

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：14303

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05930・19K21096

研究課題名（和文）多層弾塑性構造物に対する地震時極限外乱法とその建築耐震設計への応用

研究課題名（英文）Critical earthquake excitation method for multi-story elastic-plastic building structure and its application for earthquake-resistant design of building structure

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） 2,530,000円

研究成果の概要（和文）：震源断層の近傍で観測される長周期パルス性地震動を初めとした長周期成分の卓越する地震動による建築物の地震被害が懸念されている。このような地震動では、損傷や塑性化により伸びた建物の等価周期と地震動の長周期成分が一致し、建物の変形が大きく増幅する危険性がある。本研究課題では、パルス性地震動を対象として、このような「極限的」なケースにおける多層弾塑性構造物の地震応答の効率的な評価方法を展開した。また、2階建て木造住宅を対象に極限的なパルス性地震動が入力した時の最大変形の簡易評価方法を提案した。さらに、立体的、平面的に不整形な建築物に応用し、極限的なパルス性地震動の最悪入力方向の評価方法を展開している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弾塑性1自由度系の極限的なパルス性地震動に対する地震応答の閉形式解と静的漸増載荷解析に基づく1自由度系への縮約方法を用いて、多層建築構造物の弾塑性極限応答を評価する方法を提案している。これにより、従来の耐震設計でも用いられている解析結果を応用して多層建物が耐えることが出来る極限的地震動の最大地動速度を効率的に予測可能である。不整形建物を対象に、地震入力エネルギーを最大にする極限的な地震動の最悪入力方向を解明した。これにより、不確定性の高い地震動の周期特性や入力方向に対して安全性の高い建物の設計が可能になる。また、最悪な場合の地震応答を低減可能な立体的なオイルダンパーの最適配置を提案している。

研究成果の概要（英文）：After Hyogoken-Nanbu earthquake in 1995, the effects of pulse-like earthquake ground motions with a long period on structural responses have been investigated, and such pulse-like ground motions can cause large damages on building structures. When the equivalent natural period of the building structure coincides with the predominant period of the pulse-like ground motion, the deformation of the building structure is amplified. In this study, the efficient evaluation method has been proposed of the earthquake response of the multi-story elastic-plastic building structure in the critical case, where the equivalent natural period and the pulse period of the ground motion coincide. The simple estimation method of a critical response of the two-story wooden houses under the pulse-like ground motion was also suggested. Furthermore, the evaluation method of the worst input direction of the critical fling-step input was proposed for the three-dimensional irregular shaped building structures.

研究分野：建築構造・応用力学

キーワード：極限地震応答 断層近傍地震動 ダブルインパルス トリプルインパルス 多自由度弾塑性モデル 不整形立体構造物 最悪地震動入力方向 バイリニア+スリップモデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1994年のNorthridge地震や1995年の兵庫県南部地震の断層近傍で観測された長周期成分の卓越するパルス性地震動は建築構造物に大きな損傷を与える可能性が示唆されている。断層近傍地震動の断層面平行方向入力(フリングステップパルス)と断層面直交方向入力(指向性パルス)の加速度波形は、それぞれ1サイクルの正弦波と振幅の異なる3つの正弦波半波の組み合わせにより、その特徴が効果的に表現できることが、Sasani and Bertero¹⁾により明らかになっている(図1)。これらの長周期成分を含む大振幅のパルス性地震動では、部材の損傷や塑性変形によって伸びた建物の固有周期と地震動のパルス特性を示す周期(以下、パルス周期)が一致する場合に、建物の変形・損傷が大きく進行する。しかし、正弦波モデルを用いた場合、このような弾塑性モデルにおける「極限的」な場合の応答の評価には、時刻歴応答解析を用いて、特定地震動レベル下における入力振動数に対する繰り返し計算が必要であり、極めて煩雑である。小島・竹脇らは上記問題点を解決するために、断層近傍のパルス性地震動を「ダブルインパルス(DI: 図2(a))」と「トリプルインパルス(TI: 図2(b))」で近似する方法を導入している²⁻⁵⁾。インパルスに対する構造物の応答は自由振動のみで表されるため、(1) エネルギーの観点から複雑な弾塑性応答を解析的に導くことが可能であること、及び(2) 復元力が0になるタイミングでインパルスが作用すると弾塑性応答が最大になることから、パルス性地震動に対する弾塑性1自由度系の極限応答の閉形式解を導出することが可能である。

しかし、2自由度系を取り扱ったTaniguchi et al. 2016⁶⁾を除いて、インパルス列を用いた弾塑性モデルの地震時極限外乱法は1自由度系に限られている。従って、本極限外乱法を実際に建築構造物の耐震設計に応用し、不確定性の高い地震動に対して安全性の高い建築構造物を設計するためには、申請者らの提案する極限外乱法を多自由度弾塑性モデルに拡張する必要がある。

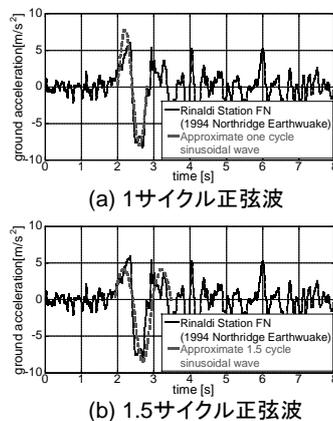
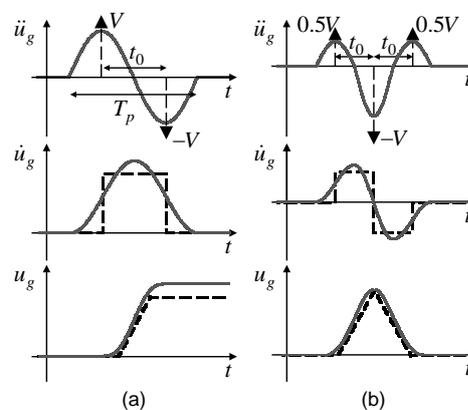


図1 パルス性地震動の正弦波による近似 図2(a) 1-cycle 正弦波とダブルインパルス(DI), (b) 1.5-cycle 正弦波とトリプルインパルス(TI)



2. 研究の目的

本研究の目的は、断層近傍のパルス性地震動を対象とした多層建築構造物、特に多層弾塑性構造物の地震時極限外乱法の展開である。すなわち、不確定性の大きい地震動に対して余裕度を適切に評価するために、多層建築物を対象とした極限的パルス性地震動とそれに対する極限地震応答の効率的な評価方法を提案する。さらに、上記の提案手法を用いて、多層建築物にとって極限的パルス性地震動を対象とした耐震設計法を展開する。

3. 研究の方法

本研究課題の目的を達成するために、以下の手順で研究を行う。

- (1) 多層弾塑性構造物の地震時極限外乱法を展開するために、極限的パルス性地震動に対する弾塑性1自由度系の最大地震応答の閉形式解について、追加で検討を行う。具体的には、以下の3つの検討を行った。
 - ① 指向性パルスを模擬したトリプルインパルスに対する粘性減衰を有する完全弾塑性1自由度系の最大変位応答の解の導出を行う。(小島・疋田(2020), 「5. 主な発表論文など」[雑誌論文]の1番目, 以下、雑誌論文①)
 - ② インパルスとエネルギー平衡に基づく地震時極限外乱法を木造住宅に拡張するために、木造住宅の層復元力特性として用いられるバイリニア+スリップモデルを有する非減衰1自由度系を対象に極限的パルス性地震動が入力した時の最大変形角の閉形式解の導出を行う。(中山・小島(2019), 「5. 主な発表論文など」[学会発表]の2番目, 以下、学会発表②)
 - ③ 回転と並進の2自由度系ではあるが、地震時にねじれ応答を伴う剛性偏心を有する弾塑性1層モデルに対して、ダブルインパルスの極限的タイミングを検証し、ねじれの影響により最も変形が大きくなる構面の最大変形の解の導出を行う。(杉本・小島(2019), 「5. 主な発表論文など」[学会発表]の3番目)
- (2) 中層から高層(10層以下程度)建物の極限的パルス性地震動に対する弾塑性応答の評価方法を提案する。具体的には、極限的ダブルインパルスや極限的トリプルインパルスに対する

1自由度系の最大応答の解と漸増载荷解析に基づく1自由度系への縮約方法を組み合わせ、多層建物の極限的なパルス性地震動に対する弾塑性応答を予測する方法を提案する。(正田・小島(2020),「5. 主な発表論文など」[学会発表]の1番目, 以下, 学会発表①)

- (3) 平面的、立体的に不整形な多層建築構造物を対象に、パルス性地震動をダブルインパルスに近似し、地震入力エネルギーを最大にする極限的なインパルスのタイミングを解明する。不整形建築物は地震動入力時にはねじれを含む立体的な挙動を示し、地震動の入力方向によって建物の地震応答および極限的なパルス性地震動が変化する。そこで、不整形立体骨組における極限的なダブルインパルスの最悪な入力方向を解明する方法を展開する。(小島・坂本・小坂(2020),「5. 主な発表論文など」[雑誌論文]の1番目, 以下, 雑誌論文②)

4. 研究成果

本研究課題で得られた主な成果を以下にまとめる。

(1) パルス性地震動に対する弾塑性1自由度系の極限応答の解の導出に関する追加検討

① 指向性パルスを模擬したトリプルインパルスに対する粘性減衰を有する完全弾塑性1自由度系の極限応答

1995年の兵庫県南部地震以降、震源断層の近傍で大振幅かつ長周期の指向性パルスが観測されている。フリッグステップパルスの近似として導入されているダブルインパルスを用いても指向性パルスによる地震応答をある程度評価可能であるが^{4,5)}、トリプルインパルス(TI)³⁾を導入することで、より精度よく指向性パルスやそれを模擬した3つの正弦波半波(以下、1.5サイクル正弦波)¹⁾、Ricker wavelet等の地震動モデルに対する地震応答を評価可能である^{3,8)}。しかし、ダブルインパルスは復元力0のタイミングがインパルスの極限的なタイミングであることから取り扱いが容易であったことに対して、トリプルインパルスは二つのインパルス時間間隔を等しくした上で極限的時間間隔(地震動のパルス周期に対応)を評価する必要がある。そのため、極限的なトリプルインパルスに対する弾塑性応答に関しては、初めて導入された文献³⁾以降、進展が見られなかった。

それに対して、雑誌論文①では、粘性減衰を有する完全弾塑性1自由度系を対象に、指向性パルスを模擬した極限的なトリプルインパルスに対する最大変位応答の解を、近似的ではあるが陽な解表現として導出している。図3に、提案する近似解による最大変位応答と時刻歴応答解析により求めた極限応答(THRA)の比較を示す。近似解を用いて精度よく最大変位応答を予測することが可能である。また、図4と図5にはそれぞれ極限的な1.5サイクル正弦波とRicker wavelet、極限的なトリプルインパルスに対する最大変位応答の比較を示す。極限的な1.5サイクル正弦波やRicker waveletは、最大地動速度一定条件下で最大変位応答を最も大きくする周期を有する1.5サイクル正弦波およびRicker waveletであり、このような極限的な地震動は最大速度一定条件下における繰り返し計算が必要である。図4, 5より指向性パルスの地震動モデルとして用いられる2つの入力に対する弾塑性極限応答を、提案近似式により効率的に評価することが可能である。

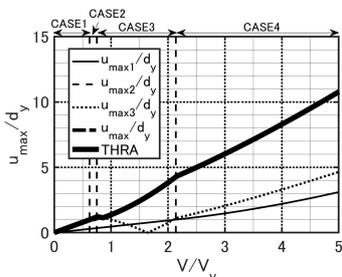


図3 極限的なTIに対する最大変位応答(減衰定数5%)

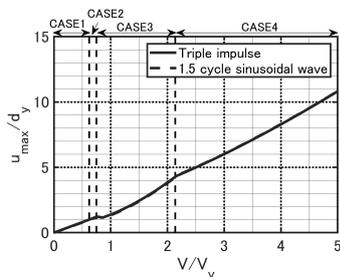


図4 極限的なTIと極限的な1.5-cycle正弦波に対する最大変位

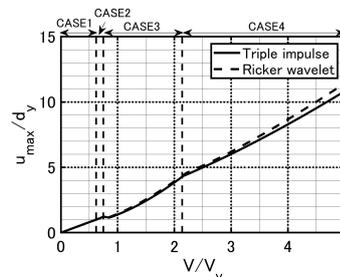


図5 極限的なTIと極限的なRicker waveletに対する最大変位

② 木造住宅を模擬したバイリニア+スリップ型1自由度系の極限的なダブルインパルスに対する弾塑性応答

木造住宅の層復元力特性としてバイリニア+スリップモデル(図6)を採用し、木造住宅をバイリニア+スリップ型1自由度系でモデル化し、極限的なパルス性地震動(極限的なダブルインパルス)に対する最大応答の閉形式解を導出した(学会発表②)。また、2階建て木造住宅の縮約方法として、一層目に変形が集中すると仮定して、1層目と2層目の質量の和を1自由度系の質量として採用し、剛性や復元力特性は1層目のものをそのまま使用する縮約方法を導入している。本縮約法と上記の閉形式解と組み合わせることで、2階建て木造住宅の極限的なパルス性地震動に対する最大応答を効率的に予測する方法を提案した。図7に、閉形式解と縮約方法により評価した極限的なダブルインパルスに対する木造住宅の1層目の最大変位応答(Equivalent SDOF(closed form))と、2自由度系に対して時刻歴応答解析により求めた極限的なダブルインパルスに対する各層の最大変位応答(2DOF(Critical DI))および極限的な正弦波1波に対する各層の最大変位応答(2DOF(Critical sine wave))の比較を示す。極限的な正弦波1波に対する最大変位応答は、最大地動速度一定条件下で最大変位応答を最も大きくする周期を有する正弦波1波であり、正弦波周期に対する繰り返し計算が必要である。図7より、本提案手法を用いて、2階建て木造住宅のパルス性地震動に対する極限応答を簡易的かつ精度よく評価可能である。

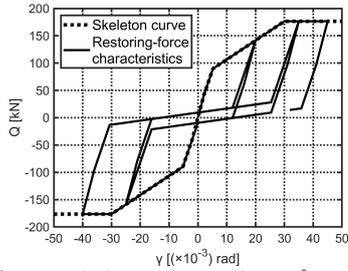


図6 バイリニア＋スリップモデル

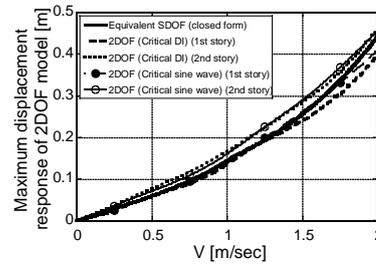
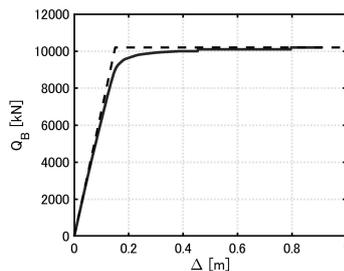
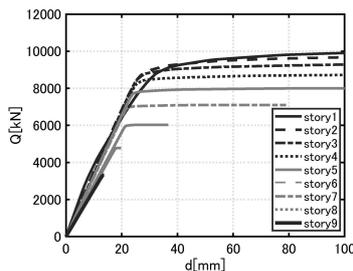


図7 2自由度系に対する時刻歴応答解析結果との比較による提案手法の精度検証

(2) 完全弾塑性1自由度系に対する極限的地震応答の閉形式解と1自由度系への縮約に基づく多層弾塑性建築構造物の極限的なパルス性地震動に対する耐震性能評価法

これまで提案されている極限応答の閉形式解や(1)①で提案した指向性パルスに対する極限応答の近似解と静的漸増載荷解析に基づいて骨組モデルを1自由度系に縮約する方法を組み合わせ、多層弾塑性建築構造物のパルス性地震動に対する極限応答を簡易的に評価する方法を提案した(学会発表①)。本手法により、雑誌論文①の極限的トリプルインパルスに対する最大変位応答の近似解を用いて、指向性パルスに対する多層弾塑性建築構造物の代表点変位を簡易的に評価することが可能である。これにより、目標とする地震動の最大速度に対して、極限的な場合においても必要とする変形性能を満たすことが出来る建物の耐震設計が可能になる。図8に、9階建ての鉄骨構造建物を想定した骨組モデルの静的漸増載荷解析から求めた層せん断力-層間変位関係およびベースシア-代表変位関係を示す。図9に、本提案手法により求めた極限的トリプルインパルスに対する代表点の最大変位とインパルスの速度振幅(地動最大速度に対応)の関係を示す。図9より、代表点の変形角を1/75まで許容する場合、インパルス速度振幅が1.07[m/sec]の指向性パルスによって、代表点の変形角が1/75に到達する可能性がある。インパルスの速度振幅1.07[m/sec]は1.5サイクル正弦波の最大地動速度に変換すると0.67[m/sec]となる。



(a)層せん断力-層間変位関係 (b)ベースシア-代表変位関係
図8 骨組モデルの静的漸増載荷解析結果

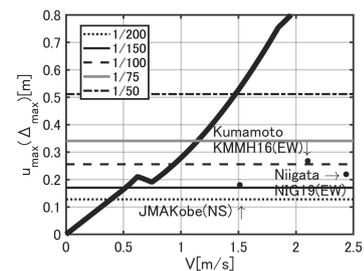


図9 極限的TIに対する代表点変位-インパルス速度振幅関係

(3) 不整形立体建築骨組を対象とする極限的パルス性地震動の最悪地震動入力方向の評価法

地震動の周期特性や波形によって、同一の不整形立体骨組に対しても最悪な地震動入力方向は変化する。従って、不整形建物の入力方向毎の極限的なパルス性地震動を明らかにし、その最悪入力方向を導出することで、最も危険な場合の地震応答の評価が可能になる。雑誌論文②では、パルス性地震動、特にフリグステップパルスをダブルインパルスで近似する方法を導入し、図10のような不整形立体骨組を対象に極限的ダブルインパルスの最悪入力方向の評価方法を展開した。本論文では、ダブルインパルスによる不整形立体骨組への地震入力エネルギーを評価の指標として導入している。任意の入力方向からの地震入力エネルギーが最大になるダブルインパルスのタイミングは、最下層の層復元力と減衰力の和の入力方向成分が0となるタイミングである。一方、任意の時間間隔を有するダブルインパルスに対する地震動入力エネルギーは地震動入力方向θに関するsin関数になることを解明し、任意の地震動に対しては最悪入力方向が陽に得られることを明らかにした。この2つのアプローチを用いて、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を算定することが可能である。また、本算定法を用いて、極限的ダブルインパルスが最悪方向から入力する場合を最悪ケースと定義し、最悪ケースにおける地震入力エネルギーを最小にする粘性ダンパーの最適配置を求めた。最大地動速度を統一した複数の実断層近傍地震動を用いた検証より、最悪ケースにおける地震入力エネルギーが最小になるようにダンパーの最適配置を行うことで、建物への地震入力エネルギーが大きくなる記録地震動に対してより効果的に地震入力エネルギーを低減することが可能である。図11には、最適化前後の極限的ダブルインパルスによる地震入力エネルギーと入力方向の関係を示す。図12には、2018年大阪北部の地震において高槻で観測した地震動(防災科学技術研究所の強震観測網K-NET OSK002⁹⁾)の東西方向成分を、粘性ダンパー最適化前後の不整形立体骨組に様々な方向から入力したときの地震入力エネルギーを示す。図12より、本最適化によって地震入力エネルギーが最も大きくなる方向からの地震入力エネルギーを低減可能である。

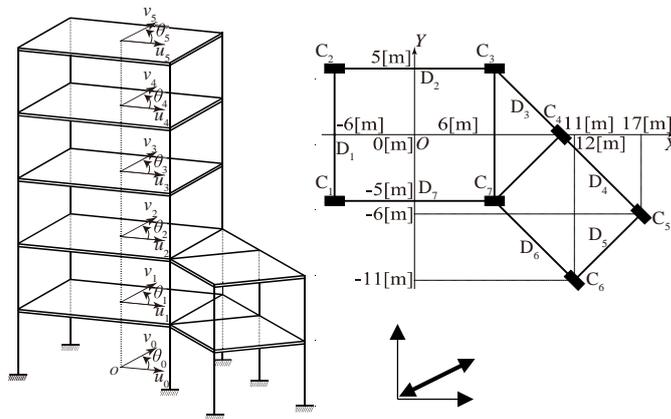


図 10 不整形立体骨組と地震動の入力方向

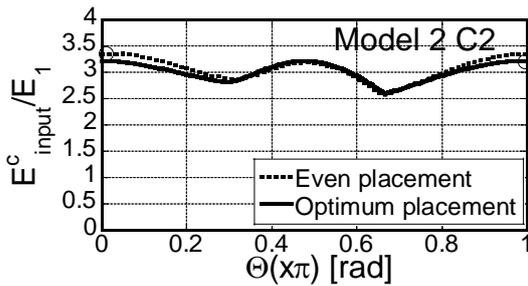


図 11 最適化前後の極限的ダブルインパルスに対する地震入力エネルギー

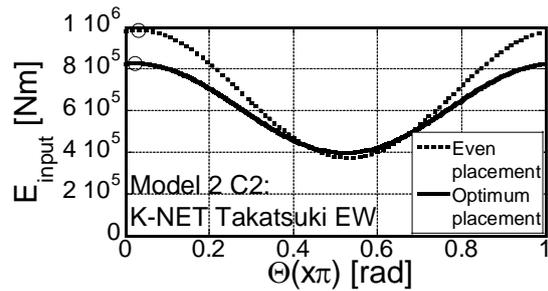


図 12 最適化前後の 2018 年大阪北部の地震高槻波東西方向に対する地震入力エネルギー

参考文献

- 1) Sasani, M. and Bertero, V.V. Importance of severe pulse-type ground motions in performance-based engineering: historical and critical review, in *Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 2000.
- 2) Kojima, K. and Takewaki, I., Critical earthquake response of elastic-plastic structures under near-fault ground motions (Part 1: Fling-step input), *Frontiers in Built Environment*, 1: 12, 2015.
- 3) Kojima, K. and Takewaki, I., Critical earthquake response of elastic-plastic structures under near-fault ground motions (Part 2: Forward-directivity input), *Frontiers in Built Environment*, 1: 13, 2015.
- 4) 小島紘太郎, 竹脇 出: バイリニア型復元力特性を有する弾塑性構造物の断層近傍地震動に対する極限応答の開形表現, 第 81 巻, 第 726 号, pp1209-1219, 2016.8.
- 5) 小島紘太郎, 五月女義人, 竹脇 出: 断層近傍地震動を受ける粘性減衰を有する完全弾塑性 1 自由度系の極限応答, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 735 号, pp643-652, 2017.5.
- 6) Taniguchi, R., Kojima, K. and Takewaki, I., Critical response of 2DOF elastic-Plastic building structures under double impulse as substitute of near-fault ground motion, *Frontiers in Built Environment*, 2: 2, 2016.
- 7) Kojima, K. and Takewaki, I., Critical input and response of elastic-plastic structures under long-duration earthquake ground motions, *Frontiers in Built Environment*, 1: 15, 2015.
- 8) Kojima, K., Fujita, K. and Takewaki, I., Double and triple impulses for capturing critical elastic-plastic response properties and robustness of building structures under near-fault ground motions, in *'Resilient Structures and Infrastructures'* edited by Noroozinejad Farsangi, E., Takewaki, I., Yang, T.Y., Astaneh-Asl, A., Gardoni, P., Springer, pp.225-242, 2019.
- 9) 防災科学技術研究所, 強震観測網 (K-NET) (<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10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 0件）

1. 著者名 小島紘太郎, 疋田理沙	4. 巻 Vol. 66B
2. 論文標題 断層近傍で観測される指向性パルスモデル化したトリプルインパルスに対する粘性減衰を有する完全弾塑性1自由度系の極限応答	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 451-461
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 小島紘太郎, 坂本晴香, 小坂郁夫	4. 巻 85
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020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 509 ~ 519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.85.509	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 疋田理沙, 小島紘太郎
2. 発表標題 極限的トリプルインパルスに対する弾塑性応答の近似解を用いた多層建物の指向性パルスに対する耐震性能評価法
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山翔太, 小島紘太郎
2. 発表標題 バイリニア+スリップ型1自由度系を用いた木造住宅の断層近傍地震動に対する極限応答
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本涼太郎, 小島紘太郎
2. 発表標題 断層近傍地震動を模擬した極限的ダブルインパルスに対する剛性偏心1層モデルの弾塑性応答
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----