

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009-2011

課題番号：21360267

研究課題名（和文） 極限地震動外乱理論の展開とそれに基づく建築耐震性能評価の信頼性向上に関する研究

研究課題名（英文） Development of Critical Excitation Method and its Application to More Reliable Evaluation of Building Seismic Resistance

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

研究成果の概要（和文）：

東京や大阪などの大都市圏では、超高層建物の建設後に大きなレベルの地震動を経験しておらず、直下型やプレート境界型の地震動に対してどのような地震動が励起され、どのような被害が発生するかについては数値シミュレーションでしか検討されていない。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、エネルギー指標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。本研究では、極限外乱理論の展開により、従来よりも信頼性の高い建築耐震性能評価が可能となることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Because super high-rise buildings in mega cities in Japan have never been shaken intensively by earthquake ground motions after their construction, the response of high-rise buildings to such severe ground motions is one of the most controversial subjects in the field of earthquake-resistant design in Japan. The criticality and uncertainty of the severe ground motions are investigated based on the theory of critical excitation in this project. The structural design methods for robust and resilient buildings are also studied.

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2010 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
総計	12,000,000	3,600,000	15,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：耐震設計、地震エネルギー、地震防災、最悪地震動、構造解析、極限外乱理論

1. 研究開始当初の背景

(1) 兵庫県南部地震で観測された地震動のレベルは、応答スペクトルや観測地震動波形などから判断しても、現行の耐震基準の2～3倍レベルのものであった。500～1000年再現期間の入力とも言われているが、対象とする建物にとっては看過するこ

とのできないものである。また最近でも耐震基準を大きく上回るレベルの地震動が観測されている。

(2) 東京や大阪などの大都市圏では、大きなレベルの長周期地震動を経験しておらず、プレート境界型の地震動に対してどのような地震動が励起され、どのような被害が

発生するかについては数値シミュレーションでしか検討されていない。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、エネルギー指標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. 研究の目的

耐震設計における設計用地震動の設定においては、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。

多成分入力地震動の評価については、これまで、安全率の導入による1方向入力としての簡易的取り扱いや、地震動の主軸の存在を仮定した方法が一般的であったが、原子力施設などの超重要構造物については、更に詳細な生起可能性を考慮した多成分入力地震動モデルの構築が要請されている。

構造物側では、余裕度やロバスト性を向上させるため、制振構造や免震構造の果たす役割について明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 著書「Critical Excitation Methods in Earthquake Engineering」(Elsevier, 2006)の極限外乱理論に基づき、さらに広範囲な問題へと発展させる。
- (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、地動最大速度や速度パワーなどの地動のみに関連した地震動基準化量を導入し、種々の建物の応答変形や入力エネルギーとの関係を明らかにする(雑誌論文⑩)。
- (3) 建築構造物の多成分地震動入力に対する耐震安全性を独自の極限外乱理論に基づき、各方向の地震動成分間の相関を的確に考慮して評価する。この点は世界最先端のアプローチである。
- (4) 2011年に発生した東北地方太平洋沖地震による東京および大阪での観測地震動および超高層建物での応答結果に基づき、長周期地震動の極限性とそれを構成するパラメータの不確定性が建物応答に及ぼす影響について詳細に検討する。
- (5) 制振構造や免震構造も検討対象とする。その性能評価に極限外乱理論を用いることにより、入力と構造の両面から「想定外」の範囲を狭めることが可能となる。

4. 研究成果

- (1) 粘性系や履歴系の制振ダンパーが地震動に対して有効であることの証明は入力エネルギーの観点から理論的にも行われており(竹脇ら[2007])、その有効性・信頼性を確認するには、それぞれのダンパーにとって最も厳しい条件下で性能を検討する必要がある。本研究では極限外乱作用時の最適ダンパー配置理論を展開した。具体的には、ダンパー配置に依存して変動する極限外乱を考慮しつつ、粘性ダンパーおよび粘弾性ダンパーの最適な配置を見出す理論を展開した。特に、ダンパー支持部材に作用する力に関する制約条件を満たしつつ最適配置を見出す概念を導入し、最適配置法を提案した(図1-3)。(雑誌論文⑦, ⑮, ⑱)

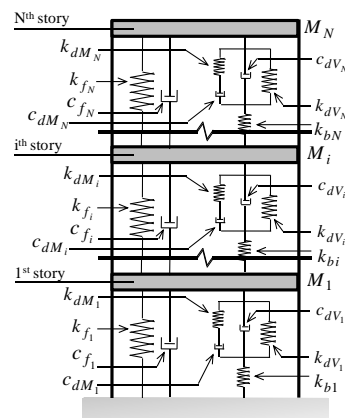


図1 支持部材付きダンパーを有する建築構造物

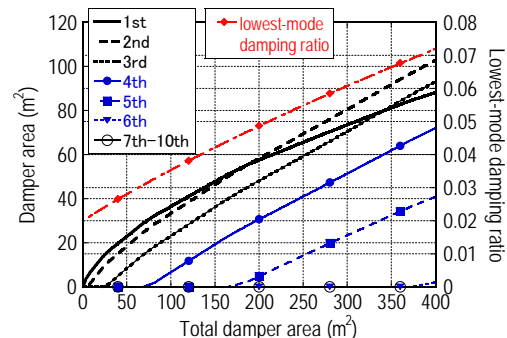


図2 詳細モデルと簡易モデルによる最適ダンパー量と1次減衰定数(10層建物)

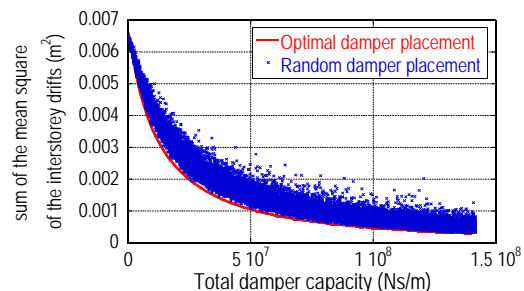


図3 提案手法による解の大域最適性の検証

(2) 構造物のモデル特性および入力外乱の不確定性を考慮した上で、最適な制振ダンパー配置を求める新しい方法として、H 無限大指標を評価関数（最小化）とする理論を展開し、その解法を構築した。（雑誌論文⑭、⑯）

(3) 東北地方太平洋沿岸地震による東京、大阪の高層建物内での観測結果の分析を行い、超高層建物では減衰定数が小さいため、損傷等による減衰定数の低下が応答増幅に大きく影響することを明らかにした（図4）。また、入力（卓越周期と継続時間）と構造特性（固有周期と減衰定数）の不確定性が極限外乱に及ぼす影響を明らかにした。さらに、東京新宿では幅広い振動数特性を有する地震動が観測されたため、1次のみならず高次の振動成分も多く含まれることを明らかにした（図5）。一方、大阪湾岸では、地盤の1次固有振動と共振するような建物ではほぼ1次振動成分で振動することを明らかにした（図4、6）。（雑誌論文⑤および投稿中論文）

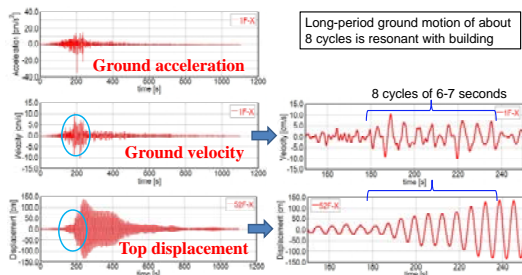


図4 大阪湾岸に立地する超高層建物の2011.3.11地震時の共振応答

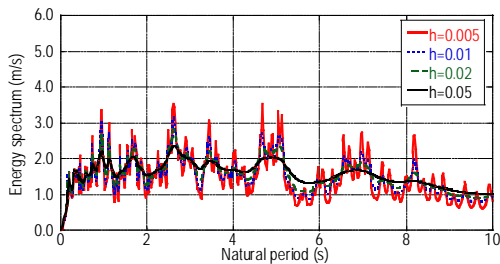


図5 K-NET 新宿(NS) 波に対するエネルギースペクトル

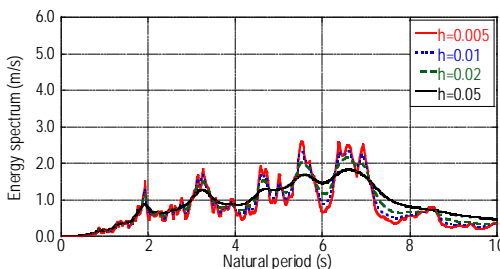


図6 大阪湾岸(NS) 波に対するエネルギースペクトル

(4) 建築構造物の多成分地震動入力に対する耐震安全性を、独自の極限外乱理論に基づき、各方向の地震動成分間の相関を的確に考慮して評価する方法を開発した。従来の設計では、複数方向の入力を統計的に独立であるとする扱い(SRSS)が主流であったのに対して、本研究では、各方向の地震動成分間の相関を厳密に考慮し、建物の応答にとって最悪な組み合わせを見出す理論を展開した。各方向入力成分間の最悪相関が閉形表現で得られることを有効に利用し、各方向のパワースペクトルの振動数特性の相関度が極限性に大きく影響することを明らかにした。（雑誌論文⑱）

(5) 実体波と表面波から構成される地震動の極限性を、建物弾塑性応答を考慮して見出す方法を展開した。指標として **Damage index** を導入した。図7は実体波と表面波の包絡関数を表し、図8には非線形構造物の極限外乱を示す。（雑誌論文⑲、⑳）

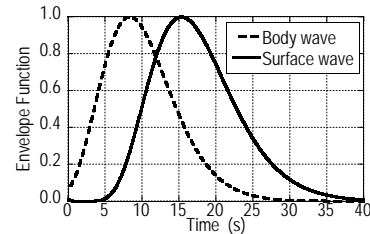


図7 実体波と表面波の包絡関数

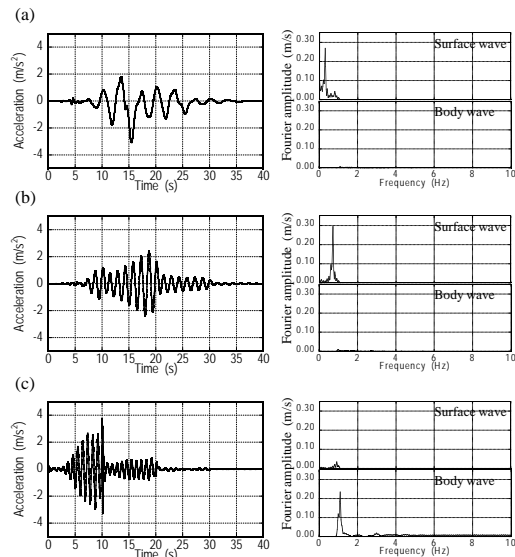


図8 3種類の2自由度バイリニアール構造物モデルに対する極限外乱加速度とフーリエスペクトル
(a) Long-period structure ($f_1=0.31\text{Hz}$, $f_2=0.81\text{Hz}$)
(b) Med. period structure ($f_1=0.70\text{Hz}$, $f_2=1.82\text{Hz}$)
(c) Short-period structure ($f_1=1.10\text{Hz}$, $f_2=2.88\text{Hz}$)

(6) 現有の小型電動振動台と新規導入の同一タイプの振動台を組み合わせ、2方向地震動入力に対する実験を行った。組み合わせた2台の上記振動台上に模型を設置し、極限

相関の場合と、それ以外の場合の比較を行い、提案する極限外乱理論の妥当性を検証した。2台を組み合わせる手法は任意方向入力と多点入力を可能とする特徴がある。また、新規導入の「動き解析マイクروسコープ」を用いて、本実験および上記コンピュータ画面上の動きを詳細に撮影し、理論検証および極限性の視覚的把握に有効利用した。

2方向水平地震動入力を受ける場合の極限的な組み合わせを見出す理論に基づき、与えられた1つの記録地震波に対して直交する方向のクリティカルな地震動を見出し、導入した振動台を用いた実験により精度を検証した。図9に最悪な相関性を有する多成分入力外乱（2方向水平入力）と完全相関波に対する柱頭縁応力の時刻歴応答の比較を示す。（雑誌論文⑱）

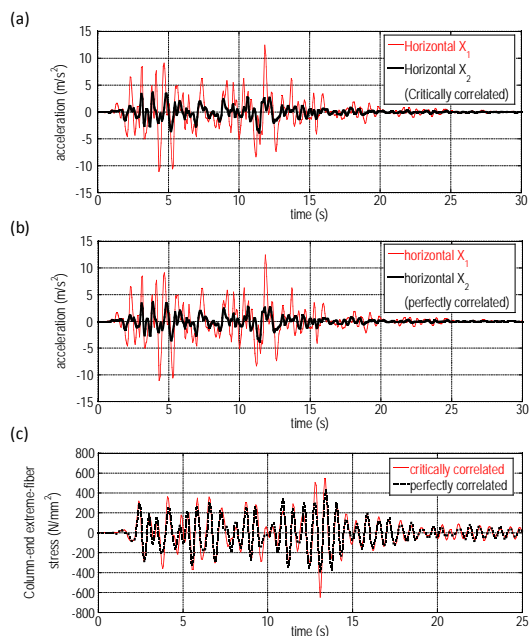


図9 最悪な相関性を有する多成分入力外乱（2方向水平入力）と完全相関波に対する柱頭縁応力の時刻歴応答の比較：(a) 極限外乱 (b) 完全相関波 (c) 柱頭縁応力の時刻歴応答

(7) 極限外乱理論を用いて、構造物のロバスト性・リダンダンシーを向上させる方法を開発した。特に、2012. 3. 11の地震でも明らかかなように、時間差を伴って多数の波群が現れることがある。最初の地震動で損傷を受けた建物が後続の地震動によってさらに大きな損傷を被ることが予想される。本理論の展開により、このような多数の波群に対する極限外乱理論は構造物のロバスト性・リダンダンシーを向上させる上で有用な知見を提供すると思われる。（雑誌論文②, ⑩）

(8) 構造物のモデル特性および入力外乱の不

確定性を考慮した上で、構造物の地震動に対する応答上限値を予測する方法を展開した。このような問題に対しては従来、区間解析法(interval analysis method)が提案されていたが、多数の変動パラメータに対しては適用が困難という問題や、区間内部で極値が生じる場合などでは大きな誤差が発生するといった問題が存在していた。本研究では、Taylor展開を用いて評価点を逐次更新する Updated Reference-Point法と呼ばれる新しい方法を開発し、種々の問題に適用可能であることを示した。特に、その理論を制振建物や免震建物に適用し、応答上限値を高精度で予測できることを明らかにした。（雑誌論文③, ⑥）

(9) 構造物およびダンパー特性の不確定性を考慮した上でのロバストパッシブダンパー設計法を展開した。図10は、性能基準を満たす設計の許容領域とロバストネス関数 α の範囲の関係および最悪ケースを表す。図11は、(a) El Centro NS (1940), (b) Taft EW (1952), (c) Hachinohe NS (1968)を受けたときの種々のダンパー分布に対するロバストネス関数を表す。ダンパー配置により、また地震動に依存してロバスト性が変化することが理解される。尚、 $\hat{\alpha} = 0$ の横軸は不確定性のないモデルを表す。

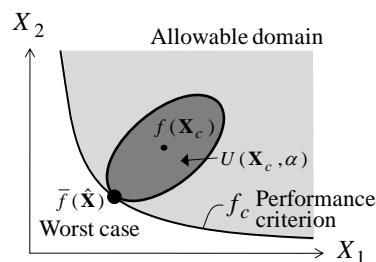


図10 性能基準を満たす設計の許容領域とロバストネス関数 α の範囲の関係

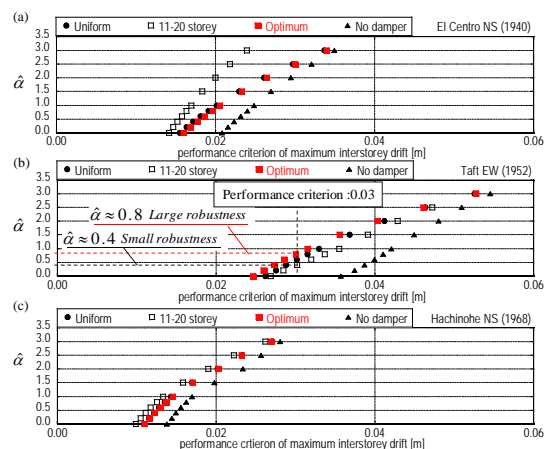


図11 種々のダンパー分布に対するロバストネス関数(20層建物)：(a) El Centro NS (1940), (b) Taft EW (1952), (c) Hachinohe NS (1968)

図 12 は、ロバストな構造物のためのパッシブダンパー総量の再設計に関する図を表し、性能基準とコストがロバスト性に及ぼす影響を表している。下方の図は、安全率を用いて性能値を表現する方法を表している。しかしながら一般に、安全率の決定には多くの曖昧さが存在するため、安全率の概念を用いずに直接ロバスト性を表現する方法を提案することが望まれる。また図 13 は、(a)一様分布、(b)11-20 層分布のパッシブダンパー総量に対するロバストネス関数の変動を表す。一様分布ではダンパー総量の増加と共に性能が向上しているのに対して、11-20 層分布ではある段階からダンパー総量が増加しても性能が向上しないことを表している。(雑誌論文に投稿中)

(10) 地動最大速度に加えて速度パワーという地動のみが有するエネルギー量は、建物への入力エネルギーの観点から見たときの地震動の基準化にとって極めて有用な指標であることを明らかにした。(雑誌論文⑩)

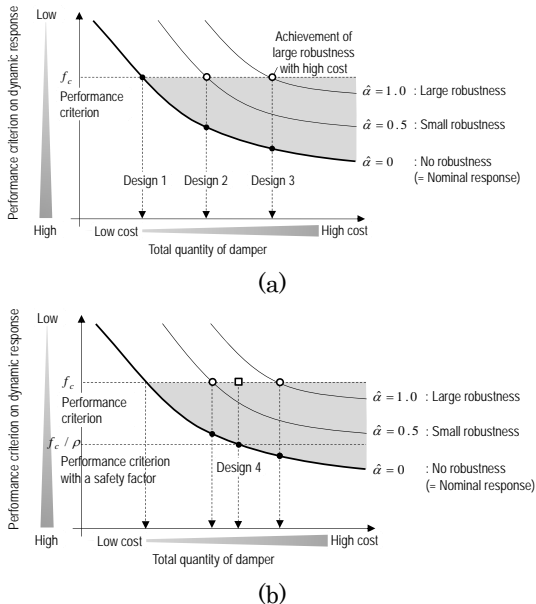


図 12 ロバストな構造物のためのパッシブダンパー総量の再設計 (性能基準とコストがロバスト性に及ぼす影響)

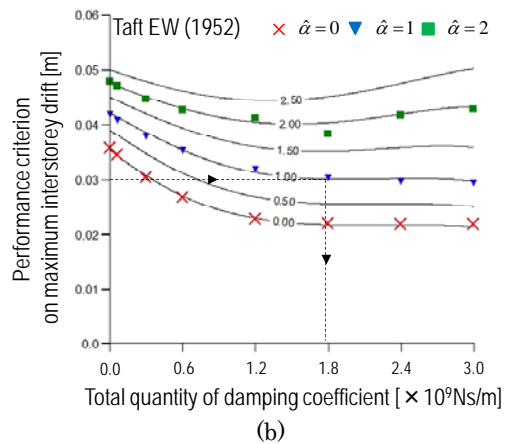
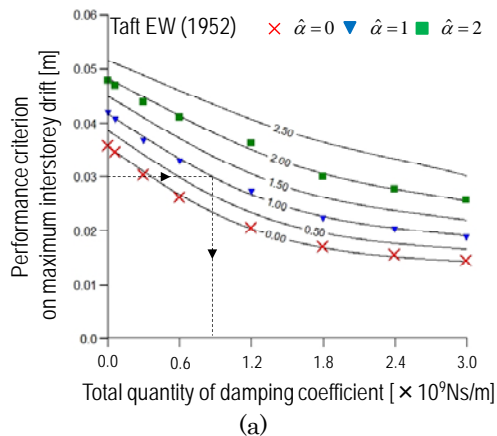


図 13 パッシブダンパー総量に対するロバストネス関数の変動 (20 層建物): (a)一様分布、(b)11-20 層分布

(11) システム同定、損傷検出理論の展開: 建築構造物のロバスト性・冗長性を高い信頼性のもとで評価するには、それを表現する設計モデルの精度を向上させる必要がある。設計モデルの精度向上にはシステム同定技術が重要な役割を果たす。本研究では、超高層建物も取り扱うことのできる曲げせん断型モデルについて、新しいシステム同定理論、損傷検出理論を展開した。(雑誌論文⑪)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① M.Kuwabara, S.Yoshitomi and I.Takewaki, A new approach to system identification and damage detection of high-rise buildings, *Struct. Control Health Monitoring*, (Pub. online on March 15, 2012). (査読有)
- ② A.Moustafa and I.Takewaki, Earthquake ground motion of multiple sequences and associated structural response, *Earthq. and Structures*, Vol.3, No.3 (in press). (査読有)
- ③ K.Fujita and I.Takewaki, An efficient methodology for robustness evaluation by advanced interval analysis using updated second-order Taylor series expansion, *Engineering Structures*, Vol.33, No.12, pp3299-3310, 2011. (査読有)
- ④ 足立冬樹, 吉富信太, 辻 聖晃, 竹脇 出, セットバック建物の弾性地震応答解析のための層方向縮約モデル, 日本建築学会構造系論文集, 669 号, 2011 年, pp1925-1935. (査読有)
- ⑤ I.Takewaki, S.Murakami, K.Fujita, S.Yoshitomi and M.Tsuji, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and

- response of high-rise buildings under long-period ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.31, No.11, pp1511-1528, 2011. (査読有)
- ⑥ 藤田皓平, 竹脇 出, 不確定な構造特性を有する免震建物のロバスト性評価のための地震時応答限界解析, 日本建築学会構造系論文集, 666号, 2011年, pp1453-1460. (査読有)
- ⑦ 辻 聖晃, 田中英稔, 吉富信太, 竹脇 出, 地震動を受ける粘性ダンパー付建物の層方向自由度に関する縮約法, 日本建築学会構造系論文集, 2011年, 665号, pp1281-1290. (査読有)
- ⑧ F.Adachi, S.Yoshitomi, M.Tsuji and I.Takewaki, Enhanced reduced model for elastic earthquake response analysis of a class of mono-symmetric shear building structures with constant eccentricity, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.31, No.7, pp1040-1050, 2011. (査読有)
- ⑨ I.Takewaki, S.Murakami, S.Yoshitomi and M.Tsuji, Fundamental mechanism of earthquake response reduction in building structures with inertial dampers, *Struct. Control Health Monitoring* (in press). (査読有)
- ⑩ A.Moustafa and I.Takewaki, Response of nonlinear single-degree-of-freedom structures to random acceleration sequences, *Engineering Structures*, Vol.33, No.4, pp1251-1258, 2011.
- ⑪ I.Takewaki and H.Tsujimoto, Scaling of design earthquake ground motions for tall buildings based on drift and input energy demands, *Earthq. and Structures*, Vol.2, No.2, pp171-187, 2011. (査読有)
- ⑫ 上野浩平, 藤田 皓平, Abbas Moustafa, 竹脇 出, 実体波と表面波から構成される地震動を受ける弾塑性構造物に対する極限外乱, 日本建築学会構造系論文集, 2011年, 659号, pp79-87. (査読有)
- ⑬ K.Yamamoto, K.Fujita and I.Takewaki, Instantaneous earthquake input energy and sensitivity in base-isolated building, *J of Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol.20, No.6, pp631-648, 2011. (査読有)
- ⑭ 山本 薫, 藤田 皓平, 竹脇 出, 建築構造物の H^∞ ノルムを最小化する最適ダンパー配置, 日本建築学会構造系論文集, 2010年, 658号, pp2163-2170. (査読有)
- ⑮ 辻 聖晃, 国分宏樹, 吉富信太, 竹脇 出, 非線形復元力特性を有する制振ダンパーの構造縮約モデルを用いた最適配置法, 日本建築学会構造系論文集, 2010年, 658号, pp2143-2152. (査読有)
- ⑯ K.Fujita, K.Yamamoto and I.Takewaki, An evolutionary algorithm for optimal damper placement to minimize interstorey-drift transfer function in shear building, *Earthq. and Structures*, Vol.1, No.3, pp289-306, 2010. (査読有)
- ⑰ A.Moustafa, K.Ueno and I.Takewaki, Critical earthquake loads for SDOF inelastic structures considering evolution of seismic waves, *Earthq. and Structures*, Vol.1, No.2, pp147-162, 2010. (査読有)
- ⑱ K.Fujita, A.Moustafa and I.Takewaki, Optimal placement of viscoelastic dampers and supporting members under various critical excitations, *Earthq. and Structures*, Vol.1, No.1, pp43-67, 2010. (査読有)
- ⑲ K.Fujita and I.Takewaki, Critical correlation of bi-directional horizontal ground motions, *Engineering Structures*, Vol.32, No.1, pp261-272, 2010. (査読有)
- [学会発表] (計3件)
- ① I.Takewaki, K.Fujita and S.Yoshitomi, Uncertainties of long-period ground motion and its impact on building structural design, *Proc. of One Year after 2011 Great East Japan Earthquake, International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake*, March 3-4, 2012, Tokyo, pp1005-1016.
- ② I.Takewaki, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and its impact on building structural design, Keynote paper (Plenary speaker) at The ASEM11+ Congress, September 18-23, 2011 in Seoul, Korea, pp36-61.
- ③ I.Takewaki, Building Control with passive dampers, Keynote paper (Semi-plenary speaker) at The First International Conf. on *Advances in Interaction and Multiscale Mechanics (AIMM'10)*, 30 May - 4 June 2010 in Jeju, Korea, Proc. pp23-39.

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・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 30432383