

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02394

研究課題名（和文）V&Vに基づくコンクリート構造物の新しい評価体系の構築とその社会実装に向けた検討

研究課題名（英文）A new evaluation of concrete structures based on V&V and its social implementation

研究代表者

車谷 麻緒（Kurumatani, Mao）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・准教授

研究者番号：20552392

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）： V&V（Verification and Validation；検証と妥当性確認）をコンクリート構造物の数値解析に応用するための基礎的な検討を行った。検証では、理論式に基づいて導出した参照解を用いてコード検証が行えることを示し、分散分析を応用して解析検証が行えることを示した。妥当性確認では、モンテカルロシミュレーションまたは代替モデルを用いて、不確かさを反映した数値解析を行い、妥当性確認が行えることを示した。コンクリートはり部材を対象に、ASME V&V 10の流れにしたがって検証と妥当性確認を具体的にを行った一例も示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリート構造物はそのスケールの大きさから、数値解析により構造物の性能を評価することになるが、その数値解析の妥当性を評価する方法が確立されていない。そこで本研究では、V&V（Verification and Validation；検証と妥当性確認）とよばれる数値解析の妥当性を評価する方法をコンクリート構造物の数値解析に適用するための検討を行った。他の材料よりも力学挙動が複雑なコンクリート構造物に対して、数値解析が正しく行われていること検証するための方法と、実際の物理挙動を正しく再現できていることを確認するための方法を構築した。具体的な事例まで示した研究は本研究が初めてである。

研究成果の概要（英文）： Basic studies were conducted to apply Verification and Validation (V&V) to the numerical analysis of concrete structures. In the verification, a reference solution of the reinforced concrete beam based on beam theory was derived for the code verification, and a method for the calculation verification using the analysis of variance was proposed. As for the validation, we demonstrated that the validation could be performed by numerical analysis using Monte Carlo simulation or a surrogate model with uncertainties. An example of the verification and validation was also presented for non-linear finite element analysis of concrete beam according to the flow of ASME V&V 10.

研究分野： 計算固体力学，安全工学，コンクリート工学

キーワード： 検証と妥当性確認（V&V） 不確かさ コンクリート 数値シミュレーション 代替モデル

1. 研究開始当初の背景

近年、コンクリート構造物の非線形数値解析の進歩はめざましく、構造物内部の力学挙動に加えて、これまで実験に頼らざるをえなかったポストピーク挙動なども評価可能になりつつある。しかしその反面、コンクリートの複雑な非線形挙動を再現するために、様々なモデル化が組み合わされていることが多く、物理的意味が明確でない解析パラメータが必要になることもあり、場合によっては、それらを変更することで、任意の結果を引き出すことも可能である。それゆえ、ありのままの事実を出力する「実験」と比較して、非線形解析(数値シミュレーション)の信頼性については疑問視されることが少なくない。

また、専門性や経験が十分でない解析従事者により、数値解析の予測性能や適用範囲を理解せずにシミュレーションが実施される場合もある。過去には、数値解析に不慣れな技術者による不適切なモデル化が原因で、設計ミスが生じ、巨額の損失が発生した事例が報告されている。非線形数値シミュレーションにおける現状と課題は我が国でも同様であり、このような未然に防ぐことのできる事故を起こさせないために、新しい概念に基づく評価体系の構築が急務である。

近年、数値シミュレーションに対する品質や信頼性を保証するための取り組みが重要視されている。米国機械学会(ASME)では、V&V(Verification & Validation; 検証と妥当性確認)と呼ばれる工学シミュレーションの品質・信頼性を保証するための考え方や方法を ASME V&V 10 としてまとめている。V&V は大きく 2 つの項目に分かれており、計算モデルが正しく実装され、正しい解が得られているかを検証する Verification (検証) と、計算結果と実験結果を比較して、実際の挙動を正しく予測できていることを確認する Validation (妥当性確認) で構成される。Verification においては離散化誤差の検証、Validation においては実験と数値解析の両方の不確かさを定量化することが求められる。

コンクリート構造物の力学挙動は、非線形性が強く、ばらつきの大い破壊現象を伴うため、他の材料と比較して、実験・数値解析ともに不確かさの影響が大いことが特徴である。しかし、実験と数値解析に含まれる各種の不確かさの定量化に基づいて、数値解析の妥当性確認が行われることはほとんどなく、現状は解析従事者の主観により非線形解析が実行され、決定論的に予測精度が検討されているに過ぎない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、コンクリート構造物に対する非線形解析の信頼性を向上させるための新しい評価体系の構築を試みる。具体的には、V&V の概念に基づいて、完全には統一することができない試験体や試験条件の違いに起因する不確かさを定量化するための検証実験と、非線形力学挙動のモデル化の違いや解析条件に起因する不確かさを定量化するための再現解析を行い、両者の結果を統計的に比較検討することで、コンクリート構造物に対する非線形解析の予測精度を確率的に評価する方法を提案する。

コンクリートの場合、試験体に含まれるばらつきに加えて、実験器具や境界条件、実験者の技術レベルなどの試験方法の違いも実験結果に影響する。このような実験における不確かさを定量化する取り組みが検証実験である。同条件の試験体を同時に複数作製し、実験を一斉に実施し、試験条件や試験方法の違いに起因する不確かさを定量化する。

コンクリートの挙動を再現するための非線形解析手法は複数存在し、それぞれ必要パラメータやパラメータ感度が異なっている。本研究では、コンクリートのモデル化手法として、損傷モデル、剛体ばねモデル、分散ひび割れモデルに基づく非線形解析手法を対象に、モデル化の違いや解析条件に起因する不確かさを考慮した再現解析を実施する。これらの結果と検証実験の結果とを比較して、両者の整合性を確率的に示すことにより、上記の数値解析に関する課題の解決を試みる。

3. 研究の方法

V&V は、検証と妥当性確認の 2 つで構成され、さらに検証ではコード検証と解析検証、妥当性確認では不確かさを考慮した実験および数値解析により構成される。本研究では、V&V をコンクリート構造物の非線形解析に適用するために、(1) コード検証、(2) 解析検証、(3) 不確かさを考慮した実験、(4) 不確かさを考慮した数値解析のそれぞれについて、ASME V&V 10 に基づく方法論を検討するとともに、(5) 具体的な事例、についても示すこととする。

4. 研究成果

(1) コード検証

コード検証は一般に、理論解や解析解の再現性を検証することで実施される。しかし、コンクリート構造物の場合、挙動の非線形性が強く、理論解や解析解が存在しない。そこで本研究では、曲げ破壊型の鉄筋コンクリートはりを対象に、材料の非線形性とオイラー・ベルヌーイの仮定に基づいた理論解に近い参照解を導出し、これを用いてコード検証を行う方法を提案した。図-1は、この参照解と実験の荷重 - 変位関係を比較した結果である。導出した参照解は、実験結果とよく整合しており、実際の挙動の再現性も高いことがわかる。

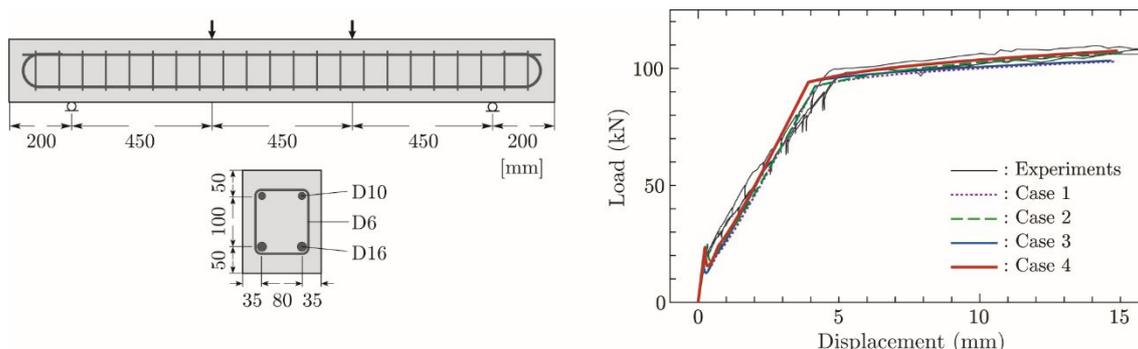


図-1 参照解と実験結果の比較

(2) 解析検証

解析検証は、数値解析結果の格子(メッシュ)収束性を示し、離散化誤差に代表される数値誤差を検証することで実施されることが多い。しかし、コンクリート構造物の場合、挙動の非線形性が強く、メッシュの細分化にともなって数値解が収束するとは限らない。そこで本研究では、解の収束性が得られない問題に対して、分散分析を用いて離散化誤差を評価する方法を検討した。具体的には、分散分析の因子を材料パラメータとメッシュサイズにすることで、材料パラメータの変動による影響度に比べて、メッシュサイズの相違による影響度が十分に小さいことを検証する方法を提案した。

(3) 不確かさを考慮した実験 (Validation 実験)

妥当性確認 (Validation) では、各種の不確かさを定量化し、実験結果と解析結果を比較することで、計算モデルの妥当性が確認される。その際、妥当性確認に用いられる実験は、実験に含まれる不確かさを定量化するために、妥当性確認に特化した「Validation 実験」でないといけない。そこで本研究では、材料のばらつきに起因する不確かさを定量化するための Validation 実験を実施した。具体的には、曲げ破壊型の鉄筋コンクリートはりを対象として、試験体の寸法や材料強度のばらつきをできるだけ小さくするため、すべての試験体を同じ場所で同時に作製した後、ほぼ同時期に4点曲げ載荷実験を実施した。また、試験機や実験者を統一することで、試験機による実験条件の違いや、実験者の熟練度の違いがないようにして、コンクリートの特徴である材料のばらつきに起因する不確かさを定量化する実験を行った。図-2は、12体の鉄筋コンクリートはり試験体の荷重 - 変位関係とひび割れ図を示している。実験条件は統一しており、試験体寸法の影響も小さいことを確認していることから、これらの結果のばらつきはコンクリートの材料特性のばらつきによるものと判断される。

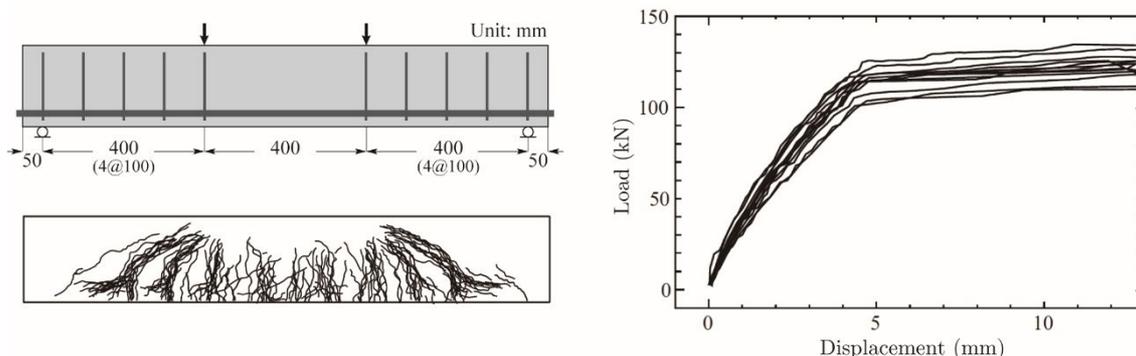


図-2 鉄筋コンクリートはりの Validation 実験の結果

(4) 不確かさを考慮した数値解析

不確かさを含む Validation 実験の結果に対して、不確かさを反映した数値解析を複数回実施し、実験結果と解析結果を定量的に比較することで、妥当性確認が行われる。本研究では、不確かさを反映した数値解析として、材料パラメータを変動させたモンテカルロシミュレーションを適用し、曲げ破壊型の鉄筋コンクリートはりを対象に、妥当性確認が行えることを示した。図-3は、試行回数を 100 としたモンテカルロシミュレーションの結果と実験結果の比較、および累積分布関数の比較を示している。ASME V&V 10 では、累積分布関数の面積指標に基づく誤差評価式が示されており、その値を計算した結果、誤差は十分に小さく、鉄筋コンクリート部材に対して妥当性確認が行えることを例示した。

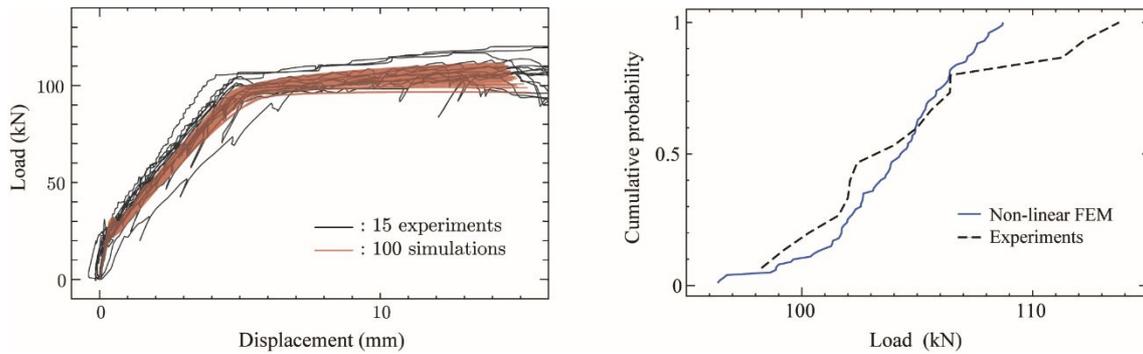


図-3 複数回の実験とモンテカルロシミュレーションの比較

(5) コンクリート切欠はりに対する適用事例

V&V の適用事例として、コンクリート切欠はりを対象に、ASME V&V 10 に基づく検証と妥当性確認を具体的に行った。検証において、破壊エネルギーの理論値の再現性を検証することでコード検証を行い、メッシュサイズが解析結果に及ぼす影響を定量化することで解析検証を実施した。妥当性確認においては、図-4 に示すように、同条件の実験を 20 回実施した結果と試行回数 500 のモンテカルロシミュレーションの結果を比較することで、面積指標に基づく誤差が十分に小さいことを示した。また、モンテカルロシミュレーションの時間を短縮するための代替モデルについても検討し、モンテカルロシミュレーションと同等の結果が得られることを示した。

ここでの事例はコンクリート切欠はりを対象としたが、上の(1)~(4)の成果を用いれば、鉄筋コンクリートはりに対しても同様に、ASME V&V 10 に基づく検証と妥当性確認を行うことができる。

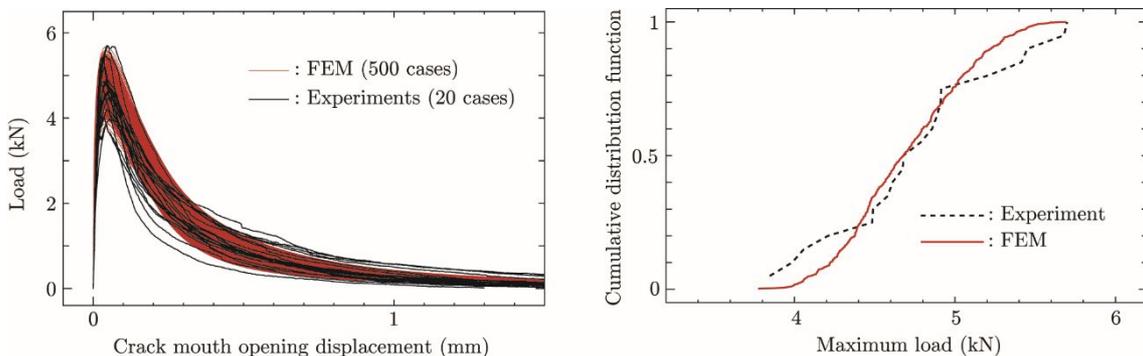


図-4 コンクリート切欠はりの数値解析における妥当性確認の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 加藤匠, 龍頭正幸, 車谷麻緒	4. 巻 76
2. 論文標題 界面の脆弱性を考慮した損傷モデルによるコンクリートのメゾスケール破壊シミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 38-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.1_38	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 上田尚史, 岡崎慎一郎, 車谷麻緒	4. 巻 58
2. 論文標題 レビュー論文: シミュレーションの検証と妥当性確認 (V&V) に関する研究事例	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学	6. 最初と最後の頁 904-910
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 佐々木浩武, 加藤匠, 車谷麻緒	4. 巻 76
2. 論文標題 損傷モデルによるコンクリートの非均質性に関するモンテカルロシミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_163-I_171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_163	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 車谷麻緒, 坂敏秀, 山本佳士, 上田尚史, 龍頭正幸, 小林樹人	4. 巻 77
2. 論文標題 鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対する代替モデルの提案とその妥当性確認	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_403-I_412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_403	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 車谷麻緒, 坂敏秀, 山本佳士, 上田尚史, 岡崎慎一郎, 小倉大季	4. 巻 2021
2. 論文標題 理論式に基づく鉄筋コンクリートはりの非線形計算モデルの開発とその検証および妥当性確認	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20210020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2021.20210020	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 車谷麻緒, 小倉大季, 櫻井英行	4. 巻 2022
2. 論文標題 コンクリートの非線形有限要素解析に対する検証と妥当性確認の一例	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 20220005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2022.20220005	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 渡邊英吾, 車谷麻緒	4. 巻 2022
2. 論文標題 鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対するコード検証および解析検証	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 20220011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2022.20220011	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 羽生隼輝, 芦田拓海, 車谷麻緒	4. 巻 78
2. 論文標題 鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対する代替モンテカルロ法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 22-15037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-15037	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 河地陽太, 車谷麻緒	4. 巻 78
2. 論文標題 鉄筋コンクリートはりのせん断破壊における挙動のばらつき要因の分析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 22-15006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-15006	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16件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Soma, Y., Kurumatani, M.
2. 発表標題 Simulation of fracture behavior of reinforced concrete involving frictional contact on interfaces
3. 学会等名 3rd Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤匠, 車谷麻緒, 村松真由
2. 発表標題 フェーズフィールド法によるコンクリートモデルの作成手法とその数値実験
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 車谷麻緒, 龍頭正幸, 小林樹人
2. 発表標題 鉄筋コンクリートのValidationにおける非線形力学挙動のばらつきに関する基礎的検討
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本康佑, 車谷麻緒
2. 発表標題 10K高解像度デジタルカメラを用いたコンクリートのひび割れ進展挙動のDIC計測
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 車谷麻緒, 龍頭正幸, 小林樹人
2. 発表標題 鉄筋コンクリートのValidationにおける非線形力学挙動のばらつきに関する基礎的検討
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本佳士, 坂敏秀, 車谷麻緒
2. 発表標題 RBSMを用いた鉄筋コンクリート部材の破壊シミュレーションにおける不確かさ評価と妥当性確認
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羽生隼輝, 芦田拓海, 車谷麻緒
2. 発表標題 鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対する代替モンテカルロ法
3. 学会等名 第25回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊英吾, 車谷麻緒
2. 発表標題 鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対するコード検証および解検証
3. 学会等名 第25回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 車谷麻緒, 小倉大季, 櫻井英行
2. 発表標題 コンクリートの非線形有限要素解析に対するV&Vの一例
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊英吾, 車谷麻緒
2. 発表標題 鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対するコード検証および解検証
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田尚史, 車谷麻緒, 坂敏秀, 山本佳士
2. 発表標題 コンクリート構造の材料非線形解析に対する数値創成解による検証
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽生隼輝, 芦田拓海, 車谷麻緒
2. 発表標題 鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対する代替モンテカルロ法
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 車谷麻緒, 渡邊英吾, 羽生隼輝, 河地陽太
2. 発表標題 鉄筋コンクリートの非線形有限要素解析に対する検証と妥当性確認の試行例
3. 学会等名 コンクリート工学におけるシミュレーションの検証と妥当性確認および不確かさ評価に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Nasukawa, Hiroto Masui, Mao Kurumatani
2. 発表標題 3D Meso-Scale Numerical Experiment of Reinforced Concrete Reflecting the Geometry of Deformed Bars and Coarse Aggregates
3. 学会等名 World Congress on Computational Mechanics XV (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Eigo Watanabe, Junki Hanyu, Yota Kawachi, Takumi Ashida, Mao Kurumatani
2. 発表標題 An Example of the Verification and Validation for Fracture Analysis of Reinforced Concrete Using a Damage Model
3. 学会等名 World Congress on Computational Mechanics XV (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshihide Saka, Yoshihito Yamamoto, Naoshi Ueda, Mao Kurumatani
2. 発表標題 A trial for validating the model of reinforced concrete beams with emphasis on uncertainty quantification
3. 学会等名 World Congress on Computational Mechanics XV (国際学会)
4. 発表年 2022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	岡崎 慎一郎 (Okazaki Shinichiro) (30510507)	香川大学・創造工学部・准教授 (16201)	
研究分担者	山本 佳士 (Yamamoto Yoshihito) (70532802)	法政大学・デザイン工学部・教授 (32675)	
研究分担者	上田 尚史 (Ueda Naoshi) (20422785)	関西大学・環境都市工学部・准教授 (34416)	
研究分担者	坂 敏秀 (Saka Toshihide) (30443740)	鹿島建設株式会社(技術研究所)・その他部局等・研究員 (92604)	
研究分担者	小倉 大季 (Ogura Hiroki) (50624037)	清水建設株式会社技術研究所・その他部局等・主任研究員 (92605)	

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
---------	---------