

## 第I部門 非線形応答特性値に基づく設計入力地震動の設定手法

京都大学工学研究科 学生員 ○岡元 良輔  
 京都大学防災研究所 正会員 本田 利器

## 1. はじめに

耐震設計に用いるための非線形動的解析において、入力波形や構造物の不確定性を考慮し、合理的な設計入力地震動を設定することが重要であると考えられる。入力波形を評価する指標について様々な研究が行なわれているが、対象が非線形系となった場合では決定的となる指標はまだ確立されていない。本研究では、入力波形を応答特性値をパラメータとする特徴空間に写像し、Kullback-Leibler 距離を用いて波形を評価する。そして、この波形の評価法を設計入力地震動の設定手法へ適応する。

## 2. 入力波形の特徴空間への写像

入力波形の非線形応答特性値は波形の特性を評価する上で非常に重要な指標である。しかし、ただ1つの指標によって非線形系である構造物の破壊が表されるということではなく、指標は複数考えられる。複数の指標を用いて入力波形を評価する場合、指標間には相関性があると考えられる。従って、その場合は指標間の相関性を考慮に入れた波形の評価方法が必要である。本研究では波形を応答特性値を座標とする特徴空間に写像し、特徴空間内において、波形を評価する。特徴空間は座標がそれぞれ独立ではない非ユークリッド空間であり、通常のベクトル空間のようなノルムの概念を持たない。そこで、特徴空間におけるノルムとして Kullback-Leibler 距離 (KL 距離) を導入する。KL 距離は

$$D(p, q) = \int p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx \cdots (1)$$

と定義され、2つの確率分布  $p, q$  の距離を計る計量となっている。2つの波形を特徴空間に写像した場合、波形同士の応答特性が異なれば KL 距離は大きくなる。また、特徴空間において波形の KL 距離は指標の相関性による影響は受けない。従って、指標として複数の非線形応答特性値を導入する場合であっても、計算量が処理可能な限りは合理的に指標を取り扱うことが可能である。

## 3. 設計入力地震動の設定への適応

前述した入力波形の評価法を設計入力地震動の設定手法へ適応する。目標とする設計入力地震動を、その入力波形で設計すれば、想定される地震動全てに耐えることのできる設計が可能な波形、つまり、想定される波形群の中で最も指標とする応答特性値が大きくなる波形とする。このような波形を特徴空間内で探索する。探索手法として、ある波形を元波形として波形を更新し、目的とする設計入力地震動へと近づけていくという手法をとる。元波形との KL 距離が大きくなる、つまり応答特性が異なるように波形を更新することで、波形の指標値を大きくすることができる。その際に更新波形の指標値が大きくなり過ぎ、過剰な設計になってしまう場合を考慮し、設計に要するコストを想定する。KL 距離とコストの増分の比 (KL-コスト増分比) を

$$\frac{D(p, q)}{\Delta C} \cdots (2)$$

として、式 (2) を大きくするように元波形を更新し、目標とする設計入力地震動を得る。ただし、 $D(p, q)$  は元波形と更新波形の KL 距離、 $\Delta C$  はコストの増分を表している。図-1 に本手法の幾何学的イメージを示す。図中の小円が特徴空間に写像された波形、矢印が KL 距離、等高線がコストを表している。更新波形を3波形想定した場合、式 (2) を最大化させる波形は、KL 距離が大きく、コストの増分は小さい  $W_c$  になる。

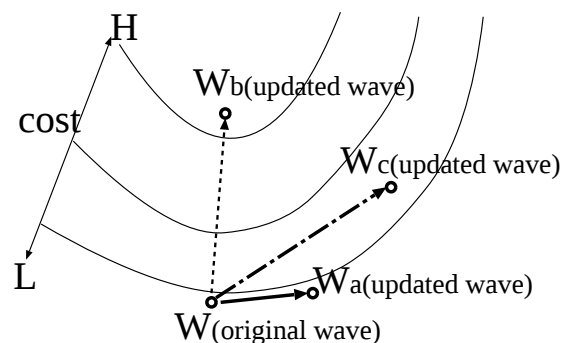


図-1 本手法の幾何学的イメージ

#### 4. 数値解析例

前節で述べた設計入力地震動の設定手法の数値解析例を示す．また，本手法の有用性を検証する．

##### (1) 解析条件

解析に用いたモデルとして1自由度バイリニア型モデルを想定した．構造物の初期剛性，降伏耐力，そして入力波形の最大振幅の位相に10%の不確定性を想定した．コスト関数を

$$C = \langle q_y + \alpha \mu^2 \rangle \cdots (3)$$

と設定した．ただし， $q_y$  は降伏耐力， $\mu$  は塑性率， $\langle \rangle$  は平均値を表す． $\alpha$  は定数で，ここでは $\alpha = 1$ とした．指標として，最大応答速度，最大応答変位，履歴吸収エネルギーの3つの指標を選んだ．2003年十勝沖地震のK-NET 広尾での余震の観測記録40波と2001年芸予地震のK-NET 広瀬での余震の観測記録66波を想定される地震動とした．計算量を減らすために，106波形の中から4波形を選んだ．これら4波形の中での指標の最大値は，不確定性を考慮した場合でも，他の102波全ての波形の指標を常に上回る値を示す4波形である．つまり，4波形に耐えることのできる構造物は，想定した106波形の全てに耐えることができる構造物であるといえる．本解析ではこれら4波形の指標を常に上回る指標を示す，想定した地震動の全てを代表する入力波形の設定を目指した．

##### (2) 解析結果

1000回のモンテカルロシミュレーションの結果，4波形の中で常に他の波形の指標を上回る波形は無かった．そこで，4波形の中から1波形を元波形として選び， $W_1$ とした． $W_1$ のウェーブレット係数を変化させて，6種の更新波形を得た．これらの更新波形は構造物モデルの固有周期やウェーブレット係数の周波数領域等を考慮して求めた6種の波形である．これらの更新波形6波の中で，どの波形が目標とする設計入力地震動に最も近い波形であるかを判別するため，元波形と更新波形のKL-コスト増分比を求めた．最もKL-コスト増分比が大きい波形を $W_{1a}$ とした．そして， $W_{1a}$ を新たな元波形として，他の波形の指標を上回るまで同様に波形の更新を繰り返し，目標とする設計入力地震動を得た．

##### (3) 有用性の検証

本手法の有用性を検証するために，本手法で設定した波形 $W''$ と想定される106波形の全ての指標を上回るように $W_1$ の振幅を一律に最小限定数倍して得た波形 $W^*$ との比較を行なった．図-2に $W''$ を，図-3に $W^*$ を示す．これら2波はどちらも想定した106波形の全ての指標を上回るように設定した波形である．従って，有用性を検証するためにはこれら2波のコストの増分による比較を行なえばよい．コストの増分による2波の比較を図-4に示す．本手法で求めた波形の方がコストの増分を抑えていることが分かる．従って，本手法を用いることで，想定される全ての地震動に耐えて，かつコストを抑えることができる合理的な設計が可能な入力波形が得られることが分かる．

#### 5. まとめ

本研究では入力波形を特徴空間に写像し，KL距離を用いることで，相関がある複数の指標を用いた場合でも合理的に入力波形を評価できる方法論を示した．設計入力地震動の設定手法へ適応し，合理的な設計が可能な設計入力地震動が得られることを示した．

#### 参考文献

- 1) 村田 昇：独立成分分析，東京電機出版局，2004
- 2) 堀口 剛，佐野 雅己：情報数理物理，講談社，2000

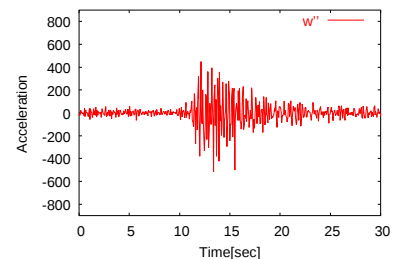


図-2 本手法で求めた波形 ( $W''$ )

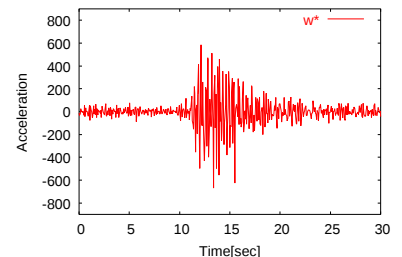


図-3 振幅を定数倍することで求めた波形 ( $W^*$ )

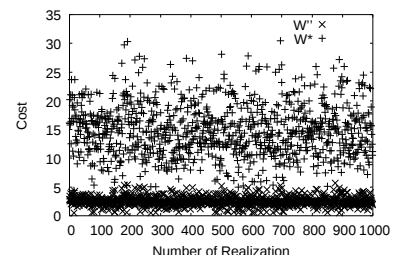


図-4 コストの増分による比較