

大規模津波解析のサロゲートモデル化による確率論的被害リスク評価

九州大学 学生会員 ○出口翔大
九州大学大学院 正会員 浅井光輝

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震により引き起こされた津波は、30m を超える遡上高や、数十 km 単位での河川の遡上を記録するなど、東日本を中心に甚大な被害をもたらした。さらに近年では、南海トラフ巨大地震の発生と、それに伴う巨大津波による被害が危惧されている。2011 年東北地方太平洋沖地震による津波被害に対する原因の一つとして、予想を上回る高さの津波が沿岸部を襲ったことが挙げられる。津波に代表される自然災害は多くの不確実性を有するため、正確な波高を予測することは困難を極める。これに対する解決策としては、不確実性を定量化（パラメータ化）し、パラメータにばらつきを与えながら多量の計算を行うことで被害を確率論的に評価することが挙げられる。しかしながら、確率論的な考察を与えるには十分な試行回数が必要とされ、一回当たり相当量の計算コストを必要とする解析を数千回以上行うのは現実的ではない。

そこで本研究では、高精度かつ詳細な数値計算を、精度よく近似・簡略化し代理的に表現するサロゲートモデルを導入することにより大量の乱数計算を短時間で行うことを可能にする。これにより、非常に低い計算コストで十分な試行回数を達成し、確率論的なリスク評価を可能にすることを目的としている。

2. 解析手法

既往の研究^{1),2)}では、2011 年東北地方太平洋沖地震を対象とし、東北地方沿岸部での津波波高のモード分解及び確率論的評価が行われている。本研究では南海トラフ巨大地震を対象として、四国地方沿岸部での最大波高データをモード分解し、モンテカルロシミュレーションを通して確率論的評価を与えた。

2.1. 津波波高データの作成

一般に、津波の特徴は地震の挙動に大きく支配されている。内閣府は、南海トラフ巨大地震を想定した 11 の地震シナリオと各シナリオでの断層パラメータを検討している。その中でも、ここでは解析対象となる四国

地方に最も深刻な被害を与えられられる「断層パラメータ_ケース 03」を採用した。さらに、四国・淡路島沿岸部に 25 の波高観測点を設置し、浅水長波方程式に基づくネスティング付き差分法による津波計算コード JAGURS を用いて各地点での最大波高を計算した。波高観測点は、図-1 中に赤点で示される。また、後項での議論のため、Location_1~21 までを示しておく。

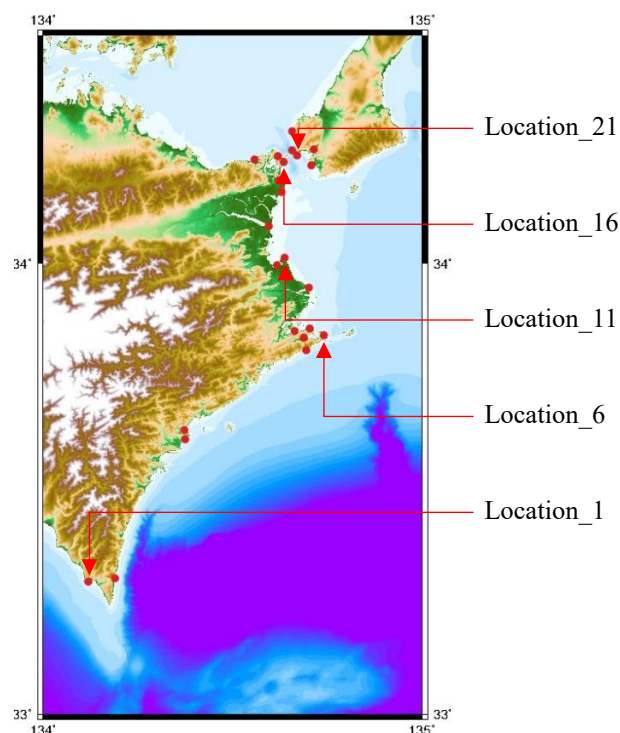


図-1 解析対象地域及び波高観測点

本研究での解析ケースは表-1 に示す通り。各断層のすべり量に対して 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 を乗じた 5 ケース、及びすべり角に対して -10°, -5°, ±0°, +5°, +10° の変動を加えた 5 ケース、合計 25 の解析ケースを設定した。

表-1 解析ケース

Test Cases		Rake Variation				
		-10°	-5°	±0°	+5°	+10°
Slip Variation	60%	A1B1	A1B2	A1B3	A1B4	A1B5
	80%	A2B1	A2B2	A2B3	A2B4	A2B5
	100%	A3B1	A3B2	A3B3	A3B4	A3B5
	120%	A4B1	A4B2	A4B3	A4B4	A4B5
	140%	A5B1	A5B2	A5B3	A5B4	A5B5

2.2. データ行列の圧縮

ここでは外里ら²⁾と同様に、前項で得られた波高データを要素に持つ行列（以降、データ行列と呼ぶ）を、特異値分解により分解した。すなわち、データ行列 $\mathbf{A}$ は、式(1)に示されるように3つの異なる行列に分解される。

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \sum_i^r \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{\Sigma}$ は特異値 σ_i を要素に持つ対角行列である。また、 $\mathbf{V}^T$ は共分散行列 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ の固有ベクトル $\mathbf{v}_i$ を列ベクトルとする行列 $\mathbf{V}$ の転置行列、 $\mathbf{U}$ は $\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \sigma_i \mathbf{u}_i$ により得られる $\mathbf{u}_i$ を列ベクトルとする行列であり、 r は行列 $\mathbf{A}$ の階数。すなわち、 $\mathbf{A}$ は $\sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T$ というモードの r 個の和である。さらに、 σ_i が各モードの分散の大きさを示すため、特異値が小さい項を省略しても、精度を保ちながら $\mathbf{A}$ を圧縮・近似することが可能である。例えば、以下のように近似行列 $\mathbf{A}_k$ を得ることができる ($r < k$)。

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \sum_i^r \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \approx \sum_i^k \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T := \mathbf{A}_k \quad (2)$$

本研究では、25 項の線形和で表現されるデータ行列 $\mathbf{A}$ を、3 項の和として近似した。すなわち、式(2)において $r=25$, $k=3$ と設定した。

2.3. 回帰分析による連続関数の作成

実際に JAGURS を用いた計算を行っていないパラメータに対しても波高の予測を可能にする（サロゲートモデルを構築する）ため、前項にて圧縮された行列 $\mathbf{A}_k$ の中で、断層パラメータのばらつきと波高を関連付けている列ベクトル $\mathbf{u}_i$ を目的変数として回帰分析（誤差最小二乗法）を行った。回帰は、式(3)に示す双一次の関数を仮定して行い、十分な精度を確認した (R^2 値はいずれも 0.95 以上)。以上により、式(4)で定義される $\mathbf{u}_{i,m}$ を用いて、式(5)に示すようなサロゲートモデルを得た。

$$\mathbf{u}_{i,m} = a_i s + b_i r + c_i s r + d_i \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_m := \sum_i^3 \sigma_i \mathbf{u}_{i,m} \mathbf{v}_i^T \quad (4)$$

ここで、 s, r はそれぞれすべり量 (slip)、すべり角 (rake) を示す変数である。

2.4. モンテカルロシミュレーション

得られたモデルに対して多量の乱数を生成しながら計算を行うことで、各観測点での最大津波波高に関する確率密度分布を得た。具体的には、すべり量、すべり角のばらつきが今回の解析ケースの中でガウス分布に

従うと仮定してモンテカルロシミュレーションを行い、図-2に示すような確率密度分布を得た。本研究では、観測点の数に対応する 25 の確率密度を得ているが、ここではその中の 5 つを示す。今回、サンプル数は 100,000 とした。

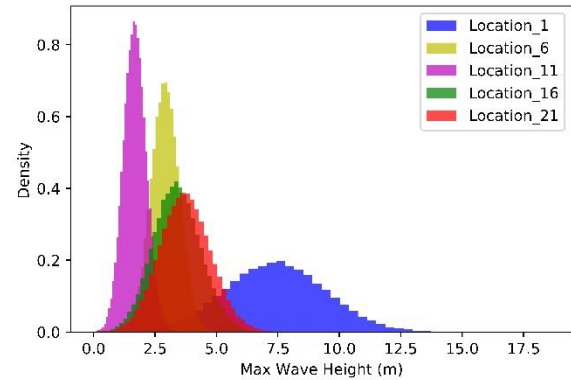


図-2 各観測点での確率密度分布

3. 結論

入力パラメータの変動を考慮した限定したケースの計算結果を基に数値解析を近似的に表現するサロゲートモデルを構築することで、低コストでの大量の乱数計算、及び短時間で津波被害に関する確率論的評価を与えることを可能にした。実際、JAGURS を用いてサンプル数 100,000 のモンテカルロシミュレーションを行うには 46 年程度の歳月がかかるが、本研究では、5 日程度で同等の計算を終了した。

本研究では、断層パラメータの中でも、津波高さとの関連性がより強いと考えられるすべり量・すべり角にのみ着目してばらつきを与えた。今後は、より波高との関連が強いパラメータの決定等を検討する方針である。

参考文献

- 1) 小谷拓磨, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 福田陽, 大竹雄, 野島和也, 桜庭雅明: 応答曲面を用いた数値解析援用確率論的津波ハザード評価, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 72, No. 1, pp.58-69, 2016.
- 2) 外里健太, 小谷拓磨, 森口周二, 寺田賢二郎, 大竹雄: 数値解析結果の空間モード分解による津波のリスク評価, 計算工学講演会論文集 Vol. 24, 2019.
- 3) Y. Yanai et al.: Projection Matrices, Generalized Inverse Matrices, and Singular Value Decomposition, Springer, 125-149, 2011.