

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2006-2008  
 課題番号：18360264  
 研究課題名 (和文) 地震エネルギー流れ解析に基づく構造物-地盤統合システムの極限的耐震要求性能評価法  
 研究課題名 (英文) Critical Evaluation Method of Seismic Demand for Structure-ground System Based on Analysis of Earthquake Energy Flow  
 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：

建築構造物の地震時の応答は地盤特性の影響を大きく受けるため、その耐震設計法を展開するには、構造物-基礎-地盤連成系の総合的なモデルを考える必要がある。本研究の目的は、構造物-基礎-地盤連成系における地震入力エネルギーについて、その入力(流れ)のメカニズムを明らかにし、想定外の地震動に対しても十分対応可能な頑強な耐震設計法を展開することにある。特に、最悪地震動を想定する独自の方法を有効に利用し、限界状態に対する余裕度を的確に設定可能な耐震設計法を展開することが可能となることを示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2007 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	9,000,000	2,700,000	11,700,000

## 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

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 建築構造物の耐震設計法において、基礎固定モデルに対するエネルギー法(建築基準法)は多数提案されているが、構造物-基礎-地盤連成系に対するものはほとんど存在しない。特に、入力の相互作用と慣性の相互作用の両者を同時に考慮した研究は皆無である。これは、部分構造の各境界に作用する力の為す仕事の振動数領域定式化によってのみ可能となる。
- (2) 地震入力の「不確かさ」と構造物・地盤特性の「不確かさ」の両者を的確に考慮したもとの信頼性の高い耐震設計法や、地震入力エネルギーの上限値を評価する方

法に関する研究は皆無である。

- (3) 振動数領域での入力エネルギーの定式化は1自由度系では少数存在するが、多自由度系では皆無である。

## 2. 研究の目的

建築構造物の耐震安全性を高い信頼性のもとで確保するには、想定可能な地震動に対する最大変形と累積エネルギーの両者についての確かな安全性確保の方策を講じる必要がある。特に、社会的な影響が大きい巨大構造物や災害時に復旧活動の中心的な役割を担う公共建築については、長周期地震動や基準レベルを大きく上回る直下型地震に対し

ても十分な検討がなされる必要がある。本研究では、このような想定外の地震動に対しても十分対応可能な頑強な耐震設計法を展開するための新しいパラダイムを提案する。

エネルギーに基づく構造物の耐震設計では、これまで基礎固定構造物への地震入力エネルギーに対する理論やそれに基づく設計法が提案されてきたが、構造物-基礎-地盤連成系における地震入力エネルギーについてその入力メカニズム(流れメカニズム)を明らかにする。さらに、地震入力や構造・地盤特性の「不確かさ」を的確に考慮して、一層安全性レベルの高い構造物を設計するために、地震入力エネルギーの上限値を見出す新しい方法を提案し、想定外地震も含む極限的な入力に対する耐震要求性能を明らかにする方法を提案する。

### 3. 研究の方法

- (1)地震入力エネルギーを、フーリエ逆変換を用いて、入力地動加速度のフーリエ振幅スペクトルの2乗値とエネルギー伝達関数の積の振動数領域積分で表現する。振動数領域での解析に基づくため、振動数の関数となる基礎入力動により表現される「入力の相互作用」と、振動数の関数である基礎インピーダンス(地盤の動的剛性・減衰)により表現される「慣性の相互作用」を的確かつ直接的・効率的に考慮可能。
- (2)地動加速度のフーリエ振幅が一定の場合には、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ことは、総質量が一定であれば、構造物系の特性に関係なく構造物系への地震入力エネルギーが一定となることを意味している。この特性から、制振部材でエネルギーを吸収する量が大きくなるほど構造物系への入力エネルギーは小さくなるといえる。これは制振システムの有効性を端的に示している。
- (3)振動数領域定式化では弾塑性系を扱うことが困難であった。本研究では、1自由度モデルに対する弾塑性時刻歴解析結果から、多自由度系の弾塑性応答(特に地震入力エネルギーの上限値)を精度よく評価する方法を提案する。

### 4. 研究成果

- (1)スウェイ・ロッキングモデルに対する地震入力エネルギー評価法の開発を行った。具体的には、スウェイ・ロッキングモデルのばね剛性およびダッシュポット減衰係数の変動が、地震入力エネルギーに及ぼす影響を感度解析的に解明する方法を展開した。特に、振動数領域での方法を用いることにより、高次の感度表現までもが閉形表現で得られることを明らかにした。
- (2)地盤特性の不確かさを考慮したエネルギー

設計法(図1-3参照)の展開のための検討を行い、群杭基礎を有する構造物をスウェイ・ロッキングモデルに置換する方法を用いて、地盤特性(剛性)の変動が地震入力エネルギーに及ぼす影響を感度解析的に解明する方法を展開した。振動数領域での方法を拡張することにより、ほぼ閉形表現で感度得られることを明らかにした。

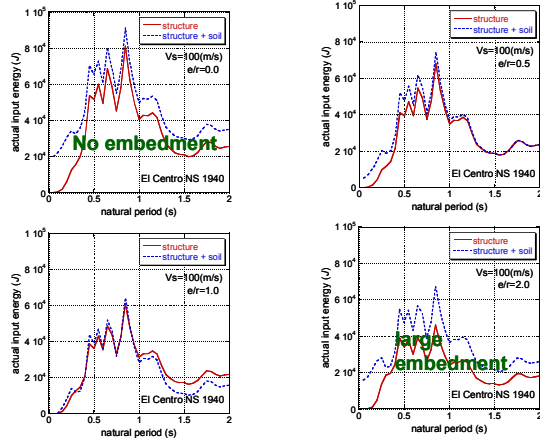


図1 スウェイ・ロッキングモデルによるエネルギー解析

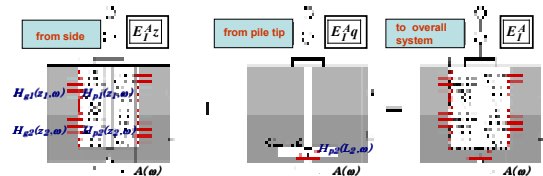
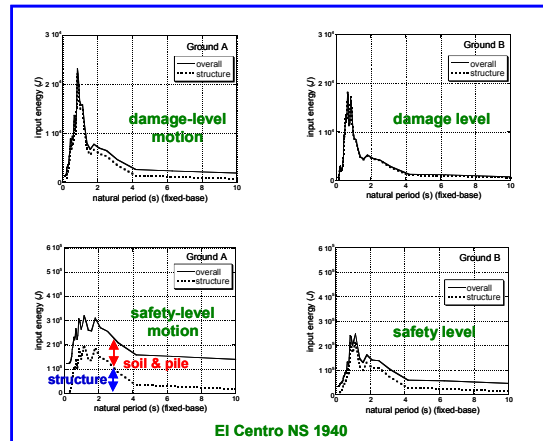


図2 構造物-杭-地盤連成系



Input energies to overall system and to structure

図3 構造物-杭-地盤連成系によるエネルギー解析

- (3)入力地震動の不確かさを考慮した設計法を展開するために、多成分地震動入力を受ける種々の構造物について、基礎の浮き上がりや材端応力に対する極限外乱を見出す理論を展開した。各方向の地震動成分の間の最悪な相関に着目し、それを効率的に解明する方法を提案した。その方法の概念図と得られた成果の一例を以下に示す。

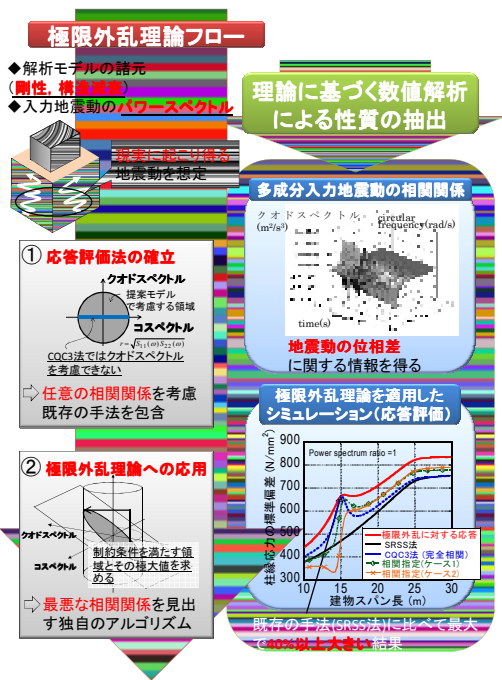


図4 多成分地震動入力に対する極限外乱理論

- (4) 地震エネルギー入力率に関する極限外乱法を展開した。地震総入力エネルギーに対して、地震エネルギー入力率は層間変位などの局所量に関する指標と考えられる。地震エネルギー入力率を最大化するような極限外乱を求める方法を開発し、振動数特性が時間とともに変化するような一般的な地震動モデルにも適用可能であることを明らかにした。
- (5) 速度パワーや加速度パワーを制約した場合の近似極限外乱としての共振正弦波入力を用いて、粘性型あるいは履歴型のダンパーを有する骨組(図5)の極限的な地震時特性を明らかにした。この特性を明示的に示すには、横軸を地動パラメータとする性能曲線を描くことが有効である。本研究では、この性能曲線をスイーピング性能曲線と命名した。図6に両モデルの地動最大加速度に対する最大層間変位の2次元スイーピング性能曲線を示す。履歴ダンパーは比較的小さな入力域で変形を抑えるのに有効であることが理解できる。

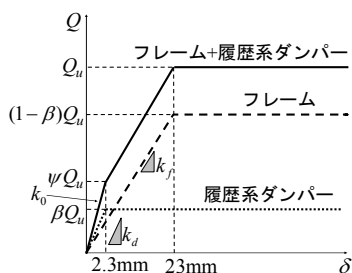


図5 履歴系ダンパーを有する建物の復元力特性

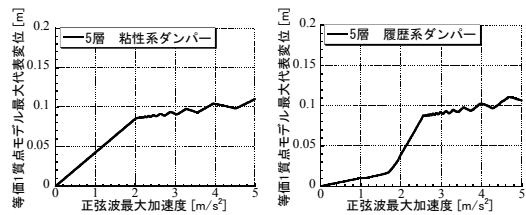


図6 受動型制振機構を有する建物の2次元スイーピング性能曲線

(6) 共振正弦波入力による制振構造物への総入力エネルギーを、1自由度系を用いた性能曲線から得られた応答変位の最大値から予測する手法を提案した。建物モデル、制振機構が決まれば、入力レベルに応じた応答が一意に定まる1自由度系に対する性能曲線を用いるため、多自由度系に対する繰り返し動的解析を行う必要がない。図7には、粘性型ダンパーを有する骨組と履歴型ダンパーを有する骨組に対する上記の理論の数値例を示す。

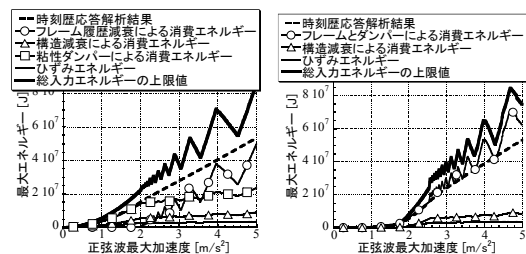


図7 受動型制振機構を有する建物への総入力エネルギー

(7) 1次固有周期と層数の特性係数を用いると、弾性系の建物については、最大層間変位と地動最大速度には層数にほぼ関係のない関係式が誘導できることを明らかにした。図8には正弦波最大速度に対する最大層間変位と総入力エネルギーの図を示す。また、総入力エネルギーと速度パワーには層数にほぼ関係のない関係式が誘導できることを明らかにした。図9には速度パワーに対する最大層間変位と入力エネルギーの図を示す。

さらに、弾塑性系についても近似的関係が成立することを明らかにした。図10は、受動型ダンパーを含まない構造物に対して描いた速度パワーに対する最大層間変位と総入力エネルギーの図を示す。

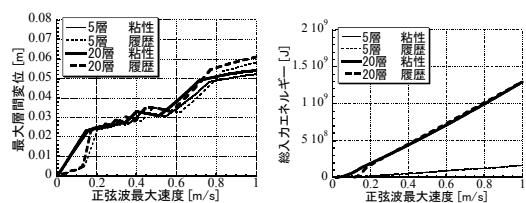


図8 正弦波最大速度に対する最大層間変位と入力エネルギー

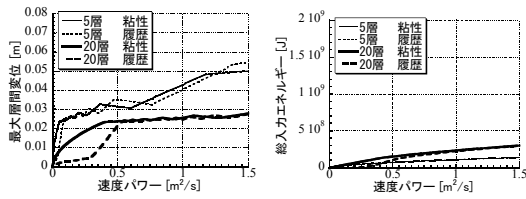


図9 速度パワーに対する最大層間変位と入力エネルギー

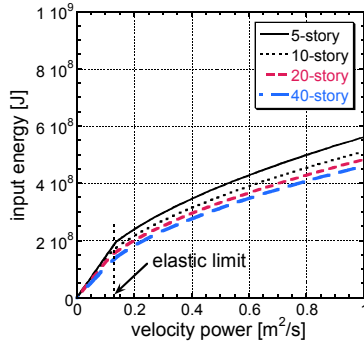


図10 総入力エネルギーと速度パワーの関係(等価正弦波)

(8) 超高層免震建物の長周期地震動に対する耐震安全性を、速度パワーなどを指標として極限外乱理論に基づき明らかにする方法を提案した。

(9) 粘性ダンパーにより連結された構造物群に入力される地震エネルギーの特性について明らかにし、図11に示すように、入力振幅が一定の場合には、全体系に入力されるエネルギーが一定となることを示した。地動加速度入力のフーリエ振幅が一定の場合とは、時間領域ではDiracのDelta関数に対応していることを明らかにし、これにより、上記の特性は、粘性ダンパーにより連結された構造物群に限らず、あらゆる構造物について存在することを明らかにした。この特性は、振動数領域における地震入力エネルギーの中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ことを意味している。従って、この特性を利用すると、フーリエ振幅が一定ではない一般的な地震動に対しても、地震入力エネルギーは安定した特性を呈することを明らかにした。図12のような自由対を考え、図13に示すようなモデルについて、種々の地震動に対する地震入力エネルギーを描いた図を図14と15に示す。上記の通り、地震動の種類に関わらず総入力エネルギーがほぼ一定となることを示している。図16には受動型ダンパーを有する構造物の有効性を模式的に示す図を示す。

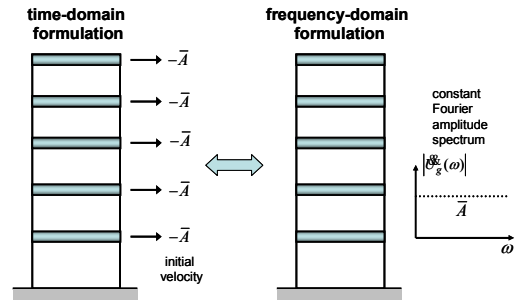


図11 時間領域と振動数領域の定式化

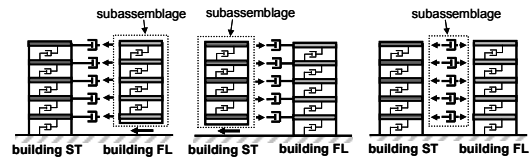


図12 サブアセンブリの自由体

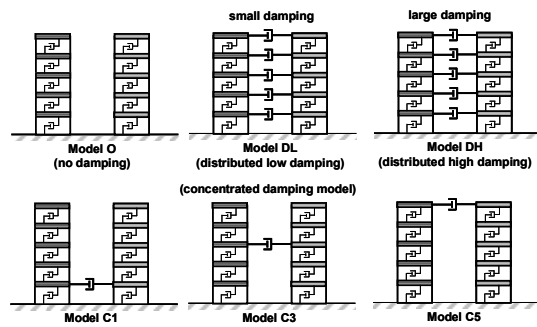


図13 種々の連結建物モデル

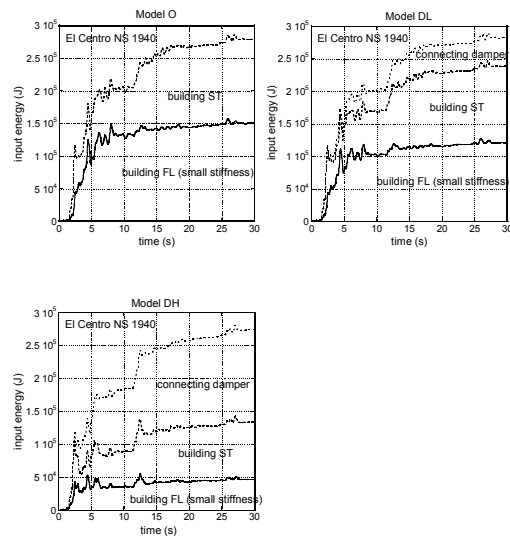


図14 Model O, DL, DH への地震入力エネルギー時刻歴



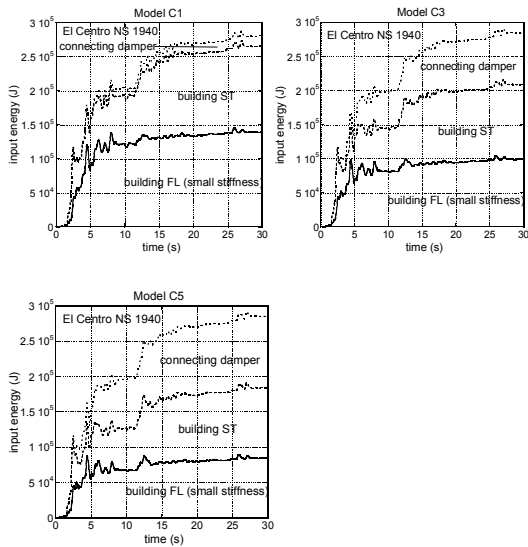


図 15 Model C1, C3, C5 への地震入力エネルギー時刻歴

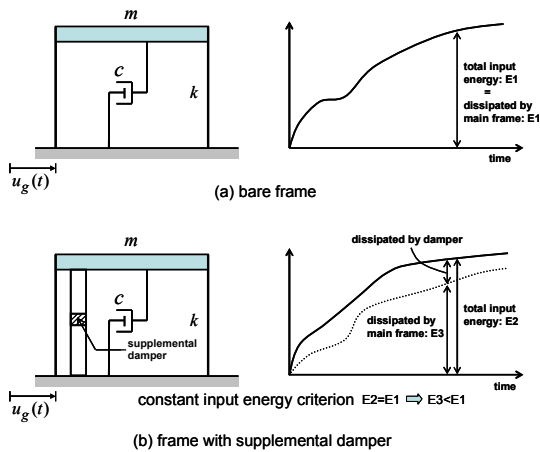


図 16 地震入力エネルギーの観点から見た受動型ダンパーを有する構造物の有効性

## 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 11 件)

- ① I. Takewaki and K. Fujita, Earthquake Input Energy to Tall and Base-isolated Buildings in Time and Frequency Dual Domains, *J. of The Structural Design of Tall and Special Buildings* (in press). (査読有)
- ② 辻本裕之, 吉富信太, 辻 聖晃, 竹脇 出, 極限的共振正弦波外乱レベルと建築構造物の応答量の相関関係, 鋼構造年次論文報告集 (第 16 回鋼構造シンポジウム), pp521-528, 2008. 11. (abstract 査読有)
- ③ I. Takewaki, Robustness of base-isolated high-rise buildings under

code-specified ground motions, *J. of The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol.17, No.2, pp257-271, 2008. (査読有)

- ④ 藤田皓平, 竹脇 出, 中村尚弘, 水平上下同時入力地震動を受ける大スパンラーメンの断面力に対するクリティカル外乱, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 626 号, pp551-558, 2008. (査読有)
- ⑤ K. Fujita, S. Yoshitomi, M. Tsuji and I. Takewaki, Critical cross-correlation function of horizontal and vertical ground motions for uplift of rigid block, *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 5, pp 1199-1213, 2008. (査読有)
- ⑥ I. Takewaki, Closed-form Sensitivity of Earthquake Input Energy to Soil-structure Interaction System, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.133, No. 4, 389-399, 2007. (査読有)
- ⑦ I. Takewaki, Earthquake Input Energy to Two Buildings Connected by Viscous Dampers, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.133, No. 5, 620-628, 2007. (査読有)
- ⑧ 竹脇 出, 辻 聖晃, 連結制震ダンパーを有する構造物群へ入力される地震エネルギーの基本特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 616 号, pp81-87, 2007. (査読有)
- ⑨ A. Kishida and I. Takewaki, Analysis of Earthquake Energy Input in Soil-pile-structure System with Uncertain Soil Parameter, *An International Journal of Advances in Structural Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp229-244, 2007. (査読有)
- ⑩ I. Takewaki, Probabilistic Critical Excitation Method for Earthquake Energy Input Rate, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.132, No. 9, pp990-1000, 2006. (査読有)
- ⑪ A. Kishida and I. Takewaki, Exact Higher-order Sensitivity and Variation of Earthquake Energy Input in Soil-Structure Interaction System, *An International Journal of Advances in Structural Engineering*, Vol. 9, No. 5, pp653-669, 2006. (査読有)

[学会発表] (計 2 件)

- ① K. Fujita and I. Takewaki, Critical excitation method for moment-resisting frames subjected to horizontal and vertical simultaneous

impulsive inputs, *Proc. of International Symposium on Structures under Earthquake, Impact, and Blast Loading* (IB08), Osaka Univ., pp95-102, 2008.10.10.

- ② I.Takewaki, Critical excitation methods for important structures, invited as a Semi-Plenary Speaker, *EURODYN 2008*, July 7, 2008, Southampton, England.

[図書] (計4件)

- ① I.Takewaki and A.Kishida, Efficient Analysis of Buildings with Grouped Piles for Seismic Stiffness and Strength Design, Chapter 8 (pp281-308) in John Bull (ed.) *'Linear and Nonlinear Numerical Analysis of Foundations'*, Taylor & Francis, 2009.
- ② I.Takewaki, Fundamental Properties on Earthquake Input Energy to Single and Connected Building Structures, A chapter in *DEVELOPING TRENDS IN SEISMIC DESIGN OF STRUCTURES* edited by Nikos D. Lagaros, Yiannis Tsompanakis & Manolis Papadrakakis, Saxe-Coburg Publisher, 2009 (to appear).
- ③ I.Takewaki and Y.Ben-Haim, *Info-gap Robust Design of Passively Controlled Structures with Load and Model Uncertainties*, Chapter 19 in "Structural Design Optimization Considering Uncertainties" (eds.) Yiannis Tsompanakis, Nikos D. Lagaros & Manolis Papadrakakis, Taylor & Francis, Chapter 19, pp531-548, 2008.
- ④ I.Takewaki, Critical Excitation Methods in Earthquake Engineering, Elsevier, 268pages, 2006.12.

## 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