

固有直交分解を用いた地震による建物損傷の確率論的リスク評価

○東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 学生会員 宇佐美 秀和
 東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 学生会員 外里 健太
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 森口 周二
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎

1. 研究の目的

近年、数値解析技術の進歩により、地震被害に関する詳細なデータを得ることが可能となってきた。しかし、確率論的にそのリスクを評価するためには、膨大な数の計算を行う必要があり、要する計算コストが大きくなることが課題である。そこで本研究では、数値解析結果からデータの特徴を抽出し、簡易的な計算によって低コストでリスク評価を可能とする手法を提案する。具体的には、近年地震被害が増えているチェンマイの一部の地域を対象として、建物損傷の数値解析結果に対して固有直交分解を適用し、データの特徴を表す固有モードを抽出する。そのモードの線形結合によって表現される代理モデルを作成し、モンテカルロシミュレーションを行うことで確率論的被害マップを作成する。

2. 損傷評価とモード分解

2.1 地震による建物の損傷評価手法

地震による建物の損傷評価には、CSM(Capacity Spectrum Method)¹⁾とHAZUS(Hazards U.S.)²⁾を用いた数値解析を用いた。CSMは地震動の応答スペクトルと建物固有の荷重変位曲線を縮約した耐力スペクトルから建物の応答を求める手法である。HAZUSは災害のリスク評価のために開発された枠組みであり、その中には地震ハザードによる、建物やライフラインなどの損傷確率を推定可能な手法も含まれている。本研究では、この損傷確率のデータを対象としてリスク評価を行う。

2.2 モード分解

あるケース*i*における建物損傷確率の数値解析結果 $\mathbf{x}_i(n$ 次元)を列として N ケース並べた行列 $\mathbf{X}$ を定義する。本研究では($N \ll n$)としているので、 $\mathbf{X}$ と $\mathbf{X}^T$ を次元が小さくなるように掛け合わせて共分散行列 $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ を定義し、固有値分解を行う。このとき得られる固有値と固有ベクトルをそれぞれ λ_j , $\mathbf{v}_j$ とし、固有ベクトルを列方向に並べた行列を $\mathbf{V}$ とする。これらを用いて次式のように $\mathbf{X}$ の特異値分解³⁾を考える。

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{\Sigma}$ は固有値の平方根を対角項に並べた行列であり、 $\mathbf{U}$ は空間モード $\mathbf{u}_j$ が列方向に並んだ行列である。また、式

(1)を変形すると次式のようになり、あるケース*i*の数値解析結果 $\mathbf{x}_i$ は係数 α_{ij} とモード $\mathbf{u}_j$ で表すことができる。

$$\mathbf{x}_i = \sum_{j=1}^N (\sigma_j \mathbf{v}_{ij}^T) \mathbf{u}_j = \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} \mathbf{u}_j \quad (2)$$

3. 代理モデルの作成

解析対象をチェンマイの一部とし、建物数を80290棟、震源の位置を図-1のように5か所(A～E)、マグニチュードを4.0から7.0まで0.25刻みで13種類変化させ、計65のシナリオで解析を行った。係数 α をマグニチュード(M)と震源の位置(震源Eから断層に沿って測った距離 l_e)の関数 A_j として表現し、モードと線形結合することで、次式のような建物損傷確率の代理モデル $\hat{\mathbf{x}}$ を作成することができる。

$$\hat{\mathbf{x}}(l_e, M) = \sum_{j=1}^r A_j(l_e, M) \mathbf{u}_j \quad (3)$$

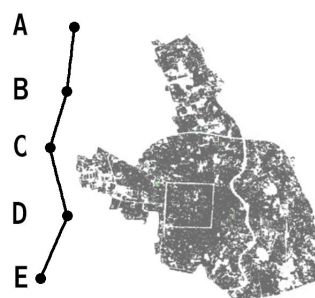


図-1 解析対象地域と断層の位置関係

情報量の少ないモードを削減するとき、寄与率や誤差を考慮する必要がある。シナリオ*i*のすべての建物の誤差率の平均 $e_i(\%)$ は式(4)で定義し、 x_{ij} と $\hat{x}_{ij}$ はそれぞれシナリオ*i*における建物*j*の損傷確率の数値解析結果と代理モデルから得られる結果である。図-2は使用したモード数と誤差率平均の関係を表しており、本研究では第4モードまで使用して代理モデルを作成することとした。M5.2震源BC間の地震に対する建物損傷確率の数値解析結果と代理モデルを用いて計算した結果をそれぞれ図-3と図-4に示す。数値解析結果と代理モデルを用いて計算した結果の各建物の誤差率のヒストグラムを図-5に示す。誤差はおおむね5%以下であった。このように、代理モデルを用いて任意のマグ

Key Words: 地震, 建物被害予測, 固有直交分解, モンテカルロシミュレーション

〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 災害科学国際研究所 4F S403-S404, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133

ニチュードと震源位置の地震による建物損傷確率を計算することが可能である。

$$e_i = \sum_{j=1}^N \left(\frac{|x_{ij} - \hat{x}_{ij}|}{x_{ij}} \times 100 \right) \times \frac{1}{N} \quad (4)$$

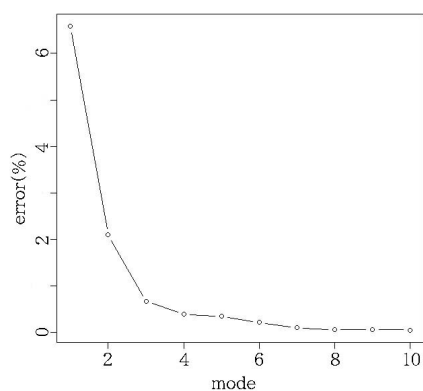


図-2 モード数と誤差率平均の関係 (M6.0 震源 E)

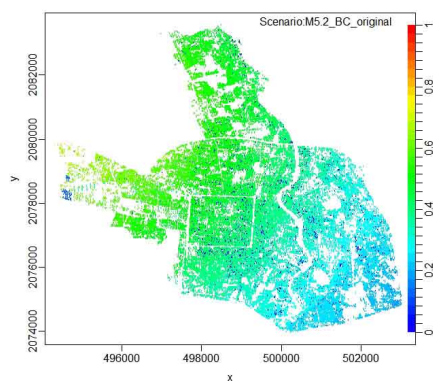


図-3 損傷確率の数値解析結果 (M5.2 震源 BC 間)

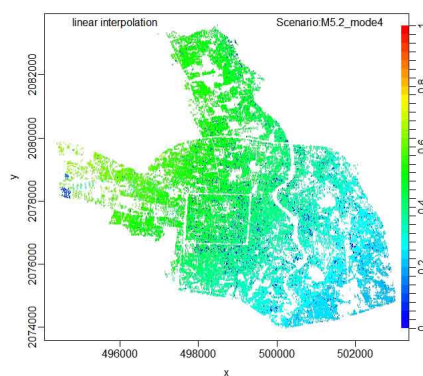


図-4 代理モデルから得られる損傷確率の結果 (M5.2 震源 BC 間)

4. モンテカルロシミュレーション

作成した代理モデルを用いて、震源位置を一様分布、マグニチュードを過去の関連研究⁴⁾で推定されている分布としてモンテカルロシミュレーションを行う。損傷確率に閾値を設定することで、この閾値を超過する確率を建物ごとに算出することができ、超過確率の空間分布としてリスク評

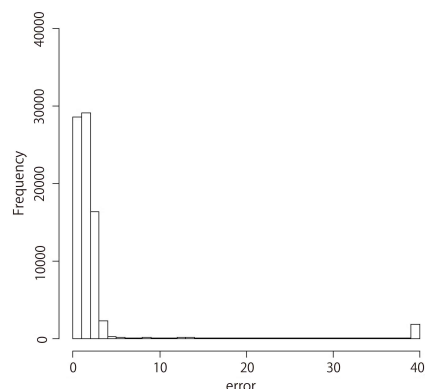


図-5 誤差率のヒストグラム (M5.2 震源 BC 間)

価が可能となる。図-6 は損傷確率が 10 % を超える確率 (超過確率) の分布図である。

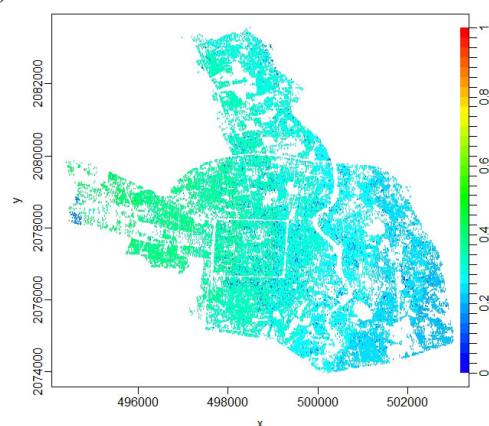


図-6 超過確率の分布図 (10 % 以上)

5. 結論

本研究では、地震時の建物被害評価を例として、固有直交分解による数値解析の代理モデルを用いた低コストでの被害予測の手法を提案した。本手法を適用することで、任意の入力パラメータの組み合わせに対する地震による建物の損傷確率を評価することが可能となる。また、この代理モデルを用いたモンテカルロシミュレーションにより、効率的な確率論的リスク評価が可能であることが確認された。

参考文献

- 1) Fajfar, P.: Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 28, No. 9, pp. 979–993, 1999.
- 2) Kircher, C. A., Whitman, R. V. and Holmes, W. T.: Hazus earthquake loss estimation methods, *Natural Hazards Review*, Vol. 7, No. 2, pp. 45–59, 2006.
- 3) 金谷健一: これなら分かる応用数学教室 -最小二乗法からウェーブレットまで-, 共立出版, 2003.
- 4) Pailoplee, S. and Charusiri, P.: Seismic hazards in thailand: a compilation and updated probabilistic analysis, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, No. 1, p. 98, 2016.