

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

非線形動的解析に基づく耐震設計においては、地震動や構造物の不確定性を考慮し、適切な入力波形を設定することが重要である。耐震設計の観点から考えると、可能な限り「強い」入力地震動で設計の方が好ましい。入力波形の強さを表す指標に関しては様々な研究が行なわれているが、決定的となる単一の指標はまだ確立されていない。従って、複数の指標で表現することが適切であると考えられる。本研究では入力波形を複数の非線形応答特性値を座標とする特徴空間に写像する。そして、Kullback-Leibler 距離¹⁾を用いて合理的に波形を探索し、設計入力地震動を設定する手法を提案する。

2. 入力波形の特徴空間への写像

入力波形の特性を評価する上で、その非線形応答特性値は重要な指標である。しかし、非線形系構造物への影響を定量的に表現できる単一の指標というものはない。従って、複数の指標で表現することが適切であると考えられるが、その場合、指標の相関性も考慮に入れることが必要である。本研究では入力波形を非線形応答特性値を座標とする特徴空間に写像する。特徴空間とはその座標がそれぞれ独立ではない非ユークリッド空間で、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2つの確率分布 p, q の距離を計る計量として $D(p, q) = \int p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx$ と定義される。KL 距離を用いることで、指標の相関性も考慮した合理的な波形の評価が可能となり、計算量が処理可能な限りの非線形応答特性値を取り扱うことができる。

3. 設計入力地震動の設定への適用

特徴空間への入力波形の写像を設計入力地震動の設定手法に適用する。目標とする入力地震動を、その波形で設計すれば、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である、つまり、想定される波形群の中で指標とする応答特性値が最も大きくなるものとする。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るという手法をとる。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、波形の指標を大きくすることができる。その際に指標が大きくなり過ぎ、その波形で設計すれば過剰な

性能を持つ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。ここで KL 距離とコストの増分の比 (KL-コスト 増分比) を $\frac{D(p,q)}{\Delta C}$ とする。ただし、 $D(p, q)$ は元波形と更新波形の KL 距離、 ΔC はコストの増分を表している。元波形を KL-コスト 増分比が大きくなるように更新し、それを繰り返すことで目標とする入力波形へと近づけていく。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、矢印の長さが KL 距離、破線がコストの等高線を表している。更新波形として W_a, W_b, W_c の3波形想定した場合、KL-コスト 増分比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。

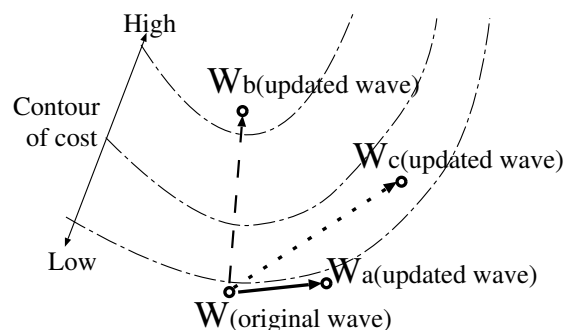


図-1 本手法の幾何学的イメージ

キーワード：設計入力地震動、非線形応答特性値、特徴空間、Kullback-Leibler 距離

連絡先：京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所

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し、本手法の有用性を検証する。

(1) 解析条件

解析には1自由度バイリニア型モデルを用いた。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 $C = \langle q_y + \alpha \mu^2 \rangle$ と想定した。ただし、 q_y は降伏耐力、 μ は塑性率、 $\langle \rangle$ は平均値を表す。 α は定数で、ここでは $\alpha = 1$ とした。考慮する応答特性指標は、最大応答速度、最大応答変位、履歴吸収エネルギーとした。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。まず第1段階として106波形の中から4波形を絞り込んだ。これら4波形の指標の最大値は、不確定性を考慮した場合でも、他の波形全ての指標を常に上回る値を示す。つまり、4波形に耐えることのできる構造物は、同時に想定した全ての波形に耐えることができる構造物である。本解析では考慮する3つの指標全てが、想定する波形の中で最も大きい値を示す代表波形の設定を目指す。

(2) 解析手順

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ものは無かった。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ものである。これらの中で、どの波形が目標とする設計入力地震動に最も近いかを判定するため、更新波形のKLコスト増分比を求め、最もKLコスト増分比が大きくなる波形を W_{1a} とした。そして、 W_{1a} を新たな元波形として、他の波形の指標より大きくなるまで更新を繰り返す、設計入力地震動を得た。

(3) 解析結果

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'' と想定される全ての波形の指標より大きくなるように W_1 の振幅を一律に最小限定数倍して得た波形 W^* とのコストの増分を比較した。図-2に W'' を、図-3に W^* を示す。 W'' と W^* のコストの増分による比較を図-4に示す。 W'' の方がコストの増分を抑えていることが分かる。従って、あるコスト関数を定めた場合、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、かつ設計に要する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非線形応答特性値を座標に持つ特徴空間に写像し、KL距離を用いることで、相関性も考慮に入れた波形の評価が可能になることを示した。その波形の評価を用いて、合理的に波形を探索し、入力地震動を設定する手法を提案した。

参考文献

- 1) 坂元 慶行, 石黒 真木夫, 北川 源四郎: 情報量統計学, 共立出版株式会社, 1983

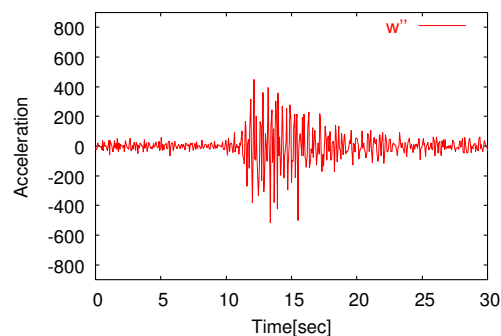


図-2 W_1 を元波形として本手法で求めた波形 (W'')

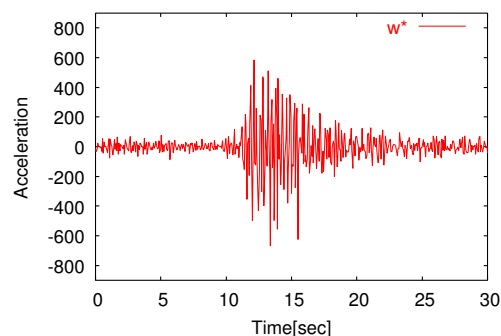


図-3 W_1 の振幅を定数倍することで求めた波形 (W^*)

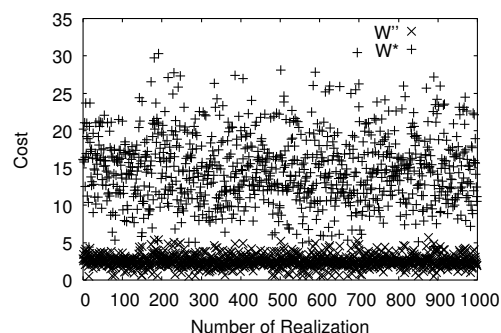


図-4 コストの増分による比較