

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04079

研究課題名(和文) 制振と免震のハイブリッド化による建築構造物の総合的なレジリエンス向上に関する研究

研究課題名(英文) Resilience upgrade of building structures using effective combination of structural control and base isolation

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) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：2011.3.11以降問題となっている「想定外の地震動」という概念を払拭するには、地震動を構成するパラメータの自由な変動を許容する最悪地震動(極限外乱)の導入が必要不可欠である。本研究では、最悪地震動の概念と構造物のレジリエンスの概念を巧みに組み合わせた信頼性の高い耐震設計法・構造設計法の枠組を創出し、「想定外の地震動」に対しても急激な耐震性能の劣化を伴わない建築構造物の設計を可能とする体系を構築した。同時に構造物パラメータの不確実性をも考慮した上で、地震動入力と構造物特性の両者の不確実性を考慮した最悪ケースの想定に基づく新しい構造設計の枠組を構築した。

研究成果の概要(英文)：After the 2011 Tohoku earthquake, the concept of unexpected ground motion caused a big issue. To respond to this difficult problem, the critical excitation methods have been developed. The concept of critical excitation and the concept of resilience of building structures have been mixed effectively and more reliable structural design methods have been developed. This new treatment enabled the design of building structures which do not deteriorate rapidly under unexpected earthquake ground motions. Furthermore the uncertainties of both input ground motions and structural parameters of buildings have been taken into account in the new structural design method.

研究分野：工学

キーワード：耐震設計 制振設計 極限外乱法 レジリエンス 不確実性

1. 研究開始当初の背景

- (1) 東京、名古屋、大阪などの大都市圏で観測された 2011.3.11 の長周期地震動は、それらの地域で予想される最大級の地震動とは到底言えない。また、その地震動に関連するパラメータの不確定性については確かな理論が提示されているとは言い難く、最悪地震動の概念の導入による地動入力のパラメータ上限値の設定などの確かな理論が求められている。
- (2) 想定外の地震動が入力された場合でも尚構造安全性を保持するような建物を設計するには、レジリエンスの概念を取り入れた新しい考え方に基づく構造設計法の展開が必要不可欠である。
- (3) これまでは、応答スペクトルや地震動基準化量（地動最大速度等）のレベル調整による名目上の安全率や余裕度の設定のみが可能であったが、これらは真の意味での安全率や余裕度を与えているとは言い難い。地震動の発生メカニズム・伝播メカニズム・増幅メカニズムを考慮した高精度の安全レベル指標に対応する「設計用地震動の設定」が要請されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、最悪地震動の概念と構造物のレジリエンスの概念を巧みに組み合わせた信頼性の高い耐震設計法・構造設計法の枠組を創出し、「想定外の地震動」に対しても急激な耐震性能の劣化を伴わない建築構造物の設計を可能とする体系を構築することにある。同時に構造物パラメータの不確定性をも考慮した上で、地震動入力と構造物特性の両者の不確定性を考慮した最悪ケースの想定に基づく新しい構造設計の枠組を構築する。さらに、これまであまり詳細に検討されなかったことがない「建築物のレジリエンス」という概念に焦点を当て、「想定外の地震動」に対しても可能な限り早期に復旧可能な構造物の設計体系についても新たな指針を考える。

3. 研究の方法

- (1) レジリエンスの概念を用いた建物の合理的な構造設計法

レジリエンスの定量的指標は Bruneau により提案されている（図 1）。Bruneau は、図 1 の欠けた三角形（レジリエンス・トライアングルと呼ばれる）の面積を最小化することがレジリエンス向上と対応することを明らかにした。この三角形の面積を小さくするには、外乱発生時の構造物の性能低下を小さくすることと、元の状態への回復時間を短くすることの両方が有効となる。前者は、構造物設計時に創意工夫を巡らせることにより対応可能である。例えば、制振、免震技術の導入などによる構造物の性能の向上が有効である。一方後者については、修復技術の準備とそれを実現する人的・物的な供給力の保持が必要となる。

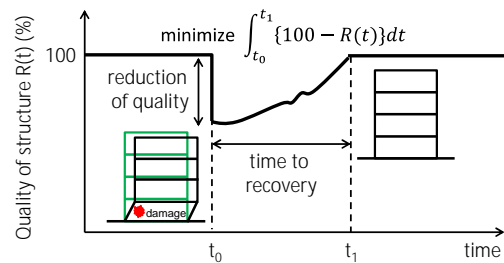


図 1 Bruneau によるレジリエンスの概念

- (2) 構造ヘルスマonitoringにおけるシステム同定・損傷同定技術の開発

図 1 の災害発生後に構造物修復が必要かどうかを知るには、構造ヘルスマonitoring 技術を利用するのが効果的である。

本研究では、独自の「同定関数」を曲げ・せん断型モデルに拡張し、同定関数とせん断剛性および曲げ剛性との関係を理論的に明らかにする。図 2 は、実際の建物モデルであり、常時微動や強制加振実験によるデータを用いて提案同定法の精度検証を行う。

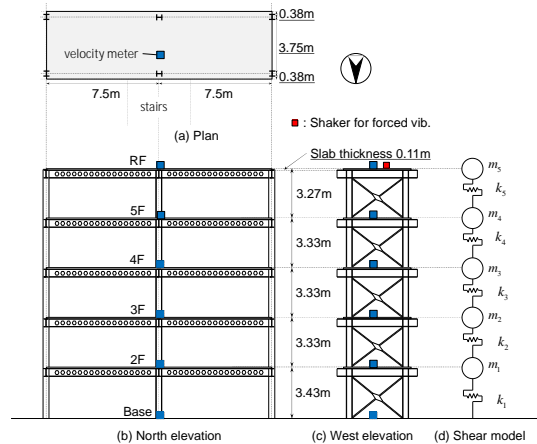


図 2 実建物による同定関数を用いた提案システム同定理論の検証

- (3) 断層近傍地震動および長周期・長時間地震動を模擬したダブルインパルス、トリプルインパルス、マルチインパルスを用いた弾塑性構造物の極限応答の閉形表現の誘導

断層近傍地震動の主要部分をダブルインパルスで（図 3）、長周期・長時間地震動の主要部分をマルチインパルスでモデル化した上で、エネルギー平衡則に基づき、1 質点系モデルの弾塑性極限応答を閉形表現で誘導する。また、高層免震建物についても 1 質点系への置換を通じて同様の方法を適用する。

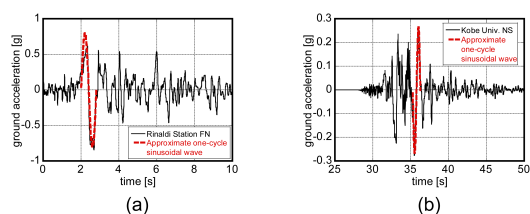


図 3 断層近傍地震動の主要部分

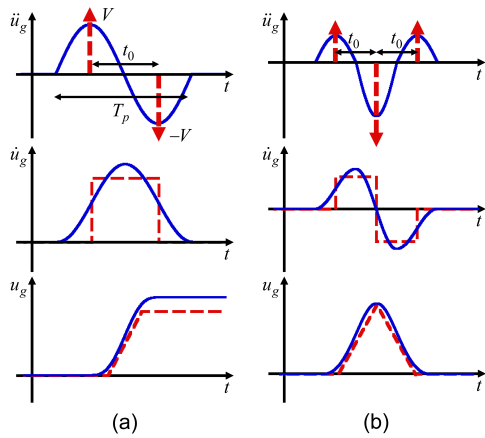


図4 断層近傍地震動の主要部分（1サイクルおよび1.5サイクル正弦波）のダブルインパルスおよびトリプルインパルス置換

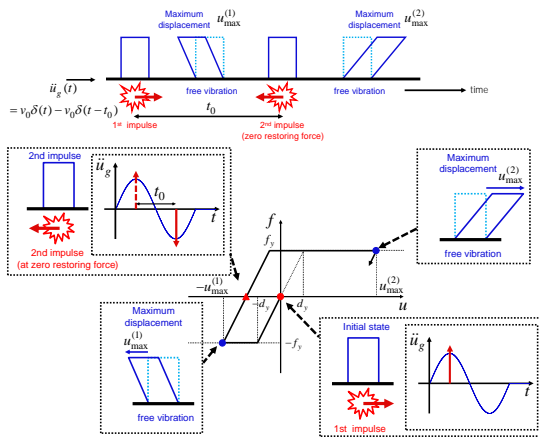


図5 エネルギー平衡則を用いたダブルインパルスに対する極限応答（閉形表現）

図4には、断層近傍地震動の主要部分（1サイクルおよび1.5サイクル正弦波）のダブルインパルスおよびトリプルインパルスへの置換を示す。インパルスの大きさは、両者のフーリエ振幅の最大値の等価性により決定する。

図5には、エネルギー平衡則を用いたダブルインパルスに対する極限応答の誘導の過程を図示している。インパルスに置換することで構造物の応答は自由振動のみになり、運動エネルギーがひずみ（および消費）エネルギーに置換されることを用いて弾塑性最大応答を予測することが可能となる。また、第2インパルスの入力タイミングが極限応答にとって重要となり、これは復元力が0となるタイミングであることが確認されている。

(4)高レジリエンスを有する免震・連結制振ハイブリッド構造システムの提案と地震動の発生メカニズム・伝播メカニズム・増幅メカニズムを考慮した上でのロバスト性評価法の提案

免震機構は長周期長時間地震動に対して、制振機構は断層近傍地震動に代表されるパルス性の地震動に対して十分に効果を発揮しない可能性が指摘されている。そこで、幅

広い地震動に対して高い振動低減効果をもつ構造システムとして、免震・連結制振ハイブリッド構造システムが提案されている。

本研究では、このハイブリッド構造システムについて、図7のようなモデルでBooreの理論（1983）を採用し、断層破壊・波動伝播を考慮した位相差分理論に基づく地震基盤面での地震動を設定する。その地震動を1次元重複反射理論に基づき地表面まで立ち上げ、それをハイブリッド構造システムに入力する。このような総合的なモデルについて、深い地盤構造までの不確定性を考慮したロバスト性評価を行う。最悪な地盤特性（あるいは上部構造特性）の組み合わせは、独自のURP法（2013）を用いる。

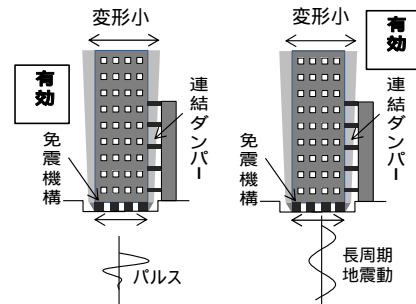


図6 免震・連結制振ハイブリッド構造システム

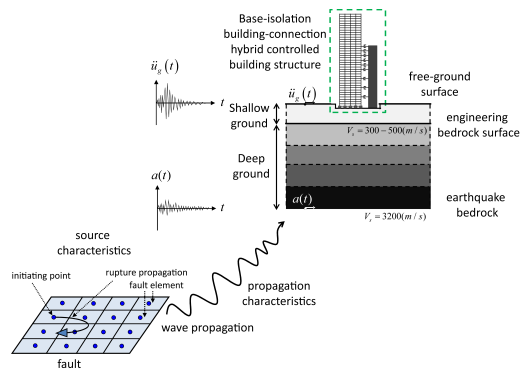


図7 断層破壊・波動伝播を考慮した位相差分理論に基づく地震基盤面での地震動設定

#### 4. 研究成果

(1)同定関数を用いて高層建物の層の剛性や減衰を少ない観測記録（図8）から同定する方法を提案した。高層建物では全体曲げ変形が卓越するため、図8のような曲げ-せん断型モデルが必要となる。本研究では、曲げ-せん断型モデルについて独自の同定関数を拡張した理論を展開した。

実際の建物に設置した常時微動などの観測記録を用いて、提案手法の妥当性を明らかにした。

さらに、図9のような損傷同定のシナリオを考え、新たに展開した曲げ-せん断型モデルに対する同定関数を用いた理論を適用した。図10には図9のPattern 3に対する損傷同定のシミュレーションを示す。10, 11層で大きな変化が見られ、理論が検証されているといえる。

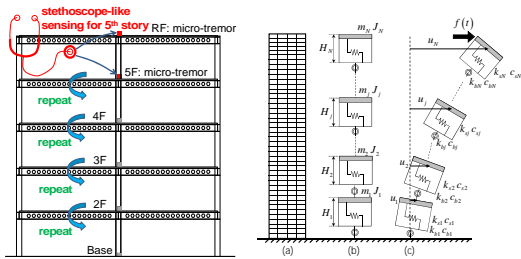


図 8 少数センサーを有効利用するシステム同定理論と曲げ-せん断型モデル

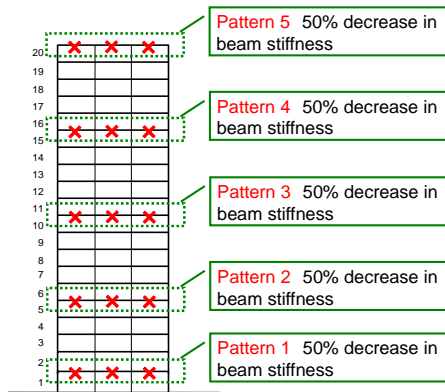


図 9 損傷同定のシナリオ

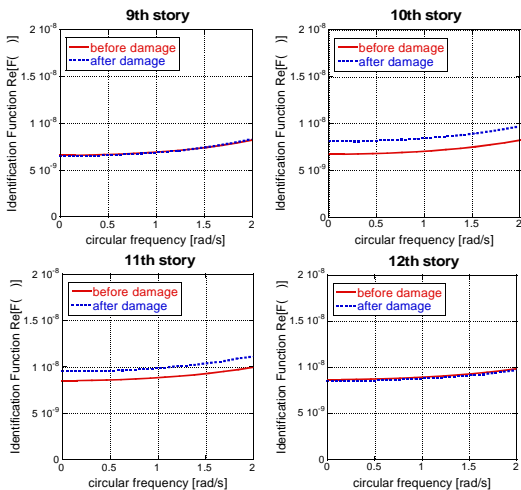


図 10 損傷同定のシミュレーション

(2)断層近傍地震動の主要部分をダブルインパルスで、長周期・長時間地震動の主要部分をマルチインパルスでモデル化した上で、エネルギー平衡則に基づき、1質点系モデルの弾塑性極限応答を繰り返し計算を伴わずに見出す方法を提案した。また、高層免震建物についても1質点系への置換を通じて同様の方法が適用できることを明らかにした。

図 11 には、記録地震動（Northridge 地震での Rinaldi 波と兵庫県南部地震での神戸大学波）を用いた提案極限外乱法の精度検証を示す。記録地震波は固定されているため、ここでは、構造物パラメータ（剛性と強度）を変化させている。

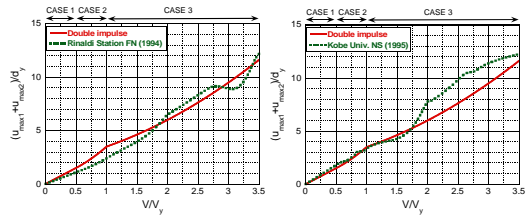


図 11 記録地震動を用いた提案極限外乱法の精度検証（Northridge 地震と兵庫県南部地震）

(3) 免震・連結制振ハイブリッド構造システムについて、Boore の理論（1983）と位相差分（山根・長橋の一連の研究）に基づき地震基盤面での地震動入力を考え、地震基盤から地表面までの地盤構造に不確実性を与えた上で、免震層変位最大値を対象としたロバスト性解析法を提案した。

一例として、図 12 のような紀伊半島沖に想定した断層モデルを考え、Boore の理論（1983）と位相差分に基づき地表面での地震動を作成した。地盤特性のばらつきを考慮したときに、免震層変形の最大値を評価関数としたときの地震基盤・自由地表面の加速度波形（ノミナル値と最悪値）と免震層変形の時刻歴を図 13 に示す。最悪ケースでは、地表面での加速度波形が長周期となり、免震層最大変形もノミナル値に比べて大きくなっていることがわかる。

また、図 14 には、免震層変形の最大値と上部建物最大頂部加速度をそれぞれ評価関数とした場合について（左右の図）、連結ダンパー量を変化させたときの、ロバストネス関数に対する免震層最大変形と上部建物最大頂部加速度を示す。連結ダンパー量は免震層最大変形の低減にとって有効ではあるが、上部建物最大頂部加速度にはあまり効果的でないことがわかる。

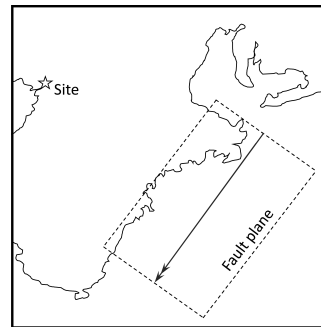


図 12 紀伊半島沖に想定した断層モデル

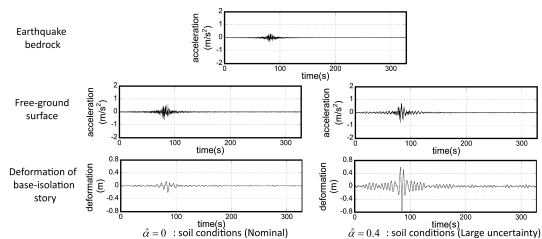


図 13 地震基盤・自由地表面・免震層上版における加速度（ノミナル値と最悪値）



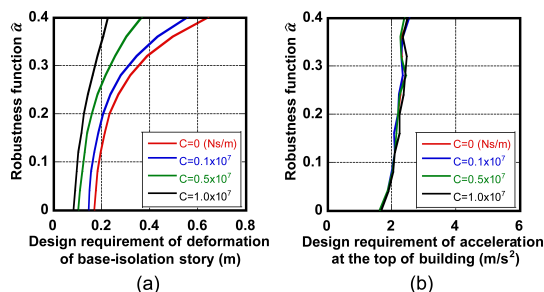


図 14 連結ダンパー量ごとの最大免震層変位と最大頂部加速度に対するロバスト性評価 (a) 最大免震層変位を評価関数、(b) 最大頂部加速度を評価関数)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 40 件)

K.Fujita, A.Ikeda, and I.Takewaki, Application of story-wise shear building identification method to actual ambient vibration, *Frontiers in Built Environment*, 1:2, 2015 (doi: 10.3389/fbuil.2015.00002). (査読有)

K.Kojima, K.Fujita and I.Takewaki, Critical double impulse input and bound of earthquake input energy to building structure, *Frontiers in Built Environment*, 1:5, 2015 (doi: 10.3389/fbuil.2015.00005). (査読有)

M.Taniguchi and I.Takewaki, Bound of earthquake input energy to building structure considering shallow and deep ground uncertainties, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol.77, pp267-273, 2015 (doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.05.011). (査読有)

K.Fujita, K.Kojima and I.Takewaki, Prediction of worst combination of variable soil properties in seismic pile response, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol.77, pp369-372, 2015 (doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.06.009). (査読有)

K.Kojima and I.Takewaki, Critical earthquake response of elastic-plastic structures under near-fault ground motions (Part 1: Fling-step input), *Frontiers in Built Environment*, 1:12, 2015 (doi: 10.3389/fbuil.2015.00012). (査読有)

城野みなみ, 藤田皓平, 竹脇 出, 曲げせん断型モデルと ARX モデルを用いた強制加振による建物のシステム同定, 日本建築学会構造系論文集, 2015 年 10 月, 第 716 号, pp1559-1567 (DOI http://doi.org/10.3130/aijs.80.1559). (査読有)

K.Kojima and I.Takewaki, Critical earthquake response of elastic-plastic structures under near-fault ground motions (Part 2: Forward-directivity input), *Frontiers in Built Environment*, 1:13, 2015 (doi: 10.3389/fbuil.2015.00013). (査読有)

K.Kojima and I.Takewaki, Critical input and response of elastic-plastic structures under long-duration earthquake ground motions, *Frontiers in Built Environment*, 1:15, 2015 (doi: 10.3389/fbuil.2015.00015). (査読有)

Y. Fukumoto and I. Takewaki, Critical demand of earthquake input energy to connected building structures, *Earthq. and Struct.*, 9(6), pp1133-1152, 2015 (DOI: http://dx.doi.org/10.12989/eas.2015.9.6.1133). (査読有)

K.Kojima and I.Takewaki, Closed-form critical earthquake response of elastic-plastic structures on compliant ground under near-fault ground motions, *Frontiers in Built Environment*, 2:1, 2016 (doi: 10.3389/fbuil.2016.00001). (査読有)

M.Kasagi, K.Fujita, M.Tsuji and I.Takewaki, Automatic generation of smart earthquake-resistant building system: Hybrid system of base-isolation and building-connection, *Journal of Heliyon*, 2016, 2(2), Article e00069 (DOI: 10.1016/j.heliyon.2016.e00069). (査読有)

K.Kojima and I.Takewaki, Closed-form dynamic stability criterion for elastic-plastic structures under near-fault ground motions, *Frontiers in Built Environment*, 2:6, 2016 (doi: 10.3389/fbuil.2016.00006). (査読有)

T.Okada, K.Fujita and I.Takewaki, Robustness evaluation of seismic pile response considering uncertainty mechanism of soil properties, *J. Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), pp1-14, 2016 (DOI: 10.1007/s41062-016-0009-8). (査読有)

K.Kojima and I.Takewaki, A simple evaluation method of seismic resistance of residential house under two consecutive severe ground motions with intensity 7, *Frontiers in Built Environment*, 2:15, 2016 (doi: 10.3389/fbuil.2016.00015). (査読有)

Y.Kanno, K.Yasuda, K.Fujita, I.Takewaki, Robustness of SDOF elastoplastic structure subjected to double-impulse input under simultaneous uncertainties of yield deformation and stiffness, *Int J Non-Linear Mechanics*, Vol.91, pp151-162, 2017 (http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2017.02.013). (査読有)

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, 2017 年 5 月, 第 735 号, pp643-652 (DOI http://doi.org/10.3130/aijs.80.1559). (査読有)

K.Fujita, K.Yasuda, Y.Kanno and I.Takewaki, Robustness evaluation of elastic-plastic base-isolated high-rise buildings under critical double impulse, *Frontiers in Built Environment*, 3:31, 2017 (doi: 10.3389/fbuil.2017.00031). (査読有)

K.Fujita, Y.Fujimori and I.Takewaki, Modal-physical hybrid system identification of high-rise building via subspace method and inverse-mode method, *Frontiers in Built Environment*, 3:51, 2017 (doi:10.3389/fbuil.2017.00051). (査読有)

K.Makita, M.Murase, K.Kondo and I.Takewaki, Robustness evaluation of base-isolation building-connection hybrid controlled building structures considering uncertainties in deep ground, *Frontiers in Built Environment*, 4:16, 2018 (doi: 10.3389/fbuil.2018.00016). (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

I. Takewaki and K. Fujita, Stethoscope-like smart sensing for system identification of building frames, *Proc. International Conference on Smart Infrastructure and Construction*

(ICSIC), June 27-29, 2016, Cambridge, pp463-468.

K.Fujita, R.Koyama and I.Takewaki, Advanced system identification for super high-rise building using shear-bending model, *EMIPMC 2016*, ASCE, May, 2016.

I.Takewaki and K.Kojima, Double, triple and multiple impulses for critical elastic-plastic earthquake response analysis to near-fault and long-duration ground motions, *Proc. of Int. Workshop on Seismic performance of soil-foundation-structure systems*, University of Auckland, 21-22 November, 2016.

I.Takewaki, Y.Fujimori and K.Fujita, Stiffness identification of high-rise buildings via subspace and inverse-mode methods, *Proc. of The 11<sup>th</sup> Int. Workshop on Struct. Health Monit.*, September 12-14, 2017, Stanford University, pp291-298.

#### [ 図書 ] ( 計 7 件 )

I.Takewaki and K.Kojima, Double, triple and multiple impulses for critical elastic-plastic earthquake response analysis to near-fault and long-duration ground motions, CRC Press, Chouw, Orense and Larkin (eds), *Seismic performance of soil-foundation-structure systems*, pp123-135, 2017 (ISBN: 978-1-138-06251-1).

I.Takewaki, R.Taniguchi and K.Kojima, Critical response of elastic-plastic structures to near-fault ground motions and its application to base-isolated building structures, Chapter 6, *Earthq. Engineering and Structural Dynamics in Memory of Ragnar Sigbjörnsson*, pp.123-141, 2017 (doi.org/10.1007/978-3-319-62099-2\_6).

#### [ その他 ]

ホームページ等

[http://www.ar.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/ground\\_enviro/index\\_html](http://www.ar.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/ground_enviro/index_html)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

竹脇 出 ( TAKEWAKI IZURU )  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：20155055

### (2)研究分担者

辻 聖晃 ( TSUJI MASAOKI )  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：00243121  
吉富 信太 ( YOSHITOMI SHINTA ) H27 のみ  
京都大学・立命館大学理工学部・教授  
研究者番号：30432383  
藤田 皓平 ( FUJITA KOHEI )  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：40648713

### (3)連携研究者

寒野善博 ( KANNO YOSHIHIRO )  
東京大学・数理情報教育研究センター・教授  
研究者番号：10378812