

地震動の集合が有する設計地震動としての情報量の定量的評価

東京大学大学院 学生員 ○宮本 崇
東京大学大学院 正 員 本田利器

1. はじめに

社会基盤構造物の設計は性能照査型への移行が進みつつあり、動的解析の結果によって安全性の評価を行う手法が採り入れられている。このとき、安全性の照査に用いる入力地震動の時刻歴波形を合理的に設定することは重要である。

地震現象は本質的な不確実性を有しており、震源過程や伝播経路特性、サイト特性を入力地震動の設定に反映させるためには、それらの特性が有する不確実性の影響を考慮する必要がある。しかし、設計時に想定する不確実性の幅を定めるとき、定められた不確実性の範囲の中でも複数の地震動が起こりうるため、設計地震動としてどれほどの数を考慮すれば十分か、という問題が生じる。そこで本稿は、想定した設計地震動の集合の価値を定量的に評価する方法を提案し、その有効性を検証する。

2. 提案手法

地震動の不確実性を前提とするとき、ある地点で生じうる地震動は無数に存在するが、実際の耐震設計において考慮できる設計地震動の数は限られる。考慮する設計地震動の数を増やせば、それに伴って設計される構造系の安全性は高まると考えられるが、どのような地震動を考慮するかによって安全性は異なることから、地震動の数だけで安全性を議論することは不十分である。

複数の地震動を設計で考慮する際には、似た性質の地震動を考慮することの意義は低いと考えられるため、互いに性質の異なる多様な地震動を考慮すべきである。そのように設計地震動を設定することで、設計される構造系もまた多様な地震動に対する安全性を確保できることが予想される。

ここで述べた設計地震動の集合が有する多様性とは、対象とする構造系に対する影響の観点から評価されるものである。本稿では、地震動が構造系に与える影響の評価手法として著者が提案している考え方¹⁾に基づき、設計地震動の集合が対象構造系への影響に関して有する多様性を、構造系を単純化したモデルを用いた動的解析のモンテカルロシミュレーションから得られる応答値の確率分布が有する情報エントロピーによって評価する。

n 個の実現値を有する現象において各事象の生起確率が p_i のとき、確率分布 $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ (ただし、 $\sum_{i=1}^n p_i = 1$) の有する情報エントロピー H は $H = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$ として定義される。ただし、 $0 \log 0 = 0$ とする。情報エントロピーが大きいほど確率分布は多くの情報を有していることを意味する。情報エントロピーに基づいた現象の多様性や情報量の評価は、情報理論等で広く行われている。

3. 提案手法の適用性の検証

(1) 数値シミュレーションモデル

提案手法の適用性を検証するため、数値シミュレーションを行った。

シミュレーションにおいては、設計の対象とする構造系と生じうる地震動、および設計地震動を仮想的に設定し、情報エントロピーによる設計地震動の集合の多様性の評価量と、構造系の安全性の関係を検証した。

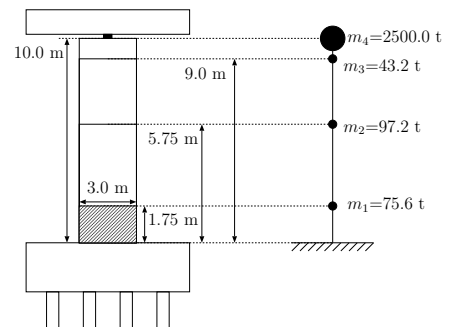


図-1 対象とする橋脚と解析モデル

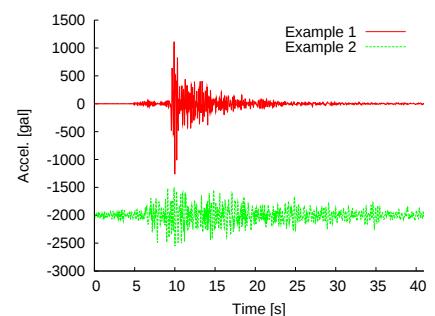


図-2 想定した地震動の時刻歴波形例

耐震設計の対象とする構造系として、図-1 に示す鉄筋コンクリート造の道路橋脚を想定し、4 自由度系にモデル化した。各集中質量をつなぐ要素は、基部から 1.75m の区間を塑性ヒンジ部としてファイバー要素によって断面をモデル化し、その他の部分は線形梁要素としている。また、対象とする構造系に対して生じる地震動として、実地震動に近いものを用いるため、K-NET から 9434 波の実強震記録を取得し、これらの記録に対して 1.0-5.0Hz のバンドパスフィルタ処理と波形のパワーが一定の範囲に収まるように振幅調整を行ったものを利用した。図-2 に、これら 9434 波形の例として 2 波形を示すが、取得した波形は周波数特性や持続時間が同図に示されるように様々に異なっている。

これらの波形の中から、設計地震動として複数の波形を用いることとする。設計地震動の集合が、対象構造系に与える影響の観点に関して有している情報量を評価するために、対象構造系の 1 次モードと同じ固有周期 (0.35s) を有するバイリニア 1 自由度系の応答を考える。不確定性を考慮するために、初期剛性および初期降伏変位にそれぞれ独立に $\pm 20\%$ の一様変動を与えたモンテカルロシミュレーションを行い、系の最大応答変位、最大応答速度、履歴吸収エネルギーの 3 応答値の結合確率分布から情報エントロピーを算出した。

(2) 適用性の検証

前述のシミュレーションモデルを用いて、以下のようにして提案手法の適用性を検証した。

今、ある n 波の入力地震動を設計地震動の集合として用いることとする。このとき、これらの設計地震動に対する構造系の応答値が n 個あれば、その最大値をもって設計時に対象橋脚の安全が保証された値と考えることができる。

構造系に対して生じうる全 9434 波に対する構造系の応答値の中で、この最大値を越えないものの割合が高い場合、構造系の安全性は高いと言える。本稿では、この割合を、 n 波の集合を用いた設計が有する安全確率と呼ぶ。

この安全確率の算出を様々な設計地震動の集合に対して行うことで、設計地震動の集合が有する情報エントロピーと、その設計地震動の集合を用いた設計が有する安全確率の関係を検証した。なお、本解析では、着目する応答値として解析モデル頂部の最大応答変位、最大応答速度、および基部の最大モーメントの 3 応答値を用い、全ての応答値に関して n 波に対する応答の最大値を越えない波形の割合を安全確率として算出している。

(3) 解析結果

ランダムに波形を選んだ設計地震動の集合に関して、設計地震動の集合が有する情報エントロピーと、設計が有する安全確率の関係を図-3 に示しているが、両者には正の相関がみられる。次に、設計地震動を順次増やしていったときの安全確率の上昇の様子を図-4 に示す。ここでは追加する波形をランダムにした 10 種類のケースを検討しており、いずれも安全確率は単調に増加しているが、その経路は様々である。一方、同じケースについて情報エントロピーの変化の様子を図-5 に示す。図-4 と比較すると、安全確率の上昇の様子と情報エントロピー上昇の様子の類似が観察される。これは、情報量エントロピーが安全確率を評価する指標として用いられ得ることを示唆する。安全確率は全波形が知られて初めて評価できるため実際には計測が不可能であるのに対し、情報エントロピーは設計波形の集合のみから評価されるために計測が可能であり、特にこの点において本提案手法は有効であると言える。

4. まとめ

本稿は、設計地震動の集合を情報量エントロピーによって評価する手法を提案した。今後も、提案手法の適用性や有効性について検証を重ねていく予定である。

参考文献

- 1) 宮本崇, 本田利器: 非線形応答値を特徴指標とする探索的な設計地震動の合成, 土木学会応用力学論文集, Vol.12, pp.601-610, 2009

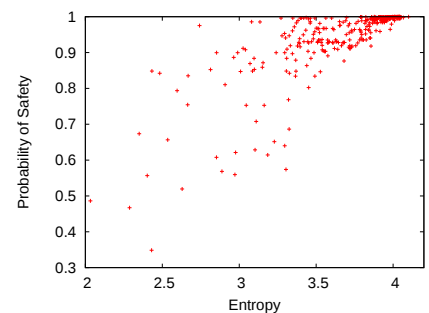


図-3 情報エントロピーと安全確率の関係

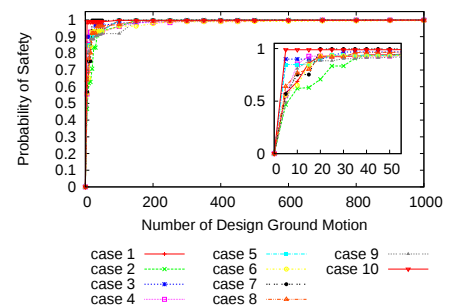


図-4 設計地震動の数と安全確率の関係

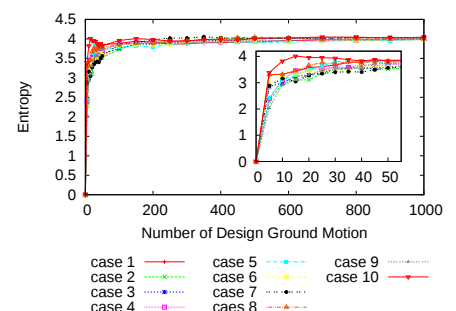


図-5 設計地震動の数と情報エントロピーの関係