

令和 6 年 6 月 22 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04347

研究課題名（和文）データ同化によるコンクリート材料試験の応力ひずみ推定値を用いた耐震解析の高度化

研究課題名（英文）Advancement of Seismic Response Analysis Using Stress-Strain Estimates from Concrete Material Testing through Data Assimilation

研究代表者

山下 拓三（Yamashita, Takuzo）

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主任研究員

研究者番号：40597605

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では材料試験から材料構成則の学習までの統一的な手順を構築して耐震解析を高度化することを目的としている。具体的には、コンクリート材料試験の変位場、ひずみ場のサンプリングモアレ法による画像計測を実施した。画像計測から得られる面内の変位場とひずみ場から応力とひずみのテンソル場を推定するためのアンサンブルカルマンフィルターによるデータ同化手法の開発を進めた。応力ひずみテンソルの時系列データを用いて、熱力学法則を組み込んだ機械学習による汎用的な弾塑性材料の構成則を開発した。コンクリートの弾塑性損傷構成則を用いた大規模FEMによる10層RC建物の地震応答解析の研究開発を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、画像解析による変位場計測技術、データ同化による応力・ひずみ推定技術、機械学習による材料構成則の学習技術、および詳細FEMによる地震応答解析の開発が進展した。この手法が実現することにより、詳細FEMの高精度化において重要であるものの、モデル化やパラメータ同定が難しい材料構成則を、材料試験から材料構成則の学習までの標準的な手続きで利用できるようになり、高度な耐震解析の普及が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to enhance seismic response analysis by establishing a unified procedure from material testing to the learning of material constitutive laws. Specifically, we conducted image measurements of the displacement field and strain field in concrete material tests using the sampling moiré method. We developed a data assimilation method using the ensemble Kalman filter to estimate the stress and strain tensor fields from the in-plane displacement and strain fields obtained from the image measurements. Using the time-series data of stress and strain tensors, we developed a general elastoplastic material constitutive law incorporating thermodynamic principles through machine learning. Furthermore, we carried out the seismic response analysis of a ten-story RC building using a large-scale FEM incorporating the elastoplastic damage constitutive law for concrete.

研究分野：建築構造

キーワード：有限要素法 材料構成則 データ同化 アンサンブルカルマンフィルター 画像計測 機械学習 コンクリート

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ものづくりの分野では、製品の安全性を確保するために、想定される荷重条件下での物体の破損や性能維持の検証が必要である。設計プロセスにおける実験による検証は、費用や時間の面からできるだけ少なくすることが望ましい。さらに、建築・土木構造物の規模から実大実験が不可能な場合がある。このため、実験の代わりとして数値シミュレーションによる検証が重要である。

詳細有限要素解析(以下、詳細 FEM)では、部材の局所的な応答から構造物の全体応答までを丸ごと計算するため、大地震によって塑性化や損傷を経験した建物が有する耐震性能(以下、残余耐震性能)を詳細に評価することが可能である。高精度な予測のためには、繰返し载荷を受ける構造材料の弾塑性・損傷の挙動を適切にモデル化する材料構成則の開発が必要である。

材料構成則のモデル化は、材料試験から得られた特定の応力ひずみの成分間の単調载荷での関係に基づいており、繰返し多軸応力下での挙動の再現性は十分でない。また、コンクリートのような不均質材料では、平均的な応力やひずみを元にモデル化されるためメッシュ依存性がある。そのため、詳細 FEM のメッシュサイズに対応した応力ひずみテンソルの全成分のデータを材料実験の計測データから生成することが重要な課題である。

また様々な構造材料の構成則が提案されているが、利用可能な FEM プログラムで必ずしも利用できるわけではなく、簡単に実装できるわけではない。

2. 研究の目的

本研究では、繰返しの弾塑性・損傷挙動を再現する材料構成則により、細部の損傷の進展から全体の挙動までを構成則に予測する地震応答解析技術を構築して、構造物の残余耐震性能を評価するために、図 1 に示す材料試験から材料構成則の学習までの統一的な手順を構築して耐震解析を高度化することを目的にしている。

具体的には、コンクリート材料試験の変位、ひずみ場の画像計測、画像計測結果を用いたデータ同化による応力ひずみテンソルの推定、応力ひずみテンソルを用いた機械学習による汎用的な弾塑性材料構成則の学習、弾塑性構成則を用いた大規模 FEM の地震応答解析の開発である。

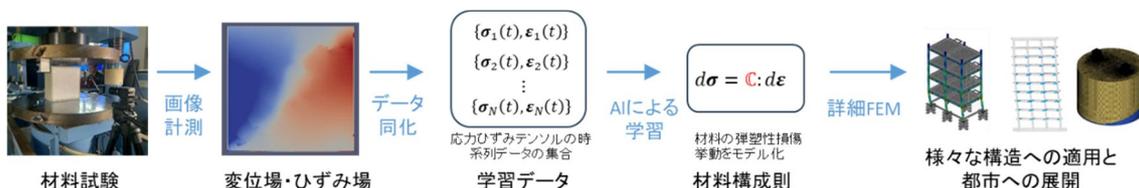


図 1 材料試験から材料構成則の学習までの統一的な手順と耐震解析の流れ

3. 研究の方法

(1) コンクリート材料試験の変位場、ひずみ場の画像計測

コンクリート圧縮試験での多軸応力化での単調および繰返し载荷での変位場を取得するためにサンプリングモアレ法による画像計測を実施した。画像解析により得られた変位分布より、有限要素メッシュを用いてひずみ場を計算するプログラムを作成した。

(2) 画像計測結果を用いたデータ同化による応力ひずみテンソルの推定

アンサンブルカルマンフィルター (EnKF) によるデータ同化手法を、有限要素法プログラムに実装した。双子実験のために既存のコンクリート構成則を改良した。

(3) 応力ひずみテンソルを用いた機械学習による汎用的な弾塑性材料構成則の学習

熱力学法則を組み込んだニューラルネットワークにより材料構成則をモデル化して、弾塑性繰返し载荷での材料挙動を学習して、その予測精度を確認した。

(4) 弾塑性構成則を用いた大規模 FEM の地震応答解析

(2)で改良したコンクリート構成則を用いて E - ディフェンス実験の再現解析を行い、観測波による 10 層 RC 建物の詳細 FEM の地震応答解析を実施して複数回地震による損傷の進展を確認した。

4. 研究成果

(1) コンクリート材料試験の変位場、ひずみ場の画像計測

コンクリートの圧縮材料試験の概要について以下に述べる。供試体の寸法は高さ 200mm、幅 200mm、奥行き 100mm である。本材料試験では、単調载荷と繰返し载荷の 2 種類の载荷を行った。試験ケースを表 1 に、試験体の写真を図 2 に示す。圧縮試験機と供試体の間に、上下面とも载荷板を挿入する。試験ケースは、载荷板の幅が 80mm(W80)と 180mm (W180)の 2 通りと、側方拘束なし(Tn)と側方拘束あり(T35)の 2 通りの組合せの合計 4 通りである。拘束板の厚みは 35mm であり D29 の鉄筋 4 本で 2 枚の拘束板を締め付けている。

図 3 に TnW80 での変位とひずみのコンターを示す。図 3(a)の鉛直方向変位が 0.53mm の場合

では亀裂発生前の最大耐力付近での結果である．ひずみは 3 成分とも非一様な分布となっている．図 3(b)の鉛直方向変位が 1.38mm の場合では供試体に鉛直方向に亀裂が進展している．図 3(a)では変位は滑らかな分布であったが，図 3(b)では亀裂発生箇所に対応して局所的に大きな変位が発生している．ひずみを見ると亀裂発生箇所で大きな値となっていることがわかる． ϵ_{yy} を見ると亀裂が通る要素では引張ひずみが大きくなり，その隣接要素で圧縮ひずみが大きくなっている．

表 1 試験ケース

| 試験名称 | TnW80 | TnW180 | T35W80 | T35W180 |
|------|-------|--------|--------|---------|
| 载荷板幅 | 80 mm | 180 mm | 80 mm | 180 mm |
| 側方拘束 | なし | なし | あり | あり |

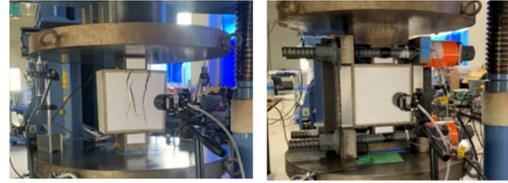
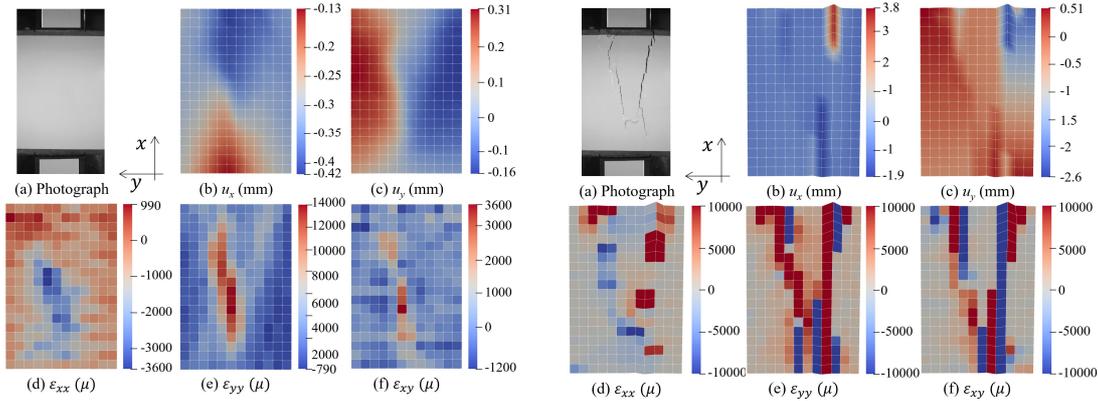


図 2 試験体 (左:TnW80, 右:T35W80)



(a) 鉛直方向変位: 0.53mm

(b) 鉛直方向変位: 1.38mm

図 3 変位とひずみのコンター (TnW80)

(2) 画像計測結果を用いたデータ同化による応力ひずみテンソルの推定

データ同化プログラムの作成

本研究で開発したアンサンブルカルマンフィルター (EnKF) によるデータ同化システムの処理フローを図 4 に示す．ここでは，EnKF のサンプル数=48，MPI プロセス数=4 の場合を示している．

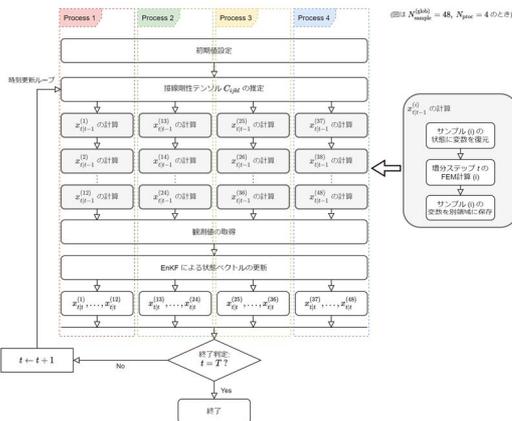


図 4 データ同化処理システムの処理フロー

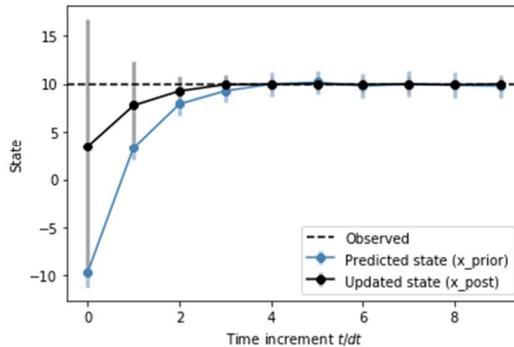


図 5 データ同化の単体テスト結果

接線剛性テンソルの推定方法について，ひずみ 6 成分に対する $i (= 1, \dots, 6)$ 番目の応力の回帰式を Ridge 回帰で求める．得られた解 $(a_{i1}, \dots, a_{i6}, b_i)$ に対して，次式により接線剛性テンソルを推定した．

$$C_{ijkl} = D_{\text{comp}(i,j), \text{comp}(k,l)} = a_{iJ}, \quad (I = \text{comp}(i,j), J = \text{comp}(k,l)) \quad (1)$$

ただし，上記の $\text{comp}(i,j)$ は初めに x, y を定義した時と同様に 3×3 の対称行列の各成分を 6 次元ベクトルの各成分にマッピングする処理である．

EnKF の実装が正しいことを確認するために単体テストとして，状態変数が全時刻と同じになるシミュレータ (Trivial Simulator と呼ぶ) を用いて，同じ観測結果で更新し続けた場合に観測データと同じ状態に収束するかの確認を行った．Trivial Simulator の状態方程式は次式で定義した．

$$x_{t|t-1}^{(l)} = x_{t-1|t-1}^{(l)} + dt \cdot v^{(l)} \quad (2)$$

ここで、 $v^{(l)}$ はシステムノイズであり、 dt は時間刻みであり0.5とした。また、観測においては状態ベクトルの全成分を観測できるとして観測行列 H は単位行列とした。状態ベクトルの初期値は-10とし、観測値は全ての時刻において10とした。また、システムノイズは2.0、観測ノイズは1.0として設定した。アンサンブルのサンプル数は100とした。以上の条件でデータ処理を実行したときの、同化後の状態ベクトルの推定値(平均値)と標準偏差を図5に示す。データ同化によって状態ベクトルの値が観測値に近づく方向に修正されていることが確認できる。また、時間ステップが進むと状態ベクトルが観測値である10と同じ値に収束している。これらの結果から、EnKFの機能が正常に実装されていることを確認した。

双子実験およびのためのコンクリート材料試験のFEM解析

本研究では双子実験のためのコンクリート構成則として既開発の弾塑性損傷構成則に筆者が提案する引張クラックモデルを実装した。開発したコンクリート構成則を検証するために、鉄筋コンクリート(RC)梁の曲げ破壊実験の再現解析を行った。図6に引張クラックと破壊パラメータの分布を示す。図7に変位反力関係を示す。耐力劣化の過程では実験結果と差異が見られるが最終的な耐力劣化の度合いは実験と解析で対応している。

データ同化手法の検証として双子実験を実施するために、開発したコンクリート構成則を用いて(1)で実施した材料試験のそれぞれの試験ケースの解析を実施した。T30W180モデルとその時の解析結果をそれぞれ図8、図9に示す。応力および変位分布が非一様であり、ここでは示していないが、それぞれの試験ケースで異なる分布性状となっている。これらの解析結果を今後の研究の双子実験に活用していく。

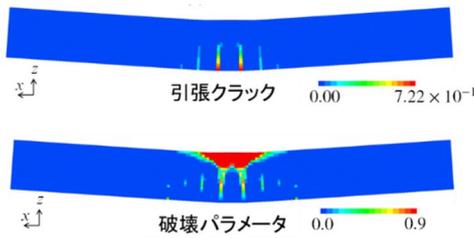


図6 引張クラックと破壊パラメータの分布

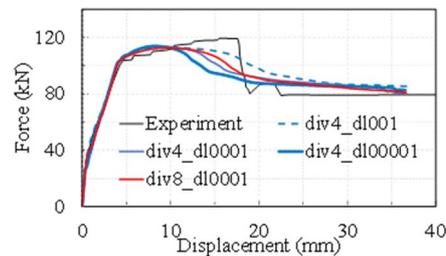


図7 変位反力関係

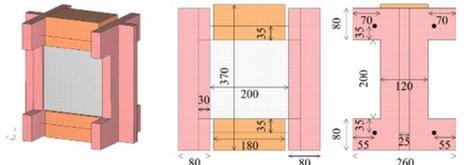


図8 T30W180モデル

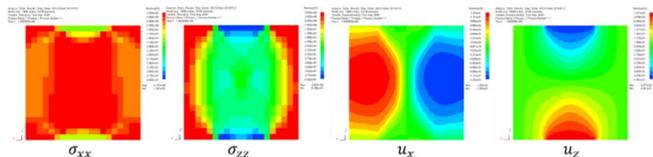


図9 T30W180での応力と変位の分布

(3) 応力ひずみテンソルを用いた機械学習による汎用的な弾塑性材料構成則の学習

汎用的な材料構成則として熱力学法則を導入したニューラルネットワークのモデル化を最終的には目指しているが、本研究では提案手法の初期検討として比較的簡易なモデル化を行った。ここでは、塑性ひずみ増分を出力とするニューラルネットワーク $NN_{\Delta \epsilon^p}$ と Helmholtz の自由エネルギー関数をニューラルネットワークでモデル化する2つのニューラルネットワーク NN_{ψ^e} から構成される構成則を提案している。この材料構成則を用いて、ひずみ、応力、塑性ひずみの初期値と $t = 0 \sim T$ までのひずみ増分の時系列データを入力して $t = 0 \sim T$ までの応力増分の時系列データを予測する。

訓練データと検証データの生成について以下に述べる。解析モデルは1辺10mmの立方体の形状で1要素(C3D8R)のモデルである。境界条件は負側のZ面を固定し、正側のZ面に強制変位を加え

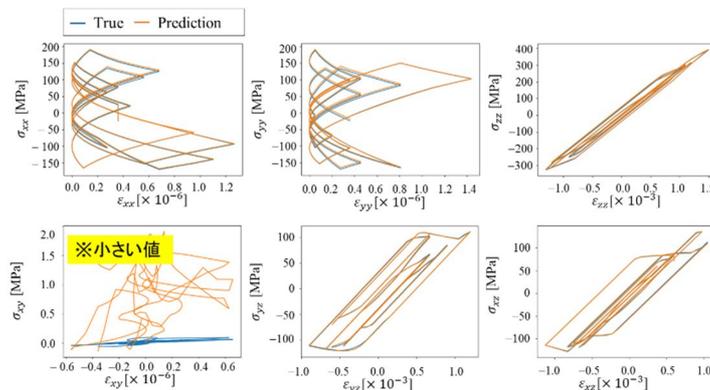


図10 応力ひずみ関係

る。載荷の種類は軸方向載荷(サンプル数 100),せん断 1 方向載荷(サンプル数 100),せん断 2 方向載荷(サンプル数 200),軸方向とせん断 1 方向載荷(サンプル数 200),軸方向とせん断 2 方向載荷(サンプル数 400)の 5 種類である。学習はまず, $NN_{\Delta \varepsilon^p}$ の出力が 0 となるようにして弾性解析のデータセットを用いて NN_{ψ^e} を学習した。続いて, NN_{ψ^e} を固定して,弾塑性解析のデータセットを用いて $NN_{\Delta \varepsilon^p}$ を学習した。

検証用データを用いて予測した応力ひずみ関係と FEM による正解値との比較を図 10 に示す。良好に正解値を再現しており高い精度で弾塑性構成則を学習できていることがわかる。



図 11 実験試験体

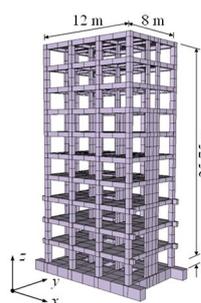


図 12 解析モデル

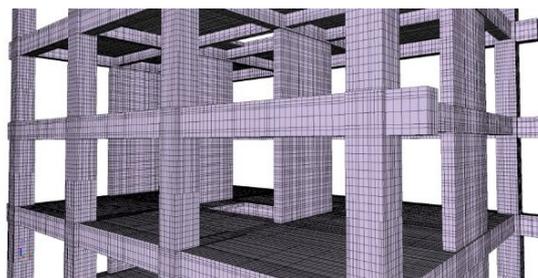


図 13 メッシュの拡大図

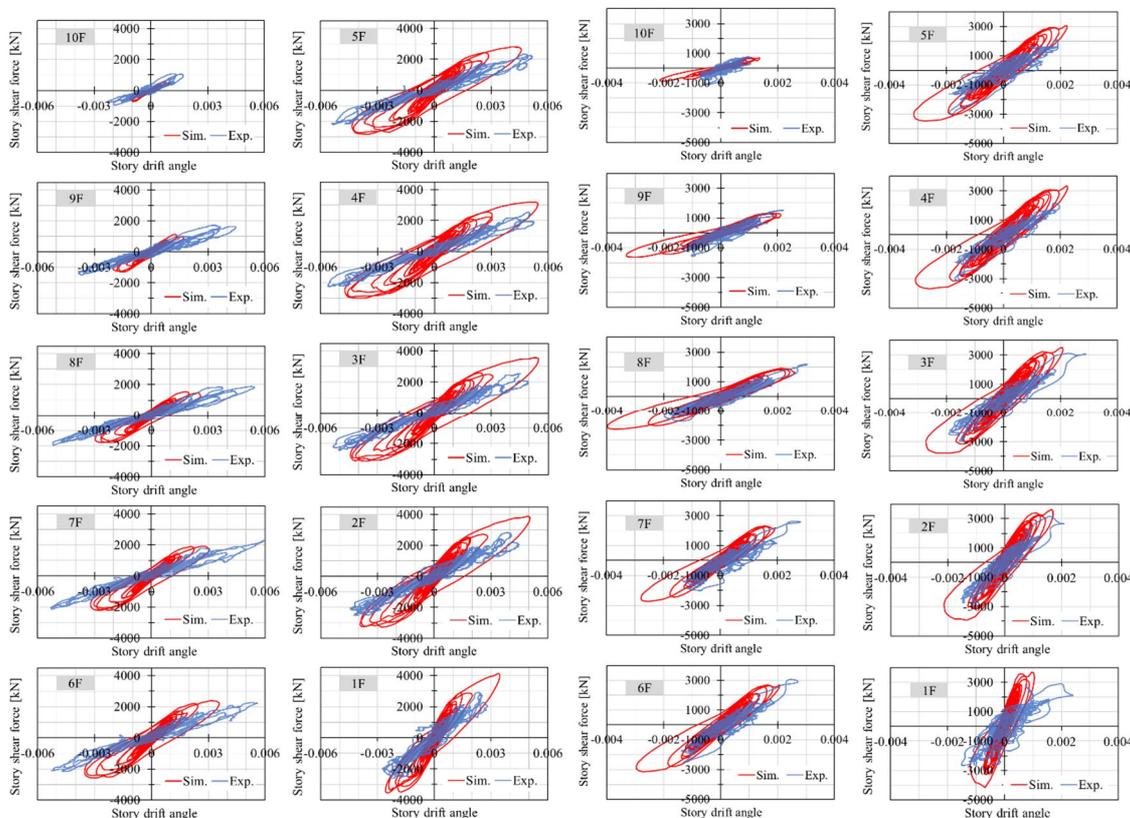


図 14 長辺方向の層せん断力層間変形角関係 図 15 短辺方向の層せん断力層間変形角関係

(4) 弾塑性構成則を用いた大規模 FEM の地震応答解析

(2)で改良したコンクリート構成則を用いて 10 層 RC 建物の大規模 FEM の地震応答解析を実施した。ここではまず, E-Defense で実施された実験の再現解析を実施した。対象となる実験の試験体を図 11 に,解析モデルとメッシュの拡大図を図 12, 図 13 にそれぞれ示す。基礎滑りのケースでの JMA 神戸波 100%加振を解析の対象とした。x 軸方向と y 軸方向の実験と解析の各階の層せん断力 - 層間変形角関係をそれぞれ図 14, 図 15 に示す。図 14 の長辺(x 軸)方向について,解析では変形が小さい領域では層剛性は大きい,変形が大きくなって非線形挙動になった際の層剛性は実験と対応している。実験では変形が小さい領域においても層剛性が小さく,解析のような顕著な層剛性の変化は見られなかった。層間変形角の正負両側の最大値は 1 階から 5 階までは実験と解析で良好に対応しているが,6 階から 10 階では実験のほうが大きくなっている。図 15 の短辺(y 軸)方向について,実験と解析とも紡錘形の履歴挙動である。層剛性は正側の応答で,実験の層剛性の低下の度合いが大きくなっているが,それ以外では実験結果と解析結果は比較的対応している。また,下層階に比べて上層階のほうが実験と解析の層剛性の対応が良い傾向にある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|----------------------------------------------------------|------------------------|
| 1. 著者名 山下 拓三、藤原 淳、宮村 倫司 | 4. 巻 2022 |
| 2. 論文標題 ポアソン効果を考慮した引張クラックモデルの開発と RC 構造物の大規模有限要素解析への適用 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 日本計算工学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 20220006 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11421/jsces.2022.20220006 | 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 Yamashita Takuzo, Sekimoto Yoshihide, Koshihara Mikio, Nakagawa Takafumi, O-Tani Hideyuki, Horiuchi Toshihiko | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 A digital twin prototype to visualize heterogeneous seismic damage simulation results on web-GIS | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Asian Architecture and Building Engineering | 6. 最初と最後の頁 1~19 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/13467581.2024.2342883 | 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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 山下拓三 |
| 2. 発表標題 熱力学法則に基づく深層学習による材料構成則の検討 |
| 3. 学会等名 計算工学講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 山下拓三, 関本義秀, 腰原幹雄, 中川貴文, 大谷 英之 |
| 2. 発表標題 地震被害予測のための異種シミュレーションを用いたデジタルツインのプロトタイプ |
| 3. 学会等名 計算工学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------------------|
| 1. 発表者名 山下拓三, 藤原淳, 宮村倫司 |
| 2. 発表標題 RC 構造物の大規模詳細FE 解析のためのコンクリート構成則開発 |
| 3. 学会等名 理論応用力学講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 山下拓三, 藤原淳, 宮村倫司 |
| 2. 発表標題 鉄筋コンクリート梁部材の静的載荷解析でのコンクリート材料構成則の検証と妥当性確認 |
| 3. 学会等名 日本建築学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------------------|
| 1. 発表者名 山下拓三, 松井智哉, 青木崇 |
| 2. 発表標題 画像計測によるコンクリート圧縮材料試験の変位場とひずみ場の可視化 |
| 3. 学会等名 日本建築学会 |
| 4. 発表年 2024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 | 松井 智哉 (Matsui Tomoya) (20402662) | 豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (13904) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|