

## 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 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560584

研究課題名（和文）

最大変位応答に基づく実用的な耐震信頼性設計法

研究課題名（英文）Reliability-based Practical Seismic Design Format based on Maximum Displacement

研究代表者

森 保宏 (MORI YASUHIRO)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：30262877

研究成果の概要（和文）：

本研究では、最大変位応答に基づく実用的な耐震信頼性設計法の構築を目的とし、骨組の必要変形性能を評価するための基本情報となる弾塑性1質点系の最大変位応答の確率分布を、等価線形化手法と一様ハザードスペクトルを用いて簡易に評価する方法を提案した。また、等価線形化手法において、等価固有周期を補正することによって精度を向上させる手法を提案した。さらに、実用的な設計法へと展開するための第1段階として、取り扱いの簡単な使用限界状態設計を対象に、荷重耐力係数を用いることができる設計条件式を導くと共に、これまで提案されている荷重耐力係数の略算法を適用する上での問題点を整理し、これを解決すべく、新たな略算法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

The objective of this research is to establish reliability-based seismic design method. In order to achieve this objective, demand deformation capacity of a frame should be estimated. In this research, a seismic hazard model of an inelastic oscillator is proposed using an equivalent linearization technique and a uniform hazard spectrum. Also the equivalent linearization technique is improved by modifying the equivalent natural period. Finally, as the first step to the practical reliability-based design, load and factor design format is proposed for serviceability limit state design. Based on the investigation of the applicability of existing method for estimating load and resistance factors a revised practical method is proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：構造信頼性、耐震設計、性能評価、最大変位応答、地震ハザード、荷重耐力係数、静的増分解析、多層骨組

## 1. 研究開始当初の背景

阪神・淡路大震災では、建築技術者と建物の所有者・使用者との間の安全に対する認識の乖離が顕在化した。その後、東海地震の想定震源域や地震災害防災対策強化地域の見直しもあり、耐震性能に対する社会の関心が高まっている。また、非関税貿易障壁の解消や技術者の相互認証の必要性から技術規準の国際化・標準化が望まれている。共通の尺度で客観的に構造性能を明示する性能設計への期待は大きく、これを実現していくためには、適切な性能評価手法の確立が急務である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、荷重および耐力の不確定性を適切に考慮しながら、耐震信頼性設計法の実用的かつ包括的な枠組みを構築することにある。

## 3. 研究の方法

- (1) 確率論的地震ハザード情報に基づく弾塑性1質点系の最大変位応答の確率モデルの構築
- (2) 応答スペクトルの形状を考慮することによる等価線形化手法の精度の向上
- (3) 荷重・耐力設計式への展開のしやすさを考慮した二乗や平方根を含まない簡易応答評価法の提案とその評価精度の検討

## 4. 研究成果

### (1) 弾塑性1質点系の最大変位応答の確率モデルの構築

構造物の最大変位応答の簡易評価手法としては、Inelastic Modal Predictor など、いくつかの手法がこれまでに提案されており、これらを用いる場合には弾塑性1質点系の最大変位応答が必要となる。本研究では、まず、等価線形化手法に基づく弾塑性1質点系の最大変位応答の確率分布の評価手法について検討した。

等価線形化手法に適用する応答スペクトルには、各固有周期における超過確率が等しい応答値をつないだ一様ハザードスペクトル (Uniform Hazard Spectrum, 以下 UHS と略記) を用いることができれば、簡便で都合が良い。UHS は固有周期間での応答は完全相

関と暗に仮定しているが、実際の地震波の応答スペクトルでは固有周期が離れるほど応答値の相関は小さくなるため、UHS を用いることについてその妥当性が懸念されるが、これまでの研究において、弾性固有周期  $T_1$  が短い場合や二次勾配  $k_2$  が小さい場合、降伏せん断力係数  $C_y$  が大きい場合を除いては、UHS を用いても精度よく確率分布を評価することができることを示した。今回は、さらに、比較的精度の低かった範囲において、UHS を用いた等価線形化手法に基づく最大変位応答の確率分布の評価手法についての検討を行った。

等価線形化手法の図的解法の1つである Capacity-Spectrum (以下 CS 法と略記) 法は、骨組の耐力を表す CS と地震ハザードを表す弾塑性系の Demand Spectrum (下 DS と略記) との交点を求めて弾塑性応答を評価するものである。通常の CS 法は  $S_D - S_A$  (加速度応答) 座標系にて示され、収束計算を必要とするが、 $S_D - T$  座標系で表現すると、 $S_D$  軸と  $T$  軸、および減衰補正係数  $F_b$  (等価減衰定数  $h_{eq}$ ) が弾塑性1質点系の降伏変位  $\delta_y$  と  $T_1$  を基準として塑性率  $\mu$  の関数で表されることから、直接交点を求めることができる。すなわち、弾塑性1質点系の最大変位応答の超過確率は、CS 法において CS が DS と等価固有周期  $T_{eq}$  以上の範囲で交わる確率と同義である。さらに、固有周期間の相関は、2つの固有周期間の対数差にのみ依存するので、次式の変換により、定常な標準正規確率過程における初期通過問題に単純化される。

$$Y(T) = \frac{\ln(S_D^E(T, h)) - \mu_{\ln(S_D^E(T))}}{\sigma_{\ln(S_D^E(T))}} \quad (1)$$

図 1(i)~(iii)に、CS を折れ線 (図 1(iv)の破線) という簡易な形状でモデル化した場合について、UHS を CS 法に適用して得られた50年間の最大変位応答の補確率分布を、モンテカルロ法による結果(一点鎖線)と併せて、破線で示す。CS の傾きが変わる点の  $T$  座標を  $T_g$ 、 $T_g$  以前の CS の傾きを  $a$ 、 $T_g$  以降の CS の傾きを  $b$ 、 $Y$  切片を  $c$  とし、図 1 は、(i)  $c=1.0$ 、(ii)  $c=0.5$ 、(iii)  $c=0.0$  の CS を用いて得られた確率分布である。 $T_g$  は応答スペクトルの変位一定領域と速度一定領域の境界に相当すると考えられる。UHS を用ると、いずれの場合にも過大評価され、特に  $a$  が小さい場合や  $c$  が大きい場合にその傾向が見られた。

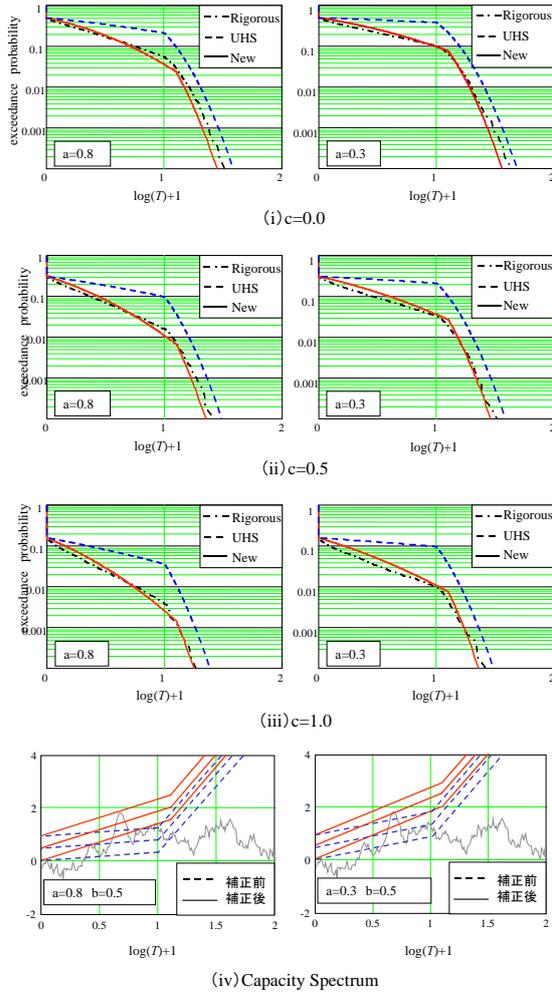


図 1：提案手法による最大塑性率の確率分布

ここで、精解を求める煩雑な計算を避けるため、UHS を用いても高い精度で確率分布を評価する CS の補正式を検討する。補正後の CS において、傾きが変わる点の  $T$  座標を  $T_{gu}$ 、傾きを  $a_u$  とし、 $T_{gu}$ 、 $a_u$  をそれぞれ以下のように示す (図 1(iv)の実線)。

$$T_{gu} = 1.1T_g \quad (2)$$

$$a_u = a + 1.0 \quad (3)$$

(2)、(3)式の関係により補正した CS を用いて得られた確率分布を図 1 に実線で併せて示すが、いずれの場合も大幅な精度の向上が見られる。

### (2) 応答スペクトルの形状を考慮することによる等価線形化手法の精度の向上

本研究では、これまでいくつかの等価線形化手法について、その評価精度を検討してきたが、その中で評価誤差の程度が建物特性に大きく左右されず、最も安定していた島崎の手法を用いることとする。同手法によれば等価

固有周期は次式で表される。

$$T_{eq} = T_1 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\mu \cdot k_2 + 1 - k_2}} \quad (4)$$

等価線形化手法による評価誤差は、地震動特性に影響を受けると考えられる。構造物の応答に影響を与える地震動特性の指標としては、これまでに様々なものが提案されているが、ここではそのなかで、「特性周期  $T_g$ 」の等価線形化手法による評価誤差への影響を検討する。特性周期とは、加速度応答スペクトル一定領域と速度応答スペクトル一定領域の境界となる周期であるが、ここでは横軸を固有周期の対数で表した減衰 10% の速度応答スペクトルにおいて原点からの傾きが最大となる周期としている。図 2 は、各地震動の特性周期  $T_g$  を弾性固有周期  $T_1$  で除したもの ( $T_g/T_1$ ) の 148 個毎の移動平均値と、 $k_2=0$  の各モデルについて、対応する地震動を用いた時刻歴応答解析による最大塑性率  $\mu_t$  と等価線形化手法による最大塑性率  $\mu_{eq}$  の自然対数 ( $\ln(\mu_t/\mu_{eq})$ ) の平均値との関係を示したものである。 $T_g$  が  $T_1$  より短いときに過小評価、長いときに過大評価となっており、これは以下に述べるように、島崎の手法では等価固有周期を過大に評価しているためと考えられる。

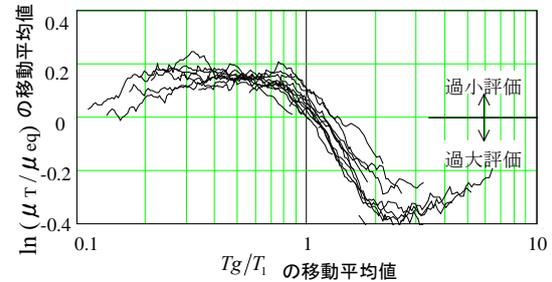


図 2 特性周期と評価誤差

図 3 は、 $S_D - T$  座標系にて CS 法を示したものである。例えば  $T_g/T_1 > 1$  の場合、Capacity Spectrum (CS) が Demand Spectrum (DS) と交わる点は主に速度応答スペクトル一定領域上となる。島崎の手法が、本来ならば点線で表される等価固有周期を過大評価(実線)しているとする、応答も過大評価となる ( $\mu > \mu_t$ )。一方、 $T_g/T_1 < 1$  の場合は CS と DS との交点は主に変位応答スペクトル一定領域上で、減衰補正係数を乗じて求められる DS の傾きは負となるため、等価固有周期を過大評価すると応答は過小評価となる。本研究では、等価固有周期の過大評価

を補正するために, (3)式を(2)式に乗じて等価固有周期を評価することを提案する。

$$k(\mu, k_2) = \exp((0.0196 \cdot k_2 + 0.0975) \ln(\mu)^2 + (0.801 \cdot k_2 - 0.536) \ln(\mu) - 0.468 \cdot k_2 + 0.280) \quad (5)$$

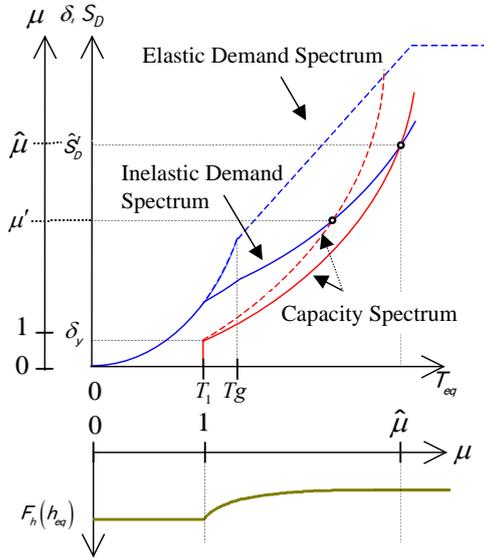


図 3 : 等価固有周期の評価と応答値

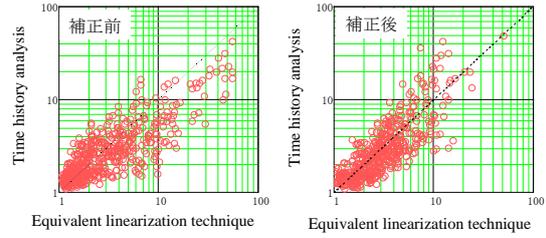
図 4 は(a)  $k_2=0, T_1=0.5$ , (b)  $k_2=0.03, T_1=1.4$  の場合を例に, (4), (5)式を用いて等価固有周期を評価して得られた最大塑性率の評価精度を示したものである。他の場合も含め, 二次勾配, 弾性固有周期により程度の差はあるものの, 補正前に比べ, 偏りやばらつきといった評価誤差は改善されている。

### (3) 荷重・耐力設計式への展開

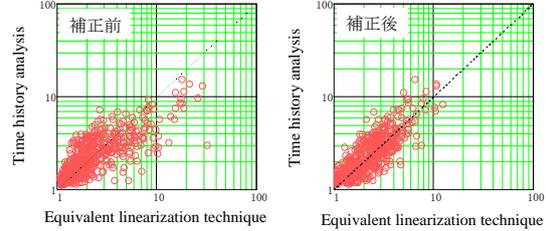
実用的な設計法へと展開するために, まずは取り扱いの簡単な使用限界状態設計を対象に, 荷重耐力係数方式の設計条件式を導く。

地震ハザード情報として, 固有周期  $T$ , 減衰定数  $h=0.02$  の弾性 1 質点系の最大変位応答スペクトルの  $n$  年最大値  $S_D(T; h=0.02)$  の確率分布が与えられているものとする。この確率的情報を用いると, 骨組  $i$  層の最大変位応答の  $n$  年最大値  $\theta_S$  は, SRSS により次式で表される。

$$\theta_{S_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (PF_{j,i} \cdot S_{D,j} \cdot F_{h,j} \cdot \varepsilon_{F_j})^2} \cdot \varepsilon_S \quad (6)$$



(a)  $k_2=0, T_1=0.5$



(b)  $k_2=0.03, T_1=1.4$

図 4 : 提案手法の評価精度

ここに,  $m$  は考慮するモード数,  $PF_{j,i}$  は  $j$  次モードの  $i$  層の層間変形角の刺激関数,  $F_{h_j}$  は減衰補正係数, また,  $\varepsilon_{F_j}, \varepsilon_S$  はそれぞれ減衰補正係数, SRSS の評価誤差を考慮するための確率変数である。最大変位応答に基づく限界状態設計法では, 設計条件式は次式で表される。

$$P[\theta_R < \theta_S] \leq \Phi(-\beta_T) \quad (7)$$

ここに,  $\theta_R$  は許容層間変形角,  $\beta_T$  は目標信頼性指標である。

(6)式左辺中の限界状態を超過している事象を表す式の両辺が確率変数の線形和で表される場合については, 「建築物の限界状態設計指針」に示されている略算法を適用することができるので, ここでは(6)式を以下のよう展開する。

(6)式を(7)式に代入することにより次式が得られる。

$$P\left[\left(\frac{\theta_R}{\varepsilon_S}\right)^2 < \sum_{i=1}^m Z_i^2\right] \leq \Phi(-\beta_T) \quad (8)$$

ここに,

$$Z = \left| PF_{j,i} \cdot S_{D,j} \cdot F_{h,j} \cdot \varepsilon_{F,j} \right| \quad (9)$$

である。さらに上式において

$$\left(\frac{\theta_R}{\varepsilon_S}\right)^2 = R, \quad Z_i^2 = S_i \quad (10)$$

とすると, 次式の一般的な荷重組み合わせの

下(線形和)での設計条件式となる。

$$P\left[R < \sum_{i=1}^m S_i\right] \leq \Phi(-\beta_T) \quad (11)$$

荷重耐力係数を用いることで、(8)式は次式の簡便な設計条件式となる。

$$\phi \cdot \mu_R \geq \sum_{i=1}^m \gamma_i \cdot \mu_{S_i} \quad (12)$$

ここに、 $\phi$ は耐力係数、 $\gamma_i$ は荷重係数である。(12)式中の $R$ 、 $S_i$ が対数正規変数の場合、 $\phi$ 、 $\gamma_i$ は次式で得られる。

最大層間変形角に着目した設計条件式では、確率変数 $R$ 、 $S_i$ の確率分布は、 $\theta_R$ や $S_D(T_i, h_i)$ 、 $\varepsilon_{F_j}$ 、 $\varepsilon_S$ の確率分布から、変数変換などにより評価することができるが、日本建築学会 限界状態設計指針に示される略算法(以下旧略算法 という)の適用性については以下の2つの問題点が挙げられる。

- ① 旧略算法では、主の荷重が従の荷重に対して支配的な場合を前提としている。しかし、最大変位応答を対象とする場合には複数の振動モードが拮抗する可能性があるため、このような場合の適用性については疑問が残る。
- ② SRSSを用いる場合、(10)式で表される $R$ 、 $S_i$ はもとの変数の二乗となっているため、変動係数が極めて大きくなる。たとえば対数正規変数の場合は、二乗することで対数標準偏差はもとの2倍となるので、 $X^2$ の変動係数は $V_X=1.0$ のときは3.9、 $V_X=1.5$ のときは10.5となる。旧略算法では、荷重の変動係数の上限を1.2~1.4程度としており、変動係数が大きい場合における適用性の検討が必要である。

これらの点について、本研究では検討を加え、改良略算法を提案した。これを用いて、わが国の耐震設計基準に基づいて設計された9層骨組「JP9」を対象に目標信頼性指標を $\beta_T=2$ とした場合の(a)許容層間変形角の平均値 $\mu_{op}$  ( $1/\mu_{op}$ で表現) および(b)実際に達成される信頼性指標 $\beta$ を図5に示す。同図にはAFOSMによる評価結果も併せて示してある。骨組の諸元を表1に、 $\theta_R$ 、 $\varepsilon_{F_j}$ 、 $\varepsilon_S$ の確率モデルを表2に示す。地震ハザードとして、弾性1質点系の応答の年最大値は、地震が少なくとも1回生起したという条件の下、対数正規分布すると仮定して、その統計量は梅村スペクトルが再現期間1000年の値 $S_{D1000}$ に相当

し、その1/5の値が再現期間50年の値 $S_{D50}$ に相当するよう設定した。また、建物の使用性に影響を及ぼす地震動が生起しない確率 $p_0=0.8$ とした。さらに、応答スペクトルにおける各モード間の相関については、Bakerの相関モデルを想定し、減衰補正係数には笠井らによる提案式を用いている。また、ここでは3次モードまで考慮している。

図5(b)では、提案手法では、いずれの層においても目標信頼性指標は精度良く達成されているが、AFOSMでは、2次モードの影響が大きな8、9層において精度の低下が見られる。

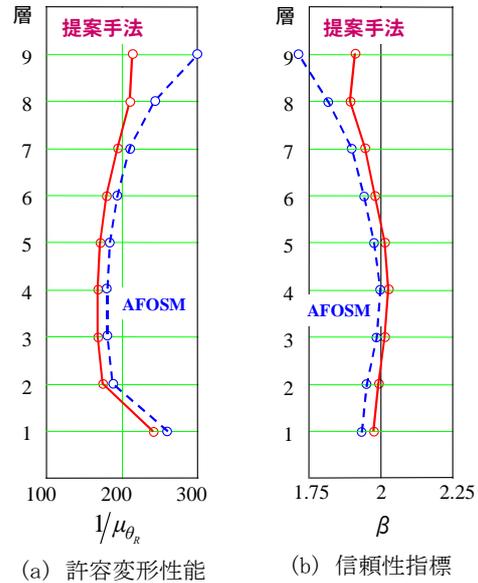


図5：許容変形性能および達成される信頼性指標

表1：JP9の諸元

	1次モード	2次モード	3次モード
$T_i$ (s)	1.50	0.55	0.35
$h_i$	0.020	0.020	0.027

表2：確率モデル

	$\theta_R$	$\varepsilon_F$	$\varepsilon_S$
$\mu_X$	設計値	1.0 (中央値)	1.0 (中央値)
$V_X$	0.15	0.3	0.1

#### (4) まとめ

本研究の目的は、最大変位応答に基づく実

用的な耐震信頼性設計法を構築することである。骨組の必要変形性能を評価する方法として、モーダルアナリシスを塑性域にまで拡張した手法がいくつか提案されており、これを実用的な耐震信頼性評価に展開するためには、弾塑性1質点系の確率論的ハザード情報が必要となる。

弾塑性1質点系の最大変位応答を簡易に評価する方法としては等価線形化手法をがあり、確率的に評価するためには一様ハザードスペクトル (UHS) を用いる方法があるが、UHSでは、応答スペクトル間の相関が考慮されておらず、その適用性に懸念があった。本研究では、固有周期の短い領域では過大評価となる以外は全般的に精度が良いことを示す一方、短周期領域における精度向上のための方向性を示した。また、島崎らが提案する等価線形化手法において、等価固有周期を補正することによって精度を向上させる手法を提案した。

さらに、実用的な設計法へと展開するために、まずは取り扱いの簡単な使用限界状態設計を対象に、荷重耐力係数を用いることができる設計条件式を導くと共に、これまで提案されている荷重耐力係数の略算法を適用する上での問題点を整理し、これを解決すべく、新たな略算法を提案した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① 伊吹豪太, **森 保宏**: 確率論的地震ハザードに基づく弾塑性1質点系の最大変位応答評価, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第48号, 2010.2, pp.161-164. 査読無
- ② **Mori, Y.**, Ibuki, K., and Oba, M., Design Spectra for Use in Probability-Based Design with Equivalent Linearization Technique, Proceedings DVD-ROM, 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, 2010, 10pp. 査読有
- ③ 川崎雄貴, **森 保宏**, 古川恵梨: 等価線形化手法による最大応答の評価精度とそのモデル化に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第49号, 2011.2, pp.205-208. 査読無
- ④ **Mori, Y.**, Kojima, S., & Ibuki, K., Probabilistic Hazard Model of Inelastic Response of SDOF System Based on

Equivalent Linearization Technique, Application of Probability and Statistics in Civil Engineering, 2011.8, 8pp. 査読有

- ⑤ **森 保宏**, 中尾真愛子: 鋼構造の最大変位応答における使用限界状態に関する荷重・耐力係数設計法に関する研究, 構造物の安全性および信頼性, Vol. 7, 2011.11, 8pp. 査読有
- ⑥ 小島早代, **森 保宏**: 設計用応答スペクトルとしてのUHSおよびCMSの適用性に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第50号, 2012.2, pp.301-304. 査読無
- ⑦ 川崎雄貴, **森 保宏**: 等価線形化手法の評価精度に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第50号, 2012.2, pp.301-304. 査読無

[学会発表] (計5件)

- ① **森 保宏**, 伊吹豪太, 大場麻弥: 最大変位応答に基づく鋼構造骨組の荷重耐力係数設計法, その1: 使用限界状態設計, 日本建築学会大会(北陸), 2010.9.9, 富山大学
- ② 伊吹豪太, **森 保宏**: 確率論的地震ハザードに基づく弾塑性1質点系の最大変位応答評価, 日本建築学会大会(北陸), 2010.9.9, 富山大学
- ③ **森 保宏**: 最大変位応答に基づく鋼構造骨組の荷重耐力係数設計法, その2: 使用限界状態設計への展開の課題と低層建物への適用, 日本建築学会大会(関東), 2011.8.24, 早稲田大学
- ④ 中尾真愛子, **森 保宏**: 最大変位応答に基づく鋼構造骨組の荷重耐力係数設計法, その3: 荷重耐力係数の略算方の改良, 日本建築学会大会(関東), 2011.8.24, 早稲田大学
- ⑤ 川崎雄貴, **森 保宏**: 等価線形化手法による最大応答の評価精度に関する研究, 日本建築学会大会(関東), 2011.8.24, 早稲田大学

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

森 保宏 (MORI YASUHIRO)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号: 30262877