

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 31 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560603

研究課題名（和文）

統計的手法に基づくランダム入力地震動モデルの作成とその応用

研究課題名（英文）

Stochastic Random Input Ground Motion Model and its Applications

研究代表者

松田 敏 (MATSUDA SATOSHI)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：60278603

研究成果の概要（和文）：本研究は、ランダム入力地震動モデルとして、地動加速度のパワースペクトル密度関数（PSDF）および地震動の有効継続時間の回帰モデルを作成することを目的とする。PSDF はホワイトノイズに対する弾性 1 質点系の擬似速度応答過程を用いて表され、その特性を規定する 3 つのパラメータおよび有効継続時間に関する回帰モデルの関数形と回帰係数を、遺伝的アルゴリズムと最尤法により求めた。そして、得られたモデルの予測性能や応用について、多角的な検討を行った。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a new regression model for the power spectral density function (PSDF) and the effective duration of input ground motions. The PSDF is expressed as that of the pseudo-acceleration response of a single-degree-of-freedom system under a white noise excitation. The regression analysis for the model parameters of the PSDF and the duration are carried out by using the genetic algorithm and the maximum likelihood method. Then, the effectiveness of the obtained regression model are investigated and demonstrated in various applications.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

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：パワースペクトル密度関数，回帰モデル，遺伝的アルゴリズム，ランダム応答解析，地震信頼性，最適設計，伝統木造構法

1. 研究開始当初の背景

近年、地震動予測の理論と技術はめざましい進歩を遂げており、断層震源やその破壊プロセスについての特定のシナリオに基づいて作成された地震動予測モデルが、地震被害予測や地震防災対策などに広く活用されている。しかし、建築物の耐震設計に際して想

定すべき入力地震動、即ち地震荷重として捉えた場合、地震動予測モデルが如何に精密なものであったとしても、起こり得る可能性の 1 つに過ぎず、それのみに依拠して耐震設計を行うことは出来ない。建築物に必要な耐震安全性を合理的に付与するためには、できるだけ多くの「可能性」を検討することが必要

であり、このような観点から、本研究グループは、起こり得る地震動“群”の性質を統計的に包絡する「ランダム入力地震動モデル」の有効性と耐震工学上の応用に関する研究に取り組んでいる。

地震動は、その本質において、断層破壊という生成過程に起因する不可避な不規則生・非再現性を有しており、これをランダム過程と捉えてモデル化することは合理的であると考えられる。しかし、それはホワイトノイズの如く完全にランダムなものではなく、断層におけるマクロな破壊伝播過程や伝播経路地盤、表層地盤の影響を受けて、何らかの大域的／局所的特性を有している。これらの特性を如何に地震動モデルに反映させるかということが重要な課題である。

2. 研究の目的

(1) ランダム入力地震動モデルの作成

ランダム入力地震動モデルのパワースペクトル密度関数を、弾性1質点系のホワイトノイズ入力に対する擬似加速度応答過程を用いて表現し、その特性を規定する「加速度パワー（加速度振幅の自乗平均値）」、「卓越振動数（1質点系の固有振動数）」、「形状係数（同減衰定数）」、及び、地震動の非正常性を規定する「有効継続時間」の4パラメータを目的変数、地震動の「マグニチュード」、「震央距離」、「震源深さ」、「表層地盤の平均S波速度」の4パラメータを説明変数として、統計的回帰モデルを作成する。

(2) ランダム入力地震動モデルの応用

本研究で採用するランダム入力地震動モデルは、弾性1質点系の出力過程として表現されるため、構造物の統計的2次モーメント応答解析と高い親和性を有している。そこで、本研究で作成した入力地震動モデルに対する構造物の各種応答指標を確率統計的に評価し、地震動の特性、それを規定する地震属性・観測点属性と構造物応答との関係を明らかにする。さらには、各種応答指標を制御対象（目的関数）とする最適設計問題への適用を試みる。

また、ランダム応答解析を適用するための各種構造物のモデル化、特に、大きなばらつきと強い非線形性を有する木造建物群の応答特性を合理的に表現し得る汎用解析モデルの作成に取り組む。

3. 研究の方法

(1) ランダム入力地震動モデルの作成

① 回帰分析のためのデータベースの構築

ランダム入力地震動モデルを規定するパラメータに関する回帰モデルを作成するために、K-NET（強震観測ネットワーク）、KiK-NET（基盤強震観測ネットワーク）等の

強震観測記録から、回帰分析の説明変数及び目的変数に関するデータベースを構築する。

また、地震動から表層地盤の影響を分離し、共通基盤における地震動モデルを作成するために、観測記録を表層地盤の伝達関数で除して生成した基盤波からも回帰パラメータを抽出し、データベースを構築する。

② 回帰モデルの作成

回帰モデルの関数形を「遺伝子」として表現し、対応するAIC（赤池情報量規準）を「適合度」の指標とする遺伝的アルゴリズムを用いて、各目的変数に関する回帰式を作成する。

③ 回帰モデルの検証

回帰モデルを作成するためのデータベースを分割し、交叉検定を行うことにより、作成した回帰モデルの予測性能について検証する。

また、パワースペクトル密度関数と有効継続時間を用いて速度応答スペクトルモデルを作成し、既往の速度応答スペクトルに関する距離減衰式と比較することにより、回帰モデルの有効性について検討する。

(2) ランダム入力地震動モデルの応用

① 地震信頼性解析

弾塑性構造物のデザインポイント入力指定するパワースペクトル密度関数を有し、指定する応答レベルを実現する入力地震動のうち、最小のパワーを持つものに基づき一次信頼性手法により、地震信頼性を評価する。

② ダンパー付き構造物の最適設計

提案するパワースペクトル密度関数モデルで与えられる入力地震動群に対して、ランダム応答解析に基づいて評価される「統計的等価減衰定数」を最大化するような最適ダンパー量（分布）を求める方法を開発する。

③ 木造建物の解析モデルの作成

伝統構法の木造建物を対象に、その振動特性に強い影響を与えると考えられる鉛直構面の水平／非線形耐力要素の構成、水平構面の剛性、および柱脚の固定度を考慮し得る、簡易かつ汎用性の高い解析モデルを提案し、その有効性をシミュレーションを通して検証する。

4. 研究成果

(1) ランダム入力地震動モデルの作成

地動加速度の自乗平均値 σ_a 、卓越振動数 ω_g 、形状係数 h_g 、有効継続時間 T_d のそれぞれを目的変数、マグニチュード M 、震央距離 Δ 、震源深さ D 、表層20mの平均S波速度 V を説明変数とする回帰モデルの関数形を次のように仮定して

$$\begin{aligned} \log Y = & c_0 + c_1 M + c_2 M^2 \\ & + c_3 \log \Delta + c_4 (\log \Delta)^2 + c_5 \Delta + c_6 \Delta^2 \\ & + c_7 D + c_8 D^2 \end{aligned}$$

$+c_9 \log V + c_{10}(\log V)^2 + c_{11}V + c_{12}V^2$
 $c_1 \sim c_{12}$ の項の採否を 12 ビットの遺伝子を用いて表し、AIC を適合度の指標とする遺伝的アルゴリズムにより作成した回帰モデル（地表面の場合）の各回帰係数を表 1 [学会発表②より抜粋]に示す。

表 1 回帰モデル(地表面)

	Y			
	σ_a	ω_g	h_g	T_d
c_0	7.83E+00	9.43E-01	-3.79E+00	-2.28E+00
c_1	-6.16E-01	-3.66E-01	6.71E-01	2.97E-01
c_2	7.80E-02	2.22E-02	-3.36E-02	-1.19E-02
c_3	-6.94E+00	1.15E+00	-2.97E-01	3.09E+00
c_4	2.37E+00	-3.06E-01		-1.13E+00
c_5	-1.83E-02			8.57E-03
c_6	1.53E-05	1.52E-06		-7.86E-06
c_7	7.58E-03			2.59E-03
c_8	-2.27E-05		-1.14E-05	-2.26E-05
c_9				
c_{10}	-1.38E-02		1.89E-01	-3.29E-02
c_{11}	8.50E-04	3.87E-03	0.00E+00	
c_{12}	-1.07E-06	-4.39E-06	-9.42E-07	
σ_ε	0.203	0.209	0.494	0.181

表 1 には併せて、各目的変数に対する対数残差の標準偏差 σ_ε を示している。さらに、表 1 のモデルを用いて表される擬似加速度型パワースペクトル密度関数モデル

$$S(\omega) = \frac{4h_g \omega_g \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4h_g^2 \omega_g^2} \sigma_a^2$$

の観測スペクトルに対する対数誤差（振動数に関する RMS 値）を図 1 に示す。

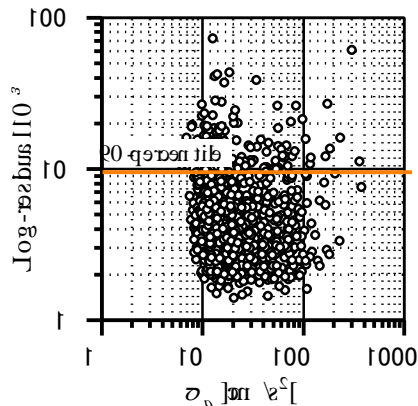


図 1 パワースペクトル密度関数の誤差分布

個々の目的変数の誤差は、形状係数 h_g ではやや大きな値をとるものの、その他のパラメータについては、概ね許容し得るレベルに抑えられている ($10^{-0.2} \sim 10^{0.2} = 0.63 \sim 1.58$)。また、パワースペクトル密度関数の対数誤差 ε の中央値は $\varepsilon = 0.586$ ($10^\varepsilon = 3.85$)、90 パーセンタイルは $\varepsilon = 0.997$ ($10^\varepsilon = 9.93$) であった。図 2 に、中央値付近の評価例として、2004 年新潟県中越地震における NIG014(三条)におけるパワースペクトル密度関数モデル（対数誤差 $\varepsilon = 0.576$ ）を示す。

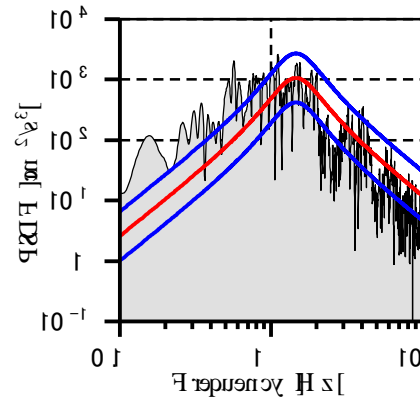


図 2 パワースペクトル関数の評価例

本研究で開発した、遺伝的アルゴリズムによる回帰モデルの関数形の探索法は、様々な目的変数の回帰モデルの作成に適用が可能であり、今後、更なる応用が期待される。PGA, PGV のような「地震動強さ」の指標に対しては所謂「距離減衰式」として、その回帰モデルの関数形について様々な提案がなされている。しかし、本研究で検討した卓越振動数や形状係数などのような「非」強度指標については経験的知見に乏しく、各説明変数（地震指標、観測点指標）との物理的関係も必ずしも明確ではないため、回帰モデルの関数形の探索を含む本手法の適用が特に有効であると考えられる。

既往の地震動スペクトルの距離減衰式では、回帰係数が振動数の関数として与えられるのに対して、本研究のランダム入力地震動モデルは、極少数のパラメータでスペクトル形状が規定されるため、使用が容易であり、利便性が高い。また、作成したパワースペクトル密度関数モデルは、ランダム応答解析の入力地震動モデルとしてのみならず、模擬地震動を作成するためのスペクトルモデルとして容易に用いることが可能であり、モンテカルロシミュレーション等、広い応用が期待される。

(2) ランダム入力地震動モデルの応用

① 地震信頼性解析

弾塑性構造物のデザインポイントに基づく一次近似信頼性手法により、地震信頼性を

評価し、モンテカルロシミュレーションとの比較により、「安全側」近似評価としての有効性と適用範囲を確認した。

また、より精度の高い地震信頼性の評価を目標として、多層構造物の応答包絡線過程の多次元レーリー分布によるモデル化と高速モンテカルロ積分による非定常・初通過破壊確率の評価手法を開発し、有効性を確認した。

② ダンパー付き構造物の最適設計

Maxwell型減衰要素としてモデル化される粘弾性ダンパーを有する多層構造物の最適設計法を開発した。構造物の定常ランダム地震入力に対する定常エネルギー応答に基づいて評価した統計的等価減衰定数を性能指標とし、これを最小化するようなダンパー量の分布を求めた。得られた最適ダンパーの有効性を、モンテカルロシミュレーション及び、観測地震動に対する応答シミュレーションを通して確かめた。

本手法で最適化の目的関数とした統計的等価減衰定数は、構造物の特性（線形／非線形）、ダンパーの種別（粘弾性／弾塑性）に依らず共通の指標として評価可能であり、別種の構造物の最適設計、あるいは耐震安全性評価への応用が大いに期待される。

③ 木造建物の解析モデルの作成

既存木造住宅の耐震補強前後の復元力特性をモデル化し、補強効果の定量的評価を行った。そして、指定された地震入力スペクトルに対して、「重量軽減」、「減衰付加」、「降伏後の剛性付加」等の各種補強効果を「補強耐力換算値」として統一的に簡易に評価する手法を開発した。本手法により、要求性能を達成するために必要な補強量とその方法を容易に見出すことが可能になった。

また、伝統木造構法を対象に、鉛直構面の線形／非線形耐力要素、水平構面の剛性、ならびに柱脚の固定度を考慮した、簡易であり、かつ高い汎用性を持つ解析モデルを開発し、その有効性を実大震動実験のシミュレーションにより確認した。

本研究課題は「ランダム入力地震動モデル作成」と「ランダム入力地震動モデルの応用」の2つのフェーズから構成されているが、本項の検討は、「応用」を前提とした、解析モデル・解析手法の開発に留まるものであり、今後も更なる展開が必要である。特に、木造建物のように、強い非線形性を持つ構造物のランダム応答解析では、復元力特性の統計的等価線形化の精度が応答評価の精度に強く影響を及ぼすため、今後、復元力の飽和特性を考慮した非ガウス分布を用い、統計的等価線形化法の高精度化に取り組む予定である。

④ その他

地震時の室内家具の移動・転倒による被害発生と回避・避難行動のシミュレーションへの応用を前提として、動的応答解析と連動したマルチエージェントモデルを開発した。

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3件)

- ① 鈴木三四郎, 川端佑輔, 山田明, 向坊恭介, 鈴木祥之, 伝統構法木造軸組の実大震動実験の解析的再現性, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 663, 2011, 935-942
- ② 松田敏, Maxwell型粘性ダンパーを有する構造物の統計的等価減衰定数に基づく最適設計, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 667, 2011, 1649-1657
- ③ 山田明, 鈴木三四郎, 既存木造住宅の耐震補強効果に簡易評価法, 査読有, Vol. 659, 2010, 105-112

[学会発表] (計17件)

- ① 根津達也, 松田敏, バイリニア1質点系の等価線形化に基づく地震信頼性評価, 日本建築学会大会(関東), 2011.8.23, 早稲田大学
- ② 櫻井一成, 松田敏, 遺伝的アルゴリズムによる統計的ランダム入力地震動モデルの作成, 第13回日本地震工学シンポジウム, 2010.11.17, つくば国際会議場
- ③ 杉山善廣, 鈴木三四郎, 地震時の家具の転倒が人的被害に及ぼす影響について, 第13回日本地震工学シンポジウム, 2010.11.17, つくば国際会議場
- ④ 櫻井一成, 松田敏, 最尤法と遺伝的アルゴリズムによる地震動スペクトルの回帰モデルの作成, 日本建築学会大会(北陸), 2010.9.9, 富山大学
- ⑤ 八木宏幸, 松田敏, 計測震度を指定したランダム入力地震動モデルの作成, 日本建築学会大会(北陸), 2010.9.9, 富山大学
- ⑥ 八木宏幸, 松田敏, モンテカルロシミュレーションによる木造建物の地震損傷確率の評価, 日本建築学会大会(東北), 2009.8.26, 東北学院大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 敏 (MATSUDA SATOSHI)
関西大学・環境都市工学部・准教授
研究者番号: 60278603

(2) 研究分担者

鈴木 三四郎 (SUZUKI SANSHIRO)
関西大学・環境都市工学部・教授
研究者番号: 40067749