

地震動分布のモード分解と線形重回帰分析に基づく予測モデル

岐阜大学大学院工学研究科博士課程 学生会員 ○高橋 幸宏
 岐阜大学工学部 正会員 能島 暢呂
 鳥取大学大学院工学研究科 正会員 香川 敬生

1. はじめに

強震動予測のレシピでは断層破壊シナリオ設定を標準化しているが、震源パラメータの設定値は、ばらつきを有している。このため、多数の断層破壊シナリオを設定し、地震動分布を計算することで、震源パラメータのばらつきが地震動分布に与える影響を評価する研究¹⁾が行われている。文献²⁾およびその後の検討では、文献¹⁾の300ケースの地震動分布に特異値分解によるモード分解を適用し、これより得た「モード形状（ばらつきの空間特性）」の支配要因を「ケース依存のモードの重み係数」と震源パラメータとの関連性より探索的に評価した。本研究では、線形重回帰分析によって、重み係数（目的変数）と震源パラメータ（説明変数）との線形関係に基づく回帰モデルを構築し、空間特性の支配要因を明らかにする。さらに線形重回帰モデルを用いて、任意の震源パラメータから地震動分布を推定するサロゲートモデルを構築する。

2. 地震動分布データとモード分解

文献¹⁾では、横ずれ断層（長さ26km、幅16km、傾斜角90度）における300ケースの断層破壊シナリオを設定し、周期・成分別の絶対加速度応答値の分布を計算した。各ケースの震源パラメータは、レシピの標準値にそのばらつきをランダムに与えて設定している。また、計算範囲の地盤構造は水平成層としている。

本研究では、文献¹⁾の地震動分布データの対称性を考慮し、断層モデルを反転させた300ケースを加えた計600ケースに特異値分解を適用した。本稿では破壊伝播効果の影響が明瞭な断層直交成分（FN）・周期2.0秒について示す。モード形状（図-1）の特徴（括弧内は支配要因となる震源パラメータ）を下記に示す。

- ・モード1：距離減衰勾配を表すモード（アスペリティの鉛直位置、破壊伝播速度、破壊開始点の位置）
- ・モード2：フォワード・ディレクティビティ効果の影響を表すモード（破壊開始点の位置）
- ・モード3：ほぼ全域での地震動強度の変動とバイラテラルな破壊進展を表すモード（破壊開始点の位置）

モード3, 6, 10, 15までの累積寄与率はそれぞれ96.9%, 97.7%, 98.3%, 98.7%である。モード形状は高次モードになるほど複雑化していき、地震動分布の細部を表していると考えられる。

3. 線形重回帰分析に基づくモードの解釈

300ケースの「震源パラメータ」（説明変数）と「重み係数」（目的変数）のデータセットを、教師データ200ケースとテストデータ100ケースにランダムに振り分けた。次に、教師データに線形重回帰分析を適用し、回帰モデルを構築した。ここで、ステップワイズ法によって説明変数を選択し、赤池情報量規準（AIC）が最小となるモデルを最終的に採用した。

表-1にモード1～3までの線形重回帰モデルに用いる震源パラメータの係数とその有意確率であるp値を示す。モード1～3をそれぞれ説明する主要な震源パラメータは、上記に示した支配要因と整合性が取れている。また、モード2・3は、互いに異なる震源パラメータを主要な説明変数とし、両モードで震源パラメータの違いによる地震動の大まかな特徴が表現されていると考えられる。



図-1 モード形状（FN成分・周期2.0秒）

表-1 回帰モデルに用いる震源パラメータの係数（赤色のセル：同一のパラメータの中で係数の絶対値が最大、灰色のセル：説明変数から除去されたパラメータ、***：0% ≤ p値 < 0.1%, **：0.1% ≤ p値 < 1.0%, *：1.0% ≤ p値 < 5.0%）

| Mode | 切片 | 地震モーメント | 破壊伝播速度 | 破壊開始点の位置 | | 大きなアスペリティの中心 | | 小さなアスペリティの中心 | | アスペリティ面積比 | 破壊開始点の水平配置パターン |
|------|-----------|-----------|---------------|---------------|------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|----------------|
| | | | | 水平 | 鉛直 | 水平 | 鉛直 | 水平 | 鉛直 | | |
| 1 | 0.306 | -0.0110 | 8.49.E-03 *** | | -1.83.E-03 | | 2.37.E-03 * | | 5.07.E-05 | 1.82.E-02 * | -1.46.E-03 *** |
| 2 | -0.0518 | | 1.78.E-02 | 7.94.E-03 *** | | -6.15.E-03 *** | | -1.16.E-03 *** | | | |
| 3 | -12.0 *** | 0.446 *** | 1.45.E-01 *** | 8.25.E-04 | 3.36.E-02 | -1.14.E-03 | -3.19.E-02 | | 1.41.E-03 * | -5.37.E-01 *** | -3.87.E-02 *** |

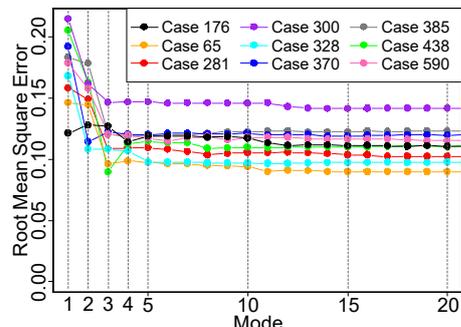
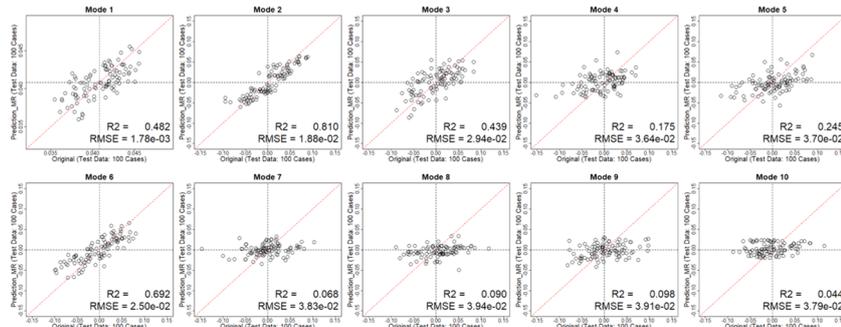


図-2 テストデータの重み係数（横軸）と線形重回帰モデルによる予測値（縦軸）の散布図（黒色の破線：600 ケースの重み係数の平均値）

図-3 代表9ケースにおけるモード数の増加に伴う予測モデルのRMSEの変動

4. 線形重回帰モデルに基づく地震動分布の予測モデル

線形重回帰モデルによるモード1～10のテストデータの重み係数の予測値を図-2に示す。寄与が高いモード1～3およびモード6では、重み係数と予測値との2乗平均平方誤差（RMSE）は小さく、精度よく表現できている。一方、その他のモード（モード4, 5, 7～10）では、予測レンジは実際の値よりもやや狭まる傾向にある。この傾向はモード11以上でも同様であり、高次モードほど予測モデルの精度が低下している。

次に、所与の震源パラメータを線形重回帰モデルに入力して重み係数を求め、モード合成により地震動分布を予測する。ここで図-3に、モード2・3の寄与がほぼない1ケース（黒線）と大きい8ケース（黒以外の線）における、モード数別の予測モデルのRMSEを示す。モード数の増加に伴うRMSEの減少効果は、モード1～3で顕著に現れ、モード15でほぼ見られなくなった。これより、本研究ではモード1～15を予測モデルの対象とした。

図-3の9ケースのうち5ケースの強震動シミュレーションによる地震動分布（図-4）と予測地震動分布（図-5）とを比較する。図-4のケース328, 370, 438の強震動域の広がりやモード2（ユニラテラルな破壊進展）の空間特性を反映しており、ケース385, 590ではモード3（バイラテラルな破壊進展）を反映している。これらの強震動域の広がりや、図-5の地震動分布でも概略的に表現されている。両地震動分布の散布図を図-6に示す。元データと予測値のばらつきは小さく、元データの全般的な特徴を表現できていることが読み取れる。一方で、高次モードの重み係数は線形重回帰モデルの予測精度が低いため、地震動の細部の広がりについては表現しきれていない。

5. 今後の課題

今後は、他の周期（0.1～1秒）や成分（断層走向成分：FP）についても同様の検討を進め、震源パラメータとモード形状の関連性に関する周期・成分間の違いについて考察する。また、本研究では線形重回帰モデルを用いたが、非線形性を考慮して、機械学習を用いた回帰モデルも構築している³⁾。両モデルの比較についても検討を進める方針である。

参考文献

- 1) 香川敬生: 多数の断層破壊シナリオによる強震動周期特性の空間分布, 日本地震工学論文集, Vol. 15, No. 70, pp. 90-99, 2015.
- 2) 高橋幸宏, 能島暢呂, 香川敬生: 地震動分布のモード分解による周期・方位依存の空間特性の分析, 第40回地震工学研究発表会講演概要集, 論文番号 D13-1653, 2020.
- 3) 高橋幸宏, 能島暢呂, 香川敬生: 地震動分布のモード分解とサポートベクトル回帰に基づく予測モデル, 第39回日本自然災害学会学術講演会, 2021.

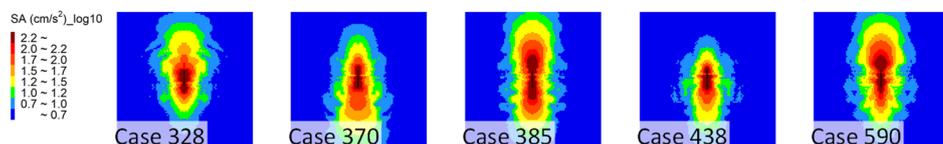


図-4 強震動シミュレーションによる地震動分布（常用対数）

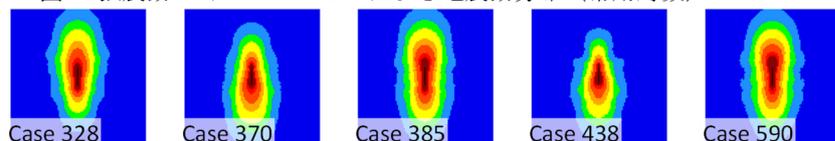


図-5 線形重回帰モデルによる予測地震動分布（常用対数）

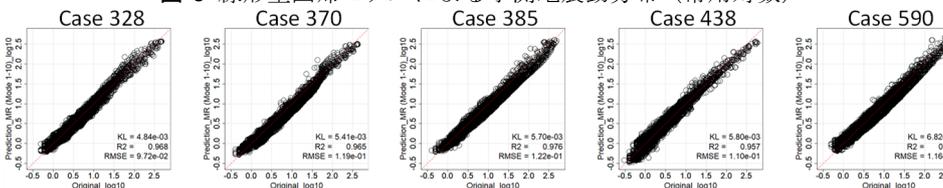


図-6 強震動シミュレーションによる地震動（横軸）と線形重回帰モデルによる予測値（縦軸）の散布図（両軸ともに絶対加速度応答値[cm/s²]の常用対数）