

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00260

研究課題名（和文）広帯域環境下にあるセメント系複合材料の耐久性力学と構造性能評価

研究課題名（英文）Durability Mechanics of Cementitious Composites and Structural Performance under Broadband Environments

研究代表者

前川 宏一（Maekawa, Koichi）

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・教授

研究者番号：80157122

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 29,200,000円

研究成果の概要（和文）：火災に伴う高温加熱を受けたコンクリート構造物の最大耐力及び残存強度と変形性能を評価できるマルチスケール解析システムを構築した。数百度におけるセメント硬化体の結晶水の脱落とそれに伴う微細孔構造の変化を予測する熱力学モデルを作成するとともに、徐冷後の気中水蒸気と二酸化炭素の取り込みによる再水和と微細孔組織の修復を定量化した。高温加熱状態において構造内で上昇する水蒸気圧を評価し、爆裂開始時間を予測するとともに、爆裂以後の構造性能をマルチスケールモデルの枠組みを用いて解析することを可能とした。部材構造によっては、高温加熱によって構造靱性が向上する場合があることも見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火災や不慮の事故等で高温加熱を受けたインフラ施設群、特に交通基盤の撤去更新は、大きな社会コストに繋がることから困難を極める。そのために、火災損傷後の残存性能を早期に評価し、かつ長期の動態を予測して適切な補修補強により、再生を図ることが求められる。本研究による残存性能評価は更新計画と復旧のための構造設計と補修補強材料の選定に、直接的に活用することが可能である点に社会的意義があり、社会基盤のレジリエンスの観点から有用である。高温加熱を受けた直後はコンクリートの微細組織が空洞化し、構造性能を損なうが、中期的に気中の水蒸気と二酸化炭素の吸収による再水和を定量化できる機能を有している。

研究成果の概要（英文）：A multi-scale analysis system was developed to evaluate the structural capacity, residual strength, and deformational properties of concrete structures subjected to high-temperature heating associated with fires. A thermodynamic model to predict the loss of crystal water from hardened cement hydrates was developed at several hundred degrees Celsius and the accompanying changes in the micropore structure was quantified. By evaluating the water vapor pressure rising in the structure under high-temperature heating, it made possible to predict the time to start the explosive spalling-off of concrete and to analyze the structural performance after the explosion using the framework of a multi-scale model. It was also found that depending on the structural dimensions, the structural ductility may be improved by high temperature heating.

研究分野：土木工学

キーワード：火災 爆裂 炭酸化 高温加熱 結晶水 再水和 耐久性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

およそ40年を経て、コンクリート構造の長期耐久性と地震に代表される非常時の安全性評価が、マルチスケールモデルのもとに統合されつつあり、長期・短期のインフラ施設のリスク評価と予防保全が一部ではあるが、社会実装に繋がってきた。しかし、火災等の非常時高温履歴と徐冷後の構造残存性能については、既往の統合システムの適用範囲を超えており、セメント系複合体と構造のモデルの大幅な機能拡充が求められるようになってきた。未だ、被災後の復旧を迅速に行うための復旧計画支援に統合モデルを有効に活用できない状況にあった。

2. 研究の目的

火災に伴う高温加熱を受けたコンクリート構造物の最大耐力及び残存強度と変形性能を評価可能なマルチスケール解析システムの構築、ならびに徐冷後の自然環境条件下でのインフラ施設の中長期残存性能を定量的に評価する数値システムの開発が、本研究の目的である。火災や不慮の事故等で高温加熱を受けたインフラ施設群、特に交通基盤の撤去更新は大きな社会コストに繋がることから、困難を極める。火災損傷後の残存性能を早期に評価し、かつ長期の動態を予測して適切な補修補強により、早期に再生を図ることを眼目とする。

3. 研究の方法

摂氏数百度におけるセメント硬化体の結晶水脱落と、それに伴う微細孔構造の変化を予測する固液熱力学モデルを作成し、氷点下を含む徐冷後の気中水蒸気と二酸化炭素の取り込みによる再水和と、これに連なる微細孔組織の修復の定量化を目指す。高温加熱状態において構造内で上昇する水蒸気圧を算定し、爆裂開始時間を予見するとともに、爆裂以後の構造性能を既往のマルチスケールモデルの枠組みを用いて定量化する。高温加熱直後はコンクリートの微細組織が空洞化して構造機能が低下する一方で、大気中の水蒸気と二酸化炭素の吸収による再水和を考慮するセメント硬化体の特性をモデル化に含めることで、火災履歴に伴うマイクロレベルでの自己再生、自己治癒が考慮できる。レジリエンスに関わる構造と構成材料の機能評価を可能とする総合性に、本研究の特色がある。

4. 研究成果

摂氏マイナス30度の低温域から高温1,200度までの広帯域環境に適用可能なセメント系無機複合材料の物理化学モデルを固体レベルの実証実験を介して構築し、自然及び人工環境下にあるコンクリート構造の耐疲労、耐火、耐震、耐久性能評価を可能とするLife-Time性能評価システムの適用範囲を拡張した。セメント硬化体中に存在する微細空隙内に展開する物理化学事象と、これらから構成されている都市基盤施設の構造応答を、ひび割れに代表される中間メソスケール空間に展開する物質の挙動を介して結合する方法を採用している。研究代表者らが開発してきたマルチスケール解析の統合を進め、火災に曝される材料構造応答、低温凍結時の構造挙動、地盤との連成を考慮した鋼材の腐食反応と電解質イオンの移動と平衡システムに関して、温度・時間・空間寸法の広帯域化を図った。統合システムの概略を図1に示し、個々の要素研究成果を以下にまとめる。

(1) セメント硬化体の高温時の結晶崩壊に伴う細孔構造の変化とメソレベルでの強度モデル

セメント硬化体を形成するポルトランドイト、C-S-H固化体、スラグおよびフライアッシュ水合物の高温時の崩壊率と反応後の生石灰、カルサイトと結晶水の質量を、高温下での重量減少と定性分析からモデル化し、数値解析に組み込むためのコード化を行った。なお、常温でのセメント硬化体の既往の炭酸化反応モデルに修正は不要であった。火災高温時には液状水は殆ど消失するが、同時に脱落した結晶水が水蒸気化して高圧蒸気圧を形成し、これが低温域の水収支と移動にも影響を及ぼす過程を高温暴露実験から計測し、マイクロ解析モデルをマクロ挙動から検証を行った。

(2) 二酸化炭素と水蒸気による、高温崩壊したセメント硬化体の細孔構造の修復再生のモデル

相対的に大きな体積を有するポルトランドイトの高温脱落と生石灰への転換後は、ゲル粒子体積の低下とキャピラリー空隙の増加として幾何学的に簡略化を行い、メソレベルでの強度モデルと結合することができた。モルタル試験体の高温暴露実験と徐冷後の強度試験から検証を行った。また、この消失空間に二酸化炭素および水蒸気が侵入した場合の再水和と再結晶化モデルをモデルに組み込み、温度広帯域化を実現した。これにより、火災被害後にもコンクリート構造性能が一部回復、あるいは構造破壊モードが転換する解析が可能となった。

(3) カルシウムと二酸化炭素の吸脱着履歴の解明とモデル化

高温下で二酸化炭素の固定と脱落を熱力学平衡モデルからコード化し、セメント硬化体自体の重量増減の履歴から、マイクロモデルの検証と確認を行った。これらのモデル化は、現在、議論さ

れているゼロカーボンコンクリートや脱炭素材料の評価にも応用が利くことが認められた。これらは研究計画当初には衆目を集める事象ではなかった。

(4) 結晶水脱落ともなう水蒸気圧とコンクリートの爆裂判定

結晶水脱落量、温度、飽和水蒸気圧とコンクリートの細孔、及びひび割れを通じて移動逸散する水蒸気を連成して、時々刻々と変化する細孔内水蒸気圧を算定する計算アルゴリズムを作成した。これを用いて算定された水蒸気圧とコンクリート複合体応力から、ひび割れリスクと爆裂領域を推定する方法を提案した。この検証には、RC 梁およびシールドトンネルセグメントの加熱実験を用いた。これにより、火災を受ける暴露面での損傷のみならず、常温に暴露される相対する面からの液状水の流出も数値解析により、追跡可能となった。固体 液体 気体の三相に関する熱力学平衡モデルを全領域に適用し、凝縮水の火災時での移動までを厳密に分析できる数値解析システムは、まだ、本研究以外に類を見ない。

(5) 連続爆裂の構造解析システムへの導入と徐冷後の構造性能評価

爆裂はコンクリートの固体を飛散させる（気化による急速膨張）ため、同時に熱境界条件が変化する。従来から、環境と構造の境界条件は構造表面に設置した熱と物質の伝達境界要素によって考慮されてきた。爆裂後、伝達境界は構造深部へ移動することから、コンクリート体積を表現する固体要素を疑似境界要素に転換するアルゴリズムを考案し、加熱実験炉内での部材実験から適用性の検証を行った結果、連続爆裂を再現することに成功した。従来まで、爆裂に関わる研究では第一の爆裂開始の判定に留まってきた。本研究で爆裂後の第二、第三の追隨する爆裂まで追跡が可能となり、構造安定性や崩壊リスクまで性能評価の範疇を広げることができた。この点に、本研究成果の特徴がある。火災被害を受けることによって初期剛性は低下するものの、構造崩壊に至るエネルギー吸収能が高まる場合があることが解析により予見され、後に RC 構造の火災高温暴露実験から実証された。これは耐震性能の向上に寄与するものである。

以上は徐冷後の短期構造性能（耐荷力および耐震性）評価に関わるものであるのに対して、既設の 22 橋梁の長期たわみ現象から 30 年超の長期性能に関する検証を併せて行った。その結果、自然環境下での繰り返し乾燥湿潤履歴と場所ごとに異なる暴露条件の違いから、初期設計時での設計たわみの 10 倍ほどの過剰たわみが発生する機構の解明が可能となり、当初の期待を上回る結果となった。

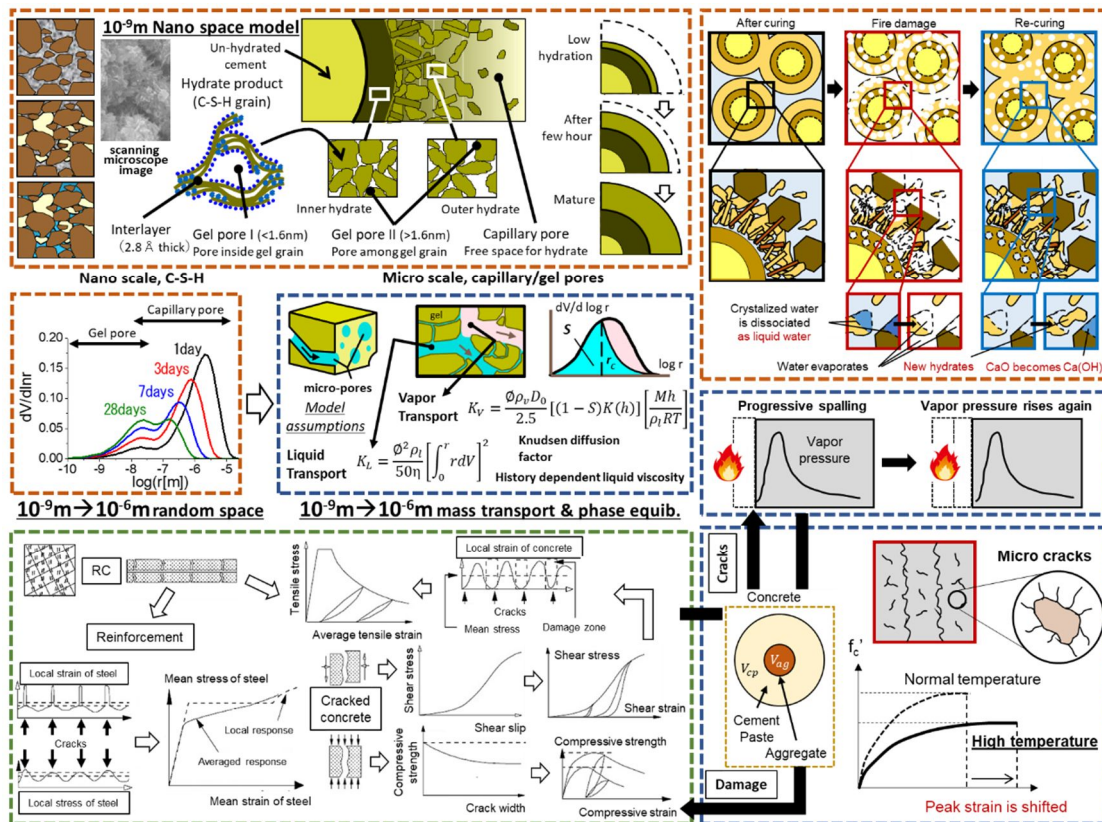


図1 マルチスケールモデルの連結性とマクロ構造応答解析への接続

(6) ひび割れに囲まれるメソ空間モデルの温度広帯域化とイオン平衡 移動モデルの高度化
 中間メソスケール空間に展開する事象として、 水分凍結と体積変化(低温-固相変化)、 アルカリ骨材反応とシリカゲル(常温-固液体平衡)、 鋼材腐食と腐食ゲル(常温-固液体平衡)

水分吸着移動と圧力降下（常温-気液平衡） 中高压下の流動と固体疲労（常温-固液平衡） 蒸発と圧力上昇（高温-気相変化）を対象に設定している。本研究で項目と項目の事象を広帯域化し、メソ空間を含む数値解析プラットフォームを拡張・改築し完備性を高めた。ここで、複数イオン間の平衡と水酸化カルシウム、フリーデル氏塩の沈殿溶解を定量化し、中間メソスケール空間における水分 多種ゲルの混相流れと損傷を、広帯域化後に再検証した。

高温での広帯域化を進める上で、1,000 度を超えて液状水が枯渇状態の限界にまで至った状態においても、凝縮水中で Nernst-Prank 移動平衡式を安定して解くアルゴリズムの開発が必要となり、これに多くの時間を割くこととなった。その結果、メソ空間で適用されるイオン平衡 移動モデルの広帯域化も同時に図られる結果となり、従来の電気防食解析の進展にもつながった。この点は当初の研究計画では考慮していなかった点である。図 2 に示す通り、鋼材腐食によって鉄イオンが溶出し、その後に移動拡散しつつ、さらに酸化が進んで固形化（錆）する機構を組み入れることができた。沈着生成し、ゲル化した錆の運動をひび割れメソ空間モデルと連結した。今後、火災被害を受け、かつ復旧された構造（交通基盤に多い）の長期腐食リスクの評価に繋がること期待される。ASR や凍結融解による損傷と長期性能評価は、システム上で整備が完了している。即ち、これらの劣化因子と火災高温履歴との複合劣化にも対応できるものと思われる。耐久性力学の完備性を高める方向に、技術開発が展開するものと予見している。

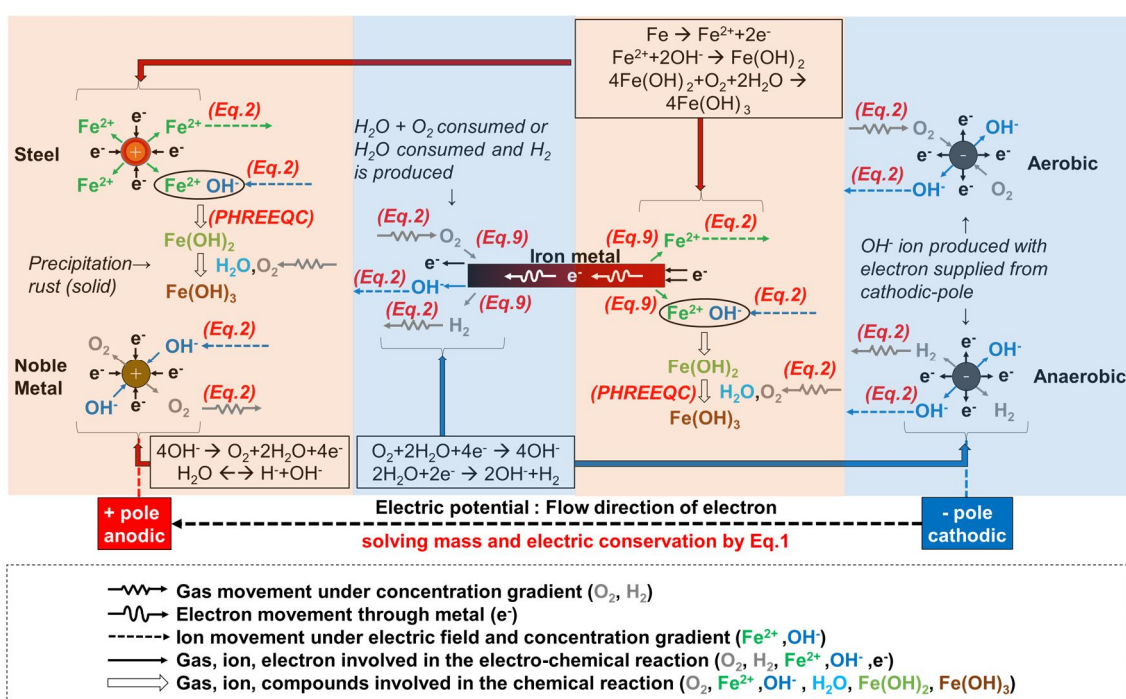


図 2 高温項帯域化の進展によるイオン平衡モデルと高度化：

Note) Eq.2 は Nernst-Plank Equation を意味する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Wang, Z., Gong, F., and Maekawa, K.	4. 巻 1
2. 論文標題 Multi-scale and multi-chemo-physics lifecycle evaluation of structural concrete under environmental and mechanical impacts	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent Construction	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.26599/JIC.2023.9180003	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 Wang, Z., Maekawa, K., and Gong, F.	4. 巻 21
2. 論文標題 Space averaging of electric field accompanying corrosion of reinforcement and its verification by pseudo-concrete	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 25-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.21.25	査読の有無 無
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 吉野 通範, 菊地 新平, 若月 健司, 千々和伸浩	4. 巻 69
2. 論文標題 過剰たわみが生じた東名高速道路跨道橋の原因推定と安全性評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 734-741
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.69A.734	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 Zhao Wang, Koichi Maekawa, Hiroki Takeda, Fuyuan Gong	4. 巻 133
2. 論文標題 Multi-ion kinetics in pseudo-concrete electrolyte associated with macro-cell corrosion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconcomp.2022.104690	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 該当する

1. 著者名 Yuto Yamanoi and Koichi Maekawa	4. 巻 266
2. 論文標題 Disintegration of low and normal strength concrete in shear localized bands and its constitutive modeling, Engineering Structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2022.114593	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 izhan Peng, Zhao Wang, Fuyuan Gong, Yuxi Zhao, Tao Meng, Weiliang Jin and Koichi Maekawa	4. 巻 24
2. 論文標題 Spatial characteristics of stray current corrosion of reinforcing bars in pseudo concrete	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structural Concrete	6. 最初と最後の頁 374-388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/suco.202200164	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 該当する

1. 著者名 Keitai Iwama, Yushi Kato, Shigeaki Baba, Kazuaki Higuchi, Koichi Maekawa	4. 巻 19
2. 論文標題 Accelerated Moisture Transport through Local Weakness of High-Strength Concrete Exposed to High Temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 106-117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.19.106	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 Keitai Iwama and Koichi Maekawa	4. 巻 129
2. 論文標題 Modelling of carbonation, de-carbonation and re-carbonation processes of structural concrete subjected to high temperature heating	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composite	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconcomp.2022.104493	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 Kazuaki Higuchi, Keitai Iwama and Koichi Maekawa	4. 巻 19
2. 論文標題 Remaining Shear Capacity of Fire-Damaged High Strength RC Beams after Moist Curing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 897-912
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.19.897	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 Yuto Yamanoi, Takashi Miura, Masoud Soltani, Koichi Maekawa	4. 巻 19
2. 論文標題 Multi-directional fixed crack model extended to masonry structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 977-987
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.19.977	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 該当する

1. 著者名 Wenteng Huang, Fuyuan Gong, Weiliang Jin and Koichi Maekawa	4. 巻 22
2. 論文標題 Numerical analysis of high and low cycle flexural fatigue for reinforced concrete beams under full range of varying amplitudes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Structural Concrete	6. 最初と最後の頁 2167-2183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/suco.202100074	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 該当する

1. 著者名 Zhao Wang and Koichi Maekawa	4. 巻 17
2. 論文標題 Lifetime assessment of structural concrete - multi-scale integrated hygro-thermal-chemo-electrical-mechanistic approach and statistical evaluation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Structures and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15732479.2021.1995443	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 該当する

1. 著者名 Zhao Wang, Koichi Maekawa, Hiroki Takeda, Fuyuan Gong	4. 巻 123
2. 論文標題 Numerical simulation and experiment on the coupled effects of macro-cell corrosion and multi-ion equilibrium with pseudo structural concrete	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconcomp.2021.104181	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 該当する

1. 著者名 Keitai Iwama, Kazuaki Higuchi, Koichi Maekawa	4. 巻 18
2. 論文標題 Thermo-Mechanistic Multi-Scale Modeling of Structural Concrete at High Temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 272-293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.18.272	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 Gong, F., Takahashi, Y., Segawa, I. and Maekawa, K.	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 1-10
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Iwama, K., Higuchi, K. and Maekawa, K.	4. 巻 30
2. 論文標題 Model-Based Assessment of Long-Term Serviceability and Fire Resistance for Underground Reinforced Concrete Ducts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structural Engineering International	6. 最初と最後の頁 506-514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10168664.2019.1709607	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Koichi Maekawa
2. 発表標題 Chemo-Physics and Mechanics of RC for Behavioral Simulation in Micro-Seconds to Years
3. 学会等名 International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keitai Iwama
2. 発表標題 Numerical Model for Explosive Spalling of High-Strength Concrete and Carbonation during and after Fire Exposure
3. 学会等名 RILEM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉野通範
2. 発表標題 過剰たわみが生じた東名高速道路跨道橋の原因推定と安全性評価
3. 学会等名 構造工学シンポジウム
4. 発表年 2023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
研究分担者	藤山 知加子 (Fujiyama Chikako) (60613495)	横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・教授 (12701)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	千々和 伸浩 (Chijiwa Nobuhiro) (80546242)	東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授 (12608)	

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