

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360177

研究課題名(和文)地震動集合の有する情報量を用いて不確実な状況での信頼性を考慮した設計入力波合成法

研究課題名(英文)A method to synthesize reliable input motions for seismic design considering the effect of various uncertainty factors using the concept of information theory

研究代表者

本田 利器 (HONDA, Riki)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：60301248

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,100,000円

研究成果の概要(和文)：耐震設計で考慮する外力の選定において、地震動強度等に基づいて選出された数波の地震動ではなく、考慮すべき「地震動の集合」の全体を用いるという考え方を提案した。まず、地震動の集合が有する耐震設計における価値(有用性)を情報量に基づき評価し、地震動集合を設定する手法を提案した。さらに、設定した地震動集合の持つ「情報」を反映した設計入力地震動を用いることを提案し、集合に含まれる地震動を「学習」させて、集合を代表する設計用地震動を合成することを提案した。また、この考え方に基づく波形合成法として、JSダイバージェンスやクラスタリング手法等を導入した手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：This research proposes a concept that, for the seismic design, not a few strong ground motions, but a whole set of input ground motions should be considered. To implement this concept, we developed a scheme to determine the set of ground motions in which their value in terms of their effect on the seismic performance of the structures are evaluated by information entropy. Also proposed a practical method to synthesize the ground motions that represent the set of ground motions, in which a candidate of input motion “learns” other waves to grow a representative wave to be considered in the seismic design. The develop method uses Jensen-Shannon divergence for stable computation of information quantity and utilizes clustering method to deal with a wide range of ground motions efficiently.

研究分野：地震工学・維持管理工学

キーワード：設計入力地震動 耐震設計 情報エントロピー 不確実性 非線形挙動

1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物の耐震設計法として普及の進んでいる性能規程型設計では、動的解析を用いることも多く、設計地震動を適切に設定することの重要性は高い。

強震動シミュレーションや構造解析の技術は進歩を続けているが、現在でも(おそらく将来においても)地震や構造物挙動については様々な不確実因子は残有しており、耐震安全性の評価においては、これらの不確実性の影響を合理的に考慮する必要がある。

不確実性を考慮した設計地震動の設定手法については、確率論的手法、発生確率や、ハザード曲線、フラジリティ曲線の評価の合理化に関する研究は多い。また、極限外乱法のように、最も厳しい波形を用いる手法等もある。

これら既往の手法は、地震動強度指標値にもとづいて十分に強いと考えられる設計地震動を性能照査において考慮することで、想定すべきそのほかの地震動に対する安全性を確保するものである。しかし、実際の構造系の非線形挙動は、複雑で様々な不確定要因に対する感度も高いため、安定した評価は容易ではない。従来手法は、このような非線形現象の予測の難しさに起因する不確実性を明確な形で考慮していない。例えば、非線形応答スペクトルなどの検討はなされてきているが、実際の構造物の複雑な挙動に対する関係性は明確では無い。そのため、どのような設計地震動を選ぶべきかが不明瞭であり、また、その設計地震動によりどの程度の信頼性が得られるのかも明確ではなかった。

多くの研究がなされてきているが、実際の構造物の損傷という非線形挙動へ与える影響を正確に定量化できる地震動強度指標は見いだされていない。そのため、設計地震動の設定について、新たな考え方に基づくことが求められている。

2. 研究の目的

本研究では、耐震設計で考慮する外力として、地震動強度等に基づいて選出された数波の地震動ではなく、考慮すべき「地震動の集合」の全体を用いるという考え方を提案し検証することを目的とする。また、そのような考え方に基づく実用的な方法も提示するため、耐震設計用で用いる入力波を合成する手法を構築することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、2つの要素から構成される。第1の要素は、想定する地震動の集合の設定である。ここでは、地震動の集合が有する耐震設計における価値(有用性)の評価に基づき、想定すべき地震動集合の設定法を構築する。第2の要素は、設定された地震動集合を代表

する設計用入力地震動の合成である。以下に、それぞれの成果について述べる。

(1) 想定する地震動の集合の設定

想定する様々な地震シナリオから生じる地震動の全体の集合を対象として考える場合、その集合の設計外力としての価値は、そこに含まれる地震動の数や、特定の地震動の発生確率等では決まらない。発生確率が低くとも考慮すべき地震動等も考えられるからである。本研究では、地震動の集合が内包する「情報量」の多さに着目する。ある程度以上の強さや発生確率を有した地震動の集合が、様々な地震動を含む場合、構造物に求められる要求性能も高まるからである。

地震動集合の情報を評価する手法としては、研究代表者らが地震動の類似性を評価するために開発した手法を援用した。これは、集合に含まれる地震動の地震動強度指標(非線形応答スペクトル値等)の値を特徴指標として用い、そのばらつきを情報エントロピーを用いて定量化する手法である。この手法を地震動の集合の評価に用いることの理論的分析や利点は、研究代表者らによって、既に一部検討されており、本課題では具体的な適用手法を検討した。

設計で想定すべき地震動は、新しいシナリオを想定するたびに増加するため、上限無く増加し続ける。提案する手法では、新たに地震動が加えられることによる地震動集合の「情報量」の変化を調べた。波形の追加に伴う情報量の増加が見られなくなった段階で、想定すべき「情報」はほぼ集合に取り込まれたと判断することができ、それ以上地震波を追加する効果は低くなる。

(2) 地震動の集合の情報を反映させた設計用入力波形の合成

上述の考え方で地震動の集合を定義することは可能であるが、それに含まれる地震動のすべてを耐震設計に利用することは現実的ではない。そのため、地震動集合の有する情報量を反映した波形を合成し、それを設計用入力波とするという手法を開発した。

地震動の集合の有する設計用入力波形としての「情報」を効率的に設計用波形に反映させるためには、単に最強の地震動を選出するのではなく、集合の有する様々な性質を取り込ませる必要がある。そこで、地震動波形の合成を、波形が集合の特性を逐次学習していくプロセスとして定式化する。

学習においては、時間周波数特性の更新による手法などが考えられるが、このような研究は過去にほとんど例がないため、効率的な学習方法の開発は重要な課題であった。本研究では、このプロセスを、情報幾何空間内での探索問題として定式化した。

4. 研究成果

(1) 地震動集合の設定について

入力地震動の候補に対して保証したい耐震強度の程度が与えられたときに、目標の耐震強度を間接的に保証するような特定の波形を選ぶのではなく、耐震強度を保証したい範囲にある入力地震動の集合を、直接、性能照査時に考慮することを考えた。例えば、入力地震動の候補のうちの 50% に対して構造系の耐震強度を保証したい場合には、候補全体の 50% を占める入力地震動の集合を直接耐震性能照査時に考慮すればよいことになる。

本手法ではある範囲に属する複数の入力地震動を直接性能照査時に考慮するため、陽に考慮していなかった損傷メカニズムに対しても影響の強い波形が入力地震動の集合の中に含まれる可能性が高まると期待される。したがって、それらの波形を性能照査時に考慮することは、そのような損傷メカニズムに対する配慮を求めることにつながり、したがって照査を経た構造系のロバスト性が向上すると期待される。

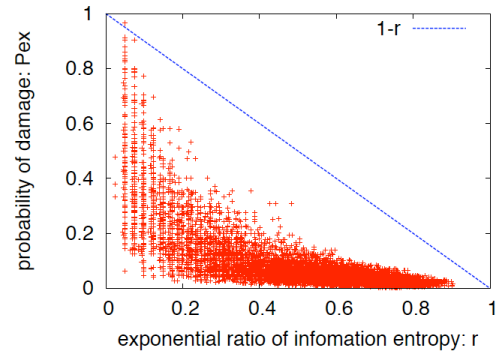
その考え方をスペクトルフィッティング波を対象としたケースを例に示す。

設計用応答スペクトルを満たす、無数の入力地震動の候補がなす集合を G とおき、 G の中から無作為に選ばれた n 波の波形の集合 g を性能照査時に考慮するものとする。このときに構造物に保証される耐震強度を、 G に属する任意の地震動による構造物の応答が、 g に属する地震動によって議論するものであるため、上述のように、 G 中の大きな範囲を占めるような g を性能照査時に考慮することで、その波形集合に対して設計した構造物の耐震強度は向上すると考えられる。そこで、 g のもつ波形の多様性を情報エントロピーに基づいて定量化した。そのうえで、それらの g に属する波形による多自由度非線形系の応答値が、全体の集合 G に属する波形による多自由度非線形系の応答値を下回る確率との関係性を検討した。

この結果、無作為に選出された波形の集合の有する多様性に基づく評価と、その選出された波形群 g に対する構造物応答が G から無作為に選出された波形に対する構造物応答を上回る確率、の関係性をプロットしたものを図に示す。同図にみられるように、明確に理論的な関係性（図では右下がりの直線で表示）があることが示された。

また、地震波の集合 g に対して、新たな波形を加えたとき、情報エントロピーがどの程度増加するかを見ることで、新たな波形を加えることの価値を定量的に評価することも検証した。これは、情報量を用いることで、設計で考慮すべき地震動の数を判断することが可能となることを意味する。

なお、設計で想定する地震動を追加すべきかどうかの判断において、情報量の増加程度を用いるという考え方は、今後重要性が増すと考えられる極大の地震動を考慮する場合



にも適用できると期待される。極大地震動が地震動集合の有する情報量に与える影響度を定量化するため、その地震動を考慮することの必要性を客観的に判断に用いることができる定量的なデータを提供できるからである。このような検討は、耐震設計における「危機耐性」の考慮の重要性を議論する上でも重要である。本研究からはこのような設計の考え方に対する示唆も得られた。

(2) 地震動の集合の情報を反映させた設計用入力波形について

ここでは、地震動の集合に多数の要素が含まれている場合の代表波の合成手法について検討した。

地震動波形に不確実性は不可避であり、それを考慮した場合、パラメタを変えた波形を多数考慮する必要があるため、対象となる集合の要素数は膨大な値になり得るからである。

(a) 類似度の評価手法について

研究代表者らは地震動波形が有する特性を抽出して波形に学習させることにより、想定される地震動群の多様な特性が反映された「代表波」を合成し、これを、設計で用いる入力波形とする手法を構築した。これは、波形をその特性に応じて、情報幾何空間に配置していると想定して、その空間での勾配を考慮して、なるべく効率的な学習による波形合成をめざすものである。

当初、波形の学習する方針を決定するのに、集合内の波形間の類似度を KL ダイバージェンスで評価していたが、計算が不安定になることもあるため、安定的に用いることができる JS ダイバージェンスの適用性について検討し、その有効性を検証した。

JS ダイバージェンスを用いた地震動間の非類似度評価においては、解析の安定性を高めるといったメリットは確認された。ただし、対象構造系に与える応答特性の異なる波形間では適切に非類似度が大きく評価される一方で、応答特性の似た波形間の非

類似度を過大評価することもあるため、運用に於いては注意が必要であることも示された。

(b) 地震動の集合の多様性が大きい場合の代表波の合成法について

本研究では、波形の「学習」法の性能を高めるのと並行して、地震動の集合の多様性が大きい場合についても検討した。

学習の対象となる集合に属する波形が、非常に異なる性質を持つ場合、これらを学習して代表波を生成するには限界があることが明らかとなった。これは、性質の大きく異なる波形の特性を1つの波形に代表させると、適正な代表波を合成できないことによる。

この問題を回避する方法として、性質の類似度に応じて地震動波形をグループ化し、グループ毎に代表波を合成する手法を提案した。ただし、波形の「グループ分け」を事前に外生的に与えることは、地震動の「強度」による順位付けと同様に、経験的で根拠が不明確なものとなるという課題がある。また、対象とする波形の数が増えたときに、グループ分けのコストも非常に高くなる。

本研究では、クラスタリングの手法を用いて、客観的に地震動のグループが形成されるというアプローチをとった。これにより作業が自動化され、膨大な数の波形を対象とする場合でも実行可能となる。

そのため、まず、地震動が構造物の非線形応答に与える影響に基づいて地震動波形群をクラスタ化する手法を提案した。

膨大な数の波形を、非線形構造物への影響も考えて扱う場合、それらがどのような分布をしているのかを事前に把握することは難しい。したがって、クラスタリングに於いても、波形間の相対的な関係性だけから生成されることが必要となる。これを考慮して、本研究では、階層型クラスタリング手法をベースに手法を開発した。

本研究では、まず、提案した手法を、設計で用いられる事の多いスペクトルフィッティング波に適用して適用性を検証した。

さらに、震源特性や伝播経路特性、サイト特性および地震動強度の類似した観測地震動記録群に対して本手法を適用し、構成された地震動のクラスタが構造系の非線形挙動に与える影響の意味で類似しているものであることを数値解析から確認し、提案手法の適用性を検証した。

地震動記録群のクラスタリング結果の分析からは、特定の部材にのみ大きな応答値を与えるなど他の波形群と応答特性の大きく異なる波形は独立したクラスタとして識別されることや、最大変位や履歴吸収エネルギーの大小という応答特性に応じた波形群のクラスタが形成されていることが確認

できた。これらの結果は、提案手法が物理特性の類似した観測地震動記録群に対して適用可能であることを示唆するものであると考えられる。

上記(a)(b)をふまえて提案した手法は、不確実性を考慮することで多数(膨大な数)になる地震波の集合を与えた場合に、それらの非線形構造系への影響の与え方という性質に基づいて自動的にクラスタ分類を行い、それぞれのクラスタに於いて「代表波」を合成するという流れになっている。

実際の運用にあたっては調整作業が必要となるが、(1)の成果とあわせることで、不確実な状況での信頼性を考慮した合理的な設計入力波を合成する手法の基本的なフレームワークを構成している。

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7件)

①本田利器・秋山充良・片岡正次郎・高橋良和・野津厚・室野剛隆:「危機耐性」を考慮した耐震設計体系 - 試案構築にむけての考察-, 土木学会論文集 A1, 査読有, (登載決定)

②宮本崇・本田利器: JS divergence に基づく地震動波形のクラスタリング手法による観測地震動記録群の分類, 土木学会論文集 A1, 査読有, (登載決定)

③宮本崇・本田利器: JS divergence を用いた地震動波形のクラスタリング手法のスペクトル適合波への適用性, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp. I_981--I_990, 2015, 査読有, DOI:10.2208/jscejsee.70.I_981

④宮本崇・本田利器: 設計入力地震動の数が構造物の耐震強度に及ぼす影響の確率的評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp. I_981-I_990, 2014, DOI:10.2208/jscejsee.70.I_981, 査読有

⑤Tauqir Ahmed and Riki Honda: Performance of nonlinear response of structures as feature indices for the selection of design ground motions, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp. I_54-I_66, 2012, , 査読有 DOI:10.2208/jscejsee.68.I_54

[学会発表] (計18件)

①宮本崇・本田利器: JS divergence に基づく地震動波形のクラスタリング手法による観測地震動記録群の分類, 第35回地震工学研究発表会, 論文番号 854, 2015年10月6-7, 東京大学生産技術研究所, 2015

②Takashi Miyamoto and Riki Honda: Setting design input motion based on information of a set of possible ground motions, Proceedings of Fourth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, International Conference Center, Waseda University, Tokyo, pp.2193-2198, 17th, November 2014 (要旨査読有)

③ 宮本 崇・本田 利器 : Jensen-Shannon divergence を用いた構造物の非線形応答値に基づく地震動波形の集合のクラスタリング, 第 14 回地震工学シンポジウム, 幕張メッセ, 千葉市, 2014 年 12 月 4 日

④ Riki Honda and Takashi Miyamoto: Synthesis of Design Ground Motion Representing the Information of a Set of Possible Ground Motions, 11th International Conference on Structural Safety & Reliability, GM10, New York, USA, 16-20, June, 2013 (要旨査読有)

⑤Takashi Miyamoto, Tauqir Ahmed and Riki Honda, Synthesis of Design Input Motion Reflecting Information of Possible Ground Motions, Paper ID 4630, Prof. of 15th World Conference on Earth-quake Engineering, Lisbon, Portugal, 24-28, September 2012

⑥Tauqir Ahmed, Takashi Miyamoto and Riki Honda, Quantification of Reliability of Ground Motion Selection by Using Nonlinear Response of Structure as Feature Indices, PaperID 4977, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 24-28, September 2012

[その他] (計 2 件)

①本田利器・野津厚・高橋良和: 「危機耐性」という考え方とそのための設計体系の指針化, 土木学会誌, 第 101 巻, 第 3 号, pp. 26-28, 2016

②本田利器: 地震動記録の「ビッグデータ」化と設計地震動, 総説, 「電力土木」, 電力土木協会, pp. 3-8, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本田 利器 (HONDA, Riki)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号: 60301248

(2) 研究分担者

宮本 崇 (MIYAMOTO, Takashi)
山梨大学・総合研究部・助教

研究者番号: 30637989