

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14871

研究課題名（和文）不整形立体骨組における極限的地震動の最悪入力方向と塑性崩壊メカニズムの解明

研究課題名（英文）Worst input direction of critical earthquake ground motion for irregular-shaped building structure and its plastic collapse mechanism

研究代表者

小島 紘太郎 (Kojima, Kotaro)

京都工芸繊維大学・デザイン・建築学系・助教

研究者番号：10822786

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）：不整形立体骨組を対象に、弾塑性応答を考慮した極限的ダブルインパルスの最悪入力方向の評価法を提案した。極限的ダブルインパルスによる不整形立体骨組への入力エネルギーが最大になる方向を最悪入力方向と定義し、地震動強さ（地動速度振幅）と最悪入力方向の関係を明らかにした。本手法により、不整形立体骨組に大振幅、長周期のパルス性地震動が作用するときの最悪ケースを効率的に評価可能である。極限的ダブルインパルスにより建物にとって最も危険なパルス性地震動を効率的に評価可能である。この特性を応用して、最悪なパルス性地震動に対する柱・梁断面の最適化問題および免震層が限界変形に到達する最小の地震動強さ評価法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弾塑性構造物の極限応答や弾塑性等価周期の評価には、非線形時刻歴応答解析を用いて地震動の周期と振幅に対する繰り返し計算が必要である。また、不整形立体骨組や偏心建物では、地震動の入力方向も地震応答に影響する。しかし、地震動の振幅と振動数および入力方向を考慮すると極限的地震動の評価における計算負荷は膨大になる。

本研究課題では、パルス性地震動の近似としてダブルインパルスを導入している。ダブルインパルスを用いることで、地動速度振幅毎の最も危険なパルス性地震動（極限的ダブルインパルス）と弾塑性立体骨組への入力エネルギーを最大化する最悪方向を効率的に評価することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：An evaluation method of the worst input direction of the critical double impulse for elastic-plastic irregular-shaped building structures was proposed. The worst input direction of the critical double impulse is defined as the direction which maximizes the input energy into the building structure. The relation between the ground velocity amplitude and the worst input direction can be evaluated efficiently using this proposed method. The critical pulse-like ground motion can be estimated easily by using the double impulse input. Taking advantage of this characteristic of the double impulse, the optimization problem is proposed to obtain the optimal member cross sections of steel building structures under the critical double impulse. Furthermore, the minimum ground velocity level of pulse-like ground motions, which can damage the isolation bearing and damper in the mid-story seismic isolation building, is evaluated.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：ダブルインパルス 断層近傍地震動 極限地震応答 不整形立体骨組 最悪地震動入力方向 平面骨組  
部材断面最適化 中間層免震建物

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。

## 1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震、2016年熊本地震の断層近傍では建物に大きな被害を与える大振幅、長周期のパルス性地震動が観測されている。地震動のパルス周期と建物の弾塑性等価固有周期が一致する「極限的な」場合に、塑性変形がより進行し、建物崩壊の危険性が高くなる<sup>[1]</sup>。しかし、弾塑性モデルの極限的地震応答や共振応答の評価には、地震動強さ一定条件下で、非線形時刻歴応答解析を用いた入力振動数に対する繰り返し計算が必要であり、計算負荷が膨大になる。

また、図1のような複雑な平面形状やセットバックを有する不整形建物や偏心を有する建物の地震応答は地震動入力方向に依存する。弾性不整形立体骨組には主軸（最も剛性の高い軸と低い軸）が存在し、最悪入力方向算定法<sup>[2]</sup>により、極限的ダブルインパルスを入力エネルギーは上記の二つの主軸付近で極大値をとることが明らかになっている。これは主軸方向で極限的となる地震動が最も危険であることを示している。弾塑性モデルでは、地震動強さ及び塑性化の進行に伴い極限的地震動及びその最悪入力方向は変化すると考えられるため、これまで想定していた入力方向よりも危険な地震動入力方向が存在する可能性がある。しかし、地震動の入力方向を考慮すると、極限的地震動評価のための計算負荷はより膨大になる。従って、より効率的に最悪入力方向と極限的地震動評価のための計算負荷を減らし、そのような最悪ケースにおける不整形な建築物の地震応答や倒壊する危険性のある地震動強さを明らかにする必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、不整形立体骨組の弾塑性応答を考慮した極限的なパルス性地震動の最悪入力方向評価法を提案する。本手法を用いて、地震動強さ（地動速度振幅）と地震動最悪入力方向および弾塑性応答の関係を明らかにする。さらに、不整形立体骨組に最悪入力方向から極限的なパルス性地震動が入力する場合（最悪ケース）の弾塑性挙動を解明する。

本研究で用いる極限的ダブルインパルス<sup>[2],[4]</sup>は、建物の地震応答や地震入力エネルギーを最大化する最も危険な地震動に対する応答を効率的に評価可能である。従って、極限的ダブルインパルスを用いて、極限的なパルス性地震動に対する柱・梁部材断面の最適化および中間層免震建物の免震層が限界変形に到達する危険性のある最小の地震動強さの評価に関して、並行して研究を実施する。

## 3. 研究の方法

### (1) 不整形立体骨組の極限的ダブルインパルスの最悪入力方向評価法

本研究代表者らは、パルス性地震動を「ダブルインパルス」で近似する方法を提案し、弾塑性応答を最大にする極限的なインパルスタイミングを明らかにしている（Kojima and Takewaki 2015<sup>[3]</sup>等）。Akehashi and Takewaki<sup>[4]</sup>は、入力エネルギーが最大になるタイミングを多自由度系におけるダブルインパルスの極限的なタイミングと定義し、ベースシアが0になるタイミングであることを示している。弾塑性応答を考慮した不整形立体骨組においても、極限的ダブルインパルスによる入力エネルギーを最大にする入力方向を最悪入力方向と定義し<sup>[2],[4]</sup>、極限的ダブルインパルスの最悪入力方向を評価する。

また、断層近傍のパルス性地震動のモデルであるダブルインパルスの速度振幅と時間間隔（周期特性）を評価するために、実地震動とダブルインパルスのエネルギースペクトルの最大値の等価性から、実地震動をダブルインパルスで近似するときのこれら2つパラメータを求める式を展開する。

### (2) 質量偏心を有する小型立体骨組モデルの振動台実験

偏心を有する立体骨組における極限的ダブルインパルスの最悪入力方向を評価する。さらに、地震動の入力方向の影響を解明するために、質量偏心を有する小型立体骨組を対象に、地震動とその振幅および入力方向を変化させた振動台実験を実施する。

### (3) 極限的ダブルインパルスを受ける多層多スパン骨組の部材断面最適化

多層多スパンの平面骨組を対象に極限的ダブルインパルスに対する建物の最大層間変形角を制約条件、柱と梁の断面積を変数として、部材重量を最小化する最適化問題を定式化し、最適化ソルバーを用いて最適な部材断面を求める。最適化前後の骨組に、実観測パルス波を入力し、地震応答解析により、得られた最適解の妥当性を検証する。

### (4) 極限的ダブルインパルスを受ける中間層免震建物の免震層最大応答評価

天然ゴム系積層ゴムとU型鋼材ダンパーを組み合わせた免震層および鉛プラグ入り積層ゴムの免震層を想定してパラメータを設定したノーマルバイリニア型復元力特性を有する中間層免震建物を対象に極限的ダブルインパルスに対する免震層の最大変形を求め、地震動強さ（インパルス速度振幅）との関係性を評価する。極限的ダブルインパルスに対する免震層最大変位応答と地震動強さの関係性から、免震層が限界変形に到達する危険性のある最小のパルス性地震動の地動速度振幅を評価する。また、球面滑り支承を有する中間層免震建物を対象に建物のパラメータを変動させて、同様に、限界変形に到達する危険性のある最小地震動強さを評価する。

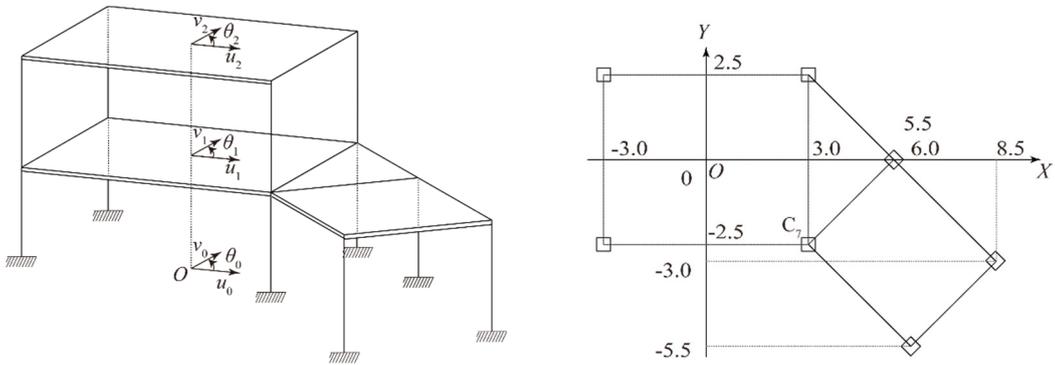


図1 不整形立体骨組（文献[4]を参考に一部修正）

#### 4. 研究成果

本研究課題で得られた成果を以下にまとめる。

##### (1) 不整形立体骨組の極限的ダブルインパルスの最悪入力方向評価法

図1の不整形立体骨組を対象に極限的ダブルインパルスの入力方向を変化させて入力エネルギーを評価し、最悪入力方向を評価した。各入力方向における極限的ダブルインパルスは、シングルインパルスに対する速度応答が得られていれば、繰り返し計算なしに評価可能である[2], [4]。図1の骨組は小坂ら[4]の2層立体骨組を参考に、柱は角型鋼管（□-400x400x16x40）、梁はH型鋼（H-390x300x10x16）としたものである。床の単位面積当たりの質量は  $10,000 \text{ kg/m}^2$  として床面積を柱ごとに等分割して柱頭に集中質量として与えている。1次、2次、3次の固有周期は、それぞれ  $0.900$  秒、 $0.813$  秒、 $0.564$  秒である。図2に、極限的ダブルインパルスによる立体骨組への入力エネルギーと入力方向の関係を示す。縦軸は比較のため、それぞれの入力レベル毎の第1インパルスによる入力エネルギー  $E_1$  で無次元化している。ダブルインパルス速度振幅  $V$  が大きいほど、 $E_{\text{input}}/E_1$  が小さくなるのは、部材の塑性化によって第1インパルス後の振動エネルギーが消費されるためである。ダブルインパルスの速度振幅  $V=0.1 \text{ m/sec}$  のとき、第1インパルス後は弾性であり、そのときの最悪入力方向は X 軸から  $170$  度と  $350$  度の方向である。  $V$  が大きくなるにつれて、最悪入力方向は  $170$  度から徐々に変化し、  $V=1.0 \text{ m/sec}$  では  $100$  度になる。図3に、最悪入力方向から極限的ダブルインパルスを入力した場合（最悪ケース）における入力エネルギーの速度換算値とインパルスの速度振幅の関係を示す。

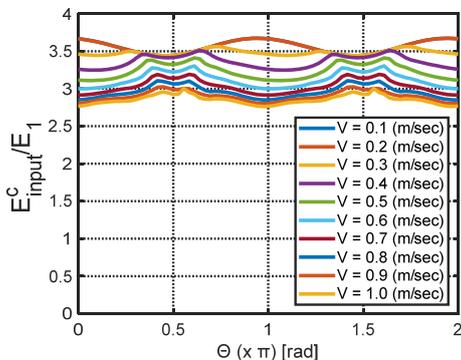


図2 極限的ダブルインパルスによる入力エネルギーと入力方向の関係

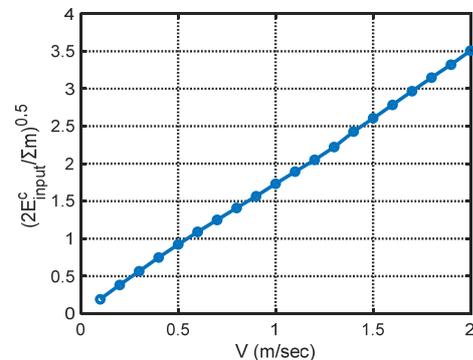


図3 最悪入力方向からの極限的ダブルインパルスによる入力エネルギーとインパルス速度振幅

##### (2) 質量偏心を有する小型立体骨組模型の振動台実験

質量偏心を有する2層1スパン×1スパンの骨組を対象に極限的ダブルインパルスの最悪入力方向を評価すると、概ね  $45$  度方向で入力エネルギーが最大となった。そこで、図4のような質量偏心を有する小型立体骨組試験体を作成し、入力地震動やその振幅、入力方向を変動させて振動台実験を実施した。振幅を低減させた2016年熊本地震の西原村小森観測波 EW 方向成分を  $0$  度、 $45$  度（おもりに向かって対角の方向）、 $135$  度方向に入力し、損傷を観察した。入力方向を比較すると  $135$  度方向でねじれ振動により最も大きく変形し、梁に一部損傷が確認された。しかし、振幅を低減した西原村小森 EW 波では試験体は倒壊には至らなかった。試験体を入れ替えて、共振させるために sweep 加振より算定した振動数  $1.6 \text{ Hz}$ 、加速度振幅  $0.3g$  の正弦波を  $45$  度方向に入力した結果、おもり付近の梁が完全に破断した。偏心立体骨組の長時間地震動による弾塑性共振現象と入力方向の関係については、マルチインパルスを用いて引き続き検討を行う。

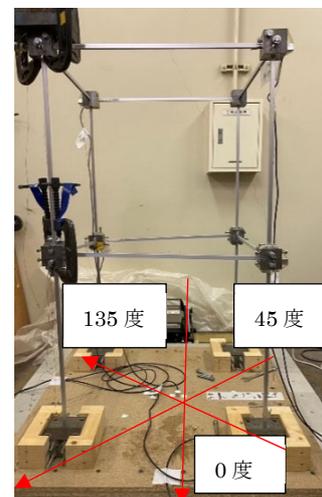


図4 質量偏心を有する小型立体骨組試験体

(3) 極限的ダブルインパルスを受ける多層多スパン骨組の部材断面最適化

2層、5層、10層の鉄骨造建物を対象に、極限的ダブルインパルスに対する最大層間変位を制約条件、柱と梁部材の重量を目的関数とし、重量を最小化する最適化問題を定式化し、柱と梁の断面の最適化を行った。本最適化では、最適化の過程において、入力地震動としてそのときの建物にとって最も危険性の高いパルス性地震動を想定した極限的ダブルインパルスを採用している。従って、本最適化では危険性の高い地震動に対しても効果的に応答低減可能な部材断面を評価することが可能である。ダブルインパルスの速度振幅  $V=2.0$  m/sec、最大層間変形角は  $1/100$  以下になるように最適化を行ったときの10層5スパン骨組の初期断面と最適化後の断面の断面積 ( $\text{cm}^2$ ) を表1,2に示す。最適化では、柱と梁の断面積を連続変数として取り扱い、李ら[6]による断面積と断面2次モーメントおよび塑性断面係数の関係を用いて、断面積から断面2次モーメントと塑性断面係数を計算している。また、最適化には、数値解析ソフトウェア MATLAB の逐次2次計画法による非線形計画法のソルバーである `fmincon` を用いている。最適化前後の10層5スパン骨組の極限的ダブルインパルスに対する各層の最大層間変位を図5に示す。

本最適化による部材断面の妥当性を検証するために2016年熊本地震における西原村小森観測波 EW 方向成分を最適化前後の骨組に入力し、最大層間変位を比較した。図6より、最適化前の骨組では極限的ダブルインパルスは西原村小森波 EW の地震応答を再現できている。最適化後の骨組では、極限的ダブルインパルスに対して最適化することで西原村小森波 EW の応答も低減することができており、本最適化は実際のパルス性地震動に対しても有効である。

表1 10層5スパン骨組の断面 (最適化前)

柱	[ $\text{cm}^2$ ]		梁	[ $\text{cm}^2$ ]	
1~9層	544	□-550×550×19	2-9層	232	H-700×300×13×24
			10層	217	H-594×302×14×23
10層	346	□-500×500×19	R層	133	H-390×300×10×16

表2 極限的ダブルインパルスによる最適断面 (Model II,  $V=2.0$ )

柱	1層	2層	3層	4層	5層	6層	7層	8層	9層	10層
1.6	1500	1282	1080	1058	697	690	689	672	501	447
2.5	1500	1500	1500	1499	1287	1282	1143	1021	580	577
3.4	1500	1500	1499	1292	1216	1164	831	716	494	427
梁	2層	3層	4層	5層	6層	7層	8層	9層	10層	R層
1.5	1000	770	766	741	660	660	659	659	545	265
2.4	1000	828	750	749	477	477	388	307	242	10
3	1000	598	536	534	462	461	461	411	301	100

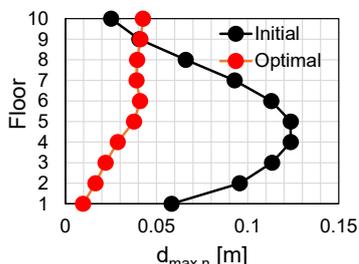
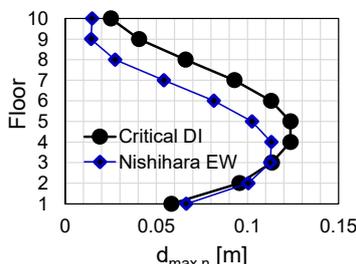
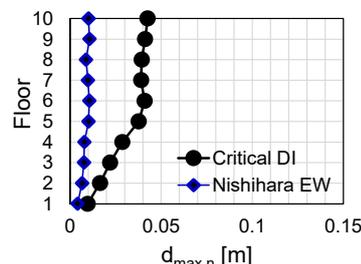


図5 極限的ダブルインパルスに対する最大層間変形



(a) 最適化前の骨組



(b) 最適化後の骨組

図6 西原村小森 EW に対する最大層間変形

(4) 極限的ダブルインパルスを受ける中間層免震建物の免震層最大応答評価

10階建て鉄筋コンクリート造建物の5層目と6層目の間に免震層を挿入した中間層免震建物を想定し、極限的ダブルインパルスに対する免震層最大変形と地震動強さ(地動速度振幅)の関係性を求めた。図7に、天然ゴム系積層ゴムとU型鋼材ダンパーを組み合わせた免震層(NRB+USSD)および鉛プラグ入り積層ゴムの免震層(LRB)の場合における、極限的ダブルインパルスに対する免震層最大変形とダブルインパルスの速度振幅  $V$  の関係性を示す。図8に、ダブルインパルスの極限的インパルス時間間隔と速度振幅  $V$  の関係性を示す。4つの免震層モデルの水平基準変位はNRB+USSDで0.65mと0.85m、LRBで0.96mと1.12mであり、免震層が限界変形に到達するときの速度振幅  $V$  は0.84~1.06 m/secとなる。そのときの極限的タイミングは図8より1.9~2.7秒である。従って、地動速度振幅が1.0 m/secかつ4秒~5秒程度の周期が卓越するパルス性地震動が生じると免震層が損傷する危険性が高い。

球面すべり支承を有する中間層免震建物を想定した3自由度系を対象に上部と下部構造の質量比と固有周期比を変動させた合計24モデルを対象に、極限的ダブルインパルスに対する免震層最大変位とインパルス速度振幅の関係性を求めた。図9に、上部構造と下部構造の固有周期がそれぞれ1.0秒と0.5秒で上部と下部の質量比を変動させた場合の免震層変位と地震動速度振幅の関係性を示す。免震層の固有周期は6.0秒である。天然ゴム系積層ゴム+U型鋼材ダンパー(NRB+USSD)や鉛プラグ入り積層ゴムの免震層(LRB)の場合と同様、免震層が1.0m変位したときのインパルス速度振幅は  $V=0.8\sim 1.0$  m/sec程度であり、球面すべり支承の中間層免震建物においても地動速度振幅が1.0 m/secで免震建物の機能が停止する危険性がある。

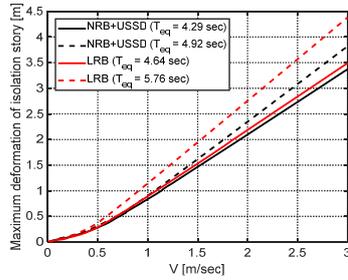


図7 免震層最大変位とインパルス速度振幅  $V$  の関係

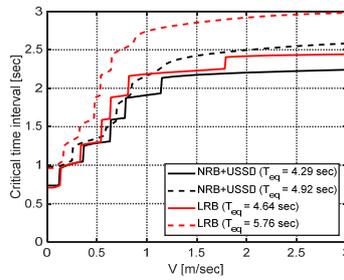


図8 極限的タイミングと速度振幅  $V$  の関係

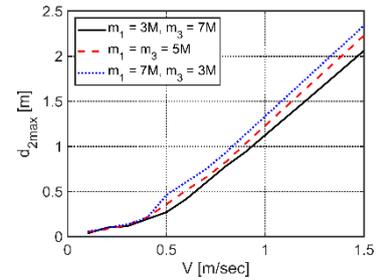


図9 免震層最大変位と速度振幅  $V$  の関係 (球面すべり支承)

## 謝辞

本研究課題では、国土交通省気象庁の強震観測データおよび地方公共団体震度計（熊本県）で得られた波形データを用いている。ここに記して、謝意を表する。

## <引用文献>

- [1] Khaloo, A. R., Khosravi, H., and Hamidi Jamnani, H. Nonlinear interstory drift contours for idealized forward directivity pulses using “Modified Fish-Bone” models, *Advances in Structural Eng.*, 18(5), 603-627, 2015.
- [2] 小島紘太郎, 坂本晴香, 小坂郁夫: 不整形立体構造物を対象とした極限的ダブルインパルスの最悪地震動入力方向, 日本建築学会構造系論文集, 第 85 巻, 第 770 号, pp.509-519, 2020 年 4 月
- [3] Kojima, K. and Takewaki, I. Critical earthquake response of elastic-plastic structures under near-fault ground motions (Part 1: Fling-step input), *Front. Built Environ.*, 1:12, 2015.
- [4] Akehashi, H. and Takewaki, I. Optimal viscous damper placement for elastic-plastic MDOF structures under critical double impulse, *Front. Built Environ.*, 5:20, 2019.
- [5] 小坂郁夫, 山下尚久, 北尾聡子: 1 軸方向地震動に対する不整形立体建物の全ての地震作用方向を考慮に入れた最大応答予測, 構造工学論文集, Vol. 63B, pp.7-14, 2017.3
- [6] 李有震, 吉富信太, 上谷宏二: 鋼構造平面骨組モデルの最適解の特性を用いた構造計画に関する研究, 構造工学論文集, Vol.50B, pp.215-220, 2004.3

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 中山翔太, 小島紘太郎	4. 巻 86
2. 論文標題 バイリニア+スリップ型1自由度系を用いてモデル化した木造住宅の断層近傍地震動に対する極限応答	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 201~211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.86.201	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川端佑弥, 小島紘太郎
2. 発表標題 断層近傍地震動を模擬したダブルインパルスに対する中間層免震建物の弾塑性極限応答
3. 学会等名 日本地震工学会・大会 - 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井悠吾, 小島紘太郎
2. 発表標題 極限的ダブルインパルスに対する層間変位を制約条件とした鋼構造骨組の部材最適化
3. 学会等名 令和4年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井悠吾, 小島紘太郎
2. 発表標題 ダブルインパルスに対する極限応答に基づく高層鉄骨造骨組の部材断面最適化
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会(北海道)学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中西海斗, 小島紘太郎
2. 発表標題 パルス性地震動に対する中間免震層の極限応答
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
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
---------------------------	-----------------------	----

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