

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 17 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246095

研究課題名(和文) 最悪地震動理論の信頼性向上とロバスト性・冗長性に優れた建物の構造設計法

研究課題名(英文) Improvement of Reliability of Worst Earthquake Ground Motion Theory and Design Method for Robust and Redundant Building Structures

研究代表者

竹脇 出 (TAKEWAKI, IZURU)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20155055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 22,300,000円

研究成果の概要(和文)：極限地震動理論(最悪地震動理論)は、これまで主として長周期地震動以外のランダム性の強い特性のものに限定されていた。本研究では、特に長周期地震動に着目し、その入力レベル(最大速度)および継続時間に関して極限的な特性を明らかにした。入力地震動の不確定性を考慮した設計法だけで想定外の地震動に十分対応できるとは考えられず、余裕度・フェールセーフ機構などの冗長性や構造特性のばらつきをも考慮した総合的な設計法が必要とされている。本研究では、入力地震動の不確定性と冗長性・ロバスト性の概念を巧みに組み合わせた新しい考え方に基づく構造設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The critical excitation methods have been developed mainly for random earthquake ground motions except long-period ground motions which were observed during the 2011 Tohoku earthquake. The criticality of the long-period ground motions is focused in this project. Because it seems difficult to respond to unpredictable earthquake ground motions only with the consideration of ground motion uncertainty, the structural design method including both ground motion uncertainty and structural robustness (redundancy) has been proposed in this project.

研究分野：工学・建築構造学

キーワード：耐震設計 最悪地震動 制振構造 長周期地震動 冗長性 ロバスト性 極限外乱理論 レジリエンス

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，冗長性・ロバスト性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，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一層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

- (1) 本研究代表者は，これまでに極限地震動理論（最悪地震動理論）を展開しているが，主として長周期地震動以外のランダム性の強いものに限定されていた。本研究では，特に長周期地震動に着目し，その入力レベル（最大速度）および継続時間に関して極限的な特性を明らかにする。
- (2) 入力地震動の不確定性を考慮した設計法だけで想定外の地震動に十分対応できるとは考えられない。同時に，余裕度・フェールセーフ機構などの冗長性や構造特性のばらつきをも考慮した総合的な設計法が必要とされている。入力地震動の不確定性と冗長性・ロバスト性の概念を巧みに組み合わせた新しい考え方に基づく構造設計法を提案する。
- (3) 構造設計での「想定外」の範囲を狭め，想定範囲を如何に広げることができるかが問われている。それを論理的に支援するシステムを提案する。

3. 研究の方法

- (1) 著書「Critical Excitation Methods in Earthquake Engineering」(Elsevier, 2007, 2013)は，確率論に基づく独自の極限外乱理論を集大成した世界最先端の研究成果である。また，「Building Control with Passive Dampers –Optimal performance-based design for earthquakes–」(John Wiley, 2009)は，制振構造により建物の冗長性・ロバスト性を取り入れる概念を提示した世界最先端の研究成果である。これらの成果を総動員し，独自の理論を展開する。
- (2) 応答スペクトルやエネルギースペクトルなどの構造物特性に依存した地震動の基準化ではなく，速度パワーなどの地動だけ

に関連した地震動基準化量を導入する点は世界的視野で独創的。特に，地動速度だけでなく速度パワーという地動が有するエネルギーに関する量に注目している点の特筆すべき点である。関連論文は最優秀論文に選定され高い評価を得ている。

- (3) 断層破壊を想定した地震基盤上での加速度フーリエスペクトルの設定と地震基盤から地表面までの地震動増幅を考慮した総合的なモデルについて，SR モデル全体への地震入力エネルギーの上限値を評価する方法を提案する。
- (4) 2011.3.11 の地震の際に観測された超高層建物における観測記録を用いるため，長周期地震動による効果や減衰が果たす役割の解析が可能となる。そのための新しいシステム同定法を展開する。
- (5) ロバスト性・冗長性を向上させた建物の構造デザインに関する最先端の構造設計の概念を考慮。特に，免震と制振のハイブリッド構造などの新しい概念を導入する。

4. 研究成果

- (1) 長周期地震動の卓越周期，継続時間の不確定性と構造物の固有周期，減衰定数の不確定性がエネルギースペクトルに及ぼす影響を理論的・解析的に検討し，長周期地震動以外の通常地震動との相違点を明らかにした。（図 1，2）。（雑誌論文 ， 著書 ， ）

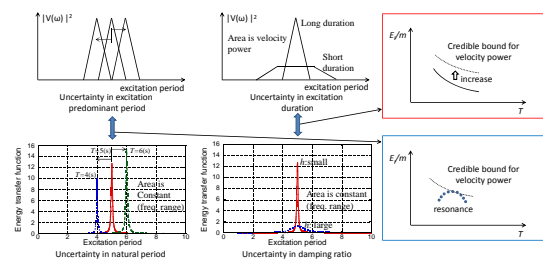


図 1 地震動継続時間の延長と構造物減衰の低下による速度パワー基準に対する入力エネルギーの credible 限界の増大

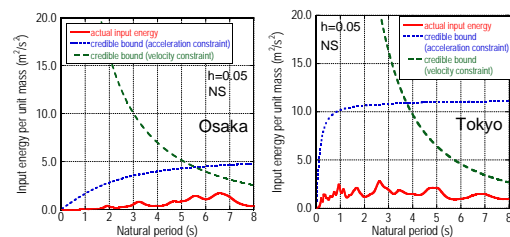


図 2 東北地方太平洋沖地震において大阪・東京で観測された地震動の極限性

- (2) 大阪府咲洲庁舎における 2011.3.11 地震時の観測データを用いて，超高層建物において発生した減衰の過大評価による影響と減衰の低減特性について明らかにした。特に，履歴ダンパー，粘弾性ダンパー，粘性ダンパーが共振時にどのような役割を果たすかについて解明した。また，新宿に存在する超高層建物についても検討を行った。（雑誌論文 ， 著書 ， ）

(3) 高層建物での地震動観測記録や常時微動観測記録に適用することを想定し、曲げせん断型モデルの剛性同定法を提案した。曲げせん断型モデルのシステム同定を行う場合にはせん断剛性と回転剛性の比率を指定する必要があるという既往の手法の問題点を克服し、水平方向の観測記録のみを用いて伝達関数や不釣り合い力の観点から曲げせん断型モデルの剛性が同定可能となる手法を提案した。新規購入した起振機と新たに製作した模型を用いて、曲げせん断型モデルに対する上記システム同定理論の精度と信頼性を明らかにした。(図3)(雑誌論文, , , 21-23)

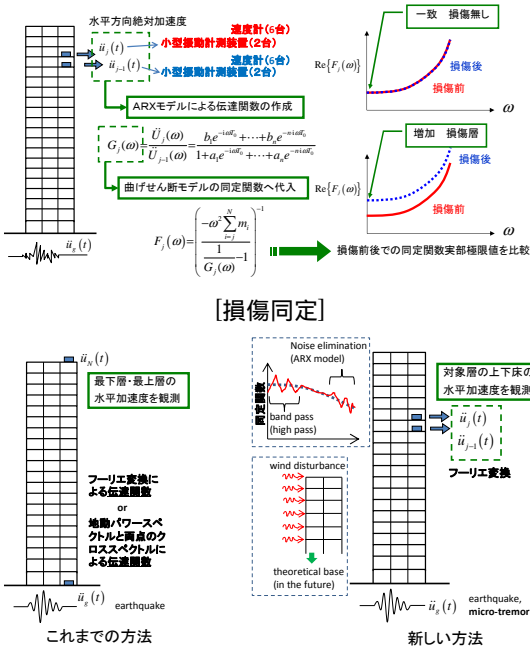


図3 曲げせん断型モデルに対して提案された損傷同定とシステム同定

(4) 建物での強制加振実験結果を用いた曲げせん断型モデルの剛性同定法を提案した。曲げせん断型モデルのシステム同定を行う場合にはせん断剛性と回転剛性の比率を指定する必要があるという既往の手法の問題点を克服し、水平方向の加速度記録のみを用いて同定を行う手法を提案した。強制加振実験による同定では、ノイズとして常時微動データを採用することにより高精度同定が可能となることを明らかにした。起振機と新たに製作した模型を用いて、曲げせん断型モデルに対する上記システム同定理論の精度と信頼性を明らかにした。(図4)(雑誌論文, 21)

(5) 免震と連結制振を組み合わせたシステムについて、長周期地震動とパルス性地震動に対する応答特性を検討した。本ハイブリッドシステムは、パルス性の地震動と長周期地震動の両方の応答低減に対して有効であり、単一システムに比べ地震動特性の変化に対して高ロバスト性を有することを明らかにした。(図5)(雑誌論文,)

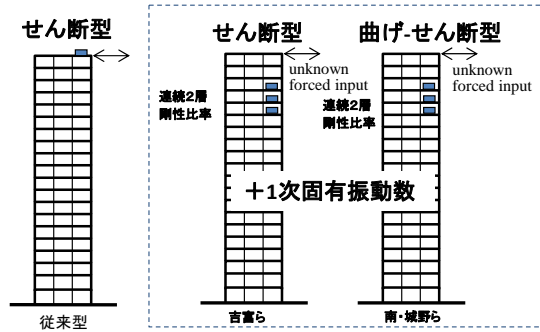


図4 強制加振実験を用いた提案システム同定

制振と免震のハイブリッドシステムの代表例

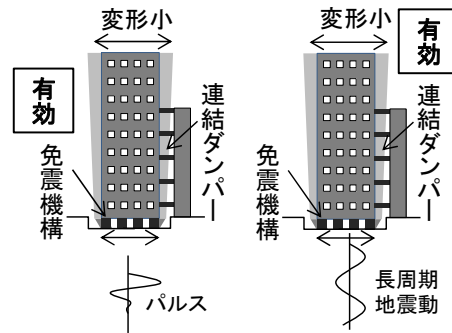


図5 制振と免震のハイブリッドシステム

(6) 地盤剛性を考慮した連結制振建物への地震エネルギーの入力メカニズムを、独自のエネルギー伝達関数を用いた定式化により明らかにした。特に、エネルギー伝達関数の特性を有効に利用して、地盤剛性が低下すると連結制振効果が低下することを明らかにした。(図6)(雑誌論文 24)

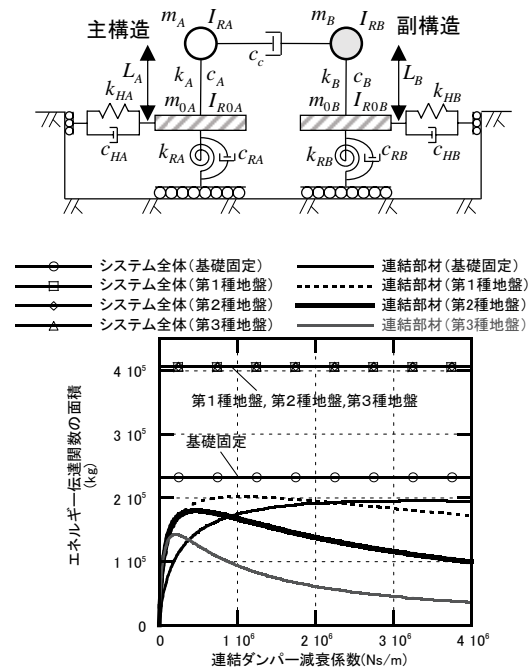


図6 地盤剛性を考慮した連結制振モデルと連結ダンパーのエネルギー伝達関数の面積に基づく最適ダンパー量の検討

(7) 連結制振の構造原理を明らかにした。2棟建物間の剛性比、質量比により固有振動特性に関する領域分類を行い、それぞれの領域における減衰特性を明らかにした。この系では、並進モードと離合モードが存在することを明らかにした。(図7)(雑誌論文)

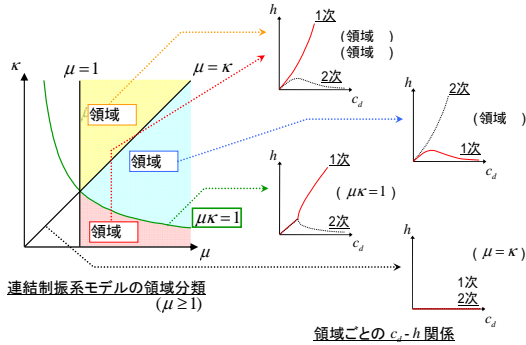


図7 質量比と剛性比をパラメータとする平面における領域分類(連結ダンパー量を増加させた場合の1次固有振動数と減衰定数の特性分類)

(8) 断層破壊を想定した地震基盤上での加速度フーリエスペクトルの設定と地震基盤から地表面までの地震動増幅を考慮した総合的なモデルについて、SRモデル全体への地震入力エネルギーの上限値を評価する方法を提案した。SRモデルのエネルギー伝達関数は比較的高振動数域まで有意な値をとるため、入力エネルギーを評価するには高振動数域までの積分を行う必要がある。それに対して、比較的低い振動数範囲での積分のみ必要となる提案上限値評価法は有効な方法である。地盤による伝達関数とSRモデル全体のエネルギー伝達関数の関係から、自由地表面に対するSRモデル全体のエネルギー伝達関数の振動数領域での積分値が一定となるという特性と、地盤による伝達関数の包絡関数を考慮することによりこの上限値が誘導できる。(図8, 9)(雑誌論文25)

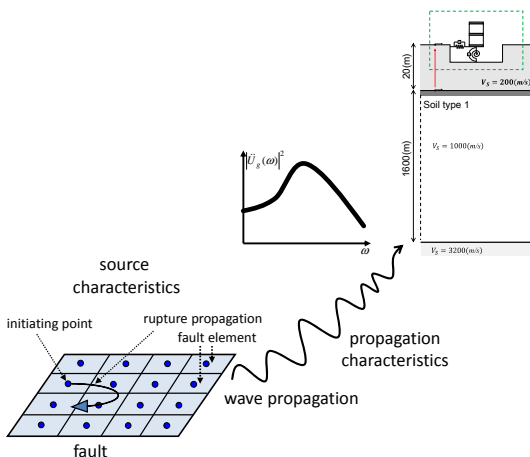


図8 断層破壊を想定した地震基盤上での加速度フーリエスペクトルの設定と地震基盤から地表面までの地震動増幅を考慮した総合的なモデル

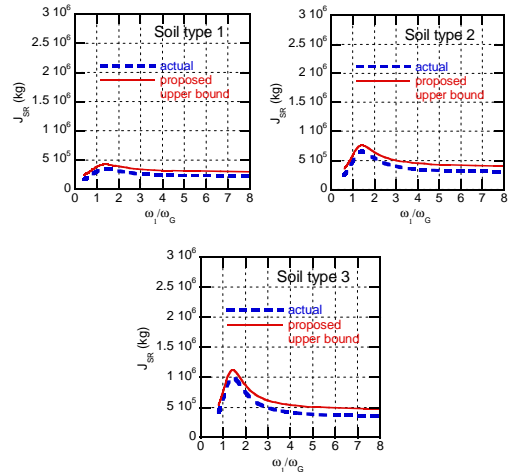


図9 SRモデルへの係数倍入力エネルギー: 正解と上限値

(9) 構造物杭地盤連成系モデルの工学的基盤面地震動に対する杭の応答(杭頭曲げモーメント)の最大値を応答スペクトル法により評価し、地盤特性(剛性と減衰)の変動に対する杭の応答の上限値とそのときの最悪な地盤特性の組み合わせを区間解析法(独自のURP法)により見出す方法を提案した。遺伝的アルゴリズムを用いた杭頭最大曲げモーメントの上限値を推定との比較を行い、提案手法による不確定性解析法の精度、信頼性及び妥当性を明らかにした。本研究代表者らによるURP法を地盤杭系という極めて複雑なモデルに適用することにより、構造設計者の経験だけでは推測することが難しい最悪な状況を見出す有効な手法となることを実際の例を通じて明らかにした。(図10-12)

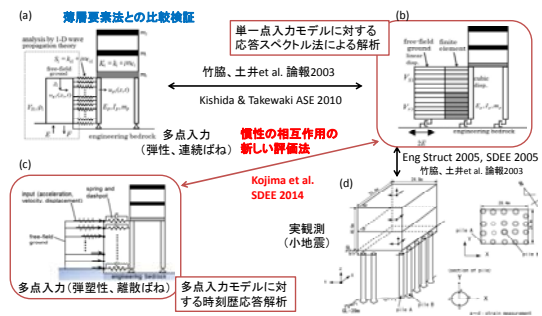


図10 構造物-杭-地盤連成系モデル

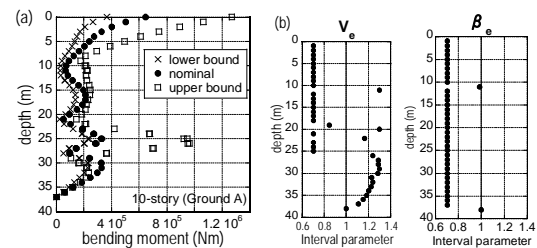


図11 ケース1 (URP法, A地盤, 上部10層) (a) 杭の最大曲げモーメント深さ方向分布, (b) 杭頭最大曲げモーメントの上限値を与える地盤物性のパラメータの組合せ(等価せん断波速度 V_e と等価減衰定数 β_e の対ノミナルモデル比)

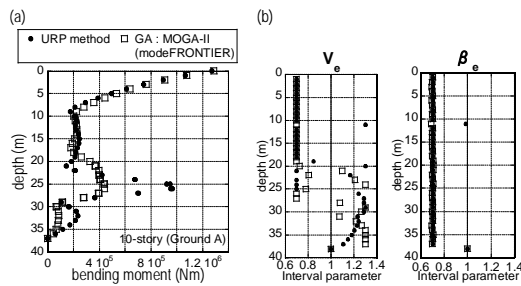


図 12 GA による精度検証 (ケース 1, A 地盤, 上部 10 層) (a) 杭の最大曲げモーメント深さ方向分布, (b) 杭頭最大曲げモーメントの上限値を与える地盤物性のパラメータの組合せ

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 25 件)

K.Fujita and I.Takewaki, Robust passive damper design for building structures under uncertain structural parameter environments, *Earthq. and Struct.*, Vol.3, No.6, pp805-820, 2012. (査読有)

K.Fujita and I.Takewaki, Robustness evaluation on earthquake response of base-isolated buildings with uncertain structural properties under long-period ground motions, *Architectonica Journal*, Vol.1, No.1, pp46-59, 2012. (査読有)

辻 聖晃, 田中英稔, 吉富信太, 竹脇 出, 多層建物におけるオイルダンパーの最適リリーフ荷重決定法, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 678 号, 2012 年 8 月, pp1237-1246. (査読有)

M.Kuwabara, S.Yoshitomi and I.Takewaki, A new approach to system identification and damage detection of high-rise buildings, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.20, No.5, pp703-727, 2013. (査読有) DOI: 10.1002/stc.1486

F. Adachi, S. Yoshitomi, M. Tsuji and I. Takewaki, Nonlinear optimal oil damper design in seismically controlled multi-story building frame, *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, 44(1), pp1-13, 2013. (査読有) <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.08.010>

I.Takewaki, K.Fujita and S.Yoshitomi, Uncertainties in long-period ground motion and its impact on building structural design: Case study of the 2011 Tohoku (Japan) earthquake, *Eng. Struct.*, 49, 119-134, 2013. (査読有) <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.038>

Y.Minami, S.Yoshitomi and I.Takewaki, System identification of super high-rise buildings using limited vibration data during the 2011 Tohoku (Japan) earthquake, *Struct. Control and Health Monitoring*, Vol.20, Issue 11, pp1317-1338, 2013. (査読有) DOI: 10.1002/stc.1537

熨斗 克哉, 吉富 信太, 辻 聖晃, 竹脇 出, 制振高層建物におけるオイルダンパーの地震動に対する最適リリーフ荷重・減衰係数決定法, 構造工学論文集, Vol.59B, pp299-307, 2013. (査読有)

M.Murase, M.Tsuji and I.Takewaki, Smart

passive control of buildings with higher redundancy and robustness using base-isolation and inter-connection, *Earthq. and Struct.*, 4(6), 649-670, 2013 (査読有) <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2013.4.6.649>

Z.Q.Lang, P.F.Guo and I.Takewaki, Output frequency response function based design of additional nonlinear viscous dampers for vibration control of multi-degree-of-freedom systems, *J. of Sound and Vibration*, 332(19), pp4461-4481, 2013. (査読有) <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2013.04.001>

F.Adachi, K.Fujita, M.Tsuji and I.Takewaki, Importance of interstory velocity on optimal along-height allocation of viscous oil dampers in super high-rise buildings, *Eng. Struct.*, 56, 489-500, 2013. (査読有) <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.036> 南 良忠, 城野みなみ, 藤田皓平, 竹脇 出, 建物内部に未知の振動源を有する高層建物の曲げせん断型モデルと ARX モデルを用いた剛性同定法, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 690 号, 2013 年 8 月, pp1405-1412. (査読有)

Y.Murakami, K.Noshi, K.Fujita, M.Tsuji and I.Takewaki, Simultaneous optimal damper placement using oil, hysteretic and inertial mass dampers, *Earthq. and Struct.*, 5(3), pp261-276, 2013. (査読有) <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2013.5.3.261>

I.Takewaki, M.Kanamori, S.Yoshitomi and M.Tsuji, New experimental system for base-isolated structures with various dampers and limit aspect ratio, *Earthq. and Struct.*, Vol.5, No.4, pp461-475, 2013. (査読有) <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2013.5.4.461>

満田衛資, 大淵充紀, 辻 聖晃, 竹脇 出, 連結制振構法を用いた建物の固有振動および減衰に関する基本特性, 日本建築学会構造系論文集, 2014 年 2 月, 第 79 巻, 第 696 号, pp227-236. (査読有)

村瀬 充, 藤田皓平, 辻 聖晃, 竹脇 出, 幅広いタイプの地震動にも頑強な免震と連結制振のハイブリッド構造, 構造工学論文集, 60B, pp413-422, 2014. (査読有)

坂口和大, 満田衛資, 辻 聖晃, 竹脇 出, 連結制振建物のダンパー量振動展開による地震時応答特性, 構造工学論文集, Vol.60B, pp423-431, 2014. (査読有)

K.Kojima, K.Fujita and I.Takewaki, Simplified analysis of the effect of soil liquefaction on the earthquake pile response, *J. of Civil Engineering and Architecture*, Vol.8, Issue 3, pp289-301, 2014. (査読有)

K.Kojima, K.Fujita and I.Takewaki, Unified analysis of kinematic and inertial earthquake pile responses via single-input response spectrum method. *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, Vol.63, 36-55, 2014 (DOI 10.1016/j.soildyn.2014.03.014) (査読有)

K.Fujita, M.Kasagi, ZQ.Lang, PF. Guo and I.Takewaki, Optimal placement and design of nonlinear dampers for building structures in the frequency domain, *Earthq. and Struct.*, 7(6), pp1025-1044, 2014. (査読有) <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2014.7.6.1025>

- 21 K.Fujita, A.Ikeda, M.Shirono and I.Takewaki, System identification of high-rise buildings using shear-bending model and ARX model: Experimental investigation, *Earthq. and Struct.*, 8(4), 843-857. (査読有) <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2015.8.4.843>
- 22 A.Ikeda, Y.Minami, K.Fujita and I.Takewaki, Smart system identification of super high-rise buildings using limited vibration data during the 2011 Tohoku earthquake, *Int. J. of High-Rise Buildings*, 3(4), pp255-271, Dec. 2014. (査読有)
- 23 A.Ikeda, K.Fujita and I.Takewaki, Story-wise system identification of shear building using ambient vibration data and ARX model, *Earthq. and Struct.*, Vol.7, No.6, pp1093-1118, 2014. (査読有) <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2014.7.6.1093>
- 24 坂口和大, 竹脇 出, 地盤剛性を考慮した連結制振建物モデルへの地震エネルギーの入力メカニズム, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 707 号, pp69-79, 2015.1. (査読有)
- 25 K.Kojima, K.Sakaguchi and I.Takewaki, Mechanism and bounding of earthquake energy input to building structure on surface ground subjected to engineering bedrock motion, *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, Vol.70, pp93-103, 2015. (査読有) DOI: 10.1016/j.soildyn.2014.12.010

〔学会発表〕(計 6 件)

I.Takewaki and K. Fujita, 2011 Tohoku (Japan) earthquake and its impact on design of super high-rise buildings, *Proc. of ICTAM 2012 Congress*, 19-24 August 2012, Beijing, China.

I.Takewaki, Smart system identification of super high-rise buildings using limited vibration data during the 2011 Tohoku earthquake, *Keynote lecture at ICEAS13 in ASEM13*, Jeju, Korea, pp118-145, 2013.

Y.Murakami, K.Noshi, K.Fujita, M.Tsuji and I.Takewaki, Optimal placement of hysteretic dampers via adaptive smoothing algorithm, *ICEAS13 in ASEM13*, September 8-12, Jeju, Korea, pp1821-1835, 2013.

K.Fujita, A.Ikeda, M.Shirono and I.Takewaki, System identification of high-rise buildings using shear- bending model and ARX model: Experimental investigation, *ICEAS13 in ASEM13*, Jeju, Korea, pp2803-2815, 2013.

K.Kojima, K.Fujita & I.Takewaki, Simple and practical analysis of effect of soil liquefaction on response of structure-pile system, *Proc. of 14th IACMAG*, Sept. 22-25, 2014, Kyoto, pp815-820.

小島紘太郎, 藤田皓平, 竹脇 出, 地震動を受ける構造物 - 杭 - 地盤連成系の地盤特性の不確定性を考慮したロバスト性解析, 第 63 回理論応用力学講演会論文集, 2014.9.

〔図書〕(計 6 件)

I.Takewaki, A.Moustafa and K.Fujita, *Improving the Earthquake Resilience of Buildings: The worst case approach*, Springer (London), July, 2012 (ISBN-10: 1447141431, ISBN-13: 978-1447141433). 2014 年度日本建築学会著作賞.

I.Takewaki and K. Fujita, 'Evolutionary Path-dependent Damper Optimization for Variable Building Stiffness Distributions', in "Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures" (Xin-She Yang, Amir Hossein Gandomi, Siamak Talatahari, Amir Hossein Alavi (eds.)), pp297-318, Elsevier, Feb. 2013 (ISBN: 9780123983640).

竹脇 出 (編集と 1, 2 章執筆)「建築構造設計における冗長性とロバスト性」, 応用力学シリーズ, 日本建築学会, 2013.

I.Takewaki, *Critical Excitation Methods in Earthquake Engineering, Second Edition*, Elsevier, 2013 (ISBN-10: 0080994369 | ISBN-13: 978-0080994369).

I.Takewaki and K.Fujita, Robust Control of Building Structures under Uncertain Conditions, *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, edited by M.Beer, E.Patelli, I.Kougioumtzoglou and I.Au, Springer-Verlag, 2014 (DOI 10.1007/978-3-642-36197-5_161-1).

Y.Murakami, K.Noshi, K.Fujita, M.Tsuji and I.Takewaki, Optimal placement of hysteretic dampers via adaptive sensitivity-smoothing algorithm, *Engineering and Applied Sciences Optimization: Volume 1 - Dedicated to the memory of Professor M.G. Karlaftis*, 2015.

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)
京都大学・立命館大学理工学部・准教授
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・情報理工学系研究科・准教授
研究者番号: 10378812