

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04674

研究課題名（和文）想定を超える地震作用に対する橋梁全体系の耐崩壊性能の評価

研究課題名（英文）Evaluation of collapse resistance performance of entire bridge systems under mega-earthquake ground motions exceeding the design basis

研究代表者

奥村 徹（OKUMURA, TORU）

九州産業大学・建築都市工学部・准教授

研究者番号：40332027

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：橋梁を構成する部分的な骨組構造の縮小模型供試体の振動台実験を実施し、精緻な数値解析により模型供試体が崩壊に至る挙動を再現できることを示した。地震作用下の実尺の橋梁を対象として、橋梁全体系の大規模なモデルを用いたシミュレーション解析をスーパーコンピュータにより実施し、その崩壊挙動を考察するとともに部材の破壊から構造全体系が最大耐力点に至るまでの余裕度を示す手法を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

激甚化する自然災害に対する事前対応の重要性が認識されつつある中、本研究は予測が困難である地震に対する構造物の致命的な被害低減を目指し、工学的な技術を駆使して対処法を検討したものである。研究成果は、想定外の地震を考慮した耐震設計技術に大きく寄与するとともに、開発したシミュレーション手法は次世代の耐震設計へ向けた新たな展開の糸口となるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We conducted shake table tests using reduced-scale model specimens of steel frames that constitute bridges. Through accurate numerical analysis, we demonstrated the ability to precisely evaluate the collapse behavior of the model specimens during the shake table experiments. Additionally, we performed a detailed numerical analysis using a large-scale model of the entire bridge system and executed it on a supercomputer. The study aimed to investigate the collapse behavior of full-scale bridges under seismic actions and propose a methodology to assess the margin of safety from component failure to reaching the ultimate load-carrying capacity of the structure.

研究分野：耐震工学，鋼構造

キーワード：超過地震作用 振動台実験 大規模計算 鋼構造

1. 研究開始当初の背景

橋梁の耐震設計では、あらかじめ規定した設計用地震動に対する耐震性能を確保する。ただし、地震の予測には不確実性が伴うので、設計の想定を超える地震動が作用した場合においても大規模崩壊等の壊滅的な被害を防止するための方策を講じておく必要がある。このためには、数値解析等による信頼性の高い高精度のシミュレーション技術を確認する必要がある。

設計上の安全限界以降の挙動を対象としたシミュレーション技術の現状として、エネルギー吸収部材である鋼製橋脚については過去に多くの載荷実験や振動台実験が実施されており、実験結果をもとにポストピークを含む領域に及び精度検証がなされたFE解析が実施されている。一方、塑性領域での繰り返し載荷に対して安定的なエネルギー吸収を期待できない、いわゆる非エネルギー吸収部材に関するものとしては古くから部材単体の耐荷力に着目した膨大な数の実験と解析が行われているものの、変形性能やこれらの部材を含む構造系としてのポストピーク以降の力学挙動に着目した研究は非常に少ない。

現行の設計においては鋼アーチ橋や鋼トラス橋などの非エネルギー吸収部材からなる橋梁では設計用地震動に対して弾性範囲にとどめる設計が行われている。これらの骨組構造に設計の想定を超える地震動が作用した場合には、全体座屈や局部座屈により部材レベルでは急激な耐力低下が生ずる一方で、不静定次数が高いため荷重再配分により構造全体としての耐力低下は抑制されることも考えられる。あるいは荷重が再配分されることにより連鎖的に部材が破壊する崩壊シナリオなども考えられるが、現状ではいずれも推測の域を出ない。

2. 研究の目的

(1)

非エネルギー吸収部材からなる骨組構造の動的崩壊挙動を予測するための数値解析手法を確認する。

(2)

実際の橋梁を対象に、地震動下における部材の破壊から構造全体系が最大耐力点に至るまでの挙動について高精度の数値解析を実施し、崩壊に対する余裕を定量的に評価する手法を提示する。

3. 研究の方法

(1)

設計の想定を超える地震動下の骨組構造の動的な崩壊挙動を対象とした振動台実験を実施し、これをベンチマークデータとして数値解析の精度検証を行う。振動台実験に用いた2種類の骨組模型供試体 (FrameA, B) および実験の概要を写真-1、図-1, 2に示す。FrameAは2体、FrameBは1体用意した。無補剛箱型断面を有する柱部材には機械構造用角型鋼管 (STKMR290) を用い、外ダイヤフラムおよびガセットプレート (SS400) を溶接した。H形断面を有する対傾構と横支材はSS400材の角棒から機械切削により製作した。実際の橋梁が崩壊に至る際には接合部の損傷や破断を伴う複雑な挙動となることも考えられるが、本実験では各部材の座屈を伴う損傷と構造全体系の崩壊挙動の関係に着目することとし、その他の要因は可能な限り排除した。この方

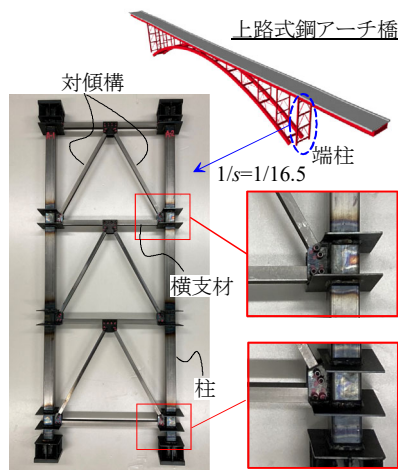


写真-1 骨組模型供試体

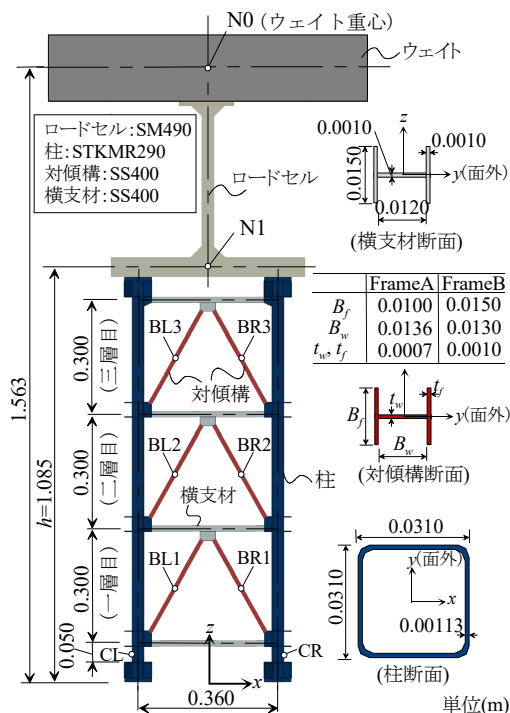


図-1 骨組模型供試体の諸元

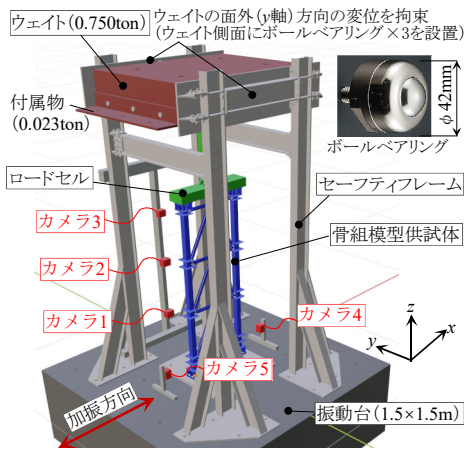


図-2 振動台実験の概要

針のもと、各部材の接合部は十分に剛性を有し、かつ損傷が生じないようにした。

ウェイトには加速度計、レーザー変位計、損傷が予想される個所にひずみゲージを設置した。骨組全体の水平荷重や水平変位などの巨視的な挙動に加え、画像解析により、対傾構の座屈によるたわみの時刻歴応答を計測した。入力地震動は水平1方向に設計用レベル2地震動II-II-2を用いた。

振動台実験において崩壊に至った骨組模型の各種計測値をベンチマークデータとして再現解析を行った。数値解析モデル(図-3)は模型供試体の寸法諸元ならびに使用鋼材の引張試験により得た応力ひずみ関係を正確に考慮し、シェル要素を用いてモデル化を行った。入力地震動は実際に振動台上で計測された加速度波形を入力した。

(2)

橋梁全体系の崩壊挙動を解析するためには、アーチリブ等の部材の局部座屈を伴う軟化挙動を考慮するためにシェル要素を用いてモデル化する必要がある。しかし、多数の部材で構成されるアーチ橋全体系のモデルをシェル要素により構築する作業は非常に煩雑で人的過誤も生じやすい。さらに数値解析においては自由度の増大に伴い、計算時間や必要となるメモリが非常に大きくなるため一般的なワークステーションでは計算することができない。このような橋梁全体系の大規模解析を実施する際の課題(大規模モデルの構築、大規模計算)に対して、はり要素のモデルからシェル要素による橋梁全体系の大規模モデルを自動構築する機能をFE解析ソフトウェアに組み込み、スーパーコンピュータ上でシェル要素を用いた構造全体系の大規模モデルを解析するシステムを開発した。実際の橋梁の地震時における崩壊挙動についてスーパーコンピュータを用いた数値解析を実施し、その挙動を明らかにするとともに崩壊に対する余裕を定量的に照査する手法について検討した。

4. 研究成果

(1)

一例として、振動台実験による骨組模型(FrameA)の動的崩壊挙動と比較したものを図-4~6に示す。振動台実験では、加速度振幅を120%に増幅した地震動を用いて、模型が明確な崩壊に

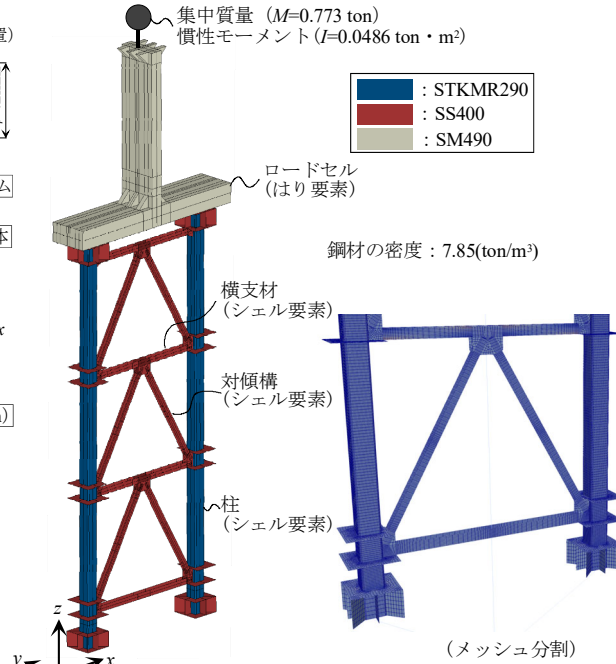


図-3 解析モデルの概要

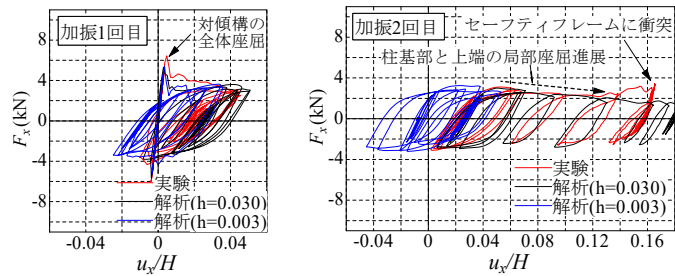


図-4 水平荷重—水平変位関係

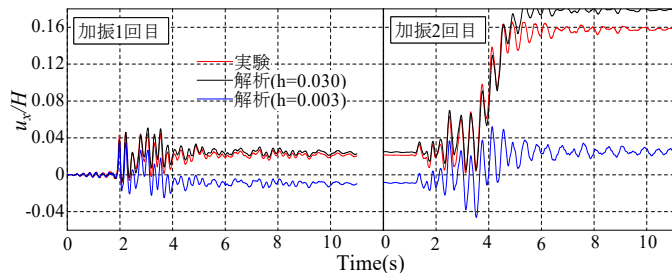


図-5 頂部水平変位の時刻歴応答

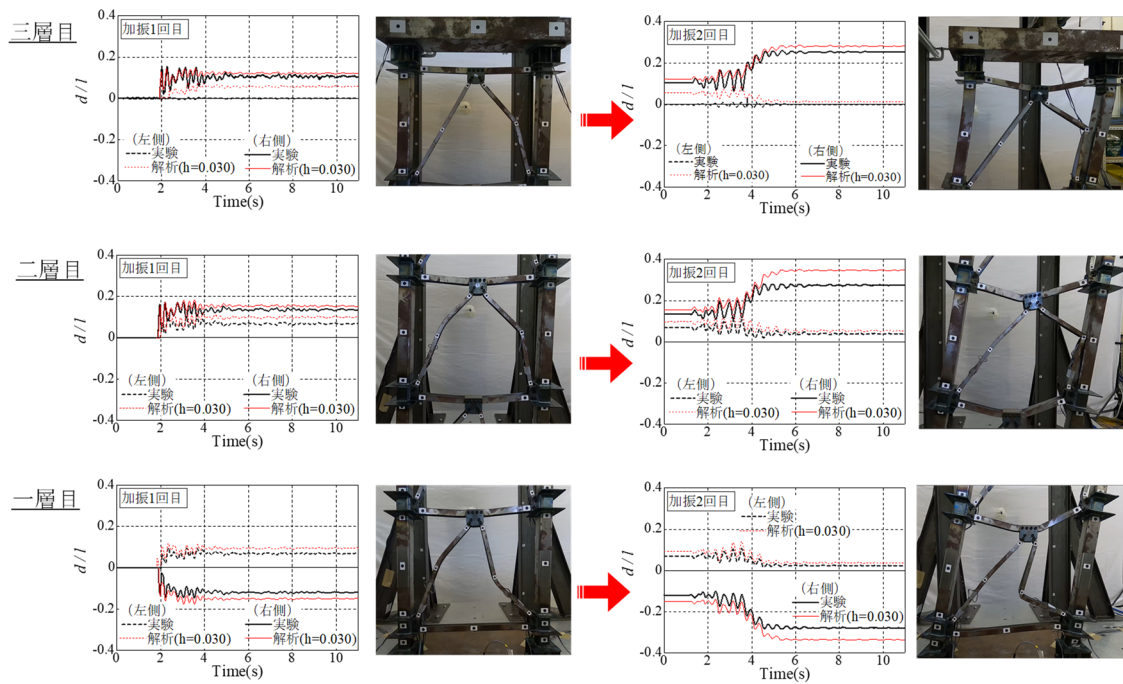


図-6 対傾構中央部の座屈によるたわみの時刻歴応答

至るまで複数回の加振を行った。結果として、1 回目の加振時に骨組模型は最大耐力に到達し、対傾構の全体座屈により急激な耐力低下を示したのち、後続の 2 回目の加振時に柱の基部と上部に局部座屈を伴いながら大きく水平変位がほぼ単調増加し、セーフティフレームに衝突して実験を終えた。このような骨組模型が明確な崩壊状態に至る実験結果に対して数値解析では骨組模型頂部（図-1, N1 点）の水平荷重—水平変位関係、水平変位の時刻歴応答のみならず、対傾構の座屈挙動においても振動台実験の結果を精度良く再現できることが確認できた。その一方で、粘性減衰などの不確定量が解析結果に対して大きな差異を生じる要因となることが明らかとなった（図-4, 5）。さらに、実構造では使用鋼材の降伏応力も製造ロットごとにばらつきがあるため、崩壊挙動の予測がさらに困難となる。実構造を対象とした崩壊制御を確実に機能させるためにはこれらの不確実な構造諸元の影響を考慮する、あるいは影響が及ばないような対策を講ずる必要があり、崩壊制御における新たな視点として今後の研究で展開したい。

(2)

上路式鋼アーチ橋に対して、兵庫県南部地震（1995）JR 鷹取駅観測波 NS, EW 成分を 2 方向同時入力し、スーパーコンピュータ「不老（名古屋大学）」により複合非線形動的応答解析を行った。解析モデルは通常の実務設計で用いられるはり要素モデルのインプットデータをもとに、本研究課題で開発したシステムを利用してシェル要素により全ての鋼部材を自動構築した（図-7）。並列計算では 186 の計算ノードを用い、ロードバランスが概ね等しくなるように、橋梁全体系の解析領域を部材単位でグルーピングした。時間増分間隔は 0.01s とし、30 秒間の入力地震動に対して計算に要した時間は 154377s（≒42.9h）であった。

時刻歴応答解析の結果を図-8～10 に示す。参考として実務で用いられるはり要素モデルによる解析結果と比較している。初期の弾性応答の範囲においてははり要素モデルとシェル要素モデルの挙動は一致しているが、その後、端柱やアーチリブに局部座屈が生じ、両者の挙動に差異があらわれる。このことから、複数の部材の損傷を伴う構造系の最大耐力到達までの挙動を評価するためにはシェル要素などを用いた精緻な数値解析が必要であることが確認された。

高精度の数値解析モデルを用いた Pushover 解析により、地震動作用下において構造全体系が最大耐力に至るまでの余裕を定量的に評価する手法を示した（図-11）。本手法ははりモデルを用いた時刻歴応答解析において構造系が危険と判断される時刻における復元力ベクトルをシェルモデルに比例載荷し、最大耐力点に至るまでの荷重倍率 Λ により余裕を評価するものである。とくに地震動による繰返しの載荷履歴を受ける場合に、最大耐力の劣化が懸念されたが、その影響は限定的であり、Pushover 解析で対応できることが確認できた。

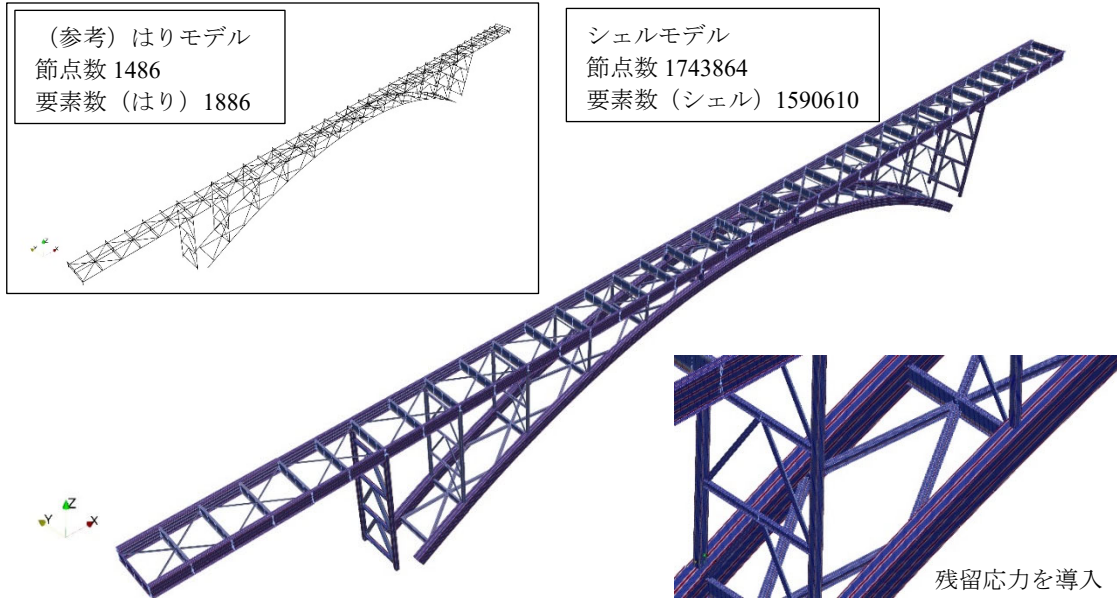


図-7 鋼アーチ橋の大規模計算用解析モデル

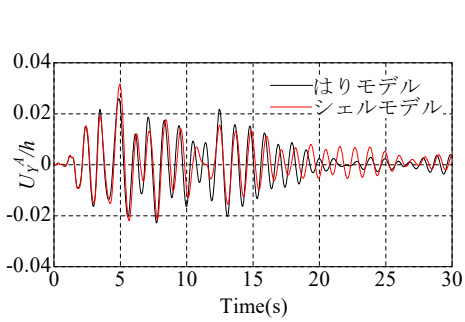


図-8 桁中央部橋軸直角方向変位

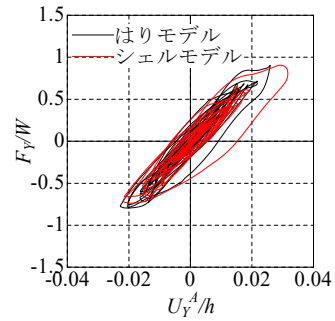


図-9 橋軸直角方向の復元力-変位関係

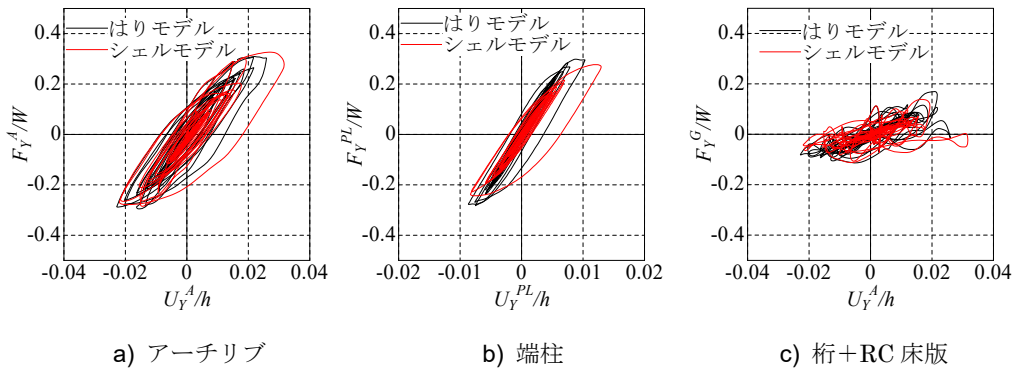


図-10 各構造要素の橋軸直角方向の反力-変位関係

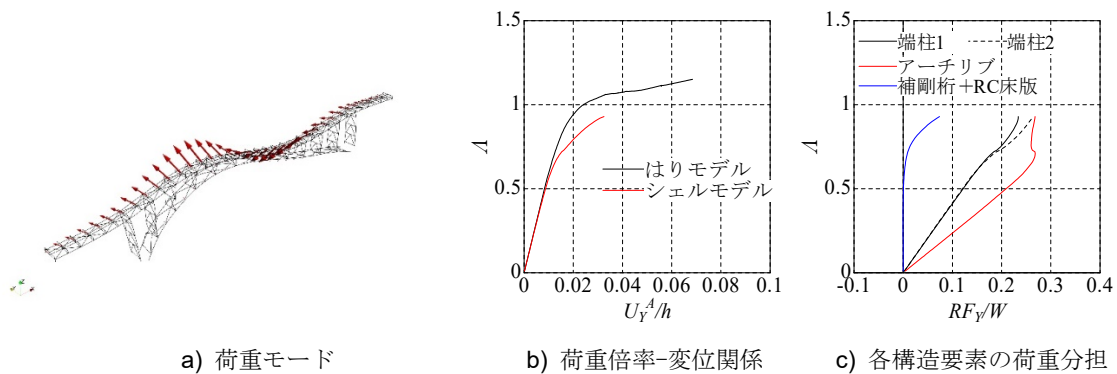


図-11 Pushover 解析による構造全体系の最大耐力までの余裕度の評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 OKUMURA Toru, MATSUMURA Masahide, NONAKA Tetsuya	4. 巻 78
2. 論文標題 DYNAMIC COLLAPSE BEHAVIOR OF BRACED STEEL FRAMES TESTED BY SHAKE-TABLE EXCITATIONS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 462 ~ 479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejseee.78.3_462	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥村 徹, 神崎勝風, 渡部竜也, 堀口雄成
2. 発表標題 対傾構を有する骨組構造の動的崩壊挙動を対象とした振動台実験
3. 学会等名 第77回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥村徹, 奈木野雷汰, 鈴木望巳
2. 発表標題 非エネルギー吸収部材からなる骨組構造の地震時崩壊挙動の予測
3. 学会等名 第78回土木学会年次学術講演会
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	野中 哲也 (NONAKA Tetsuya) (20772122)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13903)	

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	松村 政秀 (MATSUMURA Masahide) (60315976)	熊本大学・くまもと水循環・減災研究教育センター・教授 (17401)	

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