

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01507

研究課題名(和文) 結晶/非結晶性膨張が生じるコンクリート構造のマルチスケールポロメカニクス

研究課題名(英文) Multi-scale poromechanics of structural concrete with the expansion of crystal or amorphous products

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)・准教授

研究者番号：10726805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：結晶/非結晶性物質の生成による膨張・応力導入が生じる鉄筋コンクリート構造物一般について、ひび割れ進展リスクと構造性能変化を評価する計算スキームを構築した。アルカリシリカ反応(ASR)による膨張について、ASRゲル生成物の時間依存の物性変化を考慮可能な計算モデルを開発し、さらに膨張材反応や遅延エトリンガイト生成反応のモデル化を行うことで、それら結晶性膨張へもポロメカニクスモデルの適用性を拡張した。開発したスキームを用いて、種々の材料劣化と疲労が複合した実道路構造物の余寿命を定量的に示すことに成功するとともに、近年注目が高まっている床版上面の土砂化を予測することが可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アルカリシリカ反応などのコンクリートの内部膨張反応を取り扱い可能であったシミュレーションモデルの適用性を、膨張材による膨張や遅延エトリンガイト生成といった他の結晶生成に伴う膨張へ拡張し、コンクリートの膨張ひび割れ現象一般を取り扱い可能な計算モデルを構築した。異なる膨張現象を一つの統一的なモデル(ポロメカニクス)を用いて再現することで、各膨張現象の本質的理解や、複合的に膨張が生じる場合の挙動予測が可能となっている。これらモデルは既存の構造性能評価システムに実装されているため、即座に工学応用が可能であり、本研究内でも実道路構造物の劣化予測と予防保全的維持管理の戦略提案を行うに至っている。

研究成果の概要(英文)：A computational scheme has been developed to evaluate the risk of crack propagation and the change in structural performance of reinforced concrete structures, where expansion and stress occur due to the formation of crystalline/amorphous materials. For expansion due to alkali-silica reaction (ASR), a computational model was developed to account for time-dependent changes in the physical properties of ASR gel products, and the applicability of the poro-mechanics model was extended to crystalline expansion by modeling the expansive additive reaction and delayed ettringite formation reaction. Using the developed scheme, the remaining life of a real road bridge structure with the combination of various material deteriorations and fatigue was quantitatively evaluated, and it was also shown that it is possible to predict disintegration on the upper surface of slabs, which has been attracting increasing attention in recent years.

研究分野：工学

キーワード：コンクリート アルカリシリカ反応 凍害 遅延エトリンガイト生成 膨張材 複合劣化 耐久性力学

1. 研究開始当初の背景

申請者の属する研究グループは1980年代より鉄筋コンクリートの経路依存型の三次元的非線形解析手法開発を行ってきた。1990年代からは材料初期水和から劣化まで追跡するマルチスケール熱力学連成解析システムを、2000年代からはそれら構造・材料両者を直結することで、三次元仮想空間上でインフラ構造物の寿命予測が可能なシステムを実現してきた。近年は申請者の参画する研究において、ポロメカニクス(二相系)モデルにより鋼材腐食、アルカリシリカ反応(ASR)、凍害由来の膨張と構造性能への影響の評価が可能となってきた。

一方、耐久性力学の文脈のもとで膨張劣化と構造性能変化の関係を論じる多くの研究がある。その中で例えばASR膨張の場合には追加応力により構造性能が寧ろ向上する事例も報告されている。更に、遅延エトリンサイト生成(DEF)や凍害など様々な要因により表面ひび割れが生じるが、膨張後のコンクリートの力学性能は膨張機構によって全く異なることも知られている。これは、膨張機構により内部の微細損傷やひび割れの進展度合、ひび割れ中を占める生成物質の働きが異なるためであると考えられる。表面ひび割れ、内部の微細損傷の状態を適切に把握し、RC/PCの構造性能との関係を正確に理解して将来予測を行うことが、膨張劣化が生じる構造物の維持管理において重要となる。

このような背景の中、ポロメカニクスにおける骨格内生成物モデルの適用範囲を液体から半固体まで拡張する中で、同様のポロメカニクスをより広い対象へ適用することで、このような内部応力による体積変化一般を網羅的に整理できるのではという考えに至った。

2. 研究の目的

本研究は、アルカリシリカ反応(ASR)や膨張材利用、遅延エトリンサイト生成(DEF)を初めとした結晶/非結晶性物質の生成による膨張・応力導入が生じる鉄筋コンクリート構造物一般について、ひび割れ進展リスクと構造性能変化を若材齢から更新期まで適切に評価する計算スキームを構築することを目指すものである。

3. 研究の方法

(1)コンクリート骨格内に生成するゲル物質の経時固化とそれによるコンクリートの力学性能変化をモデル化することで、二相系モデルの適用範囲を短期膨張評価から長期耐久性へと飛躍的に広げる。既往のモデルにある可視ひび割れ損傷の力学影響に加えて、 μm スケールの微細損傷とその力学影響を定式化し、多様なひび割れ状況にあるコンクリート構造物の力学性能変化を評価可能とする。

(2)膨張材の化学反応モデルを定式化することで、石灰系/CSA系膨張材による結晶/非結晶生成に基づく体積変化・応力場形成モデル($\text{nm}\text{-}\mu\text{m}$ スケールの二相系モデル)を構築する。加えて、エトリンサイトの高温での溶解過程・長期の再析出過程をモデル化することで、モデルをDEF膨張へも適用可能とする。

(3)実構造物や、実規模・実環境試験体を用いて、構築したモデルの実構造スケール且つ長期材齢への適用性を検証する各寸法の損傷と構造性能変化との関係性や生成物物性の時間依存性の丁寧な比較を通して、種々の膨張性劣化を生じるコンクリート構造の長期構造性能を評価可能な解析システムを達成する。

4. 研究成果

(1)ASRによるコンクリート膨張について、ひび割れ中に存在するASRゲルの経時的な物性変化とマクロな挙動との関連性について明らかにした。材令の異なるASR膨張試験体の力学性能試験により、膨張量以外にも力学性能を規定する支配的な要因があることを示す(図1)とともに、試験体内部に生じているASRゲルの微視的な化学組成と力学特性のSEM-EDS、ナノインデンテーションの測定を行うことで、ASRゲル自体の力学特性が大きく変化していること(図2)に起因して力学性能変化が生じている可能性を実験的に示した。

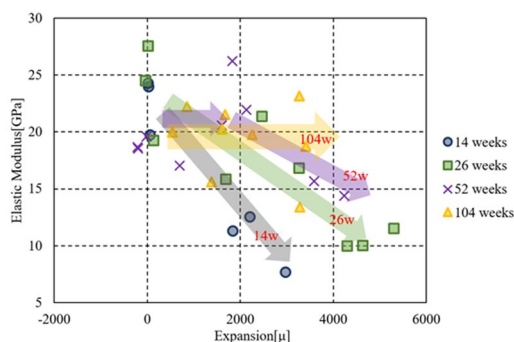


図1 ASR膨張後の力学性能変化の材齢による整理

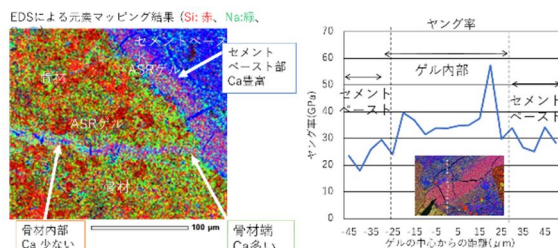


図2 SEM-EDS, ナノインデンテーションによるASRゲルの微視的物性評価

骨材中のアルカリイオンの物質移動と反応を最新の機構理解に基づいて改めて定式化するとともに、生成物の時間依存の物性変化(化学組成変化と密度変化)を考慮可能なモデルを開発し(図3)、ポロメカニクスモデルへ実装した。その結果、多様な材料条件・環境条件下での膨張推移を良好に再現可能なモデルとすることや、骨材粒径によって膨張量が異なるというペシマム現象を考慮することに成功した(図4)。

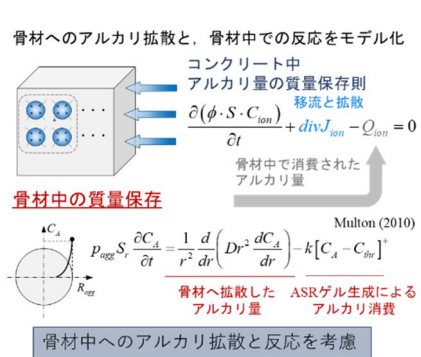


図3 骨材内の反応を考慮した ASR モデル

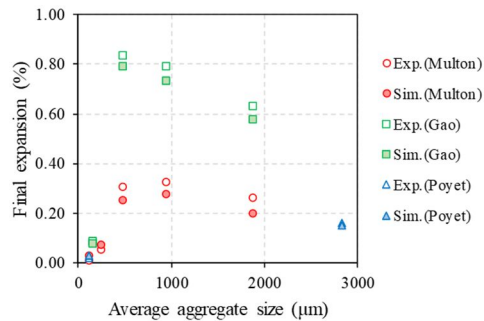


図4 構築した ASR モデルによるペシマム現象の再現結果

複数の劣化の複合的な進展の一つとして、ASR-凍害の複合劣化試験を実施し、複合劣化環境下での力学性能の変化について明らかにした。凍害による膨張は ASR 膨張速度にはあまり影響しないこと。凍害による損傷が、ASR ゲルがひび割れに浸透することで一時的に回復する可能性があることなどを、体系的な複合劣化試験より結論づけた。加えて得られた膨張進展挙動を、ポロメカニクスを基にしたモデルを用いて再現することに取り組んだ。ASR 膨張・凍害膨張両者における空気泡の効果に着目してモデルを微修正することで、複合劣化環境での膨張進展を再現可能であることを明らかにした(図5)。

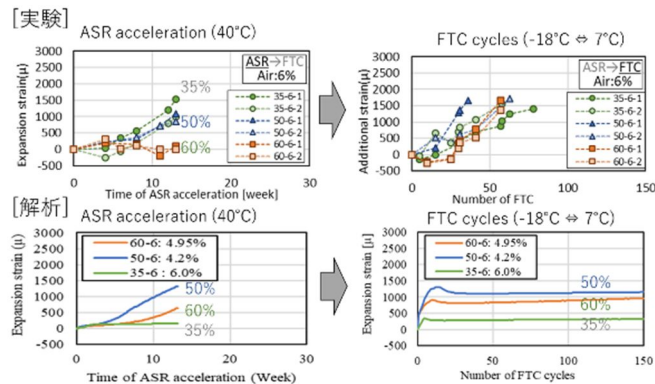


図5 ASR-凍害複合劣化の実験結果と再現解析結果

(2) ポロメカニクスモデルを新たに膨張材挙動へ拡張した。石灰系/CSA 系膨張材の化学反応挙動に基づいてエトリンガイトならびに $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の反応生成物量をモデル化し、ポロメカニクスに導入して、生成物の指向性に関するパラメータを調整することで材令極初期の膨張材による膨張挙動を考慮できるモデルを作成し、解析システムへ実装した。

さらに、本モデルを(DEF による膨張劣化に適用可能となるよう拡張した。材齢初期の高温養生期間におけるエトリンガイトの溶解過程と、その後長期での再析出過程に関する化学反応のモデルを実装することで(図6)、既往の様々な配合・環境条件下の DEF 膨張実験挙動を再現可能とした(図7)。また、膨張時の異なる損傷寸法を考慮することで DEF 膨張に特徴的な緩やかな力学性能低下を考慮可能となることを示した(図8)。

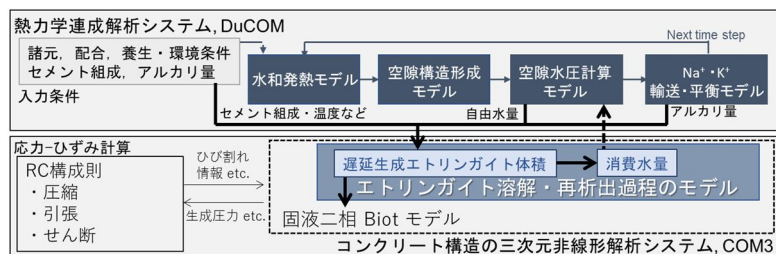


図6 DEF 膨張に関する計算スキーム

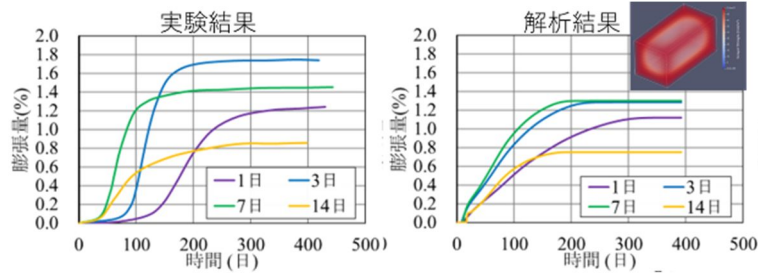


図 7 DEF 膨張実験の再現解析結果

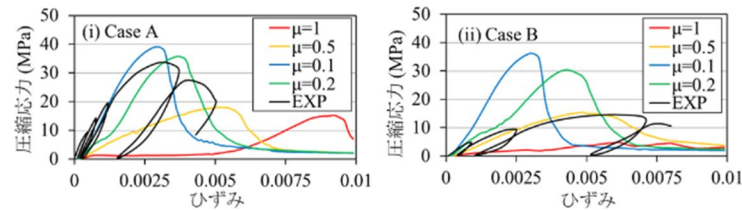


図 8 DEF 膨張後の圧縮性能解析結果

(3) ASR による膨張モデルの実規模-実環境下での適用性に関する検証を日本大学による実規模試験体の長期間計測結果を用いて行った。低温環境で ASR 膨張が停滞するモデルを新たに導入することで、自由膨張試験体の長期膨張挙動を良好に追跡できることを示した。一方、鉄筋や鋼桁による強い拘束がある条件で、体積膨張率が小さくなる現象を現状十分にモデル化出来ないことが明らかとなったため、粗大空隙への ASR ゲル吸収の圧力依存性パラメータを修正することで、実規模試験体の膨張挙動を良好に再現することに成功した(図 9)。

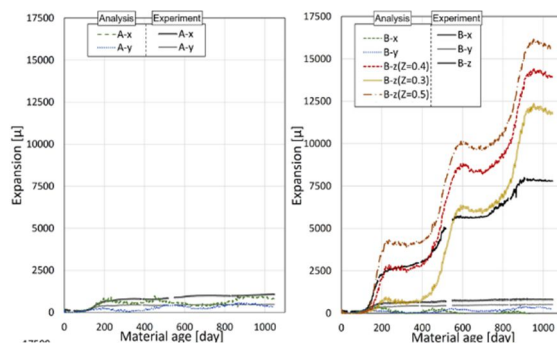


図 9 実規模 ASR 床版膨張解析結果

本研究で構築した計算スキームを用いて実構造物の挙動追跡解析を実施し、適用性を検証し、工学適用を試みた。疲労と水圧作用の複合により土砂劣化が顕在化している道路床版構造物に対してポロメカニクスモデルを適用し、土砂化が顕在化した時期を再現することに成功した(図 10)。今後の損傷進展の予測と維持管理費用の計算結果に基づいて予防保全的維持管理の方針を提案した。

また、東北地方において塩害・アルカリ骨材反応・凍害・疲労の複合作用を受けて撤去した道路構造物の損傷進展・残存力学的性能評価を実施した。撤去時のコンクリート内部の塩化物イオン分布や弾性係数から過去の作用履歴を推定して、構造物フルスケールのモデルを用いた損傷解析を実施することで、撤去時のひび割れが鉄筋腐食に主に起因するものであることを示し、それら材料劣化と疲労の複合による残存寿命を定量的に示すことに成功した。(図 11)

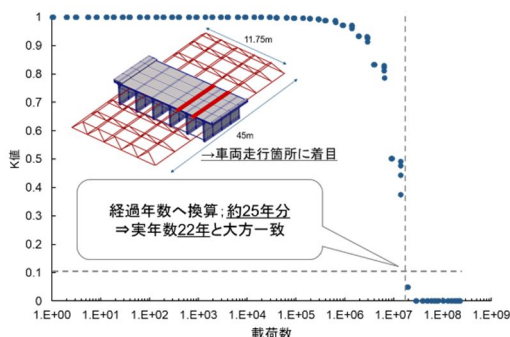


図 10 実橋梁の土砂化進展挙動解析結果

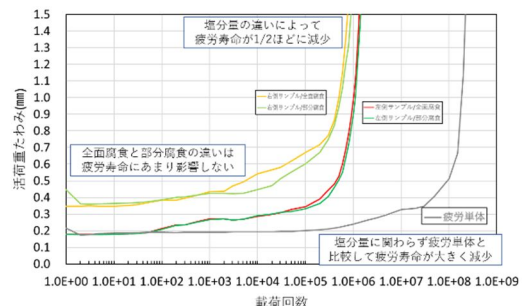


図 11 実橋梁の鋼材腐食・疲労複合挙動解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Okano Y., Takahashi Y.	4. 巻 101
2. 論文標題 Macroscale and Microscale Studies on Time-Dependent Mechanical Properties of Concrete with Alkali Silica Reactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 1881 ~ 1890
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-15-8079-6_173	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ji Xi, Joo Hyo Eun, Yang Zhehui, Takahashi Yuya	4. 巻 19
2. 論文標題 Time-dependent Effect of Expansion due to Alkali-silica Reaction on Mechanical properties of Concrete	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 714 ~ 729
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.19.714	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Joo Hyo Eun, Takahashi Yuya	4. 巻 122
2. 論文標題 Development of alkali-silica reaction model considering the effect of aggregate size	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 104149 ~ 104149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconcomp.2021.104149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 古川智也, 高橋佑弥	4. 巻 43(2)
2. 論文標題 道路橋鉄筋コンクリート床版上面における土砂化発生特徴に関する数値解析的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 421-426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 須藤健, 古川智也, 高橋佑弥	4. 巻 21
2. 論文標題 種々の劣化作用を受けたRC床版の土砂化発生傾向に関する解析的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 283-288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐藤咲, 魚地真道, 久保崇紀, 土屋智史, 高橋佑弥	4. 巻 21
2. 論文標題 スラブ軌道CAモルタルにおける温度変化と疲労の複合挙動に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 173-178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gong Fuyuan, Takahashi Yuya, Segawa Izuru, Maekawa Koichi	4. 巻 111
2. 論文標題 Mechanical properties of concrete with smeared cracking by alkali-silica reaction and freeze-thaw cycles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 103623 ~ 103623
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconcomp.2020.103623	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 高橋佑弥, 岡野佑亮, Yang Zhehui	4. 巻 42
2. 論文標題 ASR膨張が生じたコンクリートの力学特性における材令の影響に関する検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 737 ~ 742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高橋佑弥	4. 巻 57(6)
2. 論文標題 ASR生成物の力学特性測定と構造解析モデルの取り扱いに関する研究動向	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学	6. 最初と最後の頁 454-460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小川森平, 高橋佑弥, 前川宏一	4. 巻 40(1)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 867-872
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fuyuan Gong, Yuya Takahashi, Koichi Maekawa	4. 巻 35(6)
2. 論文標題 Multi-scale computational modeling for concrete damage by mixed pore pressures - case of coupled alkali-silica reaction and cyclic freeze/thaw	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Computations	6. 最初と最後の頁 2367-2385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1108/EC-11-2017-0431	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高橋佑弥, 前島拓, 岩城一郎, 前川宏一	4. 巻 65A
2. 論文標題 ASR劣化を受ける実物大鋼主桁上RC床版の 実環境暴露下における膨張変形挙動に関する解析的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 665-673
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Yuya Takahashi
2. 発表標題 Contribution of Alkali-Silica Reaction Gel on Time-dependent Mechanical Properties of Concrete
3. 学会等名 6th International Conference on Construction Materials. ConMat ' 20 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryo Taguchi
2. 発表標題 Modeling the effect of fly ash on alkali-silica reaction in concrete considering the reduction of alkali concentration in pore water
3. 学会等名 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 YuyaTakahashi
2. 発表標題 Poromechanical models for time-dependent mechanical performance of concrete with ASR
3. 学会等名 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuya Takahashi
2. 発表標題 Long term expansions and deformations of real scale RC deck on steel girders caused by ASR
3. 学会等名 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuya Takahashi
2. 発表標題 Analytical study about the expansion progress of concrete exposed to combined alkali silica reactions and freezing thawing cycles
3. 学会等名 4th international RIELM conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋佑弥
2. 発表標題 アルカリシリカ反応による膨張が生じたコンクリートの力学性能の経時変化に関する実験的検討
3. 学会等名 第73回セメント技術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋佑弥
2. 発表標題 アルカリシリカ反応によって膨張したコンクリートの力学特性の経時変化とその要因に関する微視的考察
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Okano
2. 発表標題 Macroscale and Microscale Studies on Time-Dependent Mechanical Properties of Concrete with Alkali Silica Reactions
3. 学会等名 16th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC16) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Izuru Segawa
2. 発表標題 Relationships between Expansions and Mechanical Properties of Concrete under Coupled Freeze-thaw Cycles and Alkali-Silica Reactions
3. 学会等名 The 3rd ACF Symposium 2019 on Assessment and Intervention of Existing Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Takahashi
2. 発表標題 Fatigue life Assessment of Initially and Time-dependently Deteriorated RC decks by Data assimilation
3. 学会等名 2018 fib Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Izuru Segawa
2. 発表標題 Expansions and damage processes of concrete due to coupled alkali silica reactions and freeze-thaw cycles
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Concrete Federation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬川出
2. 発表標題 コンクリートの凍結融解・ASR複合劣化における膨張・損傷過程の分析
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋佑弥
2. 発表標題 種々の促進環境条件がASR膨張の寸法依存性に与える影響に関する実験的検討
3. 学会等名 第72回セメント技術大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
中国	浙江大学		