

研究内容

Research Contents

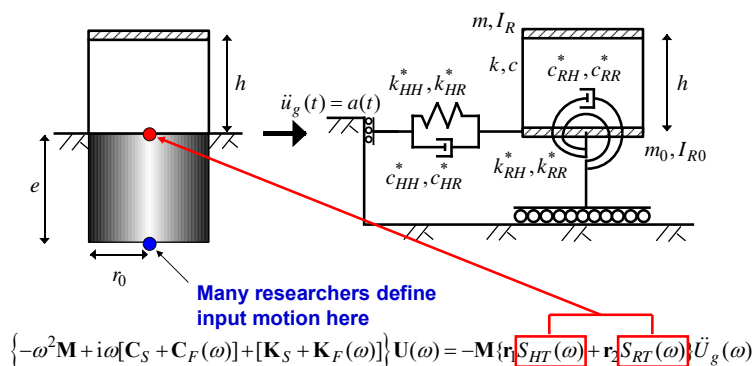
**Building Geo-environment
Engineering**

構造物と地盤の動的相互作用-1 (Soil-structure interaction-1)

建築物は地盤の上に建っているため、地震動の作用を受けた際には必然的に建物と地盤の相互作用を考慮する必要がある。建物と地盤の動的相互作用には、**慣性の相互作用**と**運動学的相互作用**がある。慣性の相互作用は、地盤が静止している状態で基礎に動的な力が作用したときの力と変位の関係を表し（動的な剛性のことをインピーダンス (impedance) と呼ぶ）、運動学的相互作用は無質量基礎が存在する場合に地震動が作用したときの基礎の動きを表す。下図のように、基礎が地中に埋め込まれている場合や地下室の場合にはその剛性が地盤の動きを拘束するため建物への地震動の入力は低減されることになる。杭基礎の場合には、慣性の相互作用は、実際の慣性力が作用したときの地盤が静止している状態での杭の応力を、運動学的相互作用は無質量基礎が存在する場合に地震動が作用したときの杭の応力を表す。また、下図に示すように、構造物-杭-地盤連成系の動的相互作用をシステムに入力される地震エネルギーの観点から把握する研究アプローチも存在し、本研究室で進められている。

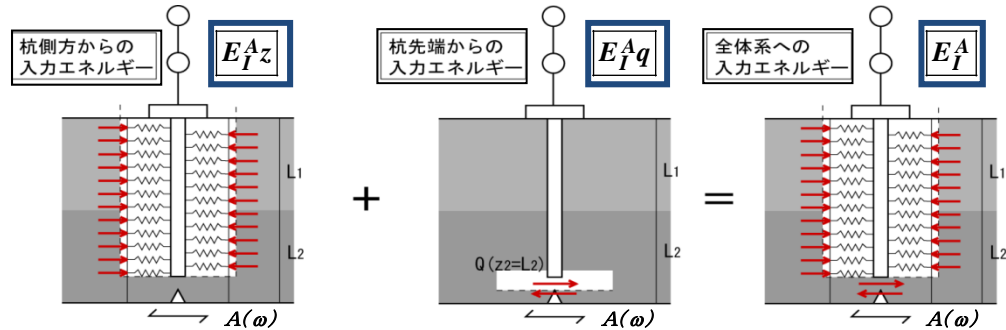
近年における震害調査から、構造物と地盤の動的相互作用を建築構造物の設計に組み込むことの重要性は十分に認識されており、表層地盤の下方に設定される工学的基礎面で設計用地震動を定義する一層詳細な手順が2000年に改正された建築基準法にも取り入れられている。構造物と地盤の動的相互作用を考慮すると、構造特性、基礎形式、地盤特性に依存して、構造物は複雑な挙動を呈し、設計者の経験やそれに基づく判断を適切に設計に反映させるには極めて高度な能力を必要とする。従って、多くの構造設計者にとっては、このような設計モデルに対する組織的な設計法を展開することが強く求められている。

本研究室では、このような構造物と地盤の動的相互作用に関する研究を設計の観点に注目しながら展開することを特徴としている。



obtaining transfer functions for embedded foundation

埋め込み基礎の動的相互作用解析



構造物-杭-地盤連成系への地震入力エネルギー

- 1. Takewaki, N. Takeda and K. Uetani, Fast practical evaluation of soil-structure interaction of embedded structures, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol.23, No.3, 195-202, 2003.
- 1. Takewaki, Frequency domain analysis of earthquake input energy to structure-pile systems, *Engineering Structures*, Vol.27, No.4, 549-563, 2005.

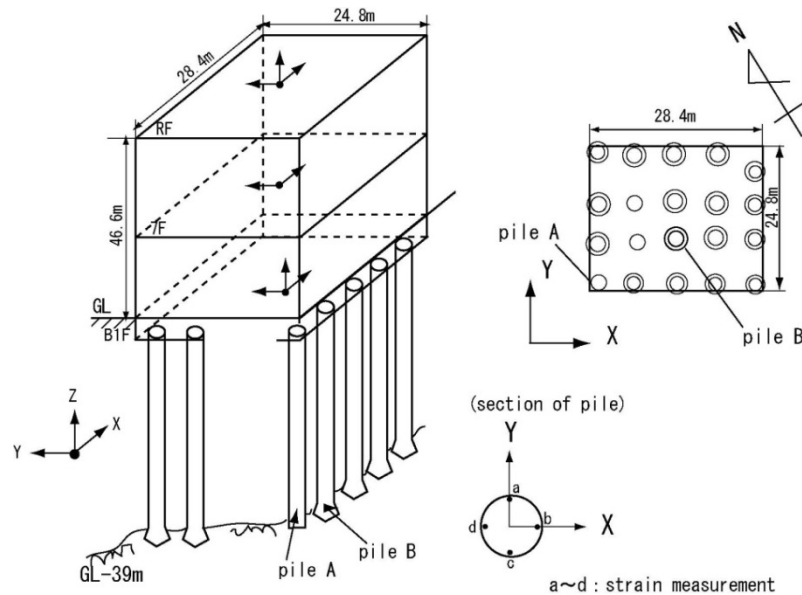
構造物 - 地盤連成系モデル

地盤の影響を考慮した逆問題型解法の例を示そう。近年における震害調査から、構造物と地盤の動的相互作用を建築構造物の設計に組み込むことの重要性は度々指摘されており、工学的基盤面で設計用地震動を設定する一層詳細な手順が2000年に改正された建築基準法にも取り入れられている。

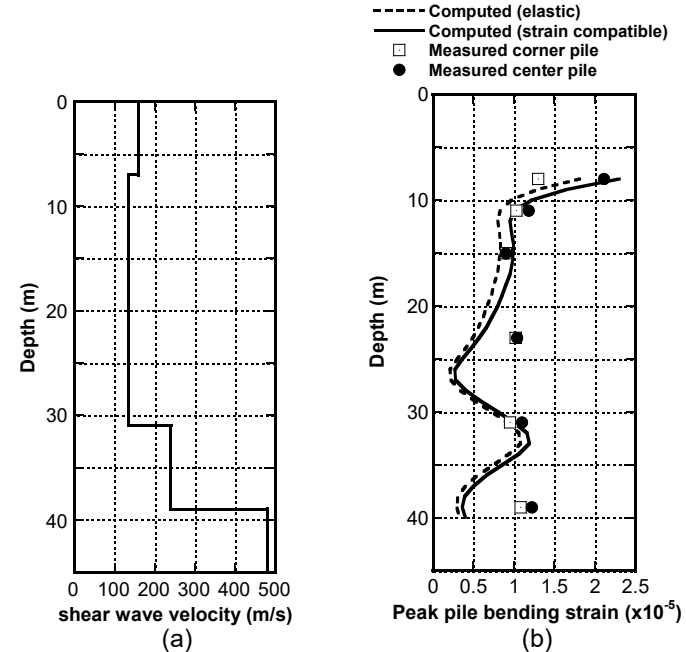
竹脇らは、その先駆的な研究として、工学的基盤面で設計用地震動が規定されるPenzien型のモデルについて、上部骨組の部材端応力に関する制約条件を満足する骨組の部材サイズを見出す設計法を展開している。構造物と地盤の連成系モデルでは、基礎固定モデルに比べて自由度が格段に増加するため、パラメトリック解析に基づく手法では多大な計算労力が必要となる。これに対して、逆問題型の解法では、地盤 - 基礎系の非設計領域を順解析的に取り扱い、上部構造の設計領域を逆問題的に取り扱うため、設計問題に即した取り扱いが可能となる。

下図には、横浜に存在する杭基礎を有する鋼構造12層建物を示す。杭Aはストレート杭を、杭Bは拡底杭を表す。この建物では、地震時の杭の挙動を把握するために杭の鉄筋にひずみ測定装置を設置している。1992年の地震で観測された杭の曲げひずみを右図に示す。比較のため、本研究室で開発した方法により評価した杭の曲げひずみも示す。図から、本研究室で開発した方法は、実際の杭のひずみを高精度に評価可能であるといえる。

I.Takewaki, T. Nakamura and K.Hirayama, Seismic Frame Design via Inverse Mode Design of Frame-Ground Systems, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.17, No.3, pp153-163, 1998.



横浜に存在する杭基礎を有する鋼構造12層建物



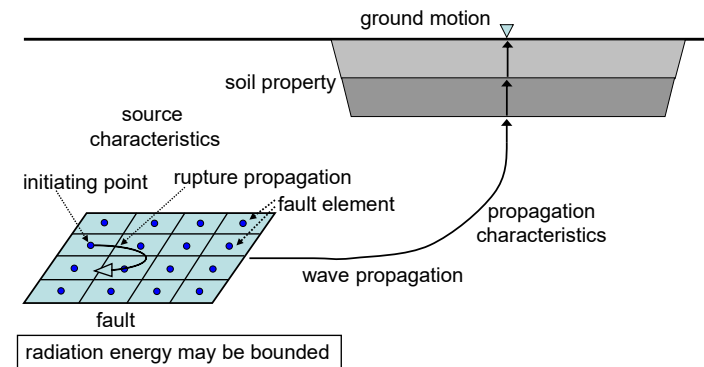
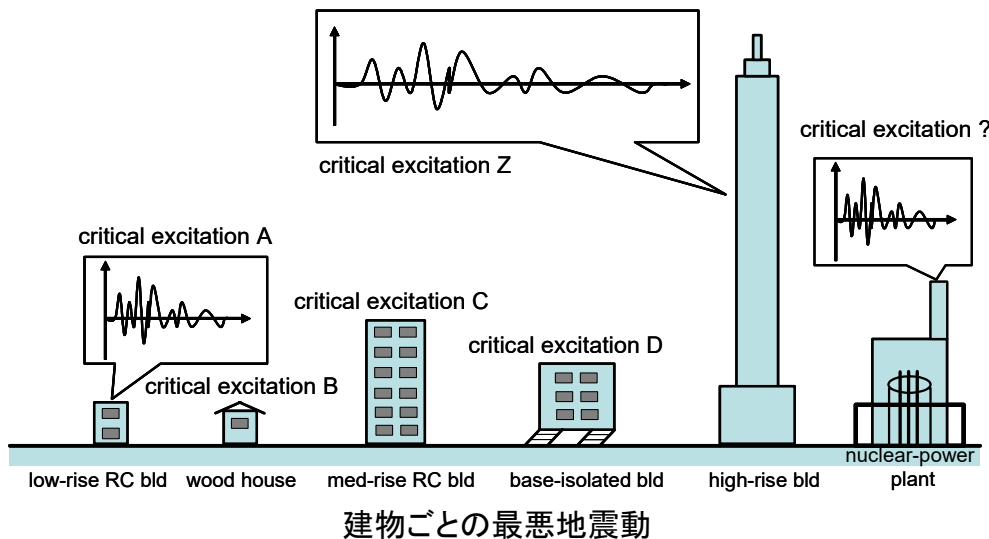
極限地震動による方法(Critical excitation method)

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、地震、津波の自然災害に加えて原子力施設の問題が発生しました。1軒の住宅が倒壊しても大きな地域に影響を及ぼすことはありません。しかし原子力施設などに問題が発生すると、今回のように極めて大きな地域あるいは日本全体に影響が及びます。従って、住宅の設計と原子力施設などの設計は異なる設計思想のもとで行われなければならないのです。実際にこれまでもそのようなことが想定され設計されています。しかし、問題があるとすれば、「最悪の事象」ということが本当に考えられてきたかということです。現在常用されている「想定外」という言葉には大きな違和感を覚えます。

私はこれまで、超高層建物や野球場、サッカー場などの社会的影響が大きな大規模施設などの設計では、この「最悪の事象」を想定すべきであると主張してきましたが、そのようなことは現実的でないという理由であまり取り入れられていません。今こそ、このような設計におけるパラダイム転換が求められていると思います。1960年代以降、東京には超高層建物が林立していますが、今回の地震で発生した5秒を超えるような長い周期を有する長周期地震動に対して本当に安全であったかどうか未だ明らかになっていません。また、近い将来発生が危惧されている東海地震や南海・東南海では、今回の地震よりも大きな揺れが東京や大阪、名古屋などの大都市を襲うと予想されています。

私達が住む建物の建設は経済活動の一環として行われるため、使えるコストには制限があります。従って、この経済性と安全性をどのようにバランスさせるかが難しい課題であることは確かです。しかし、上記の「最悪の事象」を想定することは必ずしも大きなコストアップに繋がるとは限りません。必要な部分は補強し、不要な部分は取り除くことにより全体としてコストはそれほど上昇しない場合が多いのです。このような設計を行うには、建築構造学の知識と数学の手法を巧みに組み合わせることが必要です。私はこのような「最悪の事象」を想定して建物や原子力施設などを限りなく安全に設計する方法についてこれからも研究を続けていく所存です。

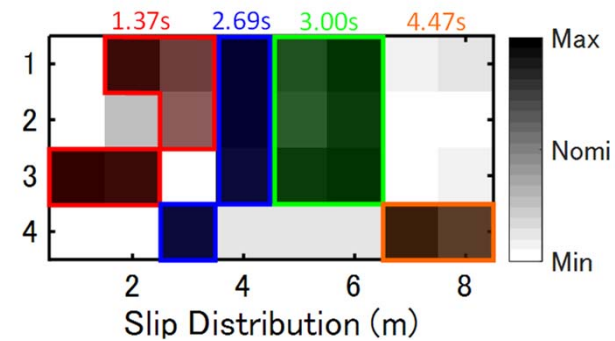
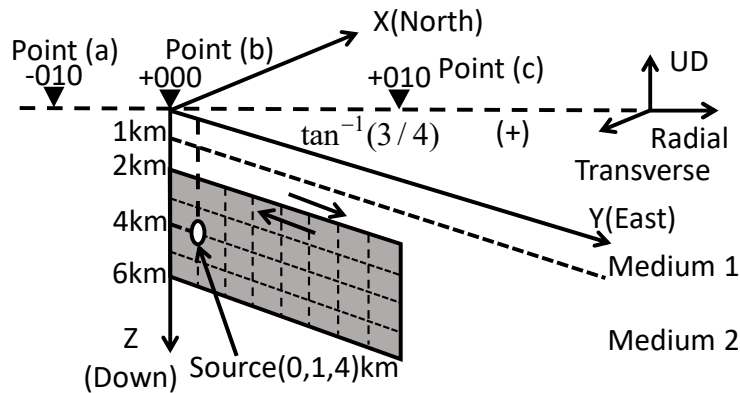
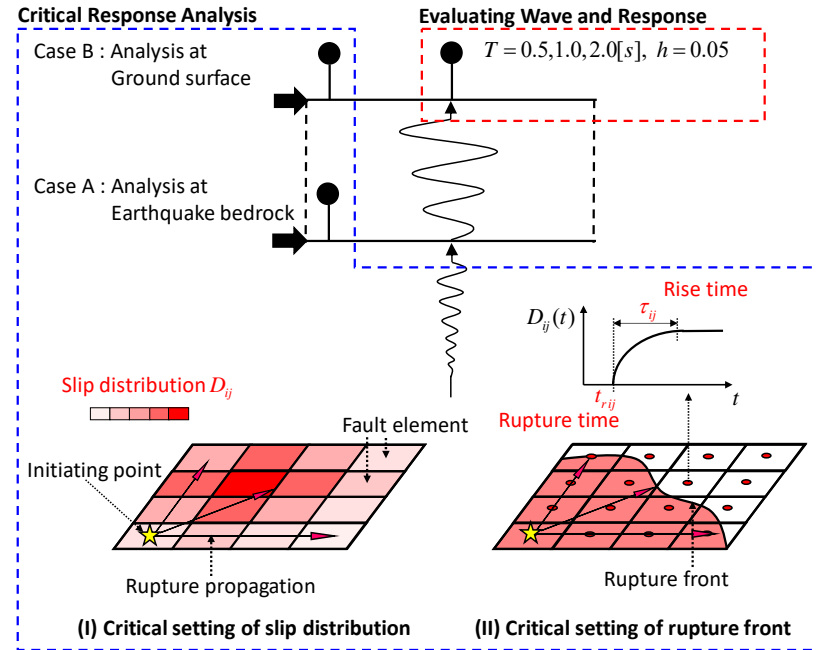
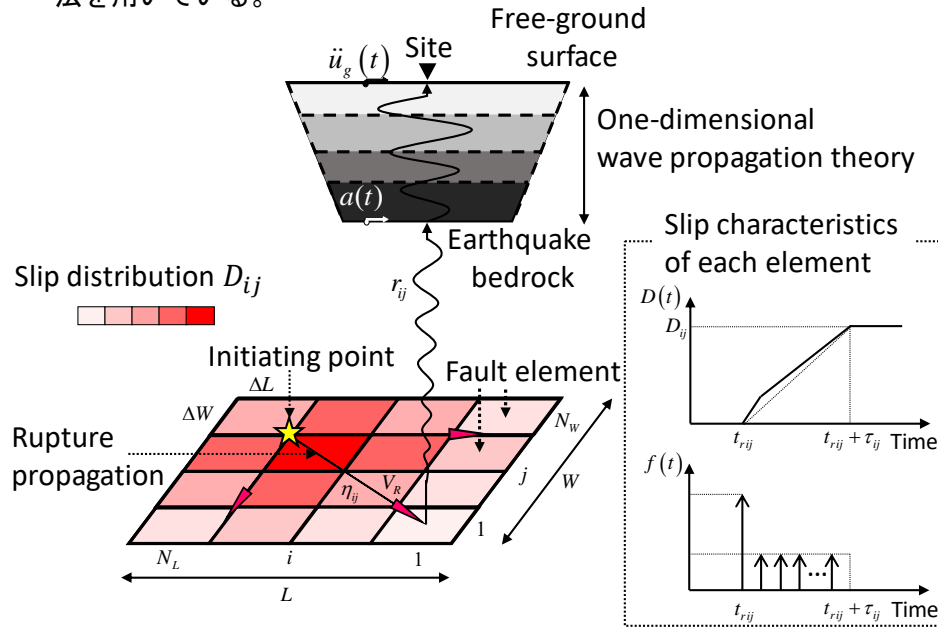
I.Takewaki, *Critical Excitation Methods in Earthquake Engineering, Second Edition*, Elsevier, 2013 (First edition 2006).



地震動の生成メカニズム

極限地震動による方法 (Critical excitation method: 断層破壊を考慮1)

地震動の生成過程は、断層破壊・波動伝播・地盤増幅の3つにより説明される。ここでは、特に断層破壊における不確実性を考慮し、建物にとって最も危険な（応答を最大にする）断層破壊特性を明らかにする方法を提案している。地震動生成解析には統計的グリーン関数法を用いている。



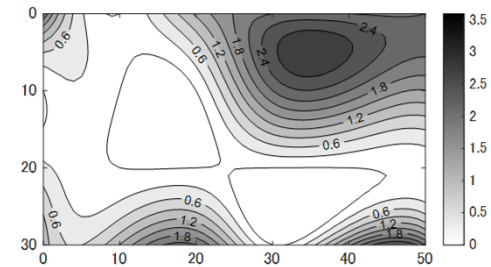
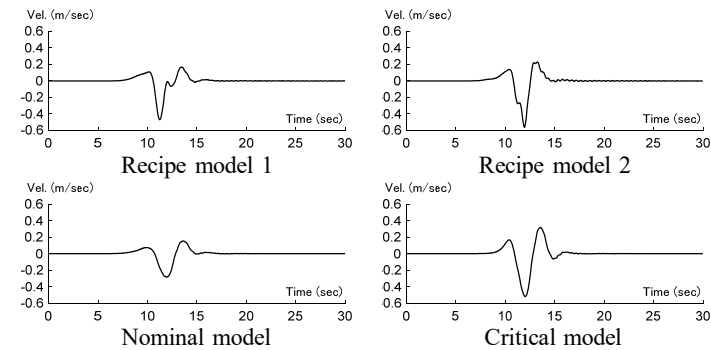
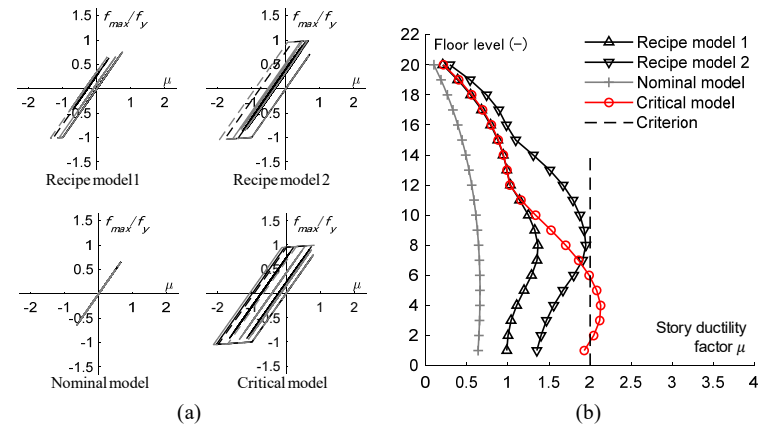
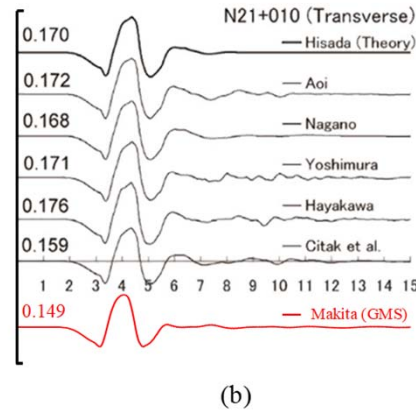
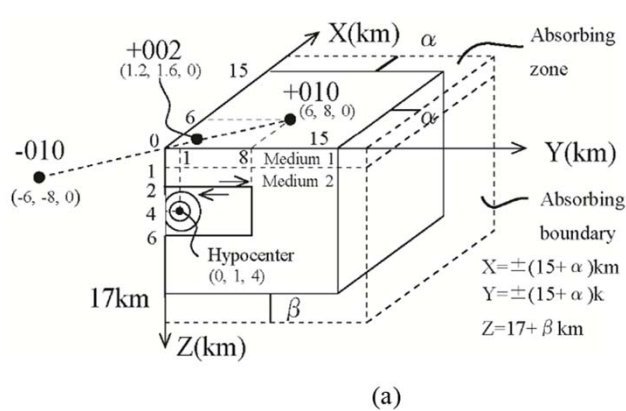
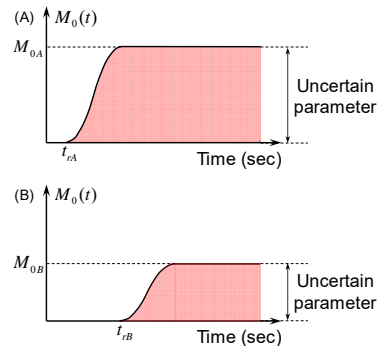
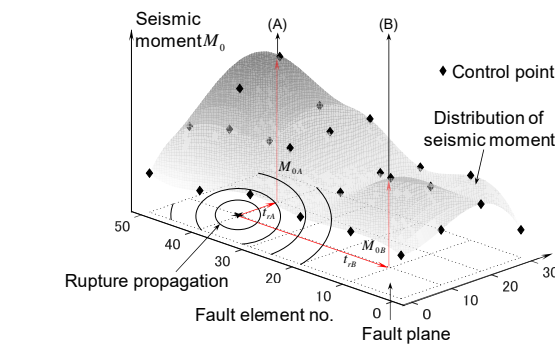
K.Makita, M.Murase, K.Kondo and I.Takewaki, Robustness evaluation of base-isolation building-connection hybrid controlled building structures considering uncertainties in deep ground, *Frontiers in Built Environment*, Volume 4: Article 16, 2018.

K. Makita, K. Kondo, I. Takewaki, Critical ground motion for resilient building design considering uncertainty of fault rupture slip, *Frontiers in Built Environment*, Volume 4: Article 64, 2018.

極限地震動による方法(Critical excitation method: 断層破壊を考慮2)

地震動の生成過程は、断層破壊・波動伝播・地盤増幅の3つにより説明される。ここでは、特に断層破壊における不確実性を考慮し、建物にとって最も危険な(応答を最大にする)断層破壊特性を明らかにする方法を提案している。地震動生成解析には3次元有限差分法(GMS)を用いている。

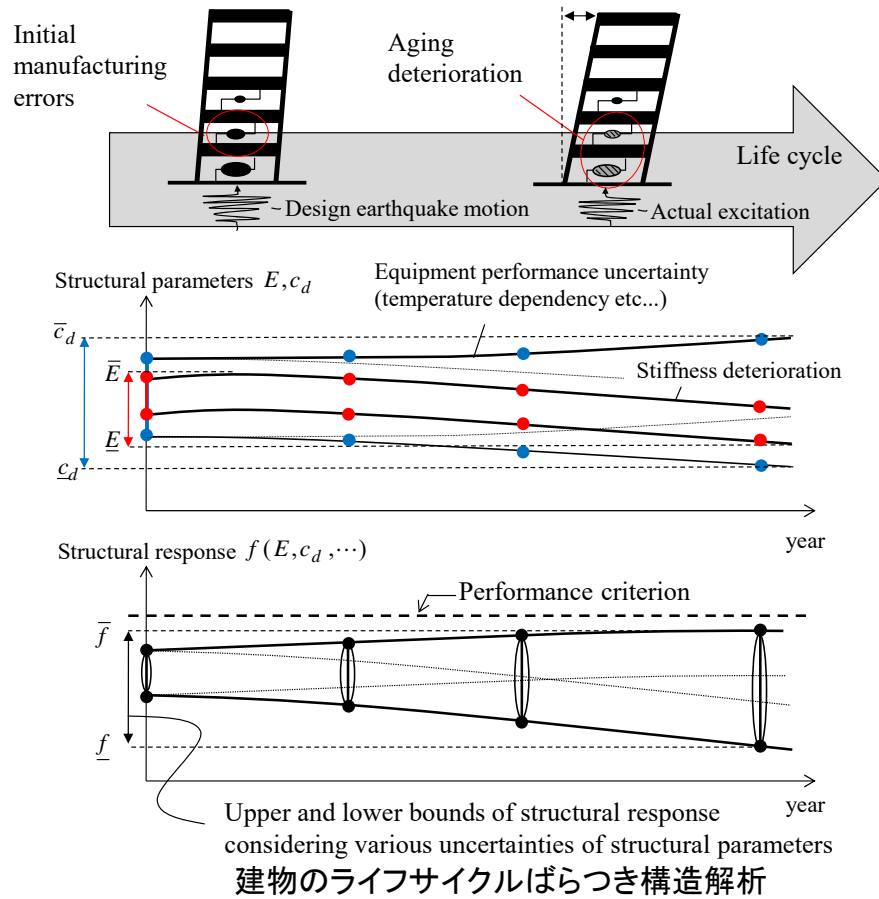
上部建物としては20層のS造建物を想定し、弾塑性応答を考慮している。提示されているレシピモデルとの比較も行い、提案極限外乱法の精度および信頼性を明らかにしている。



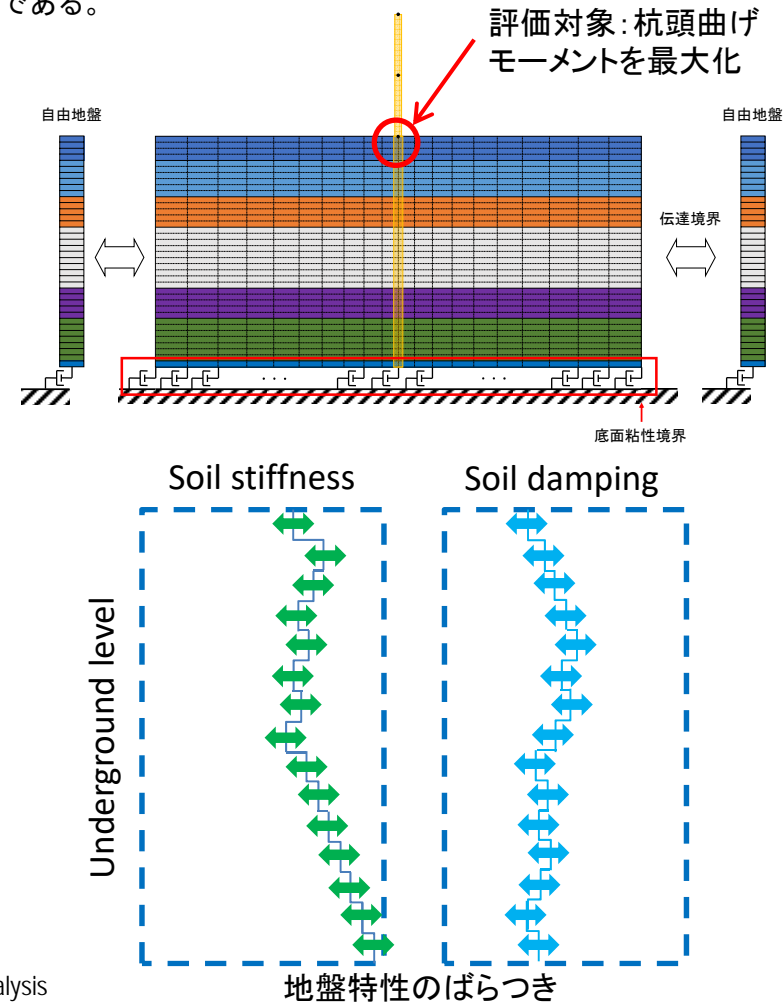
K. Makita, K. Kondo, I. Takewaki, Finite difference method-based critical ground motion and robustness evaluation for long-period building structures under uncertainty in fault rupture, *Frontiers in Built Environment*, Volume 5: Article 2, 2019.

最悪ケース解析 (Worst-case analysis)

下図に示すように、構造部材のヤング係数や寸法さらにはダンパーの減衰係数がばらついた場合の応答のばらつきを効率的に評価する方法を開発している。ばらつきの原因としては、不可避的な物性・寸法のランダム性や経年変化などが考えられる。このようなばらつきを考慮した上で、地震動や風に対する応答を最大化するばらつきの組み合わせを見出すことが要求される。このような解析を区間解析 (interval analysis) と呼ぶ。



地盤特性がばらついた場合の杭応答のばらつきを効率的に評価する方法を開発している。下図は、構造物-杭-地盤系を2次元有限要素法を用いてモデル化した場合について、地盤剛性と地盤減衰の変動幅を示す。このような変動幅において、杭頭曲げモーメントを最大化するようなそれぞれの組み合わせを見出すことが目的である。

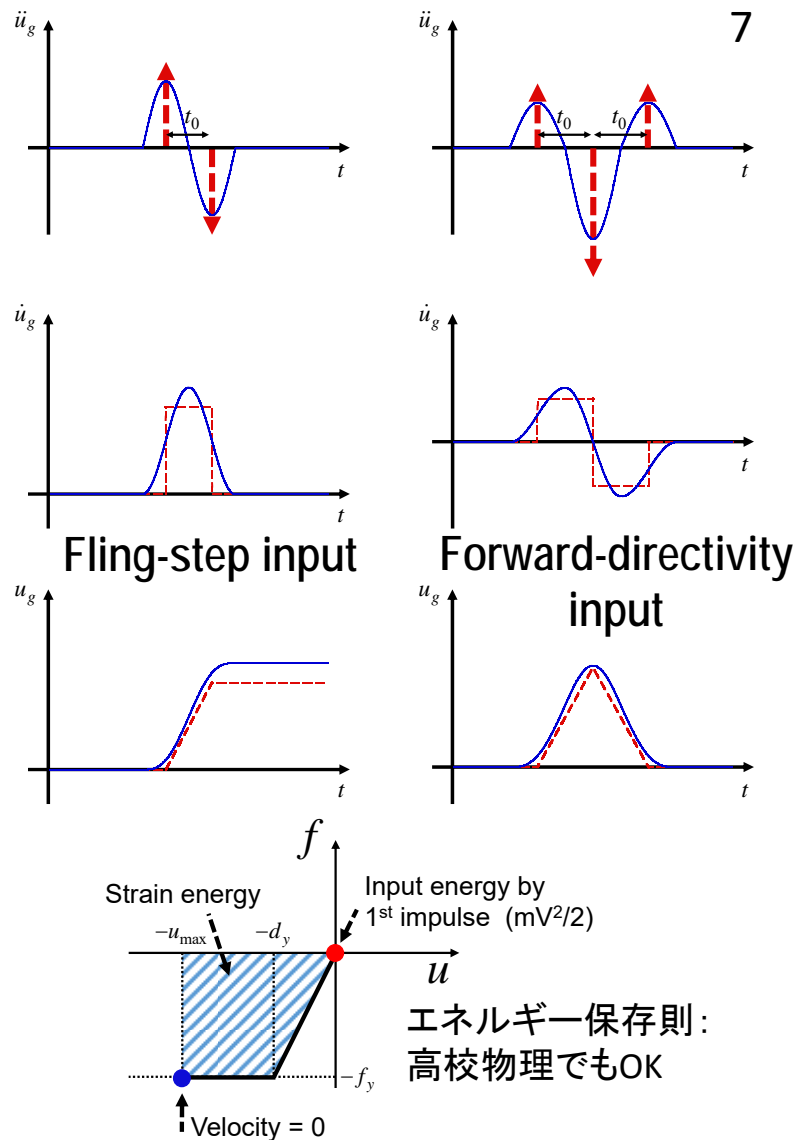
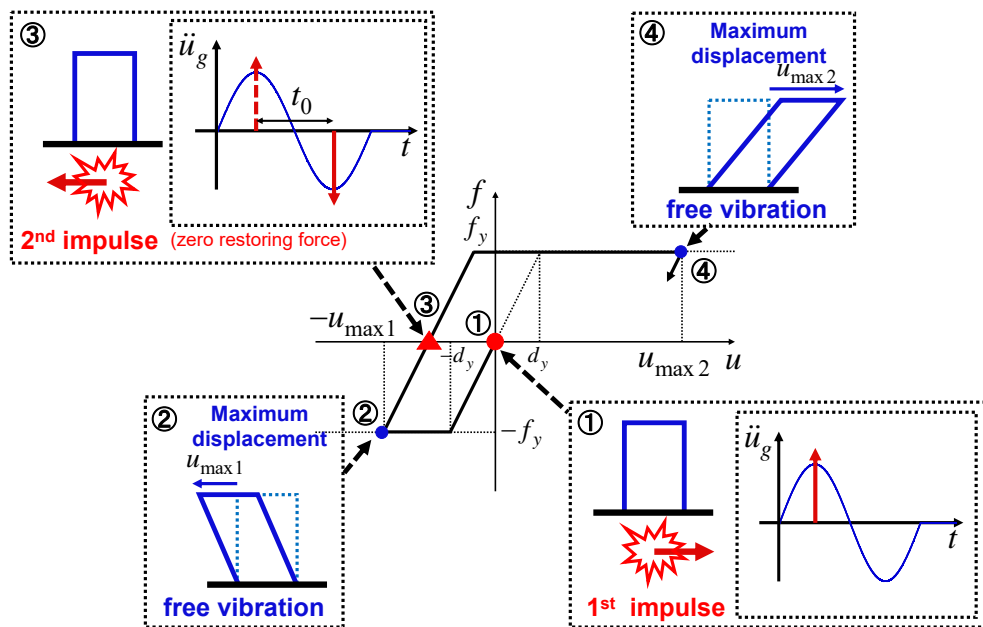
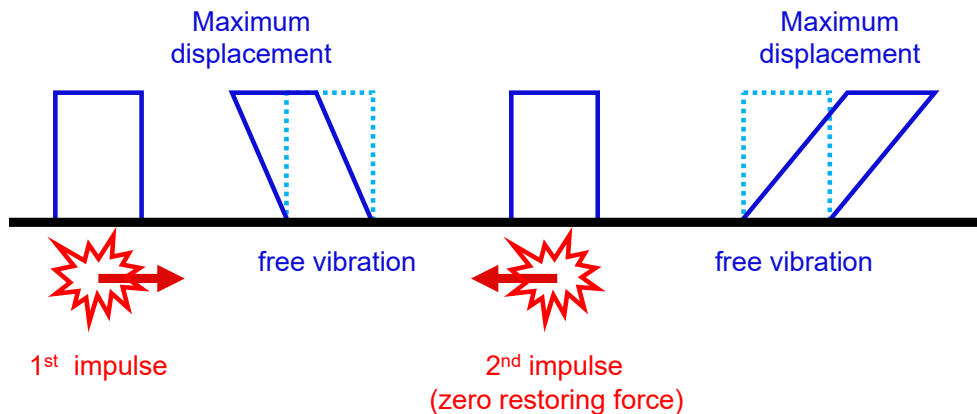


K.Fujita and I.Takewaki, An efficient methodology for robustness evaluation by advanced interval analysis using updated second-order Taylor series expansion, *Eng. Structures*, Vol.33, No.12, 3299-3310, 2011.
 K.Fujita, K.Kojima and I.Takewaki, Prediction of worst combination of variable soil properties in seismic pile response, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015.

T.Okada, K.Fujita and I.Takewaki, Robustness evaluation of seismic pile response considering uncertainty mechanism of soil properties, *Journal of Innovative Infrastructure Solutions (Open Access from Springer)*

断層近傍地震動に対する最悪弾塑性応答 (Worst-case analysis for near-fault motion) – 1

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多数の研究
 成果が存在する。しかし、以下の点で本研究は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、(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)極限的弾塑性応答を陽に導く。

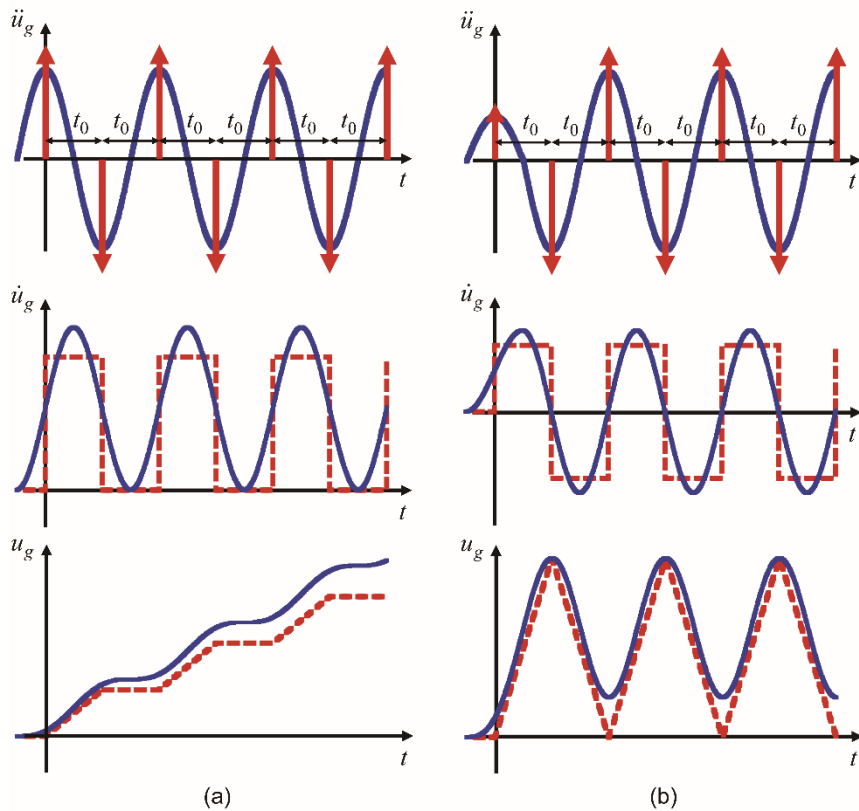


K.Kojima and I.Takewaki, Critical earthquake response of elastic-plastic structures under near-fault ground motions (Part 1: Fling-step input, Part 2: Forward-directivity input), *Frontiers in Built. Environment*, 2015 (Open Access Journal from Nature Publishing Group).

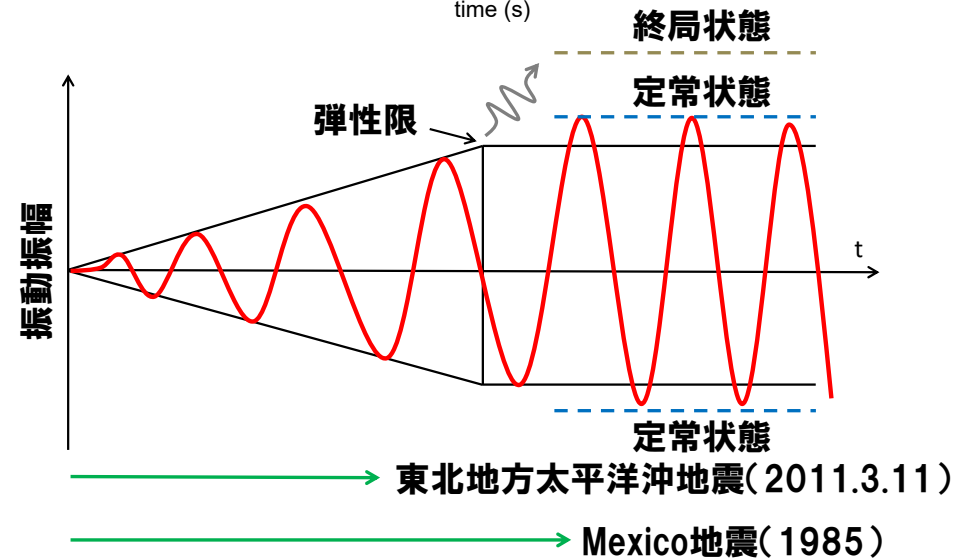
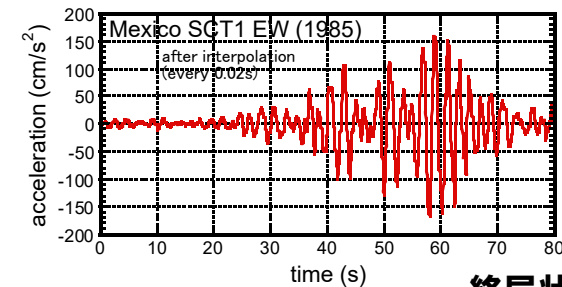
断層近傍地震動に対する最悪弾塑性応答 (Worst-case analysis for near-fault motion) — 2

＜長周期・長時間地震動モデル:マルチインパルス表現＞

2003年の十勝沖地震、2004年の中越地震、2011年の東北地方太平洋沖地震では、1970年頃の超高層建物の設計では考えられていなかった長周期で長継続時間の地震動が発生することが明らかとなり、超高層建物などの長周期建造物の安全性を確保することが喫緊の課題としてクローズアップされてきている。これに対応するために、竹脇らは、多サイクルの正弦波をマルチインパルスにより表現する方法を新たに提案し、1960年頃に米国・カリフォルニア工科大学グループが提案した等価線形化法よりも格段に優れた繰り返しの不要な方法を開発した。以下の点で本研究は際立った独創性を有している。(1)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、(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)極限的弾塑性応答を陽に導く。



マルチインパルスの例



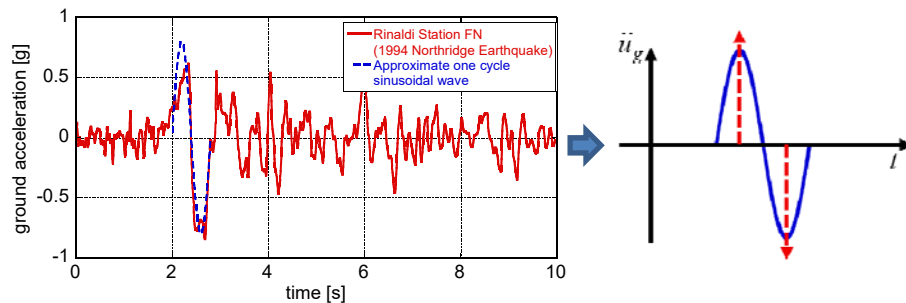
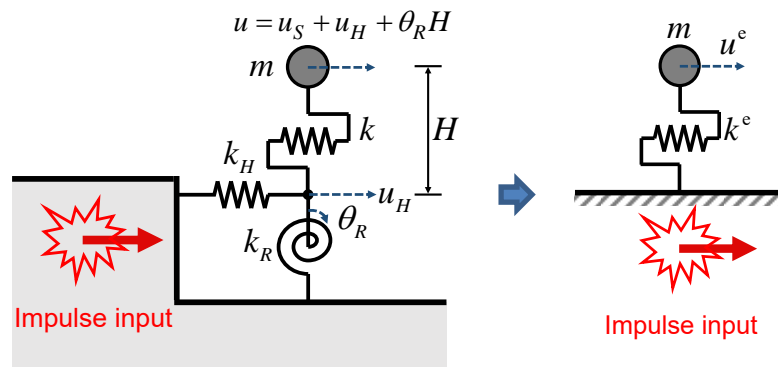
長周期・長継続時間地震動に対する共振のシナリオ

K.Kojima and I.Takewaki, Critical input and response of elastic-plastic structures under long-duration earthquake ground motions, *Frontiers in Built Environment* (Specialty Section: Earthquake Engineering), Volume 1, Article 15, 2015.

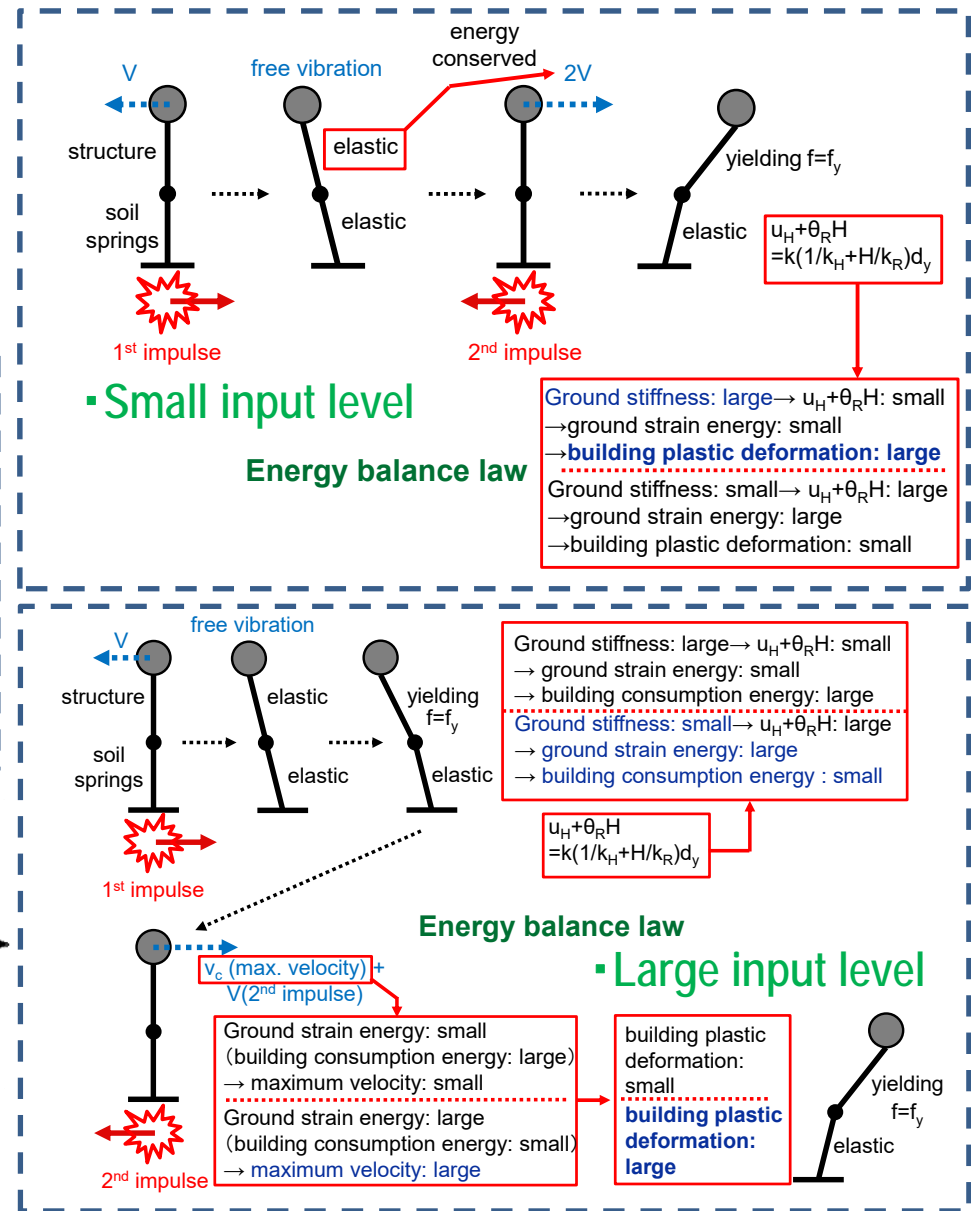
断層近傍地震動に対する最悪弾塑性応答 (Worst-case analysis for near-fault motion) — 3

<地盤・建物動的相互作用モデル>

これまでに、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した弾塑性応答特性については多数の研究結果が存在する。しかし、以下の点で本研究は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、(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)極限的弾塑性応答を陽に導く、(4)地盤特性(硬軟)が構造物応答に及ぼす影響を陽に表現し解明する。



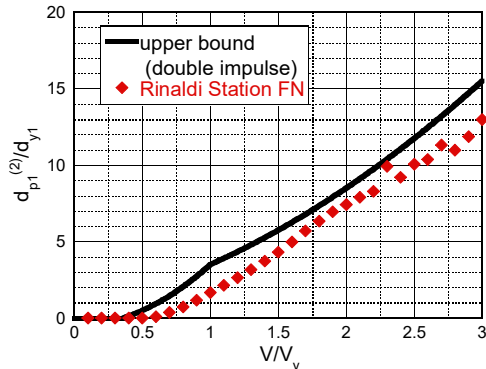
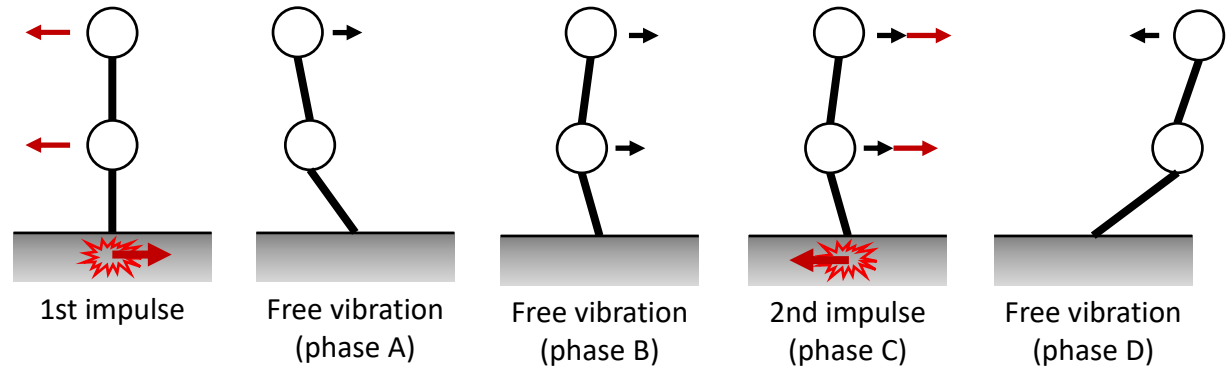
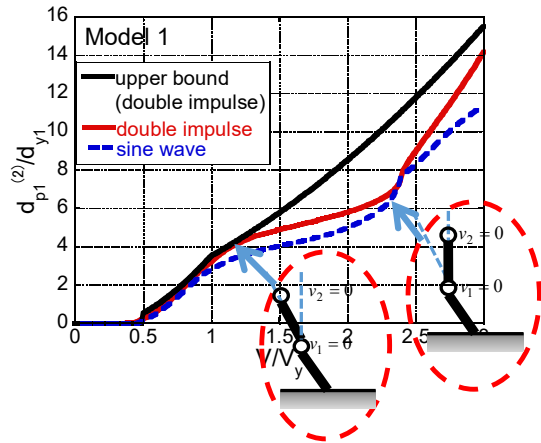
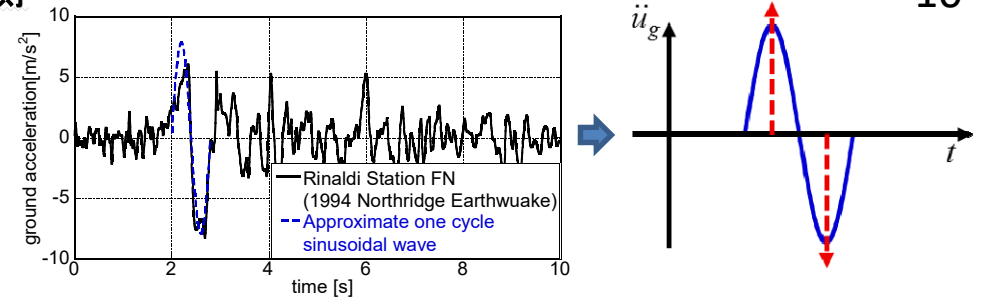
K.Kojima and I.Takewaki, Closed-form critical earthquake response of elastic-plastic structures on compliant ground under near-fault ground motions, *Frontiers in Built Environment* (Specialty Section: Earthquake Engineering), Volume 2, Article 1, 2016.



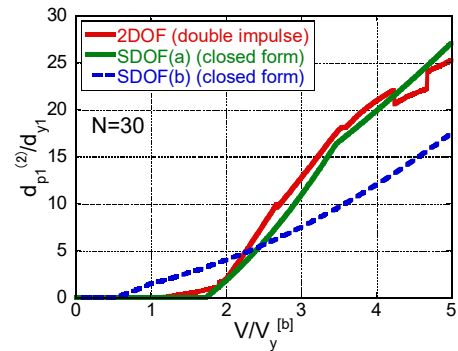
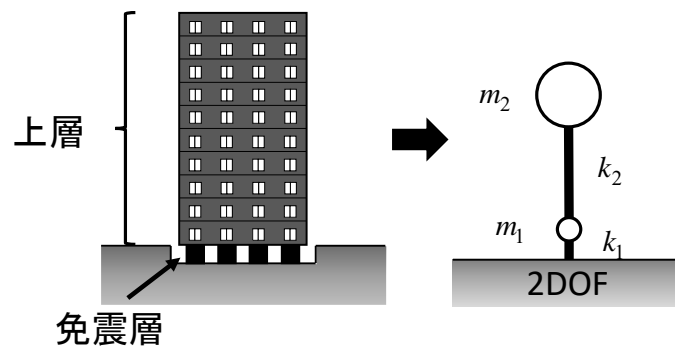
断層近傍地震動に対する最悪弾塑性応答 (Worst-case analysis for near-fault motion) - 4

多自由度モデルへの拡張・高層免震建物の応答予測

1自由度モデルに対する極限外乱理論を多自由度モデルに拡張する。多自由度モデルでは、各質点間の位相差が存在するため、1自由度モデルよりも格段に高度な理論展開が必要となる。極限的タイミングを理論的に解明し、不確定な部分はConvex Modelにより扱う。



記録地震波への適用



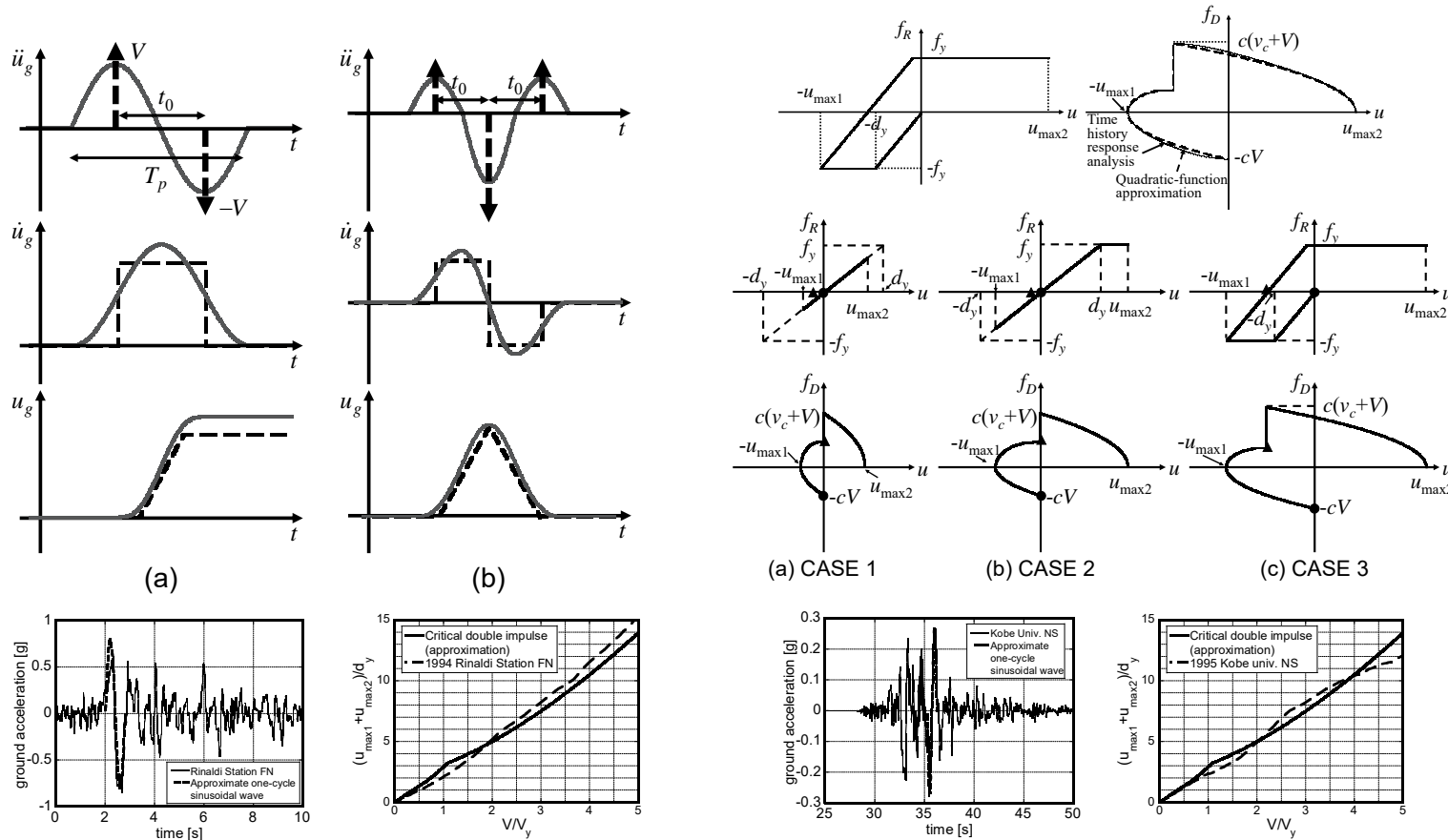
超高層免震建物への適用

R.Taniguchi, K.Kojima and I.Takewaki, Critical response of 2DOF elastic-plastic building structures under double impulse as substitute of near-fault ground motion, *Frontiers in Built Environment* (Specialty Section: Earthquake Engineering), Volume 2, Article 2, 2016.

断層近傍地震動に対する最悪弾塑性応答 (Worst-case analysis for near-fault motion) – 5

主構造の弾塑性応答を考慮した粘性系ダンパーの最適配置問題

粘性系ダンパーの一つであるオイルダンパーでは、主構造への影響を考慮して、ある一定の速度に達すると減衰係数を小さくするリリース機構というメカニズムを導入する場合が一般的である。ここでは、このようなダンパーの非線形特性を近似的に表現してこのような非線形ダンパーを有する制振建物の断層近傍地震動（ダブルインパルスで近似）に対する最大応答を極めて効率的に数式表現として求める方法を提案している。



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82巻, 第735号, pp643-652.

G. Tamura, K. Kojima, I. Takewaki, Critical response of elastic-plastic SDOF systems with nonlinear viscous damping under simulated earthquake ground motions, *Heliyon*, 5, e01221. doi:10.1016/j.heliyon.2019.e01221, 2019.

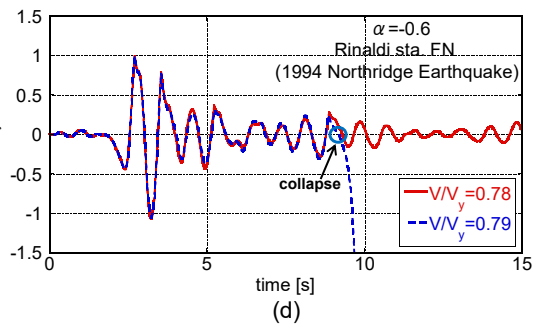
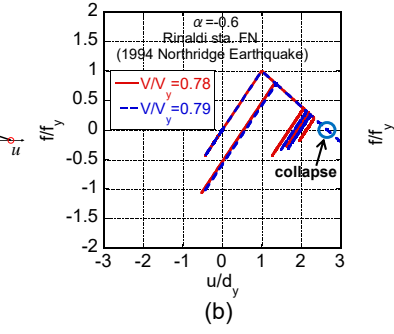
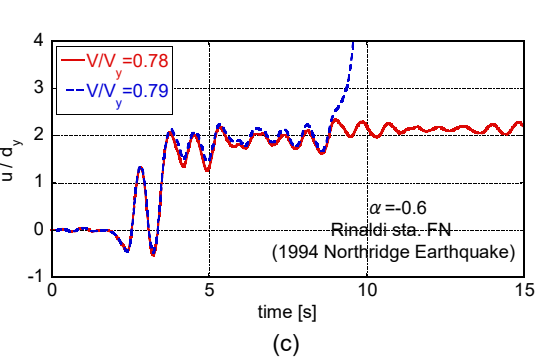
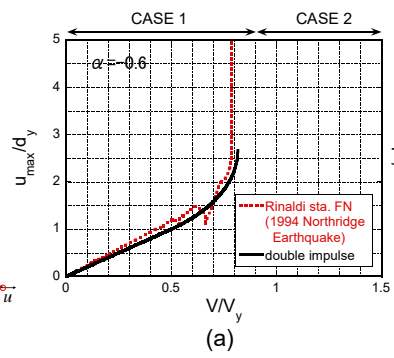
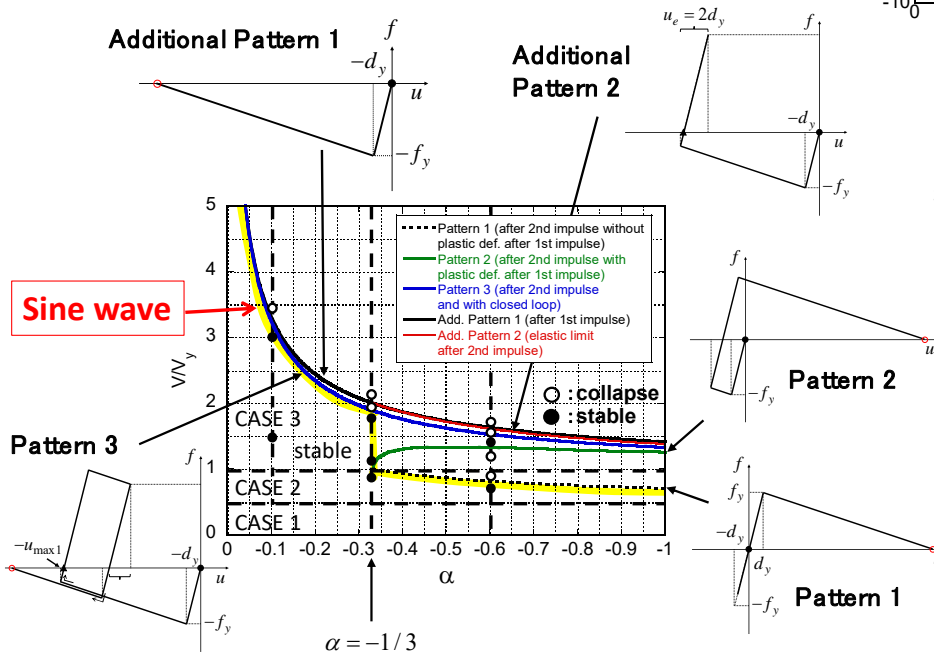
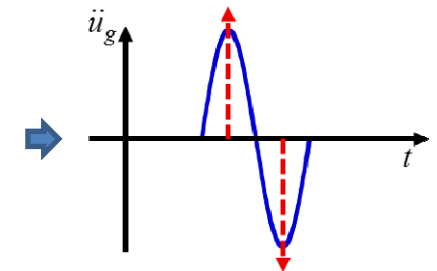
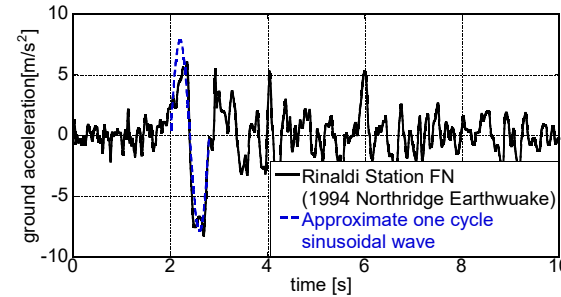
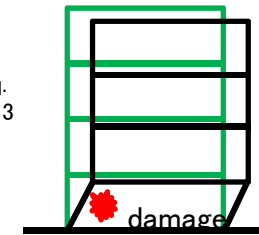
断層近傍地震動に対する最悪弾塑性応答 (Worst-case analysis for near-fault motion) – 6

<倒壊限界(P-Δ効果考慮)>

直下型地震動を受ける構造物の倒壊(動的安定)に関する研究は、1965年のJenningsとHusidの研究以来、多くの成果が蓄積されている。本研究では、直下型地震動をダブルインパルスに置換し、そのダブルインパルスに対する理論を世界で初めて展開している。入力の限界レベルを数式を用いて簡易的に明らかにする画期的研究成果である。直下型地震動の主要部分をモデル化した1サイクル正弦波による解析結果とも比較し、ダブルインパルスに対する理論の精度を検証している。また、記録地震動に対する応答解析も行い、提案する倒壊限界(安定限界)が高い精度を有することを確認している。



From Chock et al., Earthq. Spectra, 2013

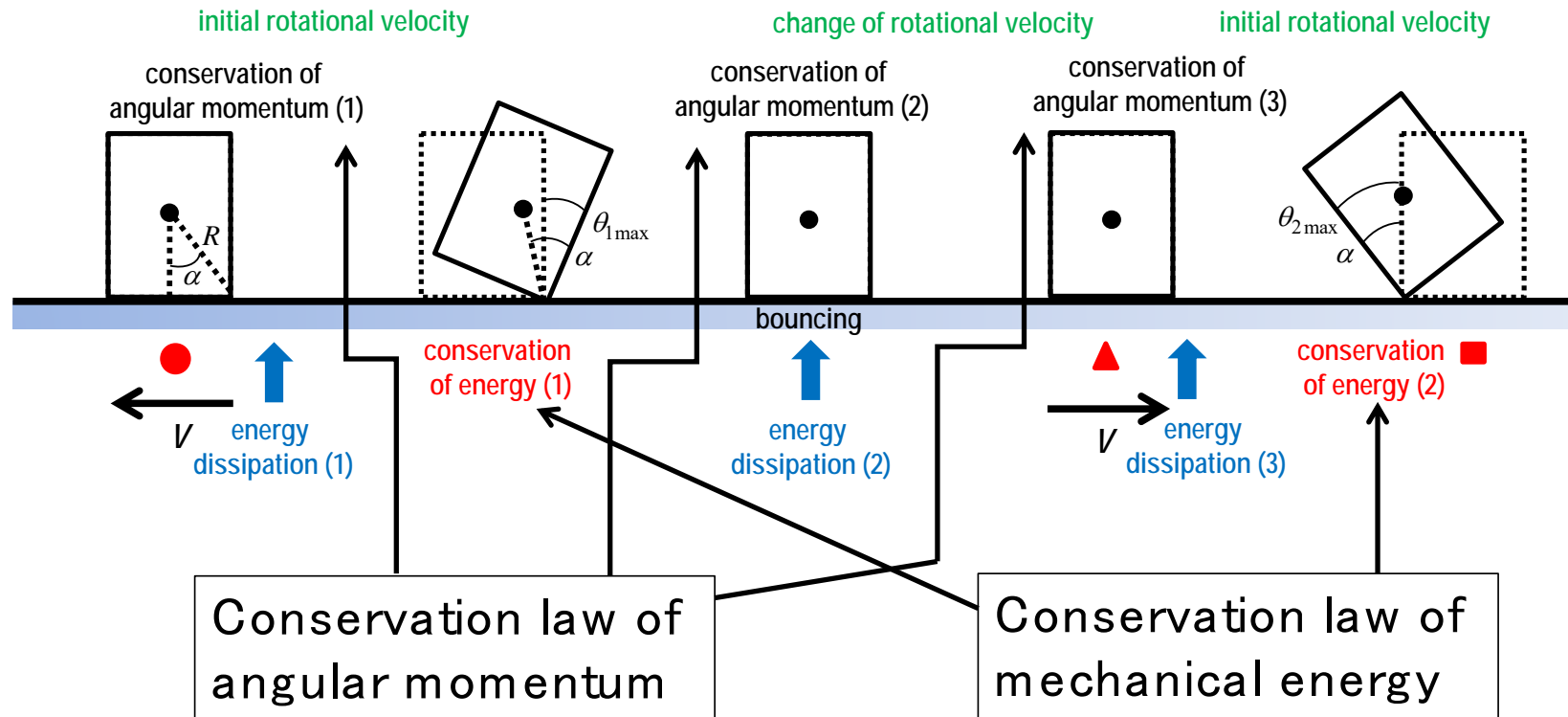


K. Kojima and I. Takewaki, Closed-form dynamic stability criterion for elastic-plastic structures under near-fault ground motions, *Frontiers in Built Environment* (Specialty Section: Earthquake Engineering), Volume 2, Article 6, 2016.

断層近傍地震動に対する最悪弾塑性応答 (Worst-case analysis for near-fault motion) – 7

< ロッキング振動における転倒限界 >

高校、大学・学部レベルの知識で説明可能

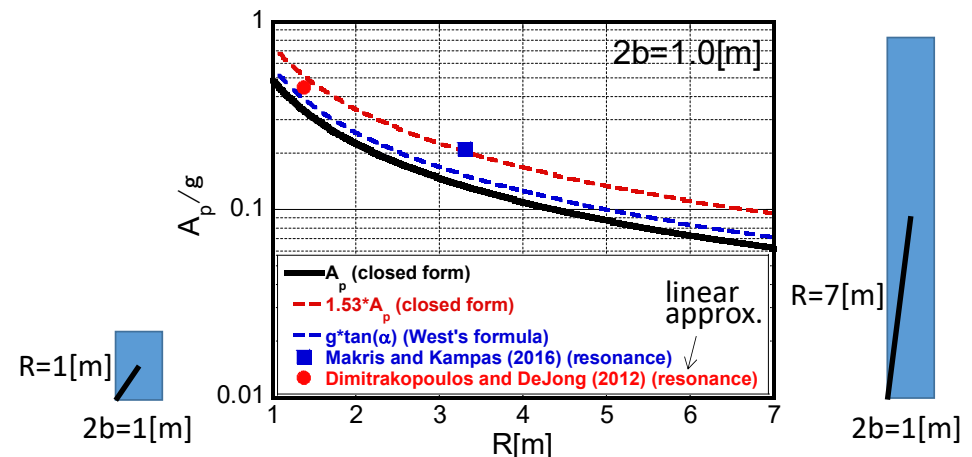


Conservation law of angular momentum

Conservation law of mechanical energy

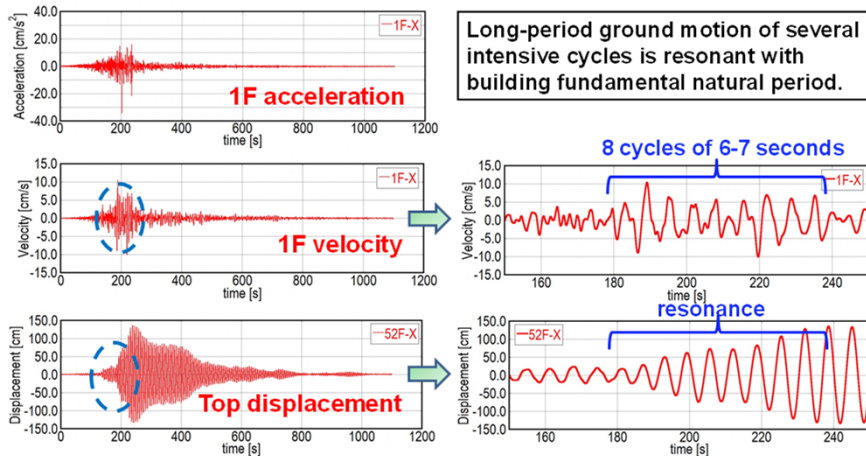
構造物の地震動に対するスケール効果に関する重要な事項を含んだ問題である。すなわち、超高層免震建物の安全性、墓石の転倒問題、家具の転倒問題等、多くの問題に適用可能な課題である。1885年のMilneの研究や、1963年のHousnerの先駆的な研究以来、これまでは、実験と数値シミュレーションに基づく研究が主流であったが、本論文では、共振に着目した理論的な検討を行い、構造物の地震動に対するスケール効果を数式で表現した。同じ地震動を対象とする場合、構造物は大きいほど転倒しにくい(大きな地震動レベル(速度レベル)が必要)ことを世界で初めて理論的に明らかにした。

K.Nabeshima, R.Taniguchi, K.Kojima, I.Takewaki, Closed-form overturning limit of rigid block under critical near-fault ground motions, *Frontiers in Built Environment* (Specialty Section: Earthquake Engineering), Volume 2, Article 9, 2016.

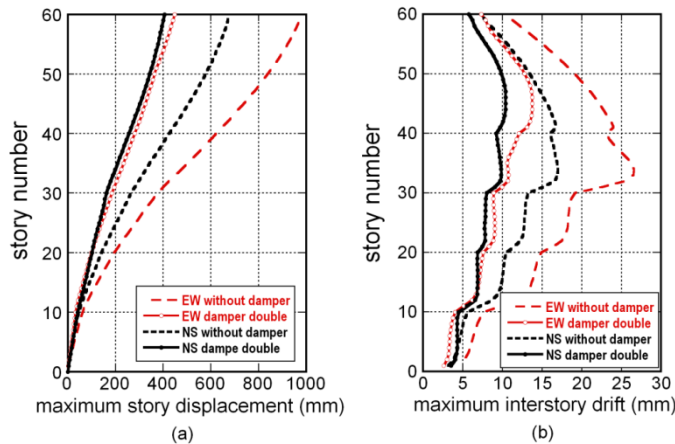


制振-1 (Passive structural control-1)

日本発の「制振（震）」という考え方で、
長周期地震動の「共振現象」対策の研究を行っています。



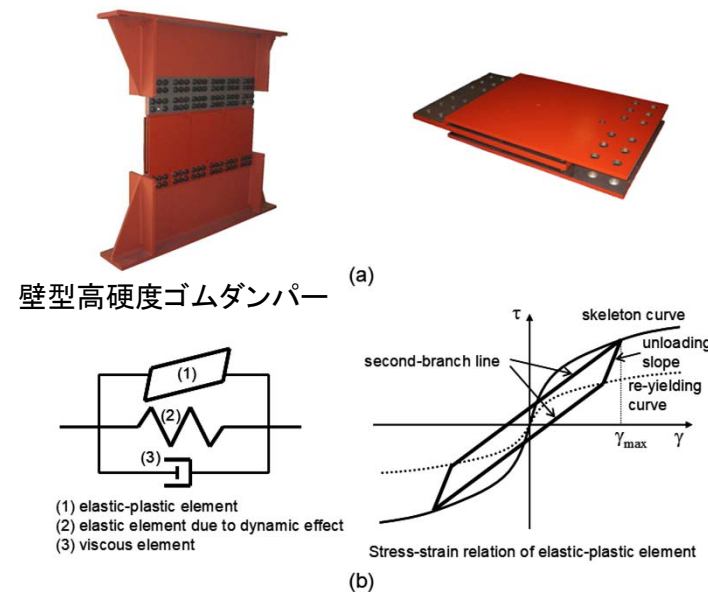
超高層建物の地震時共振現象(世界初の観測)



高硬度ゴムダンパーによる制振効果

I. Takewaki et al., The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and response of high-rise buildings under long-period ground motions, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 2011.

地震で建造物が破壊される大きな原因のひとつが「共振」です。建物の固有振動数と同じ周期の地震動を受けた場合に、振動が増幅される現象ですが、いま私が研究しているのは、2~10秒周期の「長周期地震動」の共振を抑制するための研究です。免震システムは条件が揃った場合、有効に機能する地震対策ですが、長周期地震動と共振を起こすことが懸念されています。この共振を「制震技術」で抑えようというのが私の研究になります。高層ビルの多くは制振構造を備えています。ここに免震システムを組み合わせる「ハイブリッドタイプ」の有効性を模索しています。近い将来の発生が予測されている「南海トラフ」を震源とする巨大地震の場合、揺れはそれほど大きくならないものの、長周期地震動が発生することが懸念されていますので、この研究が寄与することを願っています。実際に40階建て超高層ビルを対象としたシミュレーション実験でも、制震ダンパーがある場合の方が、ない場合に比べて、揺れの度合い、揺れの時間、梁や柱の損傷の全てにおいて優位に安全性が高いことが分かりました。また、制震ダンパーがある場合には、長周期地震動による躯体の残留変形も免れることができたのです。これは、私が共同研究をしている制震ダンパーの1つである以下に示す粘弾性型の高硬度ゴムの作用によって、振動の周期を変えることが可能となり、共振を避けているためであると考えられます。共振対策や長周期地震動対策は2003年頃から注目を集めるようになってきています。

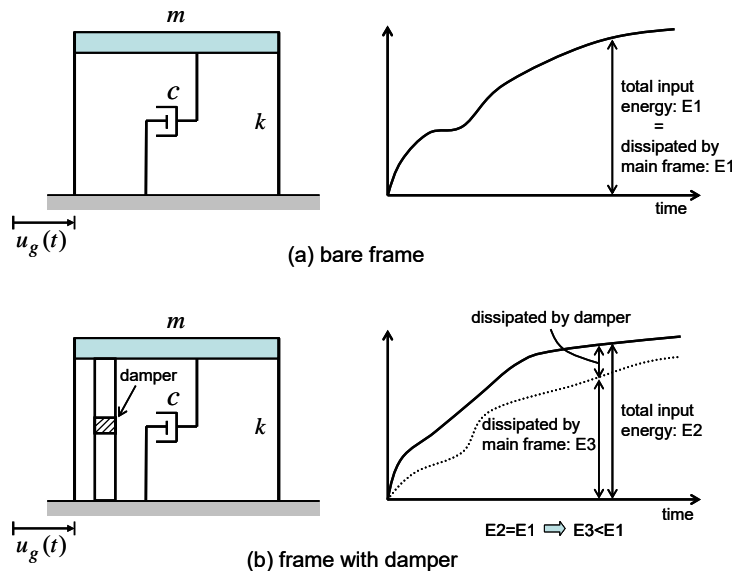


制振-2 (Passive structural control-2)

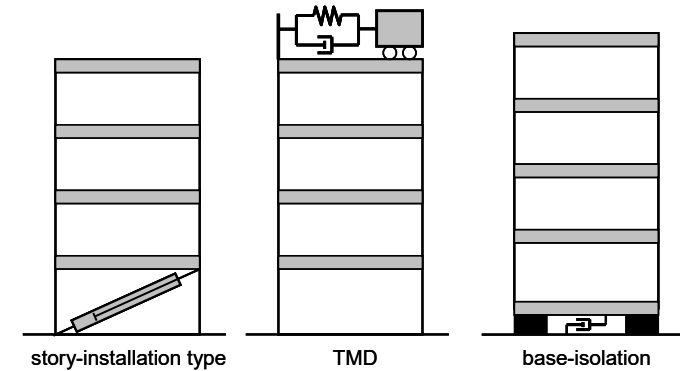
ダンパーの効果的・効率的な配置に関する研究

制振構造に関する研究では、それに用いるダンパーの性能に関するものが主流ですが、それらのダンパーを如何に**効率的・有効**に建物に組み込むかの研究もさかに行われています。下図に示すように、地震による入力エネルギーの観点から、ダンパーにより消費されるエネルギーが増えると主体骨組に入力されるエネルギーを低減できることがわかります。本研究室では、この分野で世界をリードしています。これまでに、オイルダンパー、履歴ダンパー、慣性質量ダンパー、高硬度ゴムダンパーなどの最適配置に関する研究や、これらを同時に用いた場合の最適な組み合わせに関する研究も世界最先端のものとして追求しています。さらには、英国の研究者と共同で、非線形ダンパーの最適な配置に関する研究も推進しています。

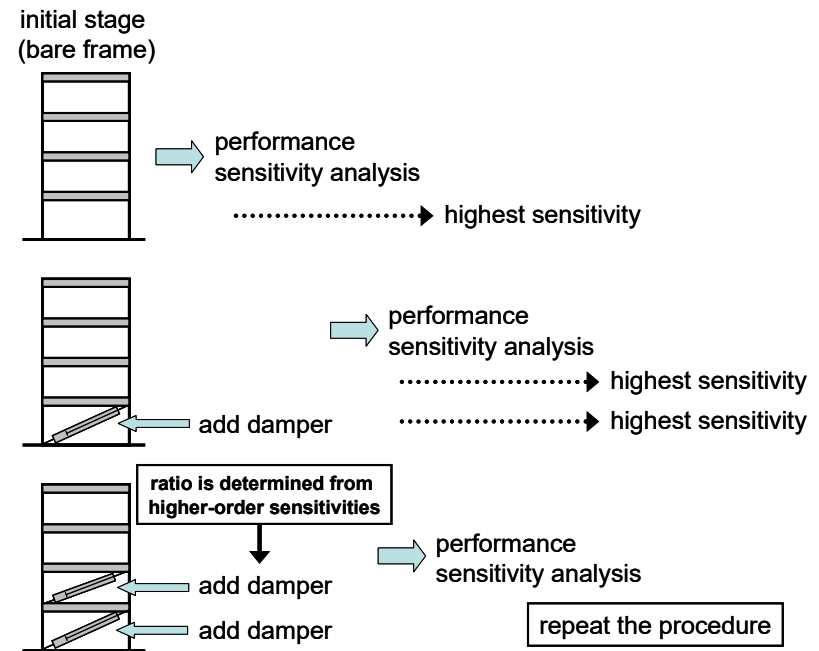
右図には、層間に設置するダンパー、TMD(tuned mass damper)、免震などの各種制御タイプを示し、その下には、感度を用いた本研究室独自の世界最先端の最適な手法の概念図を示しています。



Theoretical backbone of effectiveness of supplemental dampers



Three principal installation types of passive dampers

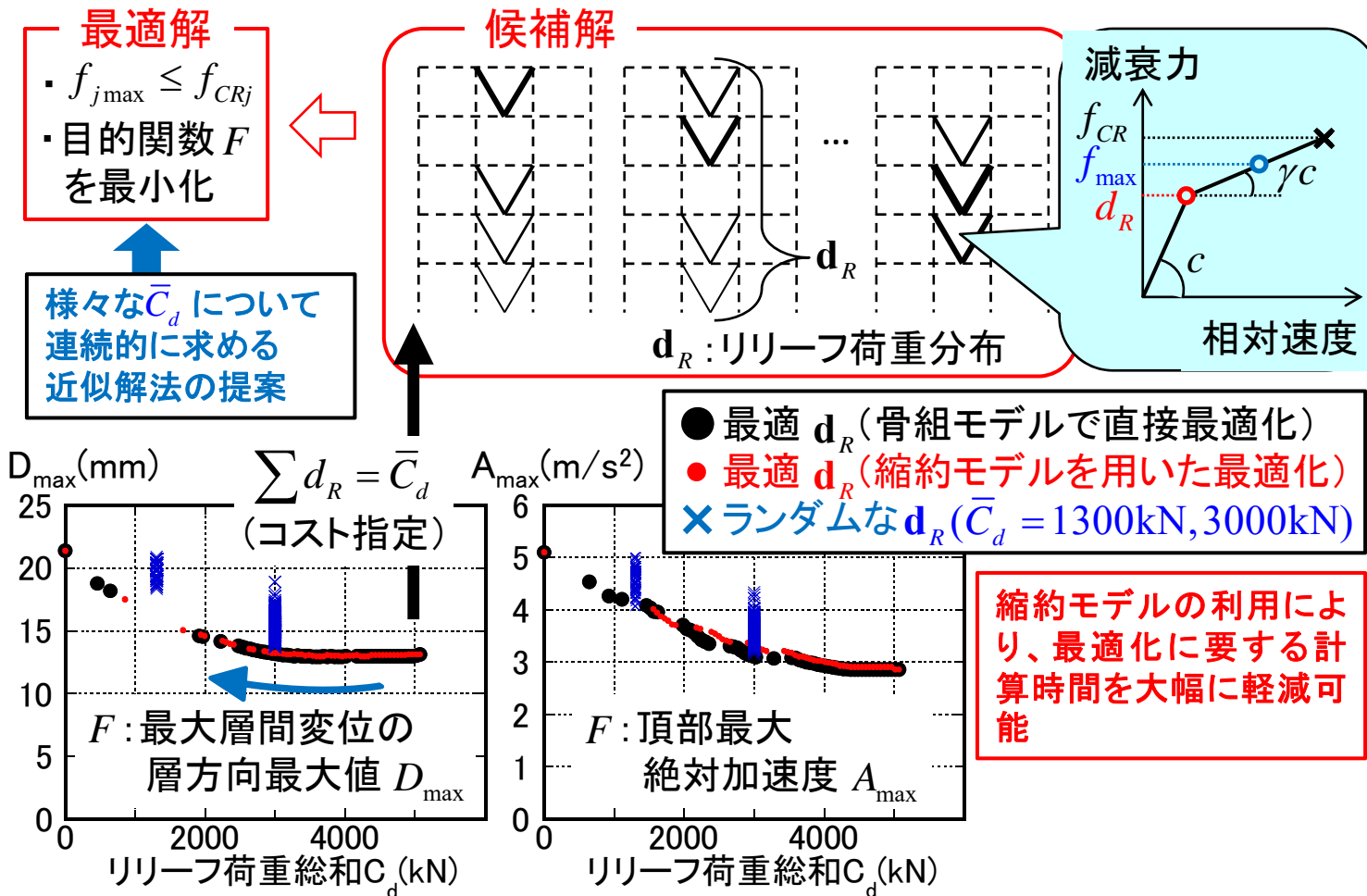


A representative schematic diagram of optimization procedures explained in this book

静的縮約を利用したオイルダンパーの最適リリース荷重決定問題

オイルダンパーでは、周辺骨組への負担軽減やダンパー装置自身への負担軽減の観点から、ダンパーに作用する力がある力に達すると減衰性能を低下させるいわゆるリリース機構を設定することが通常です。このリリース荷重をどのような値に設定するかがオイルダンパーの設計にとっては重要な要因となります。本研究室では、以下のように、リリース機構を設けないいわゆる線形ダンパーから出発して、感度解析に基づき最適なリリース荷重を逐次見つける世界最先端の方法を提案しています。

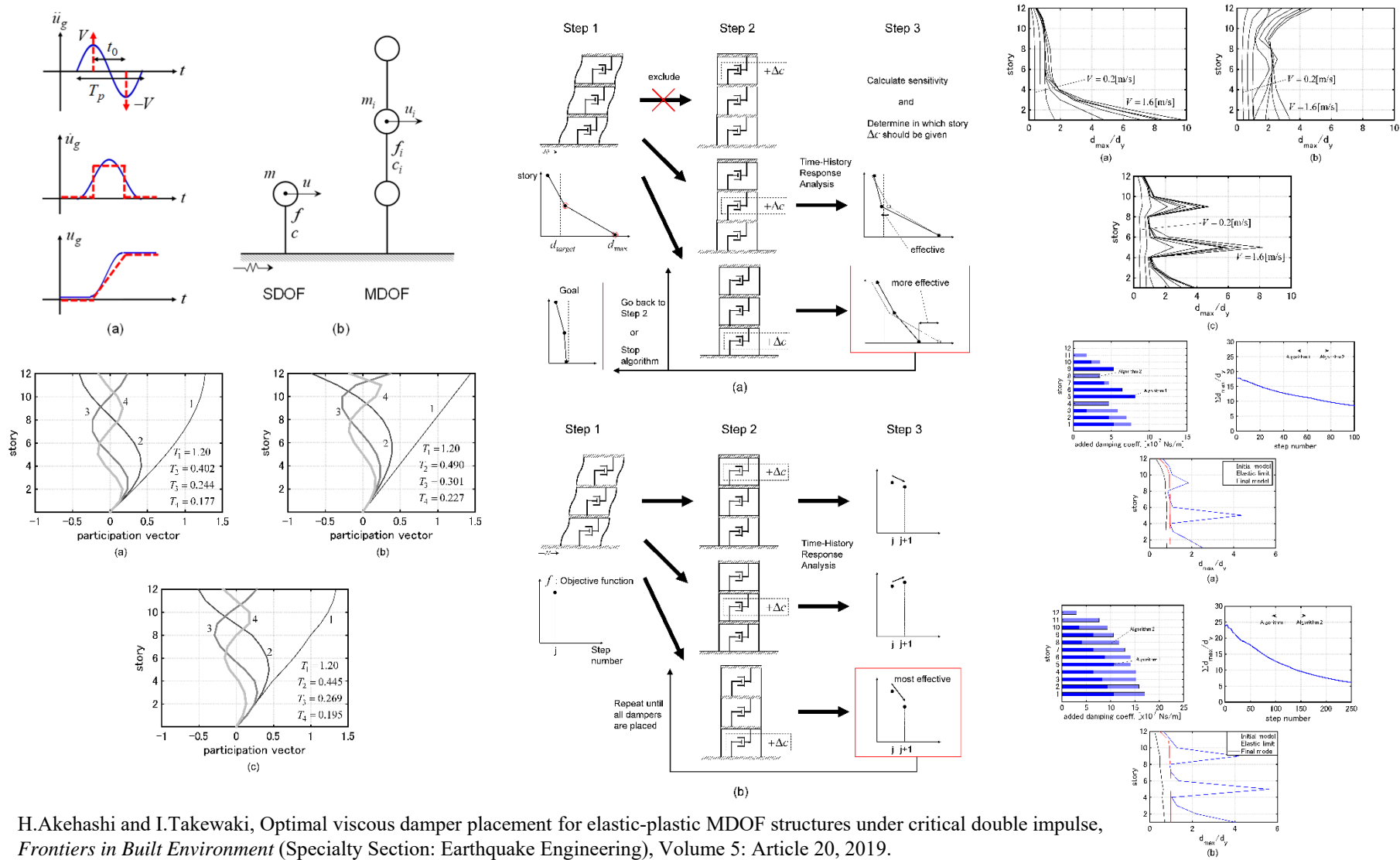
研究成果: F. Adachi et al., Nonlinear optimal oil damper design in seismically controlled multi-story building frame, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012.



制振-4 (Passive structural control-4)

主構造の弾塑性応答を考慮した粘性系ダンパーの最適配置問題

主構造が弾性の場合には、応答が比較的安定するため、最適化の過程においても安定した特性を有する。しかし、主構造が弾塑性応答を呈する場合には、ダンパー量・分布の変動に対して不安定になりやすい。ここでは、ダブルインパルスを有効に利用した方法を提案している。



H.Akehashi and I.Takewaki, Optimal viscous damper placement for elastic-plastic MDOF structures under critical double impulse, *Frontiers in Built Environment* (Specialty Section: Earthquake Engineering), Volume 5: Article 20, 2019.

制振-5 (Passive structural control-5)

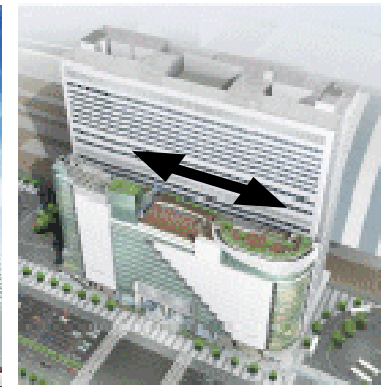
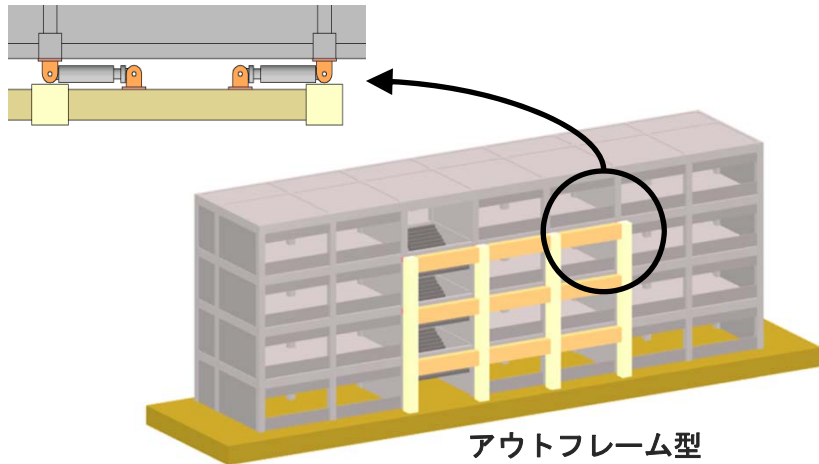
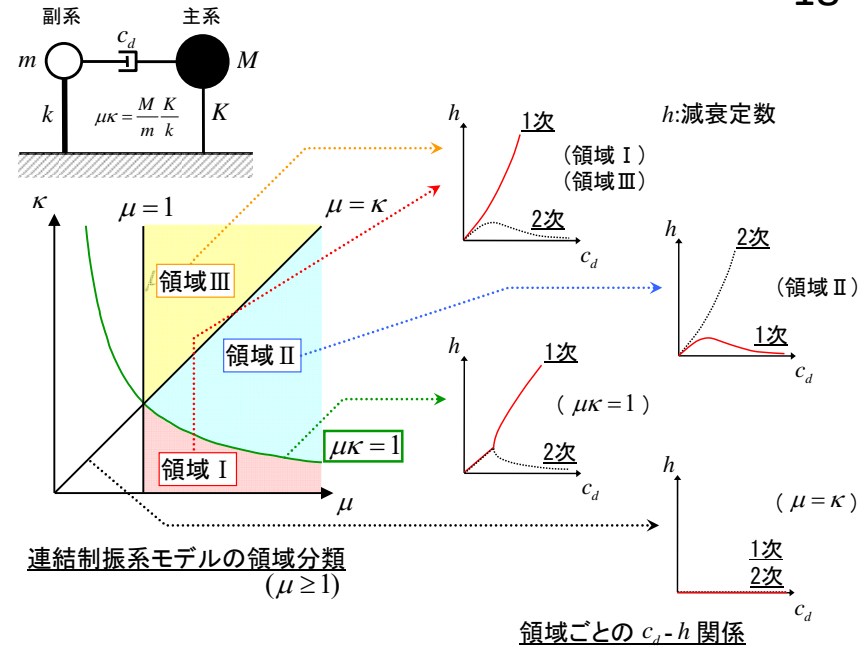
2棟の建物を連結して耐震性能を向上

建物は固有の振動周期を有していますので、異なる振動周期を有する2棟の建物をダンパーなどで連結すると、互いに影響を及ぼしあって、両方の建物の地震動に対する性能を自然と向上させることが可能となります。このような制振システムを連結制振構法と呼びます。最近では、高層建物から低層建物まで幅広い建物についてこの連結制振構法が利用される機会が増えています。

本研究室では、その力学的原理から実際の建物への適用まで、幅広い領域でその有効性を明らかにする研究を進めています。右図は、連結制振のパラメータによる挙動特性（減衰定数）の分類を行った例を表しています。

下図（左）は耐震改修が必要な既存建物の外部にアウトフレームを新設し、建物との間にオイルダンパーなどを設置して連結することにより、既存建物の耐震性能を飛躍的に向上させることが可能となっています。一方、下図（右）は、高層側の既存建物との連結を有効に利用して、それに隣接して新築する中層建物の耐震性能を大幅に向上させることを目的としています。

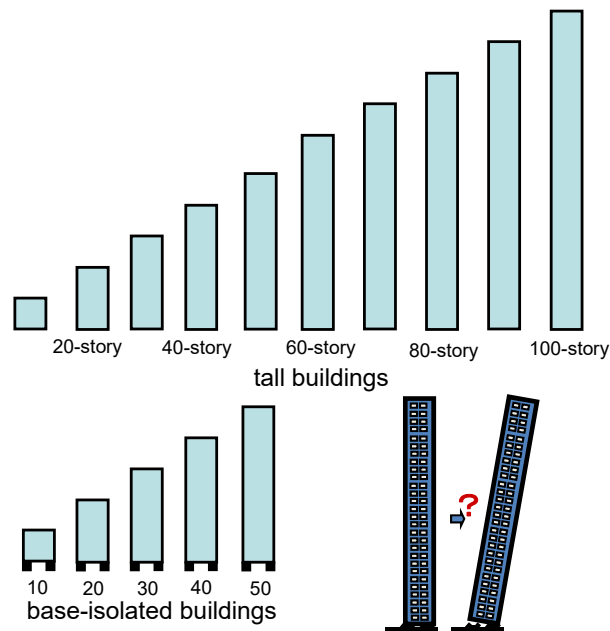
研究成果：満田衛資，大淵充紀，辻 聖晃，竹脇 出，連結制振構法を用いた建物の固有振動および減衰に関する基本特性，日本建築学会構造系論文集，2014年2月，第79巻，第696号，pp227-236.



2棟連結型（実施例）(<http://2011osaka.com/acty/>)

免震建物で 사용되는アイソレータ（免震ゴム）は、圧縮には大きな抵抗を示すが、引張に対してはほとんど抵抗を示さない。従って、下図のように、アスペクト比（高さ／建物幅）が大きくなると、免震層には大きな転倒モーメントが作用するため、アスペクト比の限界値が存在すると予想される。本研究では、その限界を見出す簡易的で有効な方法を提案する。アイソレータに関する制約には、長期荷重時の応力（圧縮）、地震時の応力（圧縮および引張）、アイソレータの水平変形などがある。

大都市圏で急増している超高層免震建物が、表面波により励起される長周期地震動に対して十分な耐震安全性を有するかどうかについて、最悪シナリオを想定し科学的に明らかにする。

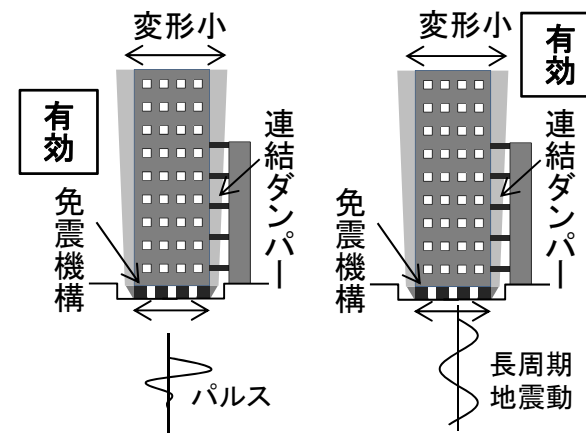


限界アスペクト比の解明

T.Ariga et al., Resonant behavior of base-isolated high-rise buildings under long-period ground motions, *The Struct. Design of Tall and Special Build*, 2006.

本研究は、建築構造設計において最近多用されている、免震構造および連結制振構造の両者を組み合わせたハイブリッド構造システムについて、その地震時応答低減特性を詳細に解明し、提案ハイブリッドシステムの連結ダンパー量決定法を提案したものである。免震構造や連結制振構造についての研究は数多くなされているが、それらを組み合わせたハイブリッドシステムの詳細な検討はほとんど見られない。本研究では、特定の記録地震動に対する応答特性の把握にとどまらず、模擬パルス波や模擬長周期地震動などの幅広い特性を有する地震動に対する検討を行い、本システムがハイブリッド化されていることによりロバスト性を有することを明らかにしている。また、2質点非減衰系モデルを使用する従来の定点理論の問題点を指摘し、2棟の高さの差異や高次モードの影響を考慮した新しい補正案を提案している。

本研究の成果を纏めた論文は国際専門誌にも採用され、その独創性と完成度の高さから、査読者より高い評価を得ている。さらに、日本建築学会の優秀修士論文賞や日本免震構造協会の優秀修士論文賞を受賞している。



ハイブリッド構造(免震と制振)

M.Murase et al., Smart passive control of buildings with higher redundancy and robustness using base-isolation and inter-connection, *Earthq. and Structures*, 4(6), 649-670, 2013.

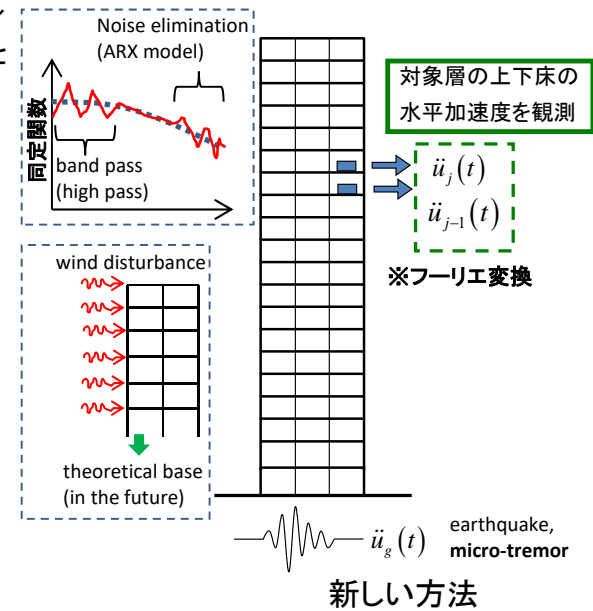
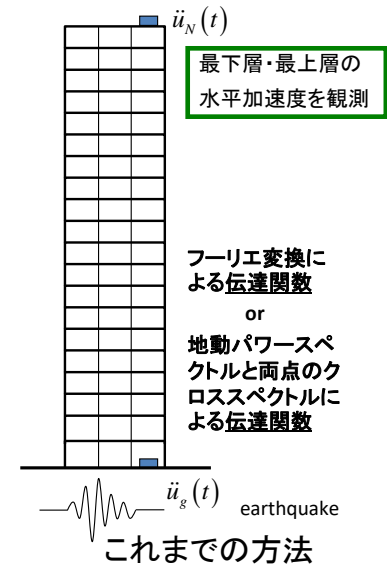
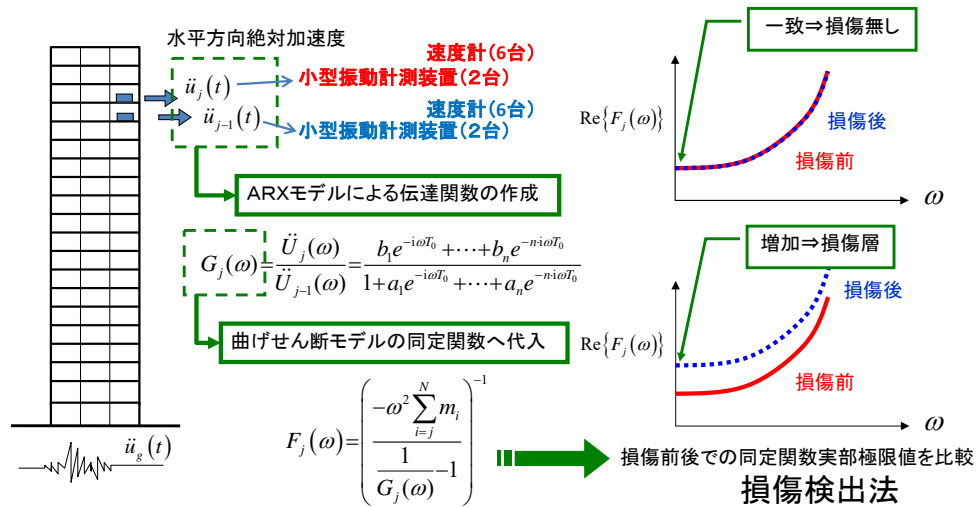
村瀬 充, 藤田皓平, 辻 聖晃, 竹脇 出, 幅広いタイプの地震動にも頑強な免震と連結制振のハイブリッド構造, *構造工学論文集*, Vol.60B, pp413-422, 2014.

構造ヘルスマニタリング-1 (Structural health monitoring-1)

システム同定とは、構造物などのシステムに外乱（入力）が作用したときの応答（出力）を観測・計測し、システムの有する特性を明らかにすることを意味する。外乱には、地震動、風外乱、温度荷重などがあるが、常時微動は利用の容易さからシステム同定の外乱としては好都合である。しかしながら、ノイズはシステム同定に大きな影響があるため、常時微動では小さなSN比が問題となることが多い。

システム同定には、モーダルパラメーター同定と物理パラメーター同定がある。モーダルパラメーター同定はSN比の影響を受けにくい安定した同定が可能であることが知られている。通常よく用いられる方法は、右図のように、まずモーダルパラメーター同定により固有振動数などを同定し、得られた固有振動数から物理パラメーターを同定するものである。この場合には、固有振動数の同定精度が物理パラメーターに大きな影響を及ぼすため、また、唯一性の問題も存在するため十分注意する必要がある。

新しい同定法として、右図（下方）に示すような、対象層の上下床の水平加速度から当該層の剛性や減衰を同定する方法が本研究室で提案されている。モーダルパラメーターを介さずに水平加速度から直接層剛性が同定される点、センサーを移動させることにより2個のセンサーしか必要としない点、ARXモデルなどを導入することによりノイズの影響を除去することが可能な点などが優れた点である。常時微動を利用する際には、ARXモデルやバンドパスフィルターの導入が必要となる。また、下図のように、同定前後の構造特性の変化を調べることで、建物の損傷を見つけることも可能となる。

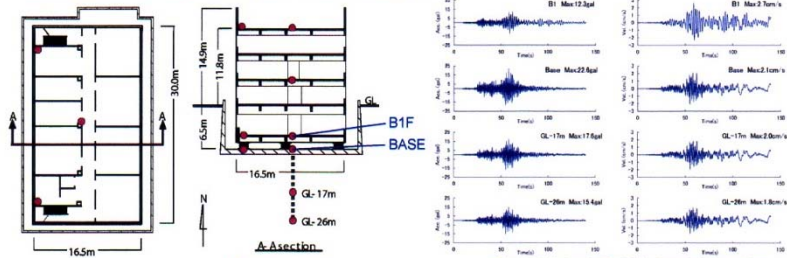


M.Kuwabara et al., A new approach to system identification and damage detection of high-rise buildings, *Struct. Control Health Monitoring*, 2013.

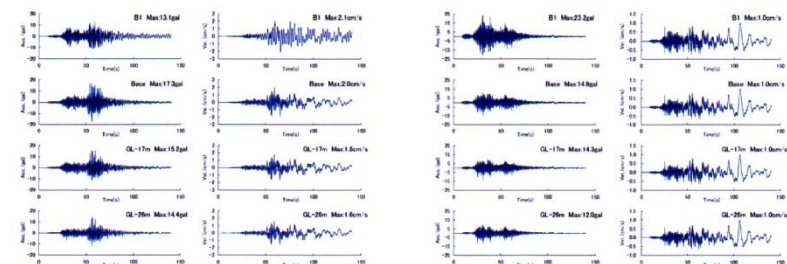
Y.Minami et al., System identification of super high-rise buildings using limited vibration data during the 2011 Tohoku earthquake, *Struct. Control Health Monitoring*, 2013.

長周期地震動の構造物への影響

京都大学構内に立地する免震構造物の地震時応答



京都大学構内の免震建築物及び地震計設置位置

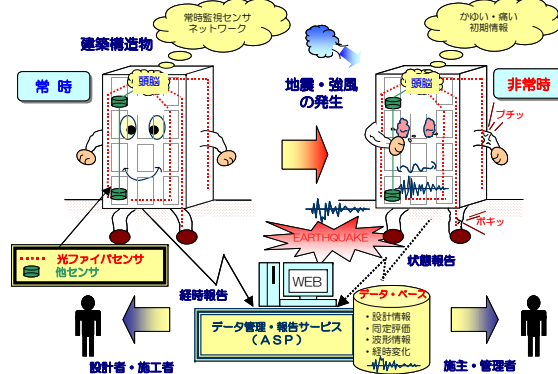


京都大学構内の免震建築物観測記録: NS成分
紀伊半島南東沖地震 (2004年9月5日23時57分: M7.4)

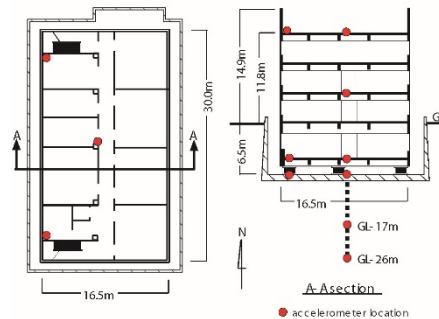
京都大学構内の免震建築物観測記録: EW成分
紀伊半島南東沖地震 (2004年9月5日23時57分: M7.4)

入倉孝次郎、釜江克宏、川辺秀憲: 巨大地震による長周期地震動予測の重要性について、日本地震学会秋季大会講演予稿集、P049,2004

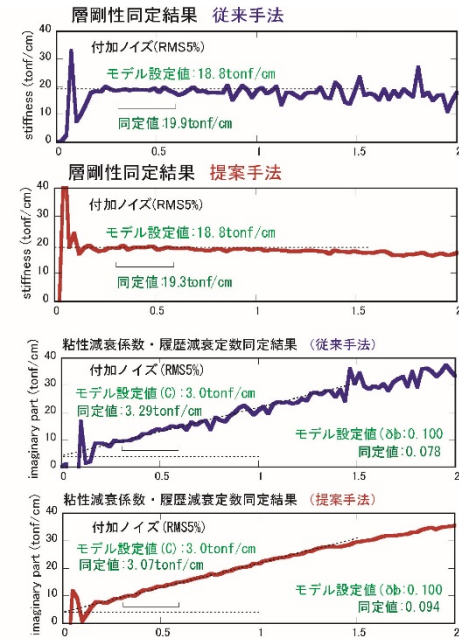
研究成果の例



構造ヘルスマニタリング



限定された地震観測記録を用いた
建築物の剛性と減衰の同時同定



研究成果の例

I.Takewaki and M.Nakamura : Stiffness-damping simultaneous identification using limited earthquake records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.29, No.8, pp1219-1238, 2000.

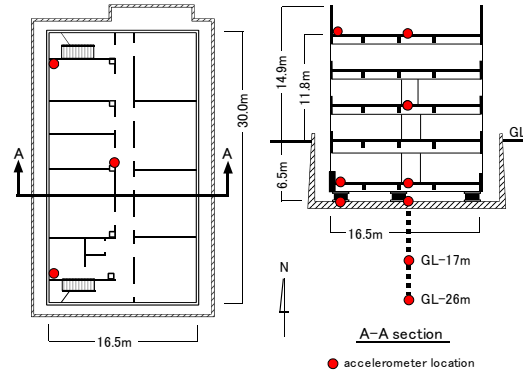
I.Takewaki and M.Nakamura, Stiffness-damping simultaneous identification under limited observation, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.131, No.10, pp1027-1035, 2005.

最近、建物の維持・管理の分野で、「構造ヘルスマニタリング」という新しい研究分野が脚光を浴びています。建物を人間のような生き物に喩えて、その性能が保持されることを健康が保持されることに喩えています。VBLで地震観測を行っていることも広い意味での構造ヘルスマニタリングといえるかもしれません。そこで得られたデータを分析することにより、建物の「健康状態」が明らかになるのです。もし、健康が損なわれていることが判明した場合には、何らかの処置（耐震補強など）が行われるかもしれません。この構造ヘルスマニタリングには費用がかかりますので、費用対効果の関係で、十分な説明ができない場合は実現することは困難となります。しかしながら、来るべき大地震に対して、老朽化した建物をそのまましておくのではなく、適切な構造ヘルスマニタリングや耐震診断技術により性能を評価し、最悪地震動にも対応できるようにグレードアップを図ることは減災上も極めて重要です。

構造ヘルスマニタリング-3 (Structural health monitoring-3)

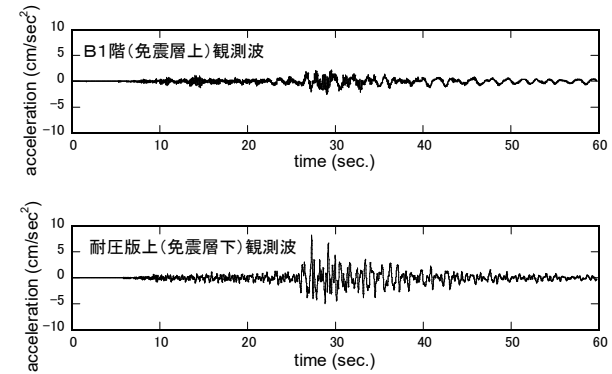


京都大学ベンチャービジネスラボラトリー棟
(国立大学第1号免震:1997年竣工)



高密度地震観測システム (VBL)

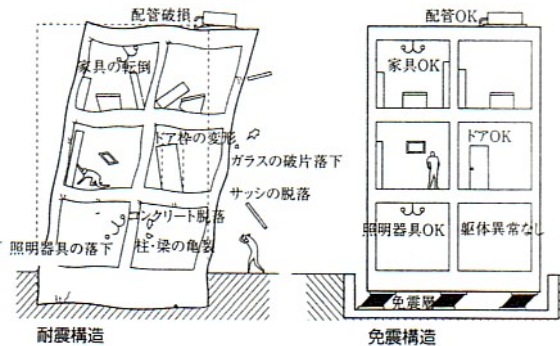
Figure 5 Overview of the base-isolated building at the Kyoto University campus and accelerometer location



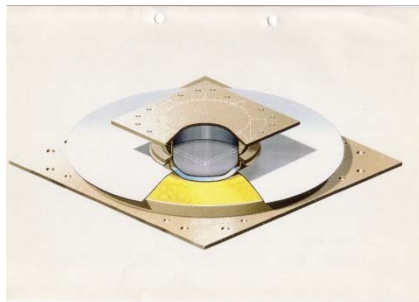
地震観測例 (1999年2月12日京都府南部地震)



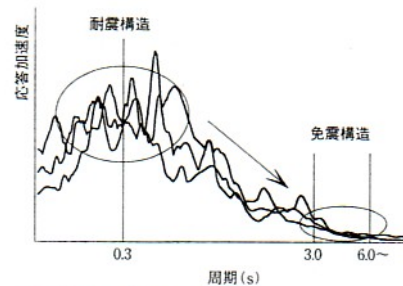
積層ゴムの変形(実験時)



耐震・免震



多機能直列型粘性ダンパー



地震応答スペクトル

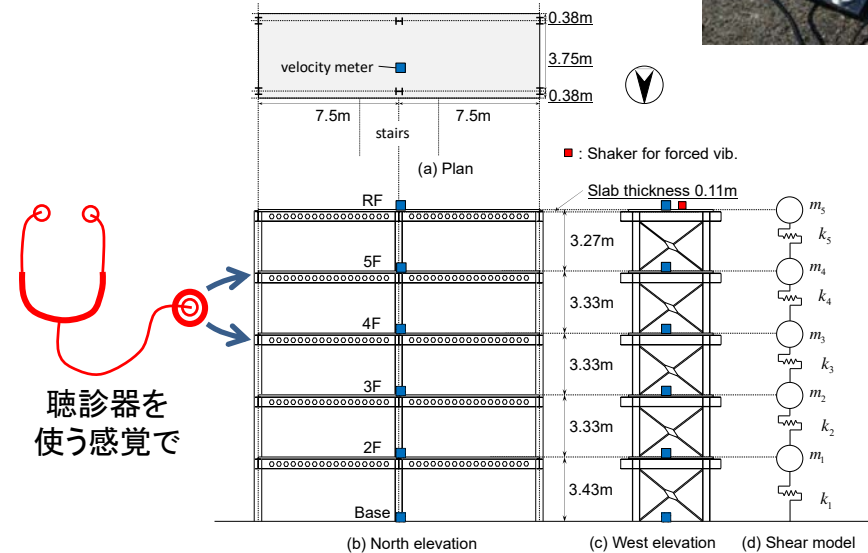
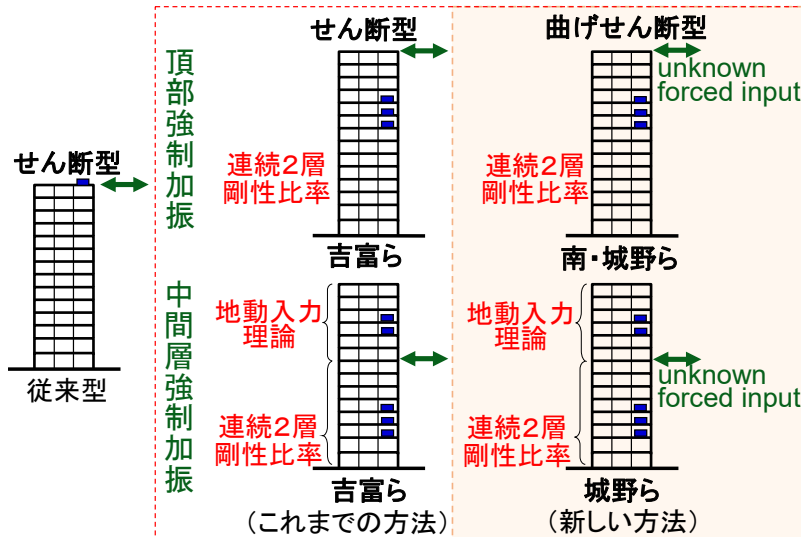
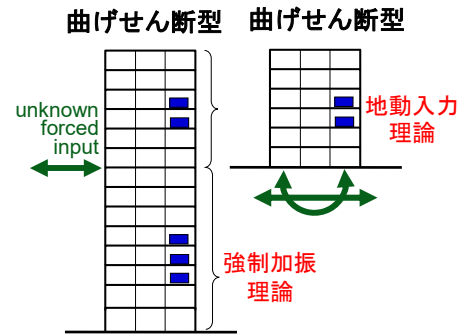
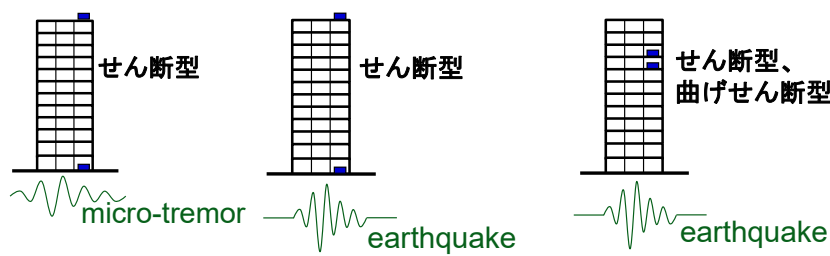
免震原理

VBLは地上3階・地下1階の鉄筋コンクリート建物で、地下1階の下に免震装置が設置されています。形は整形で低層建物であり、免震建物の教科書のようなものです。この免震装置は、建物を地面から切り離すための積層ゴムと、建物に減衰を与えるための粘性ダンパーから構成されています。積層ゴムは、鉄板と天然ゴムが何重にも重ねて構成されており、水平方向の剛性は小さく抑えて同時に鉛直方向の剛性や強度を確保するための工夫がなされています。一方、免震装置として採用される粘性ダンパーは日本でも希少価値のあるもので、2種類のダンパーが直列配置されており、微振動から大きな振動まで有効に効くことが特徴です。従って、VBLのような微振動を嫌う精密機器を扱う研究施設には最適の装置といえます。このVBLの建物の1次の固有周期は小さな振動時において約2秒程度で、大きな振動時には3秒近くになります。免震装置がない場合には、このような大きさの鉄筋コンクリート建物の1次の固有周期は約0.5秒以下ですので、周期が大幅に伸びていることがわかります。免震建物では、通常地震動が持っている周期(約1秒以下)と免震建物の周期をずらすことで、地震の影響から建物を守っているといえます。VBLの存在する地盤は地盤の中でも堅固な地盤に属し、免震建物と共振を起こすような長い周期の地震動が発生しにくい状況となっています。このこともVBLの免震建物が免震建物の教科書的な存在であることの一因となっています。このVBLでは、竣工以来、私たちが中心となって地震動観測を行っています。観測は、建物内と地盤の中の計27成分で行われており、日本の中でも高密度に観測が行われているものといえます。竣工以来、最大の震度は4であり、設計で想定しているような大きな変形は現在まで経験していません。しかし、中小規模の地震に対して大きな免震効果が得られていることが観測されています。

構造ヘルスマニタリング-4 (Structural health monitoring-4)

実用化への第一歩： 常時微動を用いたシステム同定

システム同定には、地震動を用いたもの、強制加振実験によるもの、常時微動を用いたものなど種々のものが存在する。地震動を用いる場合には地震発生頻度の問題があり、強制加振実験による場合には竣工後の実験の可否の問題がある。それに対して常時微動はその簡易性から注目されているが、計測の際のノイズの問題や風などの他の外乱による影響等の問題がある。それらを克服する方法を提案する。



聴診器を使う感覚で

K.Fujita, A.Ikeda, and I.Takewaki, Application of story-wise shear building identification method to actual ambient vibration, *Frontiers in Built Environment*, Volume 1, Article 2, 2015.

A.Ikeda, K.Fujita and I.Takewaki, Story-wise system identification of shear building using ambient vibration data and ARX model, *Earthquakes and Structures*, Vol.7, No.6, pp1093-1118, 2014.

地震入力エネルギー (Earthquake input energy)

エネルギー伝達関数を用いた地震エネルギー入力メカニズムの解析

構造物と地盤の動的相互作用に関する研究は、これまで主として変形や力に関するものが多く、右図に示すような地震入力エネルギーについて論じた研究は数少ない。その原因としては、両者の動的相互作用を考慮した場合には挙動が複雑となり、入力エネルギーを定義することが容易ではなかったことや、地震動の有する不確定性と地盤物性等の不確定性が相俟って、基礎固定モデルに比べて評価のばらつきが大きいこと等が挙げられる。

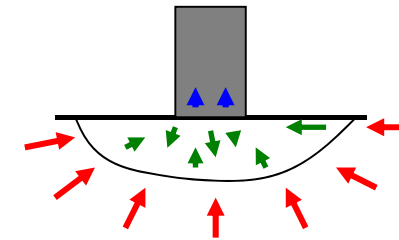
これまでに、構造物と地盤の動的相互作用を考慮したモデルとして下図のようなスウェイ・ロッキングモデル (SRモデル) がしばしば採用され、SRモデルに入力される地震エネルギーについて種々の検討がなされている。特に、過去においては、系に対して為す仕事から入力エネルギーを定義し、振動数領域での定式化が行われている。ここでは、地盤ばねやダッシュポットまで含めた全体システムに入力されるエネルギーと、構造物に入力されるエネルギーの関係について論じられ、さらに地震動特性の変動に伴う地震入力エネルギーの上限値について論じられている。

本研究では、構造物と地盤の動的相互作用だけでなく、表層地盤における地震動の増幅特性も考慮した上での構造物へのエネルギー入力メカニズムについて検討する。特に、自由地表面を基準として、そこにホワイトノイズ的な入力 (フーリエスペクトルが振動数に関して一定) が作用した場合には、地盤特性に関係なくSRモデルに入力される地震エネルギーは一定となることを明らかにする。さらに、この特性を有効に利用して、表層地盤における地震動の増幅特性を考慮した場合に、解放工学的基盤面で定義されるホワイトノイズ的な地震動からSRモデルに入力される地震エネルギーの上限値を見出す方法を提案する。地盤物性や幾何学的形状等の不確定性に起因して、表層地盤による地震動の増幅特性には大きな不確定性が存在するため、地震入力エネルギーの上限値を見出す方法は設計を行う上で有用である。

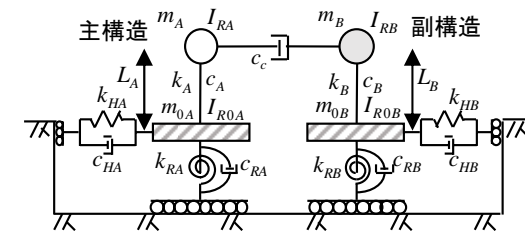
過去の研究においては、SRモデルに入力される地震エネルギーの地盤特性の変動に対する変動特性については論じられていない。また、表層地盤における地震動の増幅特性を考慮した上での構造物へのエネルギー入力メカニズムについては論じられていない。さらに、入力地震動の特性変動に対する入力エネルギーの上限値については論じられているが、表層地盤における地震動の増幅特性を考慮した上での上限値については論じられていない。今後、右図 (下方) のようなダンパーにより連結された建物において地盤特性を考慮した場合の地震エネルギーの解析についても展開していく予定である。

K.Kojima, K.Sakaguchi, I.Takewaki, Mechanism and bounding of earthquake energy input to building structure on surface ground subjected to engineering bedrock motion, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol.70, pp93-103, 2015

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.



地震入力エネルギーによる検討



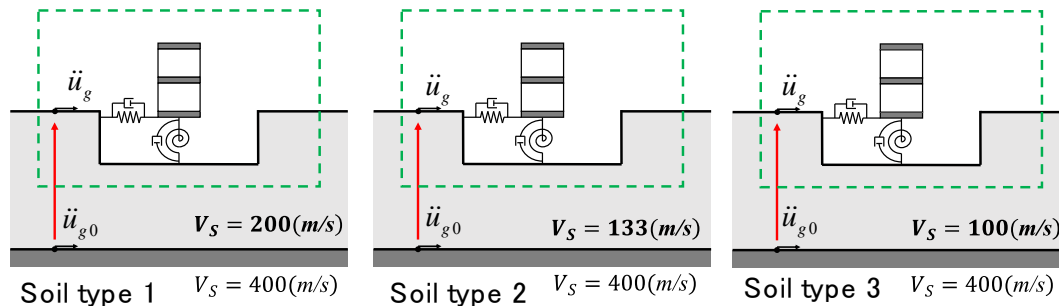
地盤剛性を考慮した2棟連結建物

$$\begin{aligned}
 & -I_{RA}\ddot{\theta}_{RA} \quad -I_{RB}\ddot{\theta}_{RB} \\
 & -m_A(\ddot{y}_A + \ddot{u}_g) \quad -m_B(\ddot{y}_B + \ddot{u}_g) \\
 & \dot{u}_{SA} + \dot{u}_g \quad \dot{u}_{SB} + \dot{u}_g \\
 & k_A u_A + c_A \dot{u}_A \quad k_B u_B + c_B \dot{u}_B \\
 & \quad \quad \quad \theta_{RA} \quad \theta_{RB} \\
 & -[m_A \bar{L}(\ddot{y}_A + \ddot{u}_g) + I_{RA} \ddot{\theta}_{RA} + c_c \bar{L}(\ddot{y}_A - \ddot{y}_B)] \quad -[m_B \bar{L}(\ddot{y}_B + \ddot{u}_g) + I_{RB} \ddot{\theta}_{RB} - c_c \bar{L}(\ddot{y}_A - \ddot{y}_B)]
 \end{aligned}$$

上部構造全体の自由体

$$\begin{aligned}
 & \dot{u}_{SA} + \dot{u}_g \quad \dot{u}_{SB} + \dot{u}_g \\
 & k_A u_A + c_A \dot{u}_A \quad k_B u_B + c_B \dot{u}_B \\
 & \theta_{RA} \quad \theta_{RB} \\
 & -[m_A \bar{L}(\ddot{y}_A + \ddot{u}_g) + I_{RA} \ddot{\theta}_{RA} + c_c \bar{L}(\ddot{y}_A - \ddot{y}_B)] \quad -[m_B \bar{L}(\ddot{y}_B + \ddot{u}_g) + I_{RB} \ddot{\theta}_{RB} - c_c \bar{L}(\ddot{y}_A - \ddot{y}_B)] \\
 & \dot{u}_g \quad \dot{u}_g \\
 & k_{HA} u_{SA} + c_{HA} \dot{u}_{SA} \quad -I_{ROA} \ddot{\theta}_{RA} \quad -m_{0A}(\ddot{u}_{SA} + \ddot{u}_g) \quad -m_{0B}(\ddot{u}_{SB} + \ddot{u}_g) \quad \dot{u}_g \\
 & k_{RA} \theta_{RA} + c_{RA} \dot{\theta}_{RA} \quad -I_{ROB} \ddot{\theta}_{RB} \quad k_{HB} u_{SB} + c_{HB} \dot{u}_{SB} \quad k_{RB} \theta_{RB} + c_{RB} \dot{\theta}_{RB}
 \end{aligned}$$

基礎地盤系の自由体



地震に対するレジリエンス(Earthquake resilience)

BruneauとReinhorn¹⁾は、構造物やインフラのレジリエンスについて言及し、レジリエントな構造物やシステムとは、(1)崩壊確率が小さなもの、(2)災害発生時の人命損失やシステムの損傷および負の経済的・社会的結果に関してそれらの影響が可能な限り低く抑えられていること、(3)損傷や被害を受けた後に正常な状態まで回復するのに短い時間で済むもの、と定義している。下図(左)は、構造物やシステムが地震動の作用を受けた際に呈する性能・機能の時間変動を表しており、(2)や(3)の要件は、100%の性能からの低減量(100-性能)の時間積分を可能な限り減少させることがよりレジリエントな構造物やシステムを設計することに対応すると考えられる。BruneauとReinhornは、レジリエンスを表現する指標として、ロバストネス(性能低下を招かずに外力に耐えることのできる能力)、リダンダンシー(代替能力)、リソースフルネス(豊富な利用資源)、ラピディティ(即時対応能力)の4つを挙げている。

このような大きなレジリエンスを有する構造物を設計するための方策としては、本研究室が関係するものに限定すれば、例えば次のようなものが挙げられる。

1. 地震動などの外乱に対する構造物の応答を抑制する手法の開発(制振、免震)
2. 安全率の見直し: Performance-based design, 最悪な状況の設定に基づく安全率の見直し(地震動特性、建物特性), 多重安全性の定量化, ロバスト性・冗長性の定量化
3. 地震経験後の復旧を容易にする設計法の開発: 損傷制御設計など
4. 構造ヘルスマモニタリングの建物への普及

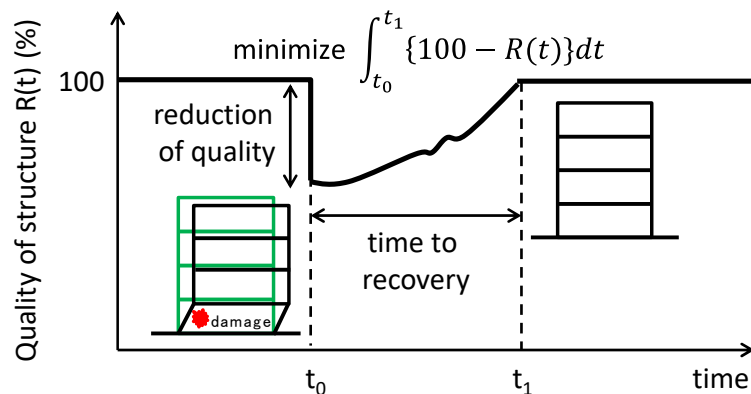
本研究室では、レジリエンスの定義の分析、その実際の構造設計における適用例の検討を通じて、今後の構造設計のあり方について独自の提案をしたいと考えている。

[参考文献] 1) M. Bruneau and A. Reinhorn, Overview of the Resilience Concept, Proc. of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering (米国地震工学会議) (2006).

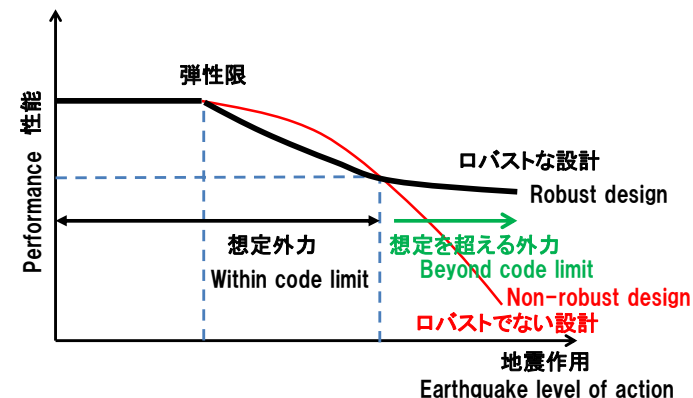
I.Takewaki, K.Fujita, K.Yamamoto and H.Takabatake, Smart passive damper control for greater building earthquake resilience in sustainable cities, *Sustainable Cities and Society*, Vol.1, No.1, pp.3-15, 2011.

I.Takewaki, A.Moustafa and K.Fujita, *Improving the Earthquake Resilience of Buildings: The worst case approach*, Springer (London), 2012.

K.Kojima, K.Fujita and I.Takewaki, Review: Building earthquake resilience in sustainable cities in terms of input energy, *Sustainable Cities and Society*, Vol.12, pp46-62, 2014.



構造物のレジリエンス指標



ロバストな設計とロバストでない設計

振動に関する逆問題 (Inverse problems in vibration)

建築構造設計における現況

建築構造設計の実務では、通常、(i) 経験や資料に基づく初期計画段階での部材断面サイズの仮定と、(ii) その仮定骨組モデルに設計用外力を作用させたときの構造解析 (応答解析) による設計条件の検定という大きな流れの中で、ほぼすべての設計条件が満たされるまで設計者の判断に基づく部材選定が繰り返し行われる。この過程を総称して構造設計と呼ぶことが多い。しかしながら、建築構造物の大規模化、多種多様な新材料の開発が進む状況下では、構造設計者の経験やそれに基づく判断が必ずしも有効に利用できるとは限らず、構造設計過程の一層の数理化・論理化を促進させ、設計条件と設計目標から組織的に部材寸法や部材断面サイズが選定される、本来の意味での構造設計の体系を構築することが強く求められている。

順問題と逆問題

上記のような問題点を解決する一つの方法として逆問題型の方法が存在する。これは、構造物の外乱に対する応答レベルを性能として分類し、その性能を実現する構造物を試行錯誤的な方法に拠らずに見出す方法を意味している。

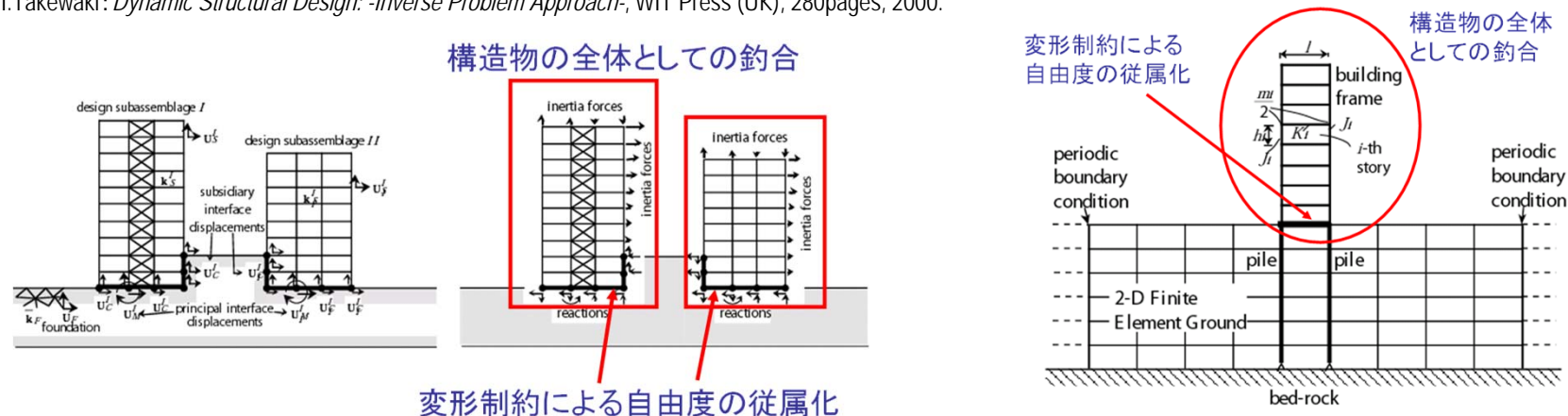
応用力学の中の振動分野では、逆問題に関する研究が急速に進展し、それに関する国際専門誌や多くの著書が存在している。逆問題という用語の定義は、そもそも相対的な側面を有しており、それまでに順問題と考えられていた問題がどのように構成されていたかに大きく依存する。逆に言えば、逆問題と呼んでいる問題は本来、順問題であるのかもしれないのである。これまでの順問題の多くは、構造解析や応答解析などの構造学の初期に発展した分野と密接に関わっている。従って、構造設計者が最終的に決定する部材サイズなどの量は予め与えられている場合が多い。それに対して逆問題では、構造物の応答量を順問題を通じて把握しながら、理想とする応答特性を呈する構造物の部材サイズなどを決定することとなる。この場合には関数関係を逆に解かなければならないため、一般に順問題よりも難しい取り扱いが要求される。

混合型逆問題

建築の世界で、最適設計や逆問題型の設計を最初に提示されたのは京都大学の中村恒善博士であると思われる。私は学生時代以来、中村恒善博士の推進される建築構造設計の論理化・組織化に関する分野に深く関わってきた。当初は最適設計について深く研究を進めたが、その後、建築構造設計の論理化・組織化と一層深い関係をもつ逆問題型設計法へと傾注していった。特に、大学院の学生当時から興味があった構造物と地盤の連成モデルに関する逆問題に惹かれるものがあり、このモデル特有の「混合型逆問題」という新しい問題を構成し、それに対する設計法を構築することに成功した。

混合型とは、設計者の判断でデザイン可能な上部構造物と、一般的には設計行為が及ばない地盤などの下部構造から構成される混合型のシステムを対象とすることを意味している。地盤などの非設計領域では解析問題が扱われ、上部構造物の設計領域では設計問題が扱われる。混合型逆問題においては、問題設定によりいくつかの分類が可能であり、それぞれに興味深い定式化が可能となる。

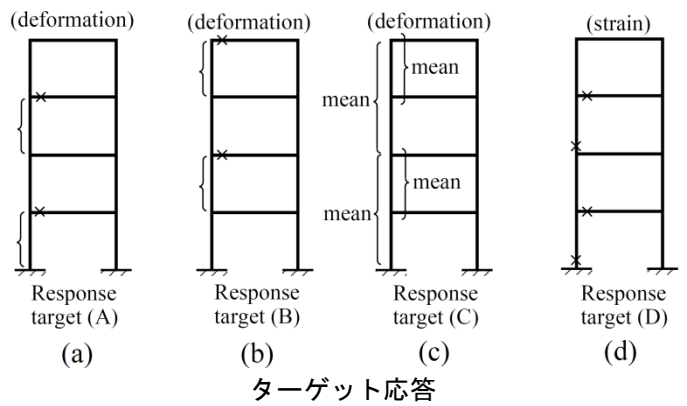
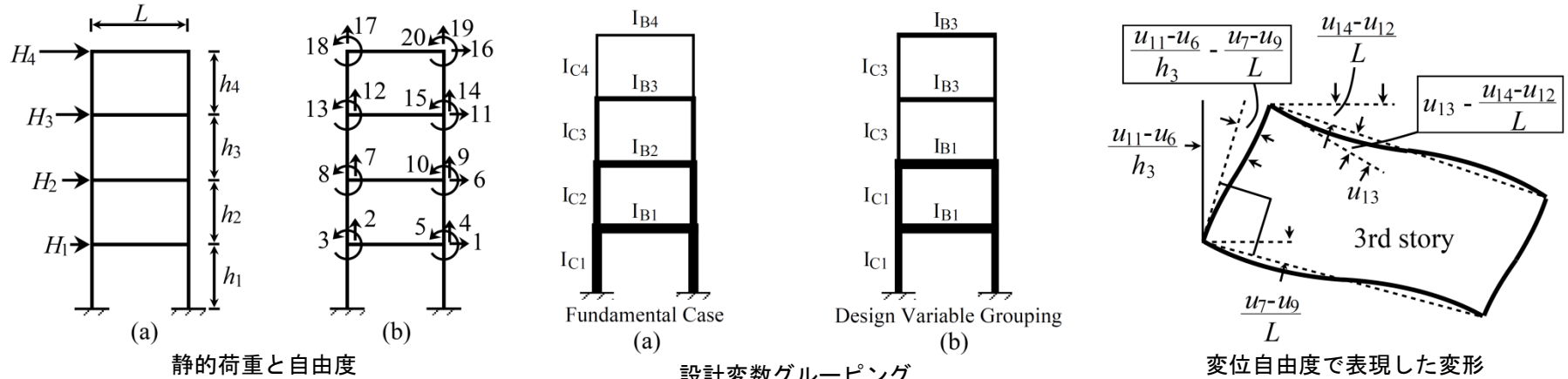
I. Takewaki: *Dynamic Structural Design: -Inverse Problem Approach-*, WIT Press (UK), 280pages, 2000.



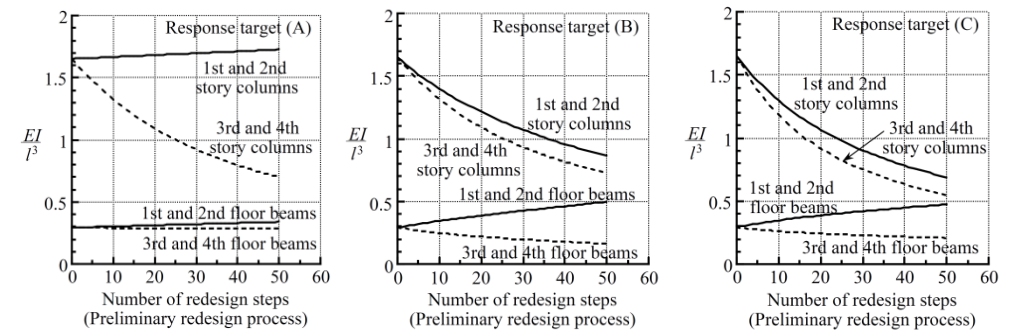
増分型逆問題 (Incremental formulation of inverse problems)

逆問題では、これまで線形問題が主として取り扱われ、解かれてきた。しかしながら、構造設計者にとって興味のある問題の多くは**非線形問題**であり、そのような問題を如何に解くかが大きな問題となっていた。この問題を解くためにTakewaki (1997)は、初期解に対する応答とターゲット応答を取り出してその差を考え、ターゲット応答を示す設計を**増分型の定式化**により解く新しい方法を提案した。

また、Takewakiは、構造設計者にとっては共通の部材を有効利用することや(設計変数グルーピング)、意思決定を複雑な状況のもとで行う際に有効となる「**不満足度関数**」という指標(ファジィ理論の拡張)を導入することも提案している。



設計変数グルーピング



初期解から最終解までの再設計プロセス

I.Takewaki, J.P.Conte, S.A.Mahin and K.S.Pister, A Unified Earthquake-Resistant Design Method for Steel Frames Using ARMA Models, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.20, No.5, pp483-501, 1991.
 I.Takewaki, J.P.Conte, S.A.Mahin and K.S.Pister, Probabilistic Multi-Objective Optimal Design of Seismic-Resistant Braced Steel Frames Using ARMA Models, *International Journal of Computers & Structures*, Vol.41, No.4, pp687-707, 1991.
 I.Takewaki: *Dynamic Structural Design: -Inverse Problem Approach-*, WIT Press (UK), 280pages, 2000.
 I.Takewaki, Elastic Frame Redesign via a Performance-Based Incremental Inverse Problem, *International Journal of Computers & Structures*, Vol.63, No.2, pp217-224, 1997.