

時間-周波数特性を考慮した地震動の次元縮約手法と波形分析に関する検討

岐阜大学大学院	学生会員	○加藤 有人
岐阜大学流域圏科学研究センター	正会員	久世 益充
岐阜大学工学部	正会員	能島 暢呂
岐阜大学大学院	学生会員	高橋 幸宏

1. はじめに

地震動の工学的特性（振幅・周期・経時特性）は、地震動の特徴を知るための基礎的な情報である。例えば、地震動の振幅・周期特性を表す応答スペクトルは、その工学的重要性和簡便性から、地震動特性の分析に用いられる。振幅・周期・経時特性を評価可能な指標として、非定常スペクトルやウェーブレット変換などが挙げられるが、データ量が元の地震動波形と同じか膨大になる。久世・能島¹⁾は、地震動波形に含まれる情報損失が少ない指標として、非定常パワースペクトル²⁾に基づく次元縮約手法を提案した。本研究では、既往研究¹⁾で提案された地震動指標をより次元縮約した手法を提案し、地震動波形の類似性評価手法について検討した。

2. 研究手法

図-1に、地震動特徴量の抽出手法を示す。同図に示すように、加速度波形より算出した非定常パワースペクトル²⁾より、周期ごとに算出した正規化累積パワーを1%刻みで離散化した周期別特徴ベクトル¹⁾を用いる。検討では、周期別特徴ベクトルより算定した密度分布を用いる。ただし、密度分布は加速度波形と比べてデータ量が増大するため、密度分布に特異値分解³⁾を適用し、得られた主成分得点を地震動特徴量として用いる。具体的には、式(1)のように、 N 個の波形よりそれぞれ算出した周期別特徴ベクトルの密度分布（時間周期軸上の密度データの数 M ）を表す M 行 N 列の行列 \mathbf{X} に対して、行列 \mathbf{X} の全要素の平均値、標準偏差で正規化した \mathbf{X}_0 に特異値分解を適用し、行列 $\mathbf{U}, \mathbf{D}, \mathbf{V}$ に分解する。

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T = \begin{pmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{M1} & \cdots & u_{MN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & d_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N1} & \cdots & v_{NN} \end{pmatrix}^T \quad (1)$$

ここで、行列 \mathbf{U} は列方向の左特異ベクトルからなる行列であり、密度分布の特性を規定するモード形状を表す。行列 \mathbf{D} は特異値の対角行列であり、各モードの重みを表す。行列 \mathbf{V} は列方向の右特異ベクトルからなる行列であり、モードにおける密度分布の重み係数を表す。次元縮約した地震動特徴量として、行列 \mathbf{D}, \mathbf{V} の積 $\mathbf{D}\mathbf{V}^T$ をモード形状の重みを表す主成分得点 $\mathbf{pcs} = \{\mathbf{pcs}_i\} (i=1, 2, \dots, n)$ と定義する。 n は分析に用いるモード数である。

地震動波形の類似度評価では、2波形 a, b より特徴ベクトル $\mathbf{pcs}_a, \mathbf{pcs}_b$ をそれぞれ算出し、ユークリッド距離に基づく非類似度を用いて評価する。

3. 周期別特徴ベクトルのモード分解

2011年東北地方太平洋沖地震で観測された防災科学技術研究所 K-NET⁴⁾の波形記録（EW成分、691波形）にモード分解を適用した。なお、波形間の時間位置を統一するため、正規化加速度累積パワーの1%を基準時間とした。図-2に示す累積寄与率より、モード9で90%以上あり、密度分布の傾向を少ない次元で表現できることがわかる。以下、モード9までの主成分得点を地震動特徴量として使用する。データ量は、加速度波形が30000（0.01秒間隔で300秒）に対して、

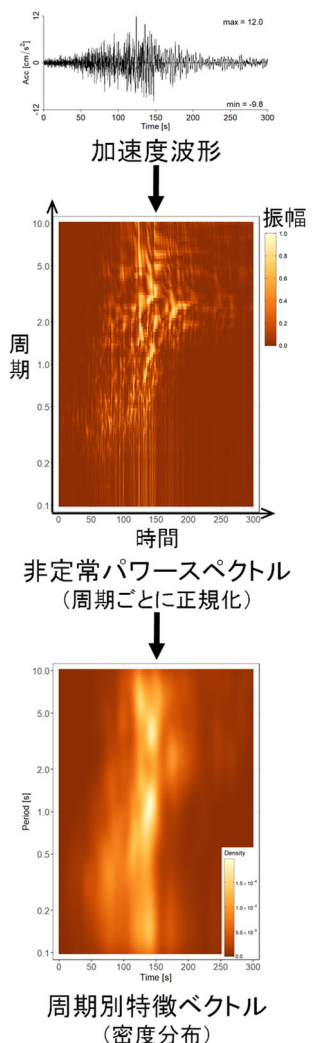


図-1 地震動特徴量の抽出

周期別特徴ベクトルの密度分布は 30401（時間軸上で 301 成分，周期軸上で 101 成分）と加速度波形と同程度であるが，個々の波形の特徴を 9 次元で表すことができた。

モード 5 までの左特異ベクトルを図-3 に示す。同色の範囲は正相関，異色の範囲は負相関の相関関係にある。図-3 より，各モードにおいて，時刻 50 秒付近を境に分布形状の違いが見られる。モード 1 は 50 秒付近，モード 2 は 0～50 秒に正值が分布しており，それぞれの時間帯の振幅のピークを表している。モード 3 は 50 秒付近に負値が見られ，50 秒前後に正の値が周期 0.1～1 秒付近に分布している。モード 4，5 は 50 秒前後で正負の値が交互に分布している。モード 4 では長周期帯で後続波と思われる分布や，モード 5 では周期によって分布が異なるなど，周期的な変動も表れている。図示は省略するが，これより高次のモードでは，より複雑な周期・時間変動を表していることを確認した。

図-4，5 に，4 波形の主成分得点と加速度波形，密度分布をそれぞれ示す。図-4 の凡例にある数値は非類似度であり，4. で後述する。図-5 に示す CHB003 の加速度波形は，50 秒付近に鋭いピークが見られ，密度分布に見られる短周期帯のピークに対応している。図-4 の主成分得点ではモード 3 が負値であり，図-3 のモード形状より，50 秒付近のピークを捉えている。双峰形の特徴が見られる IWT009 では，モード 2, 5 の主成分得点が正值であり，モード形状より，密度分布に見られる 10, 50 秒付近のピークの特徴を捉えている。

4. 主成分得点を用いた類似度評価

モード 9 までの主成分得点を用いて，CHB003 を基準に波形類似度を評価した。図-4 に示す非類似度より，CHB006 が類似した特徴を有した波形であり，主成分得点が類似の傾向を示していることがわかる。また，図-5 の加速度波形では，CHB003，CHB006 は 50 秒付近に振幅のピークが見られ，周期別特徴ベクトルも類似した分布形状である。一方，CHB003 と特徴の異なる FKS003，IWT009 の非類似度は CHB006 と差が見られることから，主成分得点を用いて，波形類似度を定量的に評価できることが確認できた。

5. まとめ

非定常パワースペクトルに基づいた地震動特徴量の検討と，モード分解により算出された主成分得点を用いた波形の類似度評価を行った。その結果，主成分得点は波形の特徴を的確に捉えており，定量的に波形を評価できることを確認できた。今後は，他地震に適用したケーススタディを行いたい。

参考文献

- 1) 久世益充，能島暢呂：混合正規分布による地震動の特徴抽出とその応用，日本地震工学会論文集，第 20 巻，第 1 号，pp.93-106，2020。
- 2) 亀田弘行：強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察，土木学会論文報告集，No.235，pp.55-62，1975。
- 3) 能島暢呂，久世益充，高橋幸宏：シナリオ地震動予測地図のモード分解による予測震度分布の空間相関特性の分析，日本地震工学会論文集，第 19 巻，第 1 号，pp.121-135，2019。
- 4) (国研)防災科学技術研究所，強震観測網(K-NET, KiK-net)，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>（最終アクセス：2022 年 12 月 13 日）

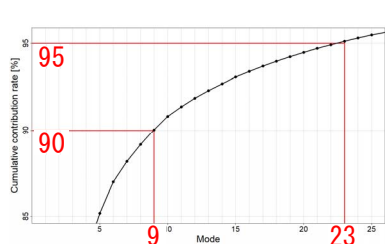


図-2 累積寄与率

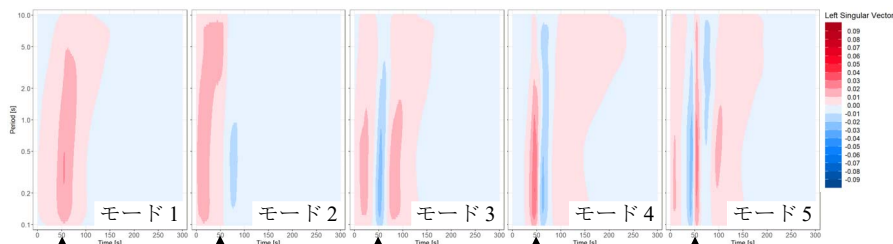


図-3 左特異ベクトルの分布（時間軸上の矢印は時刻 50 秒を表す）

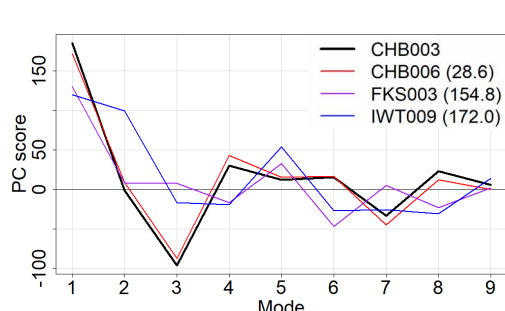


図-4 主成分得点の比較（凡例の数値は CHB003 に対する非類似度）

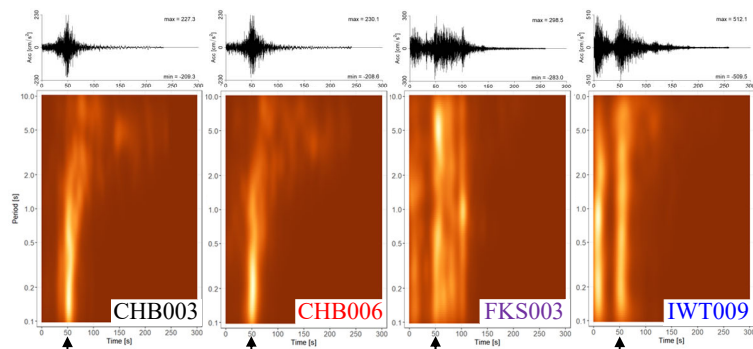


図-5 加速度波形と周期別特徴ベクトル（密度分布）の比較