

第Ⅱ部門

ランダムフェーズ津波モデルを用いた和歌山県沿岸の道路橋上部工の流出リスク評価

関西大学 環境都市工学部 学生員 ○友田 諒也
 関西大学 環境都市工学部 正会員 安田 誠宏
 関西大学大学院 理工学研究科 学生員 田中 晴規
 九州工業大学 名誉教授 正会員 幸左 賢二

1. はじめに

スマトラ島沖地震津波や、東北地方太平洋沖地震津波においては、沿岸にある多数の橋梁で流出や崩壊といった甚大な被害を受けた。近いうちに発生が予想されている南海トラフ地震に備えるため、沿岸の橋梁における津波対策が求められるが、そのためにはまず、橋梁の流出に対する正確なリスク評価が必要である。現在、津波ハザードやリスクの評価方法としては、決定論的アプローチと確率論的アプローチの2つがある。決定論的アプローチでは、既往津波を参考にした最大規模の被害を想定しているため、その被害の生じうるリスクないし確率はわからない。

本研究では、和歌山県沿岸の道路橋を対象に、確率論的アプローチで上部工の流出リスクを評価することを目的とする。ランダムフェーズ津波モデルを用いた津波伝播計算を行い、coRaL法を用いて、津波ハザードにおける不確定性を考慮した、道路橋上部工の流出リスクの確率評価を行った。

2. 評価手法

まず、橋梁上部工に対する津波作用力算定式から、橋梁の耐力と津波作用力が釣り合う（＝橋梁が流出を耐えうる）津波高を算定する。その後、津波伝播計算の結果から、coRaL法を用いて橋梁地点における津波ハザード曲線を作成し、限界津波高をもたらし津波の再現期間を算定する。

(1) 限界津波高の算定

幸左¹⁾は、模型実験の結果から、橋梁上部工に適した津波作用力算定式を提案した。本研究では、この算定式を波高について解き直したものに、上部工重量をもとに算定した橋梁の耐力を代入することで限界津波高を算定する。

【水平耐力】

$Z/\alpha_H \geq 0.5$ の場合：

$$\alpha_H = Q_x / 3.10 \rho g B (Z_2 - Z_1) + (Z_2^2 - Z_1^2) / 2.604 (Z_2 - Z_1) \quad (1)$$

$Z/\alpha_H < 0.5$ の場合： $\alpha_H = Q_x / 1.90 \rho g B T$ (2)

【鉛直耐力】

$$\alpha_H = Q_z / 0.53 \rho g B W + Z_1 / 1.1554 \quad (3)$$

ここで、 α_H ：波高、 Q_x ：水平耐力、 Q_z ：鉛直耐力、 B ：橋長、 T ：桁高、 W ：幅員、 Z ：桁中心位置、 Z_1 ：桁下高、 Z_2 ：橋面高（＝桁下高＋桁高）である。なお、水平耐力については、 $\alpha_H \leq 2Z$ となるような耐力の場合は式(1)、 $\alpha_H > 2Z$ となるような耐力の場合は式(2)を用いて算定を行う。算定結果を表-1に示す。

表-1 限界津波高の算定結果一覧

橋梁名	限界津波高 (m)	橋梁名	限界津波高 (m)
昭和橋	4.37	汐浜橋	5.45
新王寺橋	3.90	姫橋	5.05
平和橋	4.30	伊串橋	5.53
南部大橋	4.26	神野川橋	5.51
高瀬川橋	3.93	宝島橋	3.93
新工住橋	4.33	田無橋	5.00
新田子橋	6.30	玉之浦橋	4.16
有田橋	5.84	二河橋	4.48
高富橋	4.67	港橋	3.60

(2) ランダムフェーズ津波モデル

地震発生の発生シナリオは、津波ハザードの結果に大きな影響を与える認識論的不確定性である。これを、人為的に断層モデルを設定することなく、断層すべり分布を乱数によってランダムに多数生成可能なランダムフェーズモデル²⁾が提案された。本研究では、Mw8.0 から 9.0 まで 0.2 刻みで 6 つの Mw を設定し、それぞれに対してすべり分布を 100 ケースずつ（全 600 ケース）生成した。

(3) coRaL 法の概要

津波ハザードにおける不確定性を考慮するために coRaL (a method of incorporating Random phase model into Logic tree approach) 法³⁾を用いた。coRaL 法では、認識論的不確定性の評価のためにロジックツリーアプローチを用いる。また、偶然的な不確定性の評価のために、津波伝播計算結果から経験分布関数を作成し、この関数にモデル化誤差を表す切礎対数正規分布を適用する。その後、ロジックツリーの分岐ごとの重みを考慮した津波ハザード曲線を作成する。ロジックツリーの分岐は、平均発生間隔による 3 分岐と、それぞれに Mw9.0 から 8.0 まで 0.2 刻みに 6 分岐ある計 18 分岐とした。各分岐の重みを表-2 に示す。なお、平均発生間隔による 3 分岐は、異なる観点から導出された平均発生間隔であり、分岐により重みを変化させることは困難と判断し、等重みとした。

表-2 ロジックツリーにおける各分岐の重み

Mw	推本 平均発生間隔 88.2 年	推本 平均発生間隔 116.9 年	G-R 則による Mw8.0 以上の 平均発生間隔
Mw9.0	0.097	0.128	0.029
Mw8.8	0.155	0.206	0.050
Mw8.6	0.250	0.331	0.085
Mw8.4	0.401	0.335	0.147
Mw8.2	0.097	0	0.253
Mw8.0	0	0	0.436

3. 津波伝播計算と津波ハザード曲線の作成

JAGURS というオープンソース計算コードを用いて、初期水位の算定、津波伝播計算を行った。JAGURS は、線形長波、非線形長波、線形分散波、非線形分散波理論に基づく、津波伝播および浸水計算コードである。

(1) 計算条件

表-3 に本研究における計算条件を示す。津波伝播の計算にはネスティング手法を用いた、格子サイズ2430mから10mの6段階ネスティングを用いて計算を行った。なお、堤防については、破堤しない条件で計算した。これは、橋梁の上部高流出リスクを評価するという本研究の性質上、破堤により、橋梁に到達する津波高が低くなることを避けるためである。

表-3 JAGURS の計算条件（平面直角座標 6 系）

津波計算コード	JAGURS
計算格子サイズ	2430m, 810m, 270m, 90m, 30m, 10m
計算期間	地震発生後 4 時間
計算間隔（ステップ）	0.1 s
津波高保存間隔	600 ステップ（=1 min）毎
断層すべり分布	Mw 8.0, 8.2, 8.4, 8.6, 8.8, 9.0 の各 100 ケース
堤防条件	破堤しない

(2) 津波ハザード曲線の作成

coRaL 法を適用し、ハザード曲線を作成する。まず、JAGURS で計算した 600 ケースの津波伝播計算の結果から、各対象橋梁の位置座標における Mw ごとの最大津波高を抽出した。その後、最大津波高の経験分布関数に切捨て数分布を用いて、18 分岐分の津波ハザード曲線を得る。これらの最大津波高毎の平均値を期待値としてとることで、不確定性を内包した津波ハザード曲線を得た。紙面の都合上、図-1 に汐浜橋の津波ハザード曲線のみ示す。

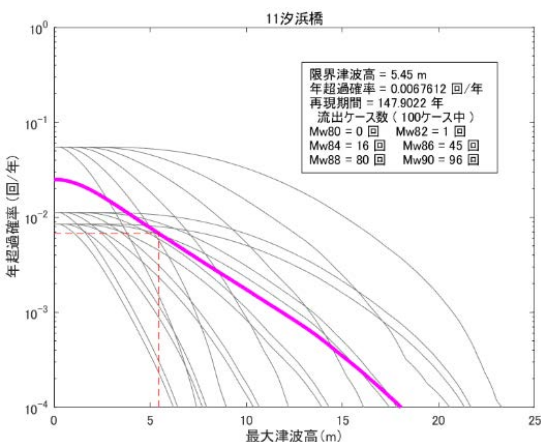


図-1 汐浜橋の津波ハザード曲線（赤紫色：不確定性を内包した曲線，灰色：ロジックツリー分岐ごとの曲線）

4. 結果と考察

作成した津波ハザード曲線より、各橋梁の限界津波高を超える（＝上部工の流出する）津波の年超過確率を読み取り、その逆数を再現期間とする。表-4 に、各橋梁の再現期間の短い順に示す。なお、幸左りの研究で行われた安全性照査においては、高瀬川橋、平和橋、新王寺橋、汐浜橋、姫橋、伊串橋が、安全性が低いと結論付けられていた。伊串橋を除く 5 橋は、本研究の算定結果における、再現期間の高い上位 5 橋と一致しており、おおむね整合性が認められる。

また、汐浜橋、姫橋、伊串橋の 3 橋を対象として、支承アンカー及び変位制限構造を考慮することによる、上部工流出の再現期間への影響についても評価した。その結果、汐浜橋が 528 年、姫橋が 2164 年、伊串橋が 979 年となった。いずれも、耐力の増加に伴う限界津波高の上昇により、再現期間が数百年程度下がった。姫橋においては、極端な再現期間の低下がみられるが、これは、支承アンカーによる耐力の大幅な増加が影響しているものとみられる。これらの結果から、支承アンカーや変位制限構造は、橋梁上部工の流出リスクを評価する際、その結果に大きく影響を与えるパラメータであるといえる。

幸左りの安全性照査においては、18 橋のほぼすべてにおいて作用力と抵抗力の比が 1 を超えており、どの橋梁も流出する危険性があるという結果だったことに対し、本研究では、それを再現期間という指標で順位付けしてのリスク評価ができた。特に汐浜橋においては、幸左りの安全性照査において、支承アンカーと変位制限構造を考慮しても流出に対して危険であると結論付けられていたが、本研究では、これらを考慮することで再現期間が 200 年を超えており、供用期間内に流出するリスクは低いことが示された。

表-4 上部工流出リスクの再現期間の順位

順位	橋梁名	再現期間 (年)	順位	橋梁名	再現期間 (年)
1	汐浜橋	148	10	新江住橋	449
2	新王寺橋	169	11	南部大橋	472
3	平和橋	264	12	港橋	495
4	高瀬川橋	289	13	有田橋	565
5	姫橋	309	14	玉之浦橋	590
6	高富橋	311	15	田無橋	658
7	昭和橋	326	16	神野川橋	707
8	伊串橋	416	17	新田子橋	912
9	宝島橋	440	18	二河橋	969

5. おわりに

本研究では、ランダムフェーズ津波モデルを用いた津波伝播計算の結果に coRaL 法を適用して津波ハザード曲線を作成し、そこから橋梁の限界津波高における津波の再現期間を算定することで、橋梁上部工の流出リスクを定量的に評価することができた。本研究では、汐浜橋、姫橋、伊串橋の 3 橋でのみ支承アンカーや変位制限構造を考慮した算定を行ったが、より正確な上部工流出のリスク評価のためには、その他の橋梁においても、これらを考慮した算定が必要であると考えられる。

参考文献

- 幸左賢二・宮島昌克・藤間功司・庄司学・小野祐輔・重枝未玲・廣岡明彦・木村吉郎 (2010): 道路政策の質の向上に資する技術開発成果報告レポート No.19-2.
- Goda K., Yasuda, T., Mori, N., Maruyama, T. (2016): New scaling relationships of earthquake source parameters for stochastic tsunami simulations, Coastal Engineering Journal, Vol.58, No.3(2016)1650010.
- 福谷陽・北野利一・安田誠宏・有川太郎・山中亮一 (2021): 確率論的津波ハザード評価手法 (coRaL 法) の構築とそれによる津波浸水評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 77, No. 2, 175-180.