, Oct. 11-13, 2017

Shimpei Ogawa, Yuichiro Tanaka, Yuya Takahashi, Koichi Maekawa: Effect of Preceding Cracks on ASR Expansion of Concrete and Its Poro-Mechanical Modeling, Proceedings of Sixth Biot Conference on Poromechanics, pp.778-786, 9-13 July 2017

Ryo Taguchi, Yuya Takahashi, Koichi Maekawa: Long-Term Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Coupled with Poromechanical Model for Alkali Silica Reaction, Proceedings of Sixth Biot Conference on Poromechanics, pp.770-777, 9-13 July 2017

Takahashi, Y., Tanaka, Y. and Maekawa, K.: Multi-scale Fatigue Simulations of RC Bridge Slabs Subjected to ASR Expansions, Proceedings of the 7th International Conference of Asian Concrete Federation, No.28, Oct. 30-Nov. 2, Hanoi, Vietnam, 2016

小川森平, 高橋佑弥, 前川宏一: ASRゲルの移動性に伴うコンクリート膨張の寸法効果, 土木学会第71回年次学術講演会, 第V部, 2016

Takahashi, Y., Tanaka, Y., Maekawa, K.: Chemo-hygral and poro-mechanical modeling for ASR and structural performance assessment of RC bridge decks, Proceedings of 15th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, No.100, 2016

Y. Tanaka, Y. Takahashi and K. Maekawa: Crack-gel interaction on the static and fatigue failure of ASR-damaged RC slabs, Proceedings of 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-9, 2016

Takahashi, Y., Tanaka, Y. and Maekawa, K. (2015). Chemo-hygral model for ASR expansion and its effects on fatigue lives of bridge slabs, XIII Int. Conf. on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications

Takahashi, Y., Shibata, K., Maruno, M. and Maekawa, K. (2015). Uniaxial Restraint Tests under High-Stress Conditions and a Chemo-Hygral Model for ASR Expansion, CONCREEP 10, Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structure

Tanaka, Y., Takahashi, Y. and Maekawa, K. (2015). Computational Fatigue Life Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams, CONCREEP 10, Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structure

〔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
<http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/research/intro/T-j.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 佑弥 (TAKAHASHI Yuya)
東京大学・大学院工学系研究科・講師
研究者番号：10726805