

令和 2 年 5 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18922

研究課題名（和文）断層近傍地震動および長周期地震動に対する建物の陽な極限的弾塑性応答に関する研究

研究課題名（英文）Closed-form elastic-plastic response of buildings subjected to critical near-fault ground motion and critical long-period ground motion

研究代表者

竹脇 出（TAKEWAKI, Izuru）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：20155055

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、入力地震動をインパルスの時間列で表現するという独創的なアプローチにより、断層近傍地震動および長周期長時間地震動に対する建築構造物の簡易的な安全性評価に関する信頼度を格段に向上させることである。本研究では、断層近傍地震動を模擬したダブルインパルスや長周期長時間地震動を模擬したマルチインパルスを受ける1自由度の非減衰および減衰弾塑性構造物の極限的応答の閉形表現解を誘導した。さらに、多自由度系についても極限的入力の特性を明らかにし、粘性ダンパーの最適配置法を展開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建物の耐震設計にとって重要なことは、共振が生じても安全性が確保されるような建物の剛性と減衰を如何に決定するかということである。本研究では、共振が生じることを最悪な状態としてとらえ、特徴的な地震動をインパルス列を用いて表現するという独創的な考えのもとに、そのような共振状態を簡潔に表現することに成功した。その方法により、建築構造物の簡易的な安全性評価の信頼度を格段に向上させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is to enhance the reliability of the safety evaluation of elastic-plastic structures subjected to near-fault earthquake ground motions and long-duration ground motions by introducing an original approach to express these peculiar ground motions in terms of a set of pulses (double impulse and multi impulse). The critical elastic-plastic responses of SDOF models under these ground motions were derived in closed form and the optimal placement method of passive viscous dampers for MDOF models was developed by defining the critical timing of the second impulse of the double impulse.

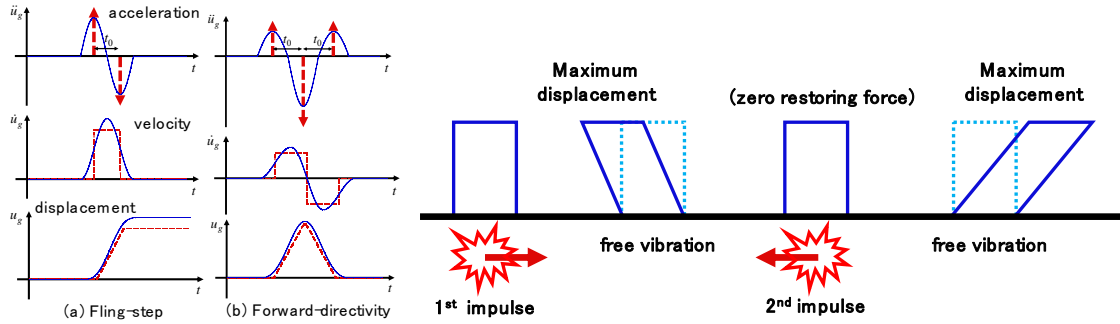
研究分野：建築構造学

キーワード：断層近傍地震動 長周期長時間地震動 極限的地震動 弾塑性応答 レジリエンス インパルス入力 制振構造 免震構造

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。

### 1. 研究開始当初の背景

これまでに、断層近傍地震動による弾塑性応答特性については、1971年の San Fernando 地震、1994年の Northridge 地震、1995年の兵庫県南部地震、1999年の台湾 Chi-Chi 地震、トルココジャエリ地震に対する成果等、多数の研究が存在する。断層近傍ではいわゆる「パルスの地震動」と呼ばれる地震動が発生することが知られており(図1(a))、断層面に平行な方向には Fling-step 波が、断層面に垂直な方向には Forward-directivity 波が発生することが知られている。Fling-step 波はサイン波1周期で、Forward-directivity 波は振幅の異なる3個のサイン半波で精度よく表現できることが世界的に知られており、実際の設計・研究でも用いられている。これまでに、パルスの地震動や長周期地震動に対する数値応答解析を通じた研究は行われているが、入力と構造物パラメータの『極限的(共振的)な組み合わせ』を陽に見出す研究は皆無である。



(a) 断層近傍地震動(断層平行・直交) (b) ダブルインパルスによる弾塑性最大変形評価  
 図1 断層近傍地震動とダブルインパルスによる弾塑性最大変形評価

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、入力地震動をインパルスの時間列で表現するという独創的なアプローチにより、断層近傍地震動および長周期長時間地震動に対する建築構造物の簡易的な安全性評価(多自由度詳細モデルに対する弾塑性時刻歴応答解析などによらないもの)に関する信頼度を格段に向上させることである。

断層近傍地震動や長周期地震動による弾塑性応答評価では、応答スペクトル法による評価精度が低く、過渡応答や定常応答を直接的に取り扱うることが必要である。本研究代表者は、断層近傍地震動や長周期地震動を2, 3個あるいは多数のインパルスの時間列で表現する新しい理論を構築している。本アプローチでは、地震動に対する応答との等価性はフーリエスペクトルの振幅の等価性により保証しており、入力地震動の振幅(速度)と振動数をインパルスの導入により完全に分離することに成功している(図1(a), (b))。これにより、入力と構造物パラメータの『極限的な組み合わせ』を陽に見出すことを可能とした。本提案手法を用いることにより、1960年頃から提案されてきた等価線形化法(構造物の等価線形化: 図2(a))に代わる、『構造モデルは弾塑性のまま』で『入力を等価なものに置き換える』という斬新な取扱いが可能となり(図2(b))、入力と構造物パラメータの『極限的な組み合わせ』を繰り返し操作無しに見出すことが可能となる。

### 3. 研究の方法

入力地震動をインパルスの時間列で表現する本研究は、以下の点で際立った独創性を有している。(1)断層近傍地震動のパラメータと構造物のパラメータ(剛性・強度)のあらゆる組み合わせを考えるのではなく『極限的な組み合わせ』のみを考慮する(図1(b))、(2)この極限的な組み合わせを『繰り返し操作無し』に見出す、(3)極限的最大弾塑性応答を『陽に導く』、(4)長周期地震動に対しても『極限的な組み合わせ』と『極限的最大弾塑性応答』を陽に導く。

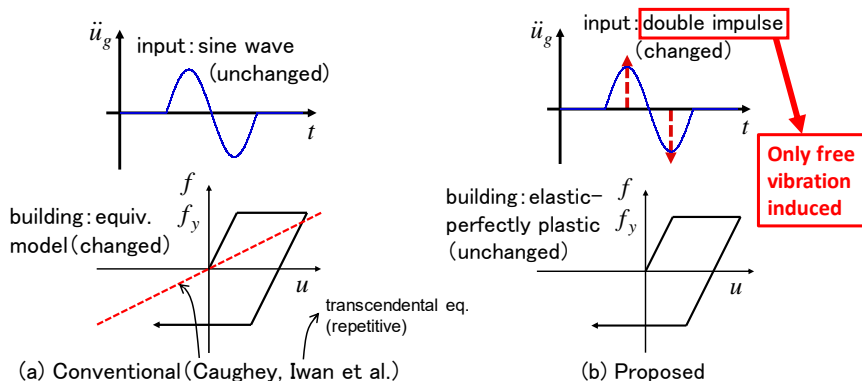


図2 弾塑性構造物を等価線形系に置換する従来の方法と入力をインパルス列に置換する提案手法の比較

#### 4. 研究成果

##### (1) 断層近傍地震動を模擬したダブルインパルスを受ける非減衰および減衰弾塑性構造物の極限的応答の閉形表現解

断層近傍地震動を2, 3個のインパルスで表現し（ダブルインパルス DI・トリプルインパルス TI）、与えられた弾塑性構造物に対する極限的インパルス間隔の陽な表現と極限応答を陽に導いた。図3に示すように、インパルス入力時と最大変位応答時のエネルギーの釣り合いにより、このような陽な表現の導出が可能となっている。ここでは、入力レベルと極限的応答の関係を無次元化した形式で陽に誘導することにより、種々の入力レベルと構造物パラメータの『極限的な組み合わせ』を直接見出すことを可能とした。理論検証のため、極限的インパルス間隔に対する数値実験を行った。また、記録地震動について、提案手法の適用可能性を検討し、十分な精度を有することを明らかにした。（雑誌論文(7)、図書(1)）

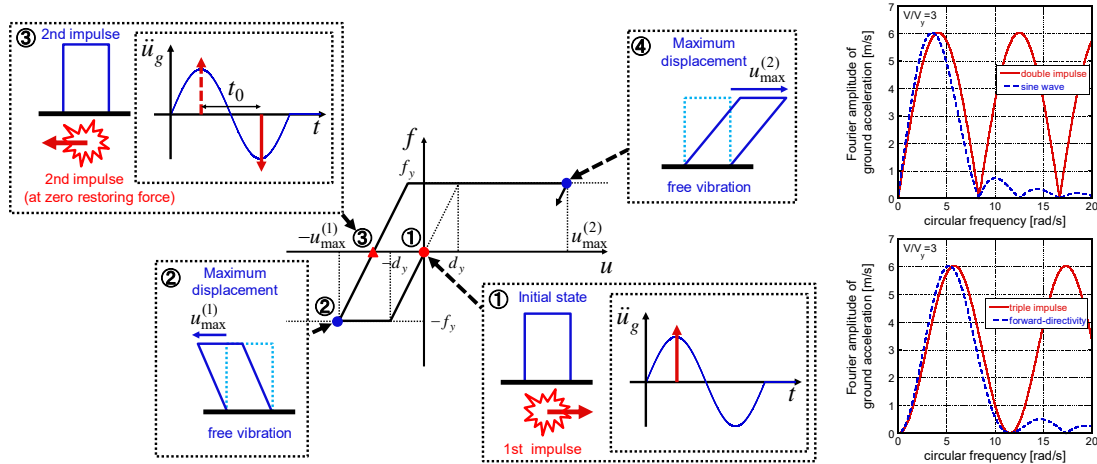


図3 極限的ダブルインパルス作用時の弾塑性応答とダブルインパルス・トリプルインパルスのフーリエ振幅（対応する1サイクル正弦波およびForward-directivity波との比較）

##### (2) 長周期長時間地震動を模擬したマルチインパルスを受ける非減衰および減衰弾塑性構造物の極限的応答の閉形表現解

長周期長時間地震動を多数個のインパルスで表現し、与えられた非減衰弾塑性構造物に対する極限的インパルス間隔の陽な表現を入力レベルごとに導いた。極限的インパルス間隔が見出された後は、インパルス作用時の運動エネルギー（復元力は0なのでひずみエネルギーは0）と最大変位時の消費・ひずみエネルギーとのエネルギー平衡則を有効利用して極限的変形を陽に導出した。入力レベルと極限的応答の関係を無次元化した形式で陽に誘導することにより、種々の入力レベルと構造物パラメータの『極限的な組み合わせ』を直接見出すことが可能となった。

次に、長周期長時間地震動を模擬したマルチインパルス(MI)を受ける線形粘性ダンパーを有するバイリニア1自由度系モデルについて、極限的最大変位応答の閉形表現を誘導した。MIの入力レベルに依存して、解の分類が必要となることを明らかにした。また、MIを受ける非線形粘性ダンパーを有する完全弾塑性1自由度系モデルについて、極限的最大変位応答の閉形表現を誘導した（図4, 5参照）。図4, 5に示すように、極限外乱を特徴づけるインパルスの作用タイミングとして、復元力0の時と最大速度点の2つが考えられる。ここでは、それぞれについて最大応答の差を検討し、ほとんど明確な差が生じないことを明らかにしている。また、閉形表現の導出により、非線形粘性ダンパーと構造物の応答領域に依存して、数種類の解の分類が必要となることを明らかにした。（雑誌論文(4), (5), (11)）

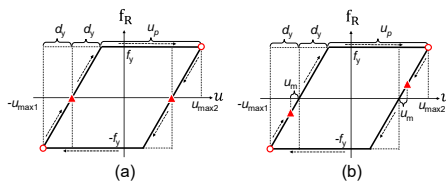


図4 復元力特性（復元力0と最大速度点）

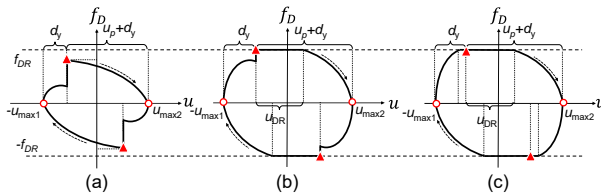
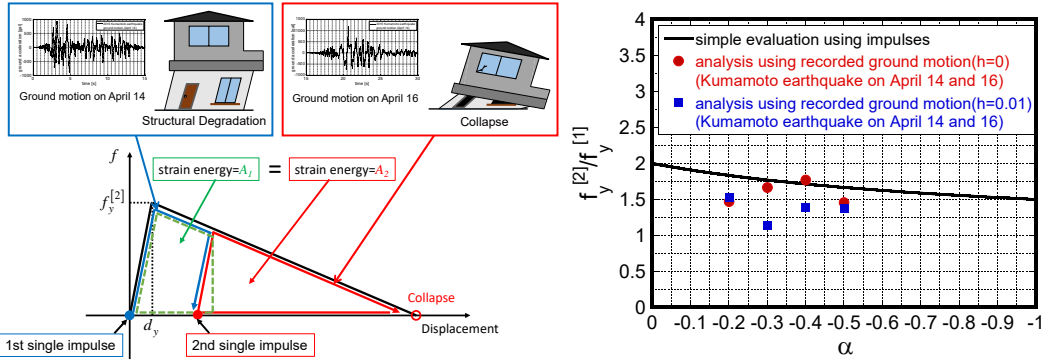


図5 減衰力-変位関係

##### (3) 震度7の揺れを複数回受ける場合の安全性確保のための強度割り増しの提案

2016年の熊本地震のように震度7の揺れを2回経験する場合の強度割増の理論を展開した。そこでは、建物倒壊を考慮するために、P-Δ効果と損傷による耐力低下のモデルを適切に組みこむ方法を採用した（図6(a)参照）。図6(b)には必要な強度割り増しの値を2次剛性比に対して示している。さらに、震度7の揺れを複数回受ける場合の理論へと発展させた。（雑誌論文(10)）

また、建物倒壊の危険性の低減に減衰が果たす役割について、倒壊限界としてのダブルインパルスDIの速度振幅を非減衰系と減衰系で比較することにより明らかにした。（雑誌論文(2)）



(a) P-Δ効果と損傷による耐力低下モデル (b) 強度割り増し (2回の震度7地震動で倒壊/1回の震度7地震動で倒壊)

図6 震度7の揺れを2回経験する場合の強度割増の理論

(4) 地盤剛性を考慮したモデルへの拡張

地盤剛性を代表する水平ばねと回転ばねで支持された1自由度完全弾塑性モデルについて、基礎固定1自由度完全弾塑性モデルに対する理論を拡張した(図7)。基礎の質量と回転慣性の影響を無視するという簡略化を行うことにより、等価な完全弾塑性復元力特性モデルを考案することが可能となった。このモデルに基礎固定1自由度完全弾塑性モデルに対する理論を適用することにより、地盤剛性の影響を考慮した上での最悪ダブルインパルスDI入力を見出す方法を展開した。入力レベルに依存して、要求塑性変形レベルが地盤ごとに異なる特性を有することを明らかにした。さらに、免震建物は断層近傍地震動や長周期長時間地震動に対して課題を有するため、その地震時の安全性を明らかにする必要がある。また、免震建物と地盤との動的相互作用も重要な課題となる。そこで、DIを受ける地盤で支持された免震建物の極限的最大応答を解析的に見出す方法を展開した(図7)。(雑誌論文(6))

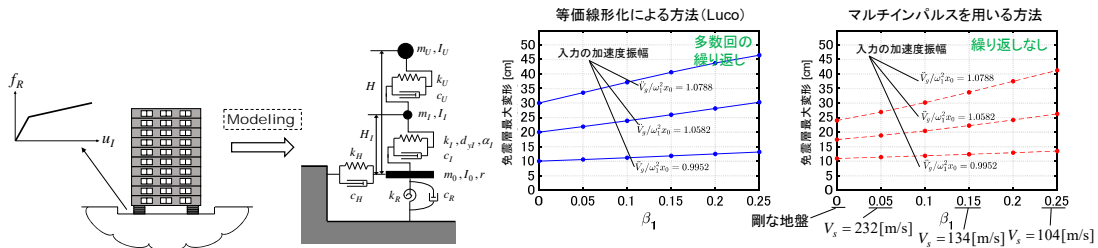


図7 地盤剛性を考慮した免震建物モデルの上部建物1自由度系への置換と既往の研究(Luco(2014))との比較

(5) 断層近傍地震動を模擬したダブルインパルスを受ける完全弾塑性型復元力特性を有する多自由度モデルに対する極限外乱法とそれに基づく粘性ダンパーの最適配置法

断層近傍地震動を模擬したDIを受ける完全弾塑性型復元力特性を有する多自由度モデルに対する極限外乱法を展開し、極限的タイミングは1層の層せん断力(復元力と減衰力の和)が0となる時であることを明らかにした。DIの振幅を漸増させて極限応答のレベルとの関係を調べるダブルインパルスプッシュオーバー(DIP)という概念を新たに定義し(図8)、それが多自由度モデルへの粘性ダンパーの最適配置問題において重要な役割を果たすことを明らかにした。弾塑性モデルでは応答が複雑な応答特性を呈するため、また高次モード成分も卓越するため、ダンパーの有効な配置法を見出すには、2つの設計問題(特定層への集中配置と全層への分散配置)を組み合わせることが有効であることを明らかにした。(雑誌論文(1), (3))

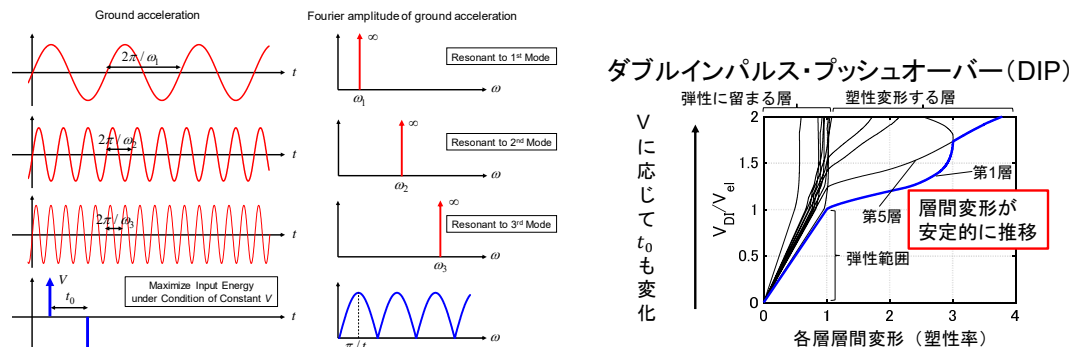


図8 建物の1-3次固有周期と共振する正弦波とダブルインパルスおよびDIPの概念



(6) 小振幅用履歴ダンパーと Gap 要素付大振幅用履歴ダンパーから構成されるデュアルダンパーシステムの開発とその多様な地震動入力に対する応答低減効果の解明

小振幅用履歴ダンパーと Gap 要素付大振幅用履歴ダンパーから構成されるデュアルダンパーシステムを開発した (図 9)。このデュアルダンパーシステムは、2016 年熊本地震等で観測された建築基準法レベルを大きく上回る「長周期パルス」に対しても極めて有効な応答低減効果を有することを明らかにした。(雑誌論文(9))

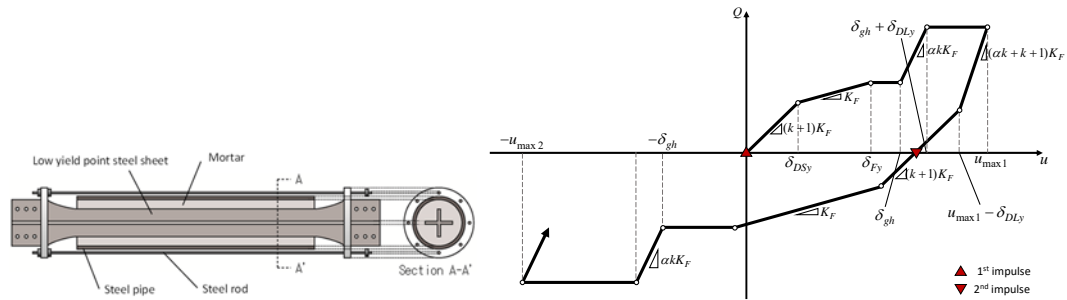


図 9 小振幅用履歴ダンパーと Gap 要素付大振幅用履歴ダンパーから構成されるデュアルダンパーシステムと極限的ダブルインパルスを受けた時の建物全体の復元力特性

(7) 免震と連結制振のハイブリッド構造を有する高層建物の断層近傍地震動および長周期長時間地震動に対する応答低減効果の有効性の解明

免震と連結制振のハイブリッド構造を有する高層建物は、断層近傍地震動および長周期長時間地震動に対して優れた応答低減効果を有することを解明した (図 10)。具体的には、ダブルインパルス DI とマルチインパルス MI を受けるときの極限応答を求める方法を 1 自由度置換に基づき開発した。図 10 は、長周期長時間地震動 (Tomakomai EW 波(2003 十勝沖地震)) に対する提案 1 自由度系の最大応答の精度を示している。(雑誌論文(8))

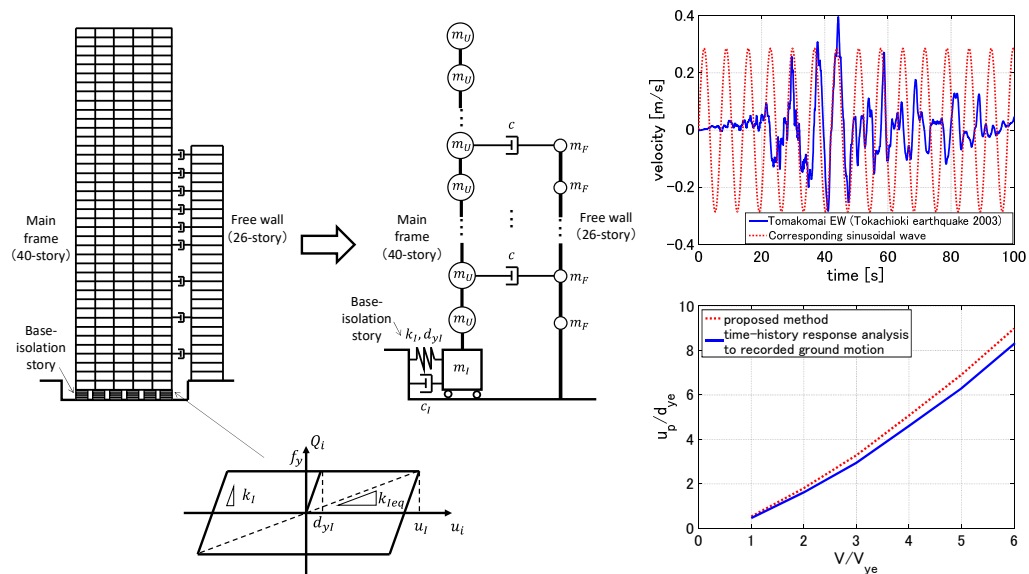


図 10 免震と連結制振のハイブリッド構造を有する高層建物のモデル化と長周期長時間地震動 (Tomakomai EW 波(2003 十勝沖地震)) に対する提案 1 自由度系の最大応答の精度

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 H. Akehashi, I. Takewaki	4. 巻 130
2. 論文標題 Comparative Investigation on Optimal Viscous Damper Placement for Elastic-Plastic MDOF Structures: Transfer Function Amplitude or Double Impulse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 105987
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105987">https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105987</a>	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 Y. Saotome <sup>1</sup> , K. Kojima, I. Takewaki	4. 巻 5: 106
2. 論文標題 Collapse-limit input level of critical double impulse for damped bilinear hysteretic SDOF system with negative post-yield stiffness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi:10.3389/fbuil.2019.00106	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 H. Akehashi, I. Takewaki	4. 巻 5: 20
2. 論文標題 Optimal viscous damper placement for elastic-plastic MDOF structures under critical double impulse	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi:10.3389/fbuil.2019.00020	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 G. Tamura, K. Kojima, I. Takewaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Critical response of elastic-plastic SDOF systems with nonlinear viscous damping under simulated earthquake ground motions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Heliyon	6. 最初と最後の頁 e01221
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi:10.1016/j.heliyon.2019.e01221	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 H. Akehashi, K. Kojima, Ehsan Noroozinejad Farsangi, I. Takewaki	4. 巻 2(4)
2. 論文標題 Critical response evaluation of damped bilinear hysteretic SDOF model under long duration ground motion simulated by multi impulse motion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Int J. of Earthquake and Impact Eng.	6. 最初と最後の頁 298-321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1504/IJEIE.2018.099361	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 H. Akehashi, K. Kojima, K. Fujita, I. Takewaki	4. 巻 4: 34
2. 論文標題 Critical response of nonlinear base-isolated building considering soil-structure interaction under double impulse as substitute for near-fault ground motion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.3389/fbuil.2018.00034	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 H. Akehashi, K. Kojima, I. Takewaki	4. 巻 4: 5
2. 論文標題 Critical response of SDOF damped bilinear hysteretic system under double impulse as substitute for near-fault ground motion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.3389/fbuil.2018.00005	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 K. Hayashi, K. Fujita, M. Tsuji and I. Takewaki	4. 巻 4(2)
2. 論文標題 A simple response evaluation method for base-isolation building-connection hybrid structural system under long-period and long-duration ground motion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.3389/fbuil.2018.00002	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 T. Shiomi, K. Fujita, M. Tsuji, I. Takewaki	4. 巻 2(3)
2. 論文標題 Dual hysteretic damper system effective for broader class of earthquake ground motions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Int. J. Earthquake and Impact Engineering	6. 最初と最後の頁 175-202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1504/IJEIE.2018.093391	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 Y. Ogawa, K. Kojima, I. Takewaki	4. 巻 2(2)
2. 論文標題 General evaluation method of seismic resistance of residential house under multiple consecutive severe ground motions with high intensity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Int. J. Earthquake and Impact Engineering	6. 最初と最後の頁 158-174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1504/IJEIE.2017.089055	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 K. Kojima, I. Takewaki	4. 巻 3: 41
2. 論文標題 Critical steady-state response of SDOF bilinear hysteretic system under multi impulse as substitute of long-duration ground motions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.3389/fbuil.2017.00041	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0件

〔図書〕 計1件

1. 著者名 K. Kojima, K. Fujita, I. Takewaki	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 494 (partially wrote pp.225-242)
3. 書名 Resilient Structures and Infrastructures	

〔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	藤田 皓平  (FUJITA Kohei)  (40648713)	京都大学・工学研究科・准教授       (14301)	