

設計地震動“集合”の利用とその性能の定量的評価手法の提案

東京大学大学院 正 員 ○宮本 崇
 東京大学大学院 正 員 本田利器

1. はじめに

社会基盤構造物の耐震性能照査用地震動として、想定された条件に適合する様々な時刻歴波形から、intensity measureや構造モデルの応答値に基づいて適切な波形を選ぶことが近年は多く、様々な方法が提案されている¹⁾。ここでは、地震動波形の性能は、指標値やモデル応答値の強さとして定量化されている。しかし、実構造物の非線形挙動は、複雑なメカニズムを有する上に、想定外の損傷メカニズムが潜在することもありうる。このため、選定された時刻歴波形が、実際には設計上考慮すべき十分な性質を有しておらず、目標の安全性が達成されない可能性が高い。

本稿では、実構造物の非線形挙動が有する複雑さを前提に、より高い信頼性を達成するため、設計地震動“集合”の利用と、その性能の新しい定量化手法を提案し、その有効性を検証する。

2. 設計地震動“集合”とその性能

(1) 地震動の集合に対する性能照査

本稿では、特定の地震動波形ではなく、複数の地震動波形の集合を性能照査用の外力として考慮することを提案する。様々な特性を有した波形からなる多様な地震動の集合は、実構造物に対しても様々な損傷モードに対して多様な影響を与えられ、例えば、地震動の選定の際に考慮していない損傷モードが存在していても、多様性の高い大きな地震動の集合を性能照査に用いることで、そのような損傷モードに対しても影響の強い波形が含まれる可能性が高まると考えられる。そこで、地震動の集合が有する設計外力としての性能を、地震動の特性を表す指標に基づいて評価される集合の“大きさ”として定量化することを考える。

(2) 地震動の集合の“大きさ”の定量化

地震動の集合の大きさに着目する際に、実構造系の応答と関連の高い特性を評価するために、性能照査の対象構造系を模した非線形構造モデルの応答値を、地震動特性の指標として用いる。このとき、最大応答変位や履歴吸収エネルギー等、複数の応答値を指標として利用することで、地震動特性を様々な観点から評価する。

また、地震動特性の評価のロバスト性を向上させるために、構造モデルのパラメタに変動を与えた際の、応答値の感度を考慮する。例として、バイリニア1自由度系の最大応答変位と履歴吸収エネルギーを地震動指標として利用する際に、1自由度系の固有周期に変動を与えて応答解析のモンテカルロシミュレーションを実施する。すると、ある地震動波形の集合に対して、モデル応答値の確率密度関数が得られる。本手法ではこの確率密度関数の形状が地震動波形の特性を表していると考え、単一の構造モデルの応答値に比較して、構造パラメタに変動を与えた際の感度を考慮することで、詳細に地震動波形の特性を表現することができる。

このような考え方から、地震動波形の集合に対して、地震動特性を評価する指標はモデル応答値の確率密度関数として得られる。この確率密度関数から集合の大きさを評価するために、本手法では情報エントロピー $H[p(x)] = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i)$ を用いる。ここで、 x は構造モデルの応答値であり、 $p(x)$ はその確率密度関数を表す。また、 $p(x)$ は離散化して表現しており、 $p(x_i)$ は各階級 x_i ($i = 1, \dots, n$) における確率密度関数の値を表す。情報エントロピーは、ある確率密度関数に従って生起する事象が有するデータ量を表している。本手法ではこの量を用いることで、地震動の集合が有する大きさを、それらの集合が有する特性を指標によって表現するのに必要なデータ量として定量化する。

3. 数値シミュレーション

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実施した。

(1) 対象構造系

性能照査の対象構造系として、鉄筋コンクリート造 10 層ビルを想定した。照査における応答解析には、既往の解析例²⁾を参考に、各集中質量をつなぐパネの特性をトリリニア型 Clough モデルで表現した 10 自由度系にモデル化した。また、構造モデルに対して地震動が与える損傷値として、各パネの Park-Ang 指標 I_{PA}^j ($j = 1, \dots, 10$) を用いることとした。事前解析の結果から、解析モデルは複数の振動モードが卓越し、地震動の特性に応じて大きな損傷値を示すパネが異なるなど、複雑な挙動を示すことを確認している。

(2) 設計スペクトルに適合する地震動の集合

設計地震動が満たすべき条件として、道路橋示方書に定められるレベル 2 地震動 II 種地盤タイプ II(内陸型)の設計スペクトルを想定した。また、設計スペクトルにフィッティングする波形を、K-NET における観測波形群の位相を利用して 1000 波形作成した。

(3) 設計地震動 “集合” の性能の評価

作成された地震動 1000 波形から、複数の波形を任意に設計地震動として選ぶものとする。選ばれた地震動の集合 G が有する、設計地震動としての性能を $P^{ex}(I_{PA}^j)$ として次のように定義する。

$$P^{ex}(I_{PA}^j) = \frac{\sum_{k=1}^{1000} \text{Ind}\{I_{PA}^j[f(t)^k] > I_{PA}^j[G]\}}{1000} \quad \dots\dots\dots ①$$

ここで、 $I_{PA}^j[f(t)^k]$ は、 k 番目の地震動 $f(t)^k$ による j 番目のパネの損傷値を表し、 $I_{PA}^j[G]$ は、集合 G に属する地震動による j 番目のパネの損傷値の最大値を示す。 $P^{ex}(I_{PA}^j)$ は、設計地震動として選ばれた波形群が、最大でどの程度の強さの波形を含んでいるかを、超過確率として構造モデルの各パネに与える損傷値毎に評価した値である。

(4) 情報エントロピーの評価

地震動の集合が有する情報エントロピーの評価には、対象構造系の 1 次モード周期に固有周期を対応させた完全弾塑性バイリニア 1 自由度系の応答値を指標として利用した。初期剛性と初期降伏変位にばらつきを与えて得られる、最大応答変位と履歴吸収エネルギーの 2 値の結合確率密度関数から情報エントロピーを算出し、地震動の集合の大きさとした。

4. 解析結果

全 1000 波形の中から、2 波から 100 波の範囲でランダムに地震動の集合を選ぶ試行を 1000 ケース行った。各ケースについて、地震動の集合の情報エントロピーと、式 (1) から評価される設計地震動としての性能の関係を、各パネ毎に評価した。図-1、図-2 に示すように、intensity measure に比べて情報エントロピーはその値の上昇と共に超過確率が減少しており、適切に地震動の集合が有する設計地震動としての性能を定量化している結果を得た。解析モデル中のいずれのパネに対しても同様の結果が得られており、特に 1 次モードのみを考慮した単純なモデル応答値から算出される情報エントロピーを用いても、図-3 のように高次モードの影響が強いパネに関して設計地震動としての性能を評価できている。これは、提案手法によって、想定外の損傷メカニズムに対する設計地震動の性能を評価できることを示唆しており、本手法の有効性を示すものである。

5. おわりに

本稿は、設計地震動“集合”の利用と、その性能を情報エントロピーによって定量化する手法を提案した。今後は、手法の手続きの一般化や検証事例の蓄積を課題として検討を行っていく。

参考文献

- 1) Rajesh P. Dhakal et al.: Identification of critical ground motions for seismic performance assessment of structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* Vol.35, pp.989-1008, 2006
- 2) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計，2006

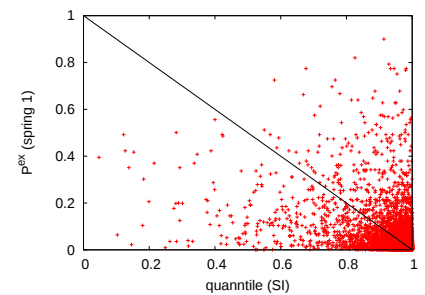


図-1 SI 値に関する quantile 値と $P^{ex}(I_{PA}^1)$ の関係 (0-1 層間のパネ)

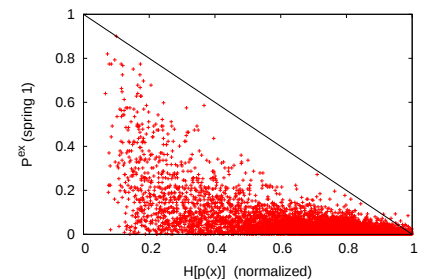


図-2 情報エントロピーと $P^{ex}(I_{PA}^1)$ の関係 (0-1 層間のパネ)

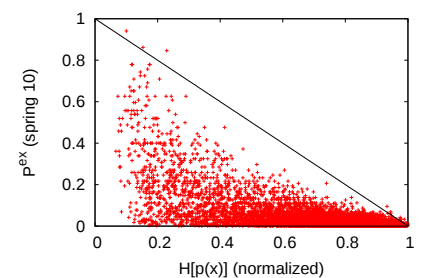


図-3 情報エントロピーと $P^{ex}(I_{PA}^{10})$ の関係 (9-10 層間のパネ)