

## JS divergence を用いた構造物の非線形応答値に基づく 地震動波形のクラスタリング

山梨大学大学院 正 員 宮本 崇  
東京大学大学院 正 員 本田利器

### 1. はじめに

耐震性能照査に用いられる設計地震動として、強震動シミュレーションから生成される波形が利用されるようになってきている。これは、設計の個別事例に応じた設計地震動を設定する有意義な手法である一方、シミュレーション上のパラメタの不確実性に起因して、波形が一意に定まらず構造物に与える影響が互いに異なる多数の設計地震動の候補が想定されうる問題がある。これに対し、地震動の候補が持つ情報が反映された設計地震動を設定することを目的として、著者らは様々な地震動波形が有する特性を抽出して集約させた人工的な代表波を合成する手法を開発している。

開発する手法は、地震動波形を性質の類似度に応じてグループ化し、グループ毎に代表波を合成するものである。このようなプロセスを実現するために、本稿では地震動波形をクラスタリングする手法を提案し、数値実験を通してその適用性を検証する。

### 2. 地震動波形のクラスタリング手法

#### (1) 地震動波形の非類似度評価

ある集合へクラスタリング手法を適用するためには、集合の各要素間の非類似度を定量的に評価する必要がある。ある地震動  $f(t)$  の性質やその非類似度を構造物に与える影響の観点から表現するために、本稿では設計の対象構造物を単純化した、パラメタにばらつきを有する非線形モデルに与える応答値  $x$  の確率分布  $p(x)$  を用いることを考える。応答値の例としては、簡単な非線形 1 自由度系の最大変位や累積エネルギーが挙げられ、 $x$  はこれら複数の応答値を要素としたベクトル値である。構造パラメタのばらつきに対する応答値の感度は地震動毎に異なり、したがって  $p(x)$  の形状もまた地震動毎に様々に変化すると考えられる。確率分布の形状を比較することにより、単一の応答値を比較する場合よりも詳細に地震動特性の非類似度を評価できると考えられる。

今、地震動  $f(t)$  と  $g(t)$  に対して、構造物応答の確率分布  $p(x)$ 、 $q(x)$  が対応付けられているものとする。このとき、 $p(x)$  と  $q(x)$  の非類似度を、次式に示す JS ダイバージェンス  $D_{JS}(p, q)$  によって評価する。

$$D_{JS}(p, q) = \frac{1}{2}D_{KL}(p, M) + \frac{1}{2}D_{KL}(q, M) \quad (1)$$

ここで、 $M$  と  $D_{KL}(p, q)$  はそれぞれ次式のように定義される。

$$M(x) = \frac{1}{2}p(x) + \frac{1}{2}q(x), \quad D_{KL}(p, q) = \sum p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} \quad (2)$$

$D_{JS}(p, q)$  は、確率分布間の距離を評価する関数として提案されたものであり、微小距離で多様体上の厳密な距離と一致するダイバージェンス関数の一種<sup>1)</sup>である。これを用いることにより、地震動の非類似度を、地震動の性質を表現する応答値の確率分布間の距離として定量化する。

#### (2) クラスタリング手法

地震動の集合のクラスタリングには、要素間の非類似度のみからアルゴリズムを構築できる階層型手法を用いる。クラスター間の非類似度は、標準的とされる群平均法によって評価する。

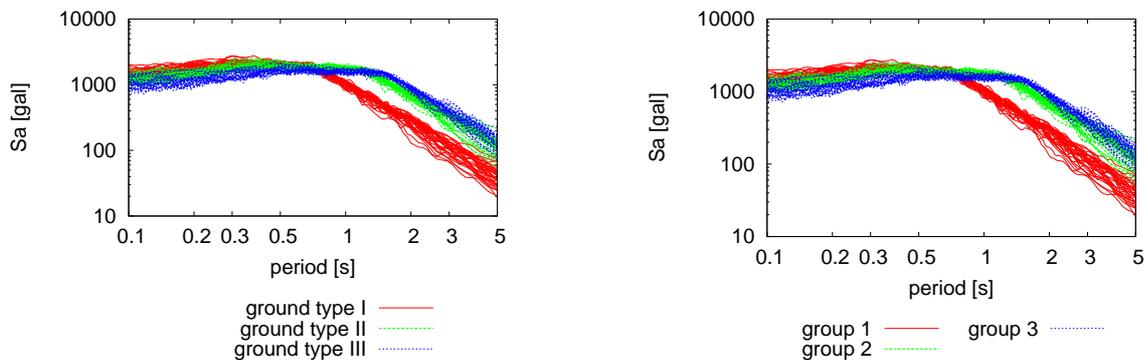
### 3. 適用性の検証

#### (1) スペクトル適合波群への適用

提案手法の適用性を、適切な分類法が既知である地震動の集合を用いて検証した。適用の対象として、道路橋示方書に示された設計スペクトルのうち、I 種地盤への適合波、II 種地盤への適合波、III 種地盤への適合波の計 3 グループからなる計 100 波を設定し、提案手法によってこれら 100 波形から地盤種別に応じた 3 グループを再現できるか検証した。

キーワード: 設計地震動, 性能照査型耐震設計, クラスタリング, 非線形応答, JS divergence

連絡先: 〒 400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11 山梨大学 工学部土木環境工学科



(a) スペクトル適合波群の応答スペクトル (b) クラスタリングから得られたグループの応答スペクトル

図-1 スペクトル適合波群への適用において対象とした波形群とクラスタリング結果

表-1 実観測波形群への適用において対象とした記録群とクラスタリング結果

クラスタ ID	地震名称	観測点	指向性	震源距離 [km]	表層固有周期 [s]
1	2000年鳥取県西部地震	江府	直角方向	17.0	0.07
1	2004年新潟県中越地震	小出	直角方向	17.0	0.13
1	2000年鳥取県西部地震	日南	直角方向	17.0	0.1
2	2000年鳥取県西部地震	赤崎	直角方向	38.6	0.21
2	2005年福岡県西方沖地震	鎮西	直角方向	37.1	0.04
2	2004年新潟県中越地震	津南	直角方向	38.3	0.05
2	2008年岩手・宮城内陸地震	川尻	直角方向	34.0	0.5
2	2011年福島県浜通り地震	小野	直角方向	37.5	0.17
3	2011年福島県浜通り地震	日立	直角方向	37.5	0.31
4	2004年新潟県中越地震	小千谷	進行方向	37.5	0.17

図-1 に、対象とした波形群とクラスタリングによって得られた 3 グループの波形群の応答スペクトルを示す。提案手法によって、スペクトルの形状に応じて 100%の精度で元のグループが再現されており、構造系への影響によって波形が適切に分類されていることが分かる。

(2) 実観測波形群への適用

次に、地震観測記録群に対して本手法を適用した。クラスタリングの対象として、震源過程やサイト特性が類似しており、震源距離のみが異なる 8 波形を K-NET の公開するデータから選定した。また、この 8 波形に加え、ディレクティブティ効果を受けた波形 1 波と、観測地点の表層固有周期が他の波形のものよりも長く、サイト特性の異なる波形 1 波を選定し、計 10 波からなる地震動の集合に対してクラスタリング手法を適用した。

表-1 に、対象とした観測記録群とクラスタ数を 4 としたときの分類結果を示す。震源距離の小さい観測記録のグループ (クラスタ ID1) と大きいグループ (クラスタ ID2) が形成されていることに加え、表層固有周期が長い波形 (クラスタ ID3) と断層破壊の進行方向にありディレクティブティ効果が表れた波形 (クラスタ ID4) の 2 種の特異な波形が独立した、波形の属性別に分類された結果が得られた。提案手法による波形の分類結果が、震源過程や距離減衰、サイト増幅といった、地震動特性や構造系の地震応答に大きな影響を与える要素による分類と一致した、妥当なものであることが示された。

4. おわりに

本稿では、地震動の集合を構造系に与える影響の観点からクラスタリングする手法を提案し、その適用性を検証した。本手法により、設計地点の地震ハザードや不確実性を反映して生じる多数の設計地震動を、構造系に与える影響に応じてグループ化することが可能になり、グループ毎の代表波を合成することにより合理的な設計地震動の設定が可能になると考えられる。

参考文献

1) Fuglede, B. & Topsoe, F.:Jensen-Shannon divergence and Hilbert space embedding, *IEEE Int. Symp. Inform. Theory*, pp.31-36, 2014