

南海トラフ地震による地震・津波ハザード評価および 太平洋沿岸部にある橋梁構造物の信頼性解析への適用

河合 祐美¹・磯辺 弘司¹・名波 健吾¹・秋山 充良²・越村 俊一³

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²正会員 博（工）早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

³正会員 博（工）東北大学教授 災害科学国際研究所（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-03）

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、耐震補強の施された橋梁構造物が津波により流失する事例が確認された¹⁾。また、2016年に発生した熊本地震においては、同じく耐震補強を施した阿蘇大橋が大規模な地すべりによって崩落した。この地震では、観測史上初めて、一連の地震活動において、気象庁震度階級における震度7が2回観測され²⁾、前震において損傷が発生した構造物に本震が作用し、その損傷がさらに進展した可能性が指摘されている。

これらの事例は、橋梁構造物の安全性を確保するためには本震による強震動に限らず、複数のハザード（マルチハザード）を想定する必要があることを示している。現在我が国では、南海トラフ地震の発生が懸念されており、今後、その影響を受ける可能性のある太平洋沿岸部の既存構造物を中心に、地震と津波の対策を講じていく必要がある。ただし、投じることのできる予算は限定されており、対象とする地域やネットワークの中にある構造物の中で、どの位置にある構造物がどのハザードに対して最も脆弱であるのかを適切に同定し、効率的に地震・津波対策を施していく必要がある。

著者らは、この背景のもと、南海トラフ地震の影響を受ける地域にある橋梁構造物の強震動と津波による損傷確率の算定フローを提案してきた。この中では、ハザード評価やフラジリティ評価が行われ、その評価に介在する種々の不確定性を扱うことになる。将来に発生が予想される地震により生じる強震動や津波の影響を受ける橋梁構造物の信頼性評価においては、断層パラメータの設定、地震動や津波の伝播解析、それらを受ける構造物の応答の予測、さらには構造物の保有耐力の推定に伴うばらつきを適

切に設定し、信頼性評価に反映させる必要がある³⁾。本研究では、各評価段階における不確定性を現時点の知見と入手可能な実験データに基づき定量化し、信頼性評価に反映させている。

また、これまでの著者らの研究においては、津波による損傷確率の計算をする際に、強震動による損傷は生じていないものと仮定していた。当然のことながら、強震動により生じる損傷は津波作用時の構造物の破壊可能性を高めると考えられる。そこで本研究では、強震動により生じる損傷の程度を考慮した確率計算を行うように、既往の提案フローを更新した。そして、地点毎の比較検討を行うため、三重県尾鷲市と高知県黒潮町にある道路橋を対象にした信頼性の計算例を提示した。

2. 地震・津波ハザードを受ける橋梁構造物の信頼性評価フロー

特定のシナリオ地震の発生を仮定した場合の、強震動と津波による橋梁の損傷確率算定のためのフローを図-1に示す。このフローにより導出される損傷確率は想定地震が生起したという条件下で得られる条件付き損傷確率であり、この点で参考文献3)や4)などに示される強震動や津波のハザード曲線と構造物のフラジリティ曲線のコンボリューションから得られる損傷確率とは異なる。

強震動による橋梁の損傷確率の算定式は図中に示している。前記したように、本研究では南海トラフ地震の生起を前提とするため、想定する個々のシナリオ地震の発生確率の和は1.0である。 $P_{fs}(i)$ は強震動によって損傷度が ds_i を超える確率である。 $f_I(\gamma)$ は地震動強度の確率密度関数であり、 $P(DS_i > ds_i | \Gamma = \gamma)$ は地震動強度 $\Gamma = \gamma$ の時に損傷度 DS_i が ds_i を超える確

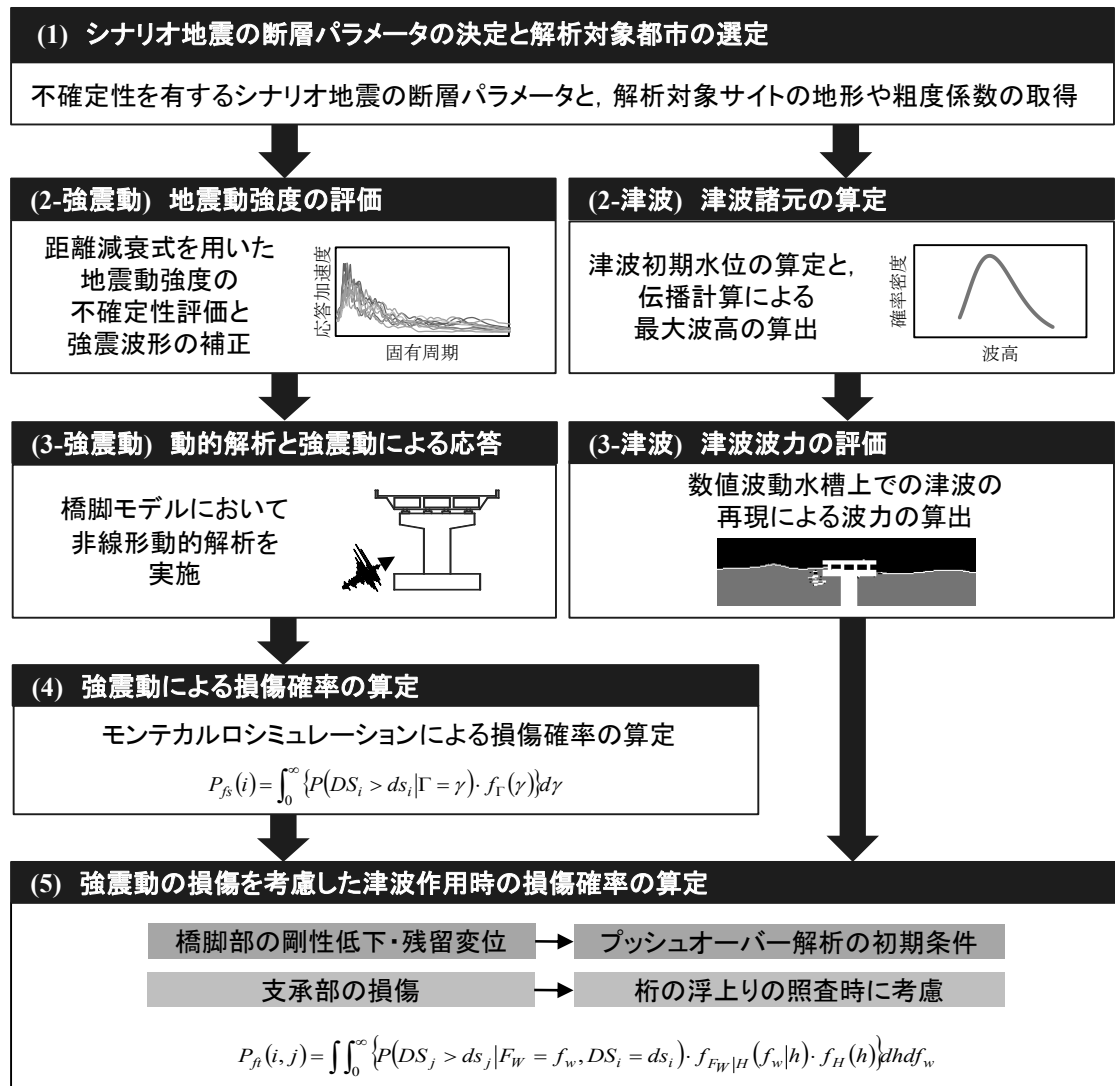


図-1 地震・津波ハザードを受ける橋梁構造物の信頼性評価フロー

率である。津波による橋梁の損傷確率の算定式も図中に示しており、 $P_{ft}(i, j)$ は、強震動によって損傷度が ds_i となった橋梁が津波により ds_j を超える損傷度となる確率を表す。 $f_H(h)$ は H に関する確率密度関数であり、 $f_{F_w|H}(f_w|h)$ は津波波高 H が h となるときに F_w の確率密度関数である。また $P(DS_j > ds_j | F_w = f_w, DS_i = ds_i)$ は、 DS_i が ds_i であり、同時に津波波力 F_w が f_w となるときに、 DS_j が ds_j を超える確率である。

断層評価の不確定性を考慮する際、泉宮ら⁵⁾は津波波高の予測においては津波の初期水位波形を推定する必要があり、津波の初期水位波形は断層のすべり量によって算定されるとしている。更に「南海トラフの巨大地震モデル検討会（以下、検討会）」⁶⁾では、すべり角に $\pm 30^\circ$ の揺らぎを与えることで、強震波形の計算結果が極端なものとならないように対処している。これらに基づいて、本研究では断層パラメータのうち、すべり量とすべり角を確率変数と

して扱い、そのほかに使用する断層パラメータは検討会により示されている値を参照する。

また、動的解析で使用する加速度波形は、距離減衰式から得た最大加速度と一致するように、検討会の想定する強震波形(100波)を振幅調整することで得た。このとき、想定する断層が面的に広がっているため、断層最短距離ではなく等価震源距離を用いた司・翠川⁷⁾の距離減衰式を採用している。

一方、津波の評価に関しては断層パラメータから初期水位を計算し、非線形長波理論を用いた平面二次元津波解析モデル⁸⁾による津波伝播計算を行うことで、検討対象地点での最大波高を得た。次に数値波動水槽CADMAS-SURF/3D⁹⁾から橋梁に作用する水平波力を算定する。また、上揚力により上部工が流出するケースも考慮し、ここでは支承が破壊された場合も橋梁の損傷と見なした。これらを基に、橋梁の強震動および津波による損傷確率を算定する。

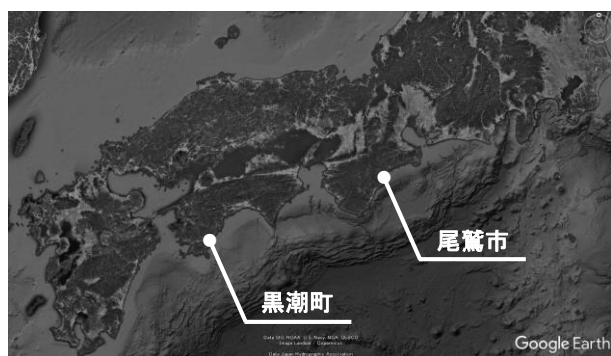


図-2 解析対象都市の位置



図-3 尾鷲市での解析対象橋梁の位置



図-4 黒潮町での解析対象橋梁の位置

またこのとき、強震動を受けることで、橋脚に生じる最大荷重後の水平荷重と剛性の低下、および残留変位を津波水平波力を用いたプッシュオーバー解析による照査時に、また、支承部の強震動による損傷を桁の浮上りに関する照査時に考慮することで、強震動による損傷を津波作用時の評価に引き継ぎ、強震動と津波を一連の外力として扱っている。

3. 太平洋沿岸部にある橋梁構造物を対象としたケーススタディ

本章では、図-1 に示した橋梁構造物の信頼性評価フローの適用例を示す。解析地点は、南海トラフ地震が発生した際に大きな被害が懸念されている三重県尾鷲市、および最大規模の被害が懸念されている高知県黒潮町とした。尾鷲市と黒潮町の位置関係を図-2 に示す。それぞれの解析地点は、図-3 および図-4 に示すように、河口部を想定した。

解析に用いる RC 橋脚は、仮想のモデルであり、米田ら¹⁰⁾の論文に示される橋脚を参考に試設計した。尾鷲市の地点 A、黒潮町の地点 B とともに同一の橋梁が置かれると仮定した。本橋梁は、道路橋示方書が定めるレベル 2 地震動に対する安全性を確保している。地盤種別は I 種地盤であり、橋脚高さは 8m、上部工は桁橋を想定している。損傷の判定については、橋脚の残留変位、せん断破壊、および曲げ破壊（変形能）に関する照査に加えて、支承部の損傷と上部工の流出に関する照査を行う。

強震動に関しては、モンテカルロシミュレーションを用いた動的解析により、地震波を橋梁に繰り返し作用させ、各地震動強度（本研究では、地動最大加速度）に対して、想定した限界状態を超える確率を算定し、その結果を対数正規分布で近似することで図-5 の地震 fragility 曲線を得た。そして、各地震動強度となる確率を掛け合わせることで、橋梁の地震動に対する損傷確率を求めた。

また津波に関しては、前章に示したように、断層の不確定性を考慮して断層位置における津波の初期水位から津波伝播解析を行い、津波波高の確率密度関数をモンテカルロシミュレーションにより得た。次に、伝播計算で得られた周期特性を考慮して CADMAS-SURF/3D の中で津波を造波し、解析モデルに作用する波力を算定した。得られた波力を、プッシュオーバー解析を用いて橋梁に作用させることで図-6 の津波 fragility 曲線を得ている。このとき、前記したように、強震動の作用による RC 橋脚の最大荷重後の水平荷重と剛性の低下および残留変位を、プッシュオーバー解析を行う際の初期条件とすることで、強震動の影響を津波作用の照査の際に引き継いでいる。

鉛直波力に関しては、炭村ら¹¹⁾に従い、支承部のサイドブロックが損傷する場合に上部工が流出するとした。サイドブロックの損傷は、サイドブロック上部・下部の耐力、および取付ボルトの耐力を算定し、作用鉛直波力がこれらの耐力のいずれかを上回った場合と定義した。なお、幾つかの条件で試算し、2011 年東北地方太平洋沖地震の津波による橋梁被害の統計分析の結果との比較から、この条件で得られ

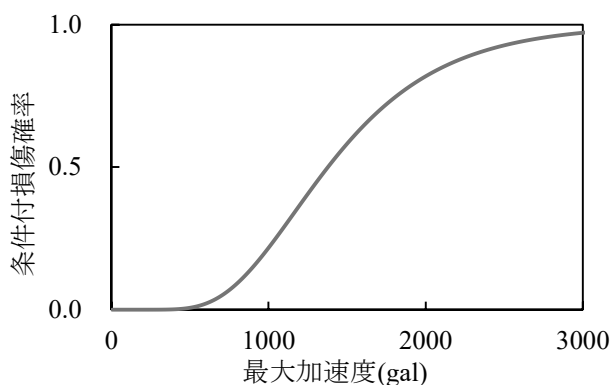


図-5 地震フラジリティ曲線

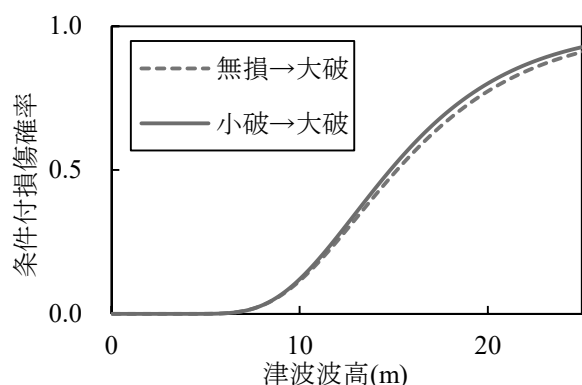


図-6 津波フラジリティ曲線

表-1 損傷確率の算定結果

	黒潮町	尾鷲市
強震動	0.427	0.198
強震動+津波	0.706	0.329

る支承の損傷確率（上部工の流出確率）は，上部工が浸水した場合に確率 0.581 で上部工は流出すると仮定できることが分かった．また，上揚力の評価においても強震動の作用による支承部の損傷を考慮することで，強震動と津波を一連の外力として扱っている．以上の手法を用いて算出した損傷確率を表-1に示した．強震動・津波ともに，三重県尾鷲市と比較して高知県黒潮町にある橋梁の損傷確率が大きいという結果が得られた．

4. まとめ

本研究では，南海トラフ地震の生起を前提に，太平洋沿岸部の2つの地点にある橋梁の強震動および津波による損傷確率の算定フローを示した．この中では，強震動により生じる損傷が津波による橋梁の破壊可能性を高める影響を考慮した．

今後は，提案手法を強震動と津波の影響を受ける道路ネットワークに適用し，個別構造物の損傷がネットワークの機能低下に及ぼす影響を評価する．

謝辞：本研究を進める上で，産業技術総合研究所活断層・火山研究部門の吉見雅行博士より断層パラメータの設定方法に関する貴重なご助言を賜りました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会:東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書，2015.
- 2) 土木学会西部支部:「2016年度熊本地震」地震被害調査報告会～緊急災害調査と応急復旧の取り組み～，<http://committees.jsce.or.jp/report/node/117>，2017年5月28日閲覧.
- 3) Akiyama, M. and Frangopol, D. M.: Life-cycle design of bridges under multiple hazards: Earthquake, tsunami and continuous deterioration, Proceedings of 11th ICOSSAR (International Conference of Structural Safety and Reliability), New York, USA, 2013.
- 4) Akiyama, M., Frangopol, D. M., Arai, M. and Koshimura, S.: Reliability of bridges under tsunami hazards: Emphasis on the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, Earthquake Spectra, Vol. 29, No. S1, pp. S295-S314, Oct. 2013.
- 5) 泉宮尊司，坂井雄太:GPS地殻変位データを用いた東北地方太平洋沖地震津波の波源域の逆推定とその予測精度に関する研究，新潟大学災害・復興科学研究所年報，pp121-122，2013.
- 6) 内閣府:南海トラフの巨大地震モデル検討会，2015.
- 7) 司宏俊，翠川三郎:断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No.525，pp63-70，1999.
- 8) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, IUGG/IOC Time Project, 1997.
- 9) 一般財団法人沿岸開発技術研究センター:数値波動水路の研究・開発,2001.
- 10) 米田慶太，川島一彦，庄司学，藤田義人:試設計に基づく耐震技術基準の改訂に伴うRC橋脚およびくい基礎の耐震性向上度に関する検討，構造工学論文集，Vol.45A，pp.751-762，1999.
- 11) 炭村透，張広鋒，中尾尚史，星隈順一:津波によって橋に生じる作用に対する鋼製支承の抵抗特性に関する実験的検討，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.4，pp.102-110，2013.