

令和元年6月13日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04399

研究課題名(和文) スペクトル適合多次元地震動を用いた漸増動的解析による次世代耐震設計法の開発

研究課題名(英文) Development of a seismic design framework based on incremental dynamic analysis using spectrum-compatible multi-dimensional seismic ground motions

研究代表者

五十嵐 晃 (Igarashi, Akira)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：80263101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：ネパール・パタン¹の歴史的組積造建物および熊本²の通潤橋を対象とした漸増動的解析により、実際にそれぞれの構造物が経験した2015年ゴルカ地震および2016年熊本地震で見られた損傷レベルの評価の妥当性および地震動レベルとの関係を明らかにした。また、曲線橋梁の構造モデルを用い水平2方向入力と桁・橋台の衝突による回転を考慮した漸増動的解析を行い、フラジリティカーブでの評価を行った。曲線橋の場合、2方向同時作用による地震リスクが増加することを定量的に示した。以上の結果を踏まえ、2方向地震動と漸増動的解析を用いた構造物の耐震性能評価と設計照査法に関するとりまとめを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

設計地震動を超えるレベルの地震における致命的な損傷を回避する「危機耐性」や、機能損失の限定化や早期の復旧性を含めた要求である「レジリエンス」を構造設計への取り入れを図ることの重要性が認識されている。これらの観点からの性能評価のための手段として漸増動的解析の有効性や、より現実的な条件を考慮した性能評価としての多次元地震動入力の活用とその評価の実際的な検証を行い、有効性および今後の方向性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Incremental dynamic analysis of historical masonry buildings in Patan, Nepal and Tsujun Bridge in Kumamoto revealed the validity of the assessment of damage level and the relationship with the level of earthquake motion, under the 2015 Gorka and 2016 Kumamoto earthquake ground motions that each structure actually experienced. Also, incremental dynamic analysis of structural models of a curved girder bridges was performed taking the bi-directional input and rotation due to collision of girder / abutment into account to obtain seismic performance assessment in the form of fragility curves. It is quantitatively shown that the seismic risk due to the bidirectional action significantly increases for the case of curved girder bridges. Based on these results, seismic performance assessment and design method of the structure using two-direction ground motion and incremental dynamic analysis were summarized.

研究分野：構造工学

キーワード：耐震 制震 免震 防災

1. 研究開始当初の背景

鉄道構造物設計標準では、2014年の改訂で設計地震動を超える地震が発生しても破滅的な状態に至らないことを要求する「危機耐性」の概念が導入されている。設計地震動が耐震標準において物理的に考えられる最大の地震ではなく経済性も勘案して社会的にも妥当とされる範囲で設定された最大級の地震として定義されているのに対して、設計地震動を超える地震の存在の可能性を考慮して設定された概念である。ここで言う破滅的な状況とは、想定以上の損傷が構造物の崩壊が生じるような状況と解釈できることから、想定外の地震が発生しても、崩壊に至るような損傷が生じないまたは生じにくい構造設計を行うことが重要となる。しかしながら、このような危機耐性を明確な数値目標に基づいて構造設計で照査する方法は未確立である。また、重要インフラ防護における「レジリエンス」もまた近年着目されている概念である。これはある程度までの災害の脅威に対しては通常通りのサービスを提供でき、大災害においては要求される最低限の機能の提供を継続するとともに、災害が去った後は速やかに回復する能力などと定義され、国際的にも諸先進国の国家戦略の中での重要インフラ防護の取り組みに明示されているものである。インフラの「強じん化」や「堅ろう化」などの概念は、本質的な意味はレジリエンスと同等のものであると考えられるが、社会基盤施設の構造設計としてのレジリエンスの要求のあり方についても、議論は端緒に付いたばかりである。

上述した危機耐性やレジリエンスの観点から考えた場合、通常地震動解析では、特定の入力地震動に対しては構造物が目標性能の要求を満足するか否かを判断できるが、設計想定を超える大きさを含むより幅広い入力地震動に対する損傷の段階を予測するものではない。このような目的に適用可能と考えられる手法として、Cornellらにより提唱された漸増動的解析 (Incremental Dynamic Analysis, IDA) がある。IDAは、入力波の強度を漸増させて非線形時刻歴応答解析を行い、その入力強度と構造物の応答の関係から耐震性能および地震応答特性を評価する手法である。IDAは、地震動入力振幅を徐々に増加させながら非線形時刻動的応答解析を繰り返し行った結果を用いて地震動の大きさのレベルと損傷する部位の関係の評価を得るものである。この結果に基づき、設計上の損傷順序と損傷部位に従った部材設計や構造設計、設計地震動を超える地震動に対する構造物の挙動の予測、などが可能となると考えられる。申請者は、こうしたIDAの橋梁設計への適用に着目して、具体的な橋梁事例に基づく検討を行ってきた。

従来、海外や建築分野で検討や適用がされてきたIDAでは、地震動は1方向入力を前提としている。これは既存の耐震設計体系で想定する範囲内での方法論との整合性や連続性を持っているものの、想定を超える地震動に対する構造物の性能を検討する上では、2方向など多次元の地震動の作用に対する構造物の多次元弾塑性応答の評価の重要性が増すと考えられる。構造物の多次元の2方向地震動入力に対する2次元応答や構造物の性能は既往の研究でも数多くの研究が行われており、成果や知見の蓄積があるが、IDAによる評価を前提とした検討はされておらず、これからの課題と考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、規定された応答スペクトルに適合した(水平2方向を含む)多次元地震動を基準入力波として用いた構造物の漸増動的解析(IDA)を提案し、限られた設計地震動レベルに限定せず様々なリスクレベルでの地震動の大きさに対する構造物の性能および地震応答特性を評価する手法としての可能性・適用性を検討する。解析や実験的な手法など様々な側面から「スペクトル適合2方向地震動を使ったIDA」による評価の妥当性や特性を調べ、危機耐性やレジリエンスを視野に入れた構造設計のための性能評価手法として確立することを目標としている。

この目標を実現するため、次の4項目を対象とした検討を行う。

- A. スペクトル適合2方向入力地震動作成法の開発：一様ハザードスペクトルや設計地震で規定される応答スペクトルに基づき、2次元入力模擬地震動を生成する手法については、申請者らがこれまで検討している。この知見をさらに発展させ、当該地点での地震危険度と許容リスクを勘案した上で規定されたスペクトルに基づいて2方向入力地震動の作成法を開発する。
- B. 漸増動的解析(IDA)への適用：上記の基準入力を用いたIDAの動的応答解析の方法論としての妥当性を評価するとともに、既存の設計地震レベルにおける性能の余裕度を新たに評価することが可能な手法であることから、設計者が耐震安全性能の要求に柔軟に対応できる評価手法としての妥当性を検討する。シナリオ地震に基づくサイト波の推定を行いこれを入力として照査以外の選択肢として、構造物の耐震性能を判定する方法としての妥当性を検討する。
- C. 構造物の2方向弾塑性・非線形動的応答の数値的・実験的評価：入力の方向性による応答の相違、構造部材や免震支承・制震ダンパー等の新たな要素に特異な非線形2方向変形・復元力特性、軸方向性を持つ部材やデバイスの水平面内の回転挙動など、1方向入力による評価が実際の地震時応答を適切に評価しているかどうかに着目し、2方向入力地震作用に基づく設計および照査の手段としての評価の有用性を、解析および実験の両側面から検証する。
- D. 設計と性能評価手法としての有用性の検討：上記の危機耐性やレジリエンスの要求との対応関係あるいはその評価のための有効性の検討結果を取りまとめる。

3. 研究の方法

(1) 2方向地震動入力への検討

漸増動的解析への適用のための、最も合理的なスペクトル適合2方向入力の検討を行う。特に、下記の課題に留意した制震橋梁に対する2方向同時入力への応答の適切な評価方法の構築を行うことにより、2方向入力波形の設定法を確立する。研究代表者・研究分担者は、構造設計の条件を直接反映できる2方向入力地震動の作成方法として、Hilbert変換を用いて直交成分を生成しスペクトル適合地震動波形を算出する方法や、それを発展させた方法を提案しており、それらの適用性についても検証した。

(2) 漸増動的解析(IDA)への適用の検討

漸増動的解析(IDA)は、基準入力地震波に振幅倍率を乗じたものを入力し、非線形時刻歴応答解析を実施することでそれぞれの振幅倍率での最大応答値を順次求め、選択された入力地震波の振幅倍率と最大応答の関係を示すことでIDA曲線を得る方法である(研究業績12,16,18,19など)。前項目で検討したスペクトル適合2方向地震動を用いたIDAによる耐震性能評価の有効性の検討を行う。

前項目で作成した様々な異なるスペクトル適合2方向入力地震波を選び、複数のIDA曲線を得ることで、入力地震波の特性がIDA曲線の作成と構造物の性能評価に与える影響を検討する。また、着目部位の限界値を超過する振幅倍率を把握することで、構造物の損傷順序を考慮した耐震性を明確に評価する。それぞれのIDA曲線を対比して比較することで、1方向入力時では評価できない損傷パターンの2方向地震動を使用することによる検出の可能性や、2方向地震動入力における構造物の耐震性能の適切な評価などの観点から方法としての合理化を調査した。

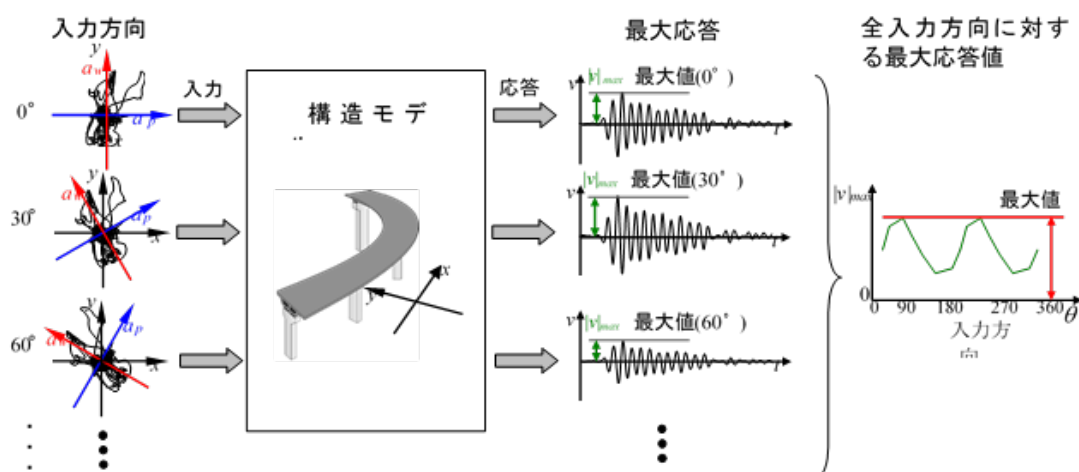
(3) 構造物の2方向応答解析モデル構築のための特性の調査

コンクリート橋、鋼橋、組積造構造、および免震制震デバイスとの組み合わせを含む数タイプの構造物の水平2方向地震応答を求めることができる2方向弾塑性復元力モデルの確立と特性調査を行う。その結果に基づく非線形バネによるマルチスプリングモデルや2方向を用いてその材料非線形性を考慮するとともに、ここで問題として扱おうとしている大変形による幾何学的非線形性を取り入れた解析モデルを構築し、解析の妥当性および有効性の検証を行った。

4. 研究成果

(1) 2方向地震動入力への検討

耐震性能照査のような目的で水平2方向入力を用いた非対称橋梁の動的応答解析を行う場合、対象橋梁の構造解析モデルの配置方向とは別に、水平2方向入力の入力方向を定義する必要がある。地震動の入力方向を特定の方向に設定する根拠が乏しい場合には、構造物の着目応答量について最も不利な方向、すなわち着目量の最大応答値が最も大きくなるような入力方向を採用する事が妥当である。これは図1に示すように、360°の範囲で様々な方向に入力した時の、それぞれの構造物応答値の時刻歴上での最大値を求め、それらの入力方向に関する最大値を構造物の要求耐震性能に対応する許容値と比較する手順を想定している。



ここでは図2に示すように、2方向地震動の全ての入力方向への変化に加えて、与えられた2つの直交成分波形 $a_p(t)$, $a_w(t)$ のうち1つの成分 $a_w(t)$ の正負の反転あるいは非反転の操作も含む場合についての、応答特性や最大応答値への影響について検討する。このような正負反転の上で入力方向を回転することで得られる2方向入力群と元の2方向入力群は互いに鏡像関係にあり、入力方向をどのように変化させても両群の中には互いに一致する2方向入力の組は存在しない。したがって、正負反転の有無により、異なった2つのグループの2方向入力群が生産できる。これらの2つのグループの区別を位相極性 (phase polarity) と呼ぶこととする。

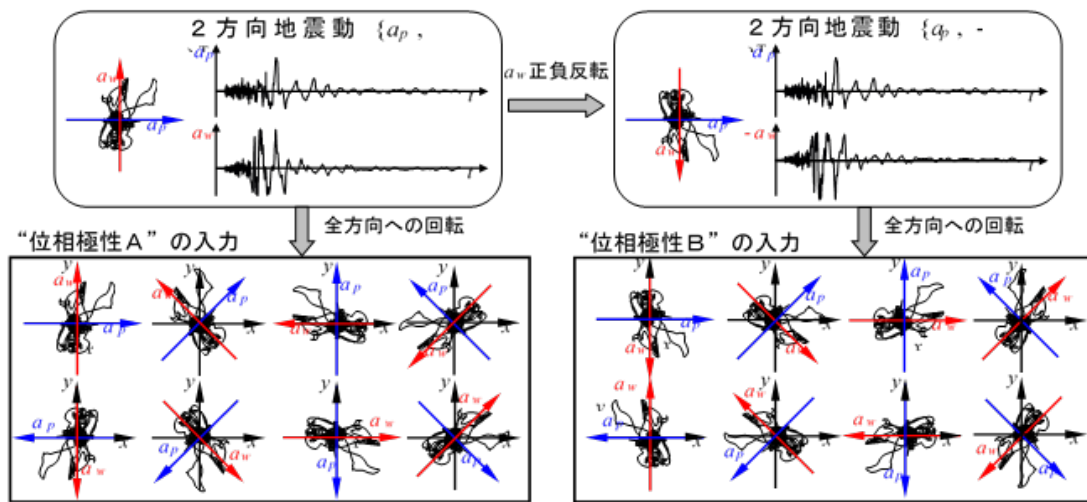


図2 2方向入力の位相極性の概念

位相極性の相違が構造物の最大応答量に与える影響を具体的に検討することを目的に、簡易な曲線橋モデルを用いた数値計算を行い、最大応答量の相違の数値的な算出を行った。曲線桁が強軸方向と弱軸方向を有するような断面形状の橋脚の天端上のゴム支承で支持され、桁と橋脚の間に制震ダンパーを設置した曲線橋の1径間を想定した。対象構造の概形図を図4に示す。曲線桁、橋脚、支承に関する設定パラメータの一覧を表1に示す。橋脚およびゴム支承は、それぞれ強軸と弱軸で剛性が異なる異方弾性バネと等方弾性バネでモデル化し、橋脚の質量を無視した。曲線桁は質量と慣性モーメントを持つ剛体と見なし、曲線橋全体を2方向並進変位と回転の3自由度1剛体系でモデル化した。制震ダンパーは線形粘性減衰要素を仮定し、減衰力は初期配置時の軸方向に作用するものとする。

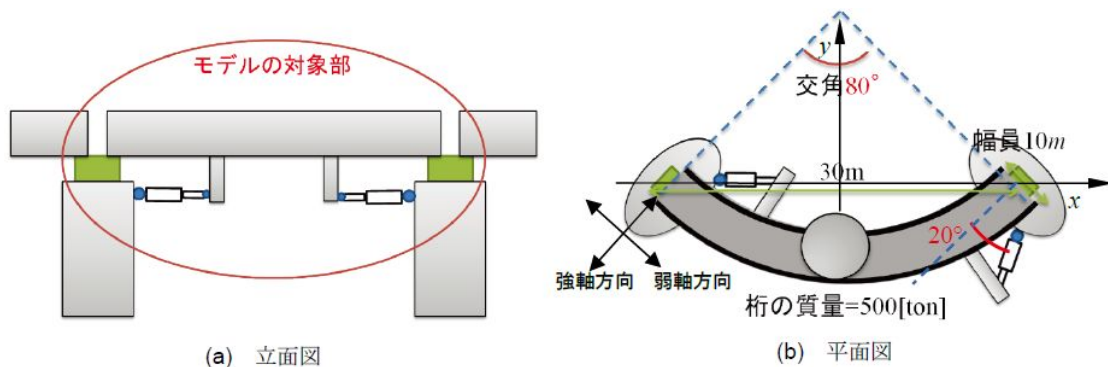


図4 想定曲線橋モデルの概略図

水平2方向地震動入力として、1995年兵庫県南部地震の東神戸大橋記録を用いた。

全角度の入力方向と2つの位相極性の場合について時刻歴応答解析を行った。東神戸大橋記録は橋軸方向のlg成分とその時計回り直角方向のtr成分よりなり、それぞれをx軸方向、y軸方向としたものを位相極性+、lg成分をそのままにしてtr成分の正負を逆にしたものを位相極性-としている。比較のため、各成分を1方向入力として用いた時刻歴応答解析も行った。

ダンパーの粘性減衰力がない場合の、右側ダンパー伸縮量の最大値と入力方向の関係を図5に示す。位相極性+と位相極性-のケースでのダンパー伸縮量の最大値同士を比較すると、位相極性+の方が著しく大きく比は1.4倍に達している。1方向入力のケースでは、lg成分とtr成分ではlg成分の方が大きな応答値となっているため、lg成分による応答に着目する。2方向入力の場合の最大値は、lg成分による一方向入力の応答解析結果から安全側に予測した1.41倍の値を超えている。これは1方向入力による時刻歴応答解析のみでは、2方向入力時の最大応答値の評価が困難であることを意味する。

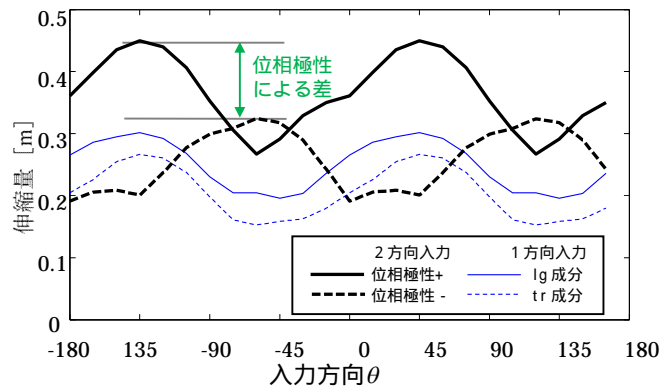


図5 右側ダンパー最大伸縮量と入力方向

(2) 実際構造物への漸増動的解析による耐震性能評価の検証例

漸増動的解析により、2015年ネパール・ゴルカ地震により被災したパタンの歴史的組積造建物と、2016年熊本地震で被災した通潤橋の耐震性を評価した。その結果、パタンの歴史的組積造は、ゴルカ地震では倒壊せず軽微な被害であったが、2倍の地震動の場合は残留変位が生じる結果となった。通潤橋は、熊本地震の前震・本震で盛土に亀裂が入り、通水管から漏水が生じたが、石材の落下は生じなかった。漸増動的解析の結果、熊本地震本震の約1.35倍の地震動の場合は石材が落下する可能性があり、5倍の地震動に対してはアーチ構造が破壊してしまう可能性のあることがわかった。

(3) 2方向入力に基づく地震応答と地震損傷に関するリスク評価

曲線桁の曲率が異なる複数の曲線橋構造モデルに対して、水平2方向と共に桁と橋台の衝突による回転も考慮した漸増動的解析を行い、免震橋がゴム支承の破断と落橋の2段階の損傷レベルを想定し、対応するフラジリティカーブの形での耐震性能と損傷リスクの評価結果が得られた。地震動の強さと50年間の発生確率および各段階の破壊による損失効果を考慮して、それぞれの地震リスクを計算した結果、耐震設計で2方向同時作用による地震リスクは曲線橋の曲率が大きい場合に増大する傾向があり、特に曲率が大きい(斜角が100度以上)の場合、落橋確率が急増することが判明した。

(4) 構造設計への適用について

位相極性に関する計算例により、2方向入力の位相極性が応答評価に大きな影響を与える場合があることが明らかとなった。線形弾性構造系ではなく材料や幾何学的な非線形性を持つ構造でも、入力の位相極性による最大応答への影響は同様に生じると考えられる。これを踏まえると、2方向地震動を入力として用いる場合には、安全側の評価のため、全ての入力方向のみならず2つの位相極性についての応答解析を行い、より大きい応答値を許容値と比較する考え方を導入する必要性が高い。より合理的な構造設計に向けての重要な検討課題となると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

- 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃, 水平2方向地震動の軌跡特性が構造物の2方向弾塑性応答に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, 73(4) I_122-I_134, 2017.
- Yanyan Liu, Akira Igarashi, Characterization of radial and circumferential mechanical energy components in bi-directional nonlinear seismic response of steel bridge piers, Procedia Engineering, 査読有, 199 3009-3014, 2017.
- 井上和真, 渡辺和明, 立石章, 五十嵐晃, 2方向応答スペクトル適合波による土柱モデルの非線形応答に関する解析的検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 74(2) I_603-I_614 2018.
- 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃, 水平2方向地震力に対する構造モデルの2方向応答特性に関する検討例, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 査読有, 74(4) I_1087-I_1096 2018.
- Ahmed ALHOURANI, Junji KIYONO, Aiko FURUKAWA, and Hussam Eldein ZAINEH, Seismic Hazard in Syria Based on Completeness Analysis and Assessment, Journal of Disaster Research, 査読有, Vol. 13, Number.1, Paper: Dr13-1-7597, 2018.
- 古川愛子, 花房陸斗, 清野純史, R.R. Parajuli, H.R. Parajuli, 土岐憲三, ネパール・ゴルカ地震によるパタン Jhatapol 地区の歴史的組積造建物群の被災度分析 歴史都市防災論文集, 査読有, Vol.12. pp.67-74, 2018年7月.
- 古川愛子, 矢野翔大, 清野純史, 鉄道無筋コンクリート橋脚の地震時破壊挙動の数値解析に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.4, (地震工学論文集第37巻), 査読有, I_883-I_896, 2018年11月.
- 秋池佑香, 覚紀, 山崎信宏, 石山昌幸, 染谷優太: 機能分散された免制震橋の地震リスク評

価, 土木学会論文集 A1, 査読有, Vol.74, No.4, pp. I_955-963, 2018.

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 五十嵐晃, 儀久昂, 2 方向地震動入力の位相極性に着目した非対称橋梁の地震応答の分析と評価, 第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集 15(GO01-01-05) 41-50 2018 年 12 月
2. 井上和真, 岡山真之介, 野口裕介, 五十嵐晃, 2 方向応答スペクトル適合波による免震建築物の水平 2 方向地震時挙動分析, 第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集 15(PS1-01-30) 2900-2909 2018 年 12 月
3. Xinhao He, Akira Igarashi, Influence of impact effect in bidirectional UPSS, Proc. 7th Asia Conference on Earthquake Engineering (7ACEE) 7(ACEE0042) 2018 年 11 月
4. 井上和真, 五十嵐晃, 2 方向弾塑性キャパシテイスpekトル法による矩形断面柱の地震応答値予測の試み, 第 38 回土木学会地震工学研究発表会概要集 38(A23-1315) 2018 年 10 月
5. Akira Igarashi, Subaru Gigyū, Influence of phase polarity of bidirectional seismic ground motion on dynamic response of asymmetric bridges, 40th IABSE Symposium: Tomorrow's Megastructures S23-83-S23-90 2018 年 9 月
6. Kazuma Inoue, Kazuaki Watanabe, Akira Igarashi, Effect of accelerogram trajectory of bi-directional spectrum-compatible waves on nonlinear seismic response of structural model, 40th IABSE Symposium: Tomorrow's Megastructures S23-91-S23-99 2018 年 9 月
7. Yanyan Liu, Akira Igarashi, Investigation on phase lag of bidirectional model in nonlinear seismic analysis, 40th IABSE Symposium: Tomorrow's Megastructures S23-133-S23-139 2018 年 9 月
8. 好川浩輝, 古川愛子, 清野純史, 2016 年熊本地震における通潤橋の被災メカニズムの解明, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 北海道, I-582, p.1163-1164, 2018 年 8 月.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 古川 愛子

ローマ字氏名: FURUKAWA AIKO

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 00380535

研究分担者氏名: 党 紀

ローマ字氏名: DANG JI

所属研究機関名: 埼玉大学

部局名: 工学研究科

職名: 助教

研究者番号(8桁): 60623535

(2) 研究協力者

なし

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、研究者個人に帰属されます。