

南海トラフ地震の影響を受ける構造物の信頼性評価に関する 基礎的研究：三重県沿岸部を対象としたケーススタディ

名波健吾¹・磯辺弘司¹・竹本梨香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年東北地方太平洋沖地震により、多くの土木構造物が強震動および津波による被害を受けた。今後も、南海トラフ地震や首都直下地震の発生が懸念されており、既存構造物の強震動および津波への対策を継続的に進める必要がある。その際、構造物に作用する津波や地震などのハザード評価、それらの作用に対する構造物の脆弱性評価、さらには、ハザード曲線や脆弱性曲線から算定される構造物の信頼性（破壊・損傷確率）の評価を行い、その大小に基づいて、対象とする構造物にとって最も脅威となるハザードや、あるいはネットワークの中で最も信頼性の低い構造物を抽出して対策を進めることが合理的である。

ハザード評価や脆弱性評価では、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、構造物の地震時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¹⁾。

本研究では、三重県沿岸部にある橋梁および盛土構造物を対象として、南海トラフ地震の生起を前提としたときに、強震動あるいは津波のどちらが脅威のハザードであり、あるいは、橋梁と盛土のどちらが脆弱であるのかについて、ケーススタディを通じた検討を行う。なお、この評価に関係する各ばらつきを確率変数として取り扱うためには、確率分布およびそれらのパラメータ（平均値・標準偏差等）が

必要になる。強震動および津波の影響を受ける構造物の信頼性評価において、これら全てを定めるだけの十分な情報は得られていない。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に基づき定量化し、信頼性評価に反映させているが、今後の研究の進展にあわせたそれらの見直しが必要である。

2. 地震あるいは津波ハザードを受ける橋梁・盛土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あるいは津波による橋梁・盛土構造物の損傷確率の算定手順と、それに基づいた対策優先度の判定フローを図-1に示す。なお、本研究では南海トラフ地震を想定する。このフローにより導出される損傷確率は想定地震が生じ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2)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脆弱性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意味を有する。

橋梁の損傷確率の算定式は図-1に示されている。強震動による損傷確率は、検討地点での地震動強度 Γ の確率密度関数 $f_{\Gamma}(\gamma)$ および $\Gamma = \gamma$ の時に最大応答値 D_{es} が変形能 C_{as} を超える確率 $P(D_{es} > C_{as} | \Gamma = \gamma)$ を掛け合わせ、 γ に関して積分することで得られる。

津波による損傷確率は、検討地点で想定される津波波高 H の確率密度関数 $f_H(h)$ 、波高が $H = h$ となるときの波力の確率密度関数 $f_{FwH}(f_w | h)$ 、および $F_w = f_w$ のときに構造物に生じる最大応答値 D_{et} が変形能 C_{at} を超える確率 $P(D_{et} > C_{at} | F_w = f_w)$ を掛け合わせ、 h と f_w に関して積分することで得られる。前記の通り、

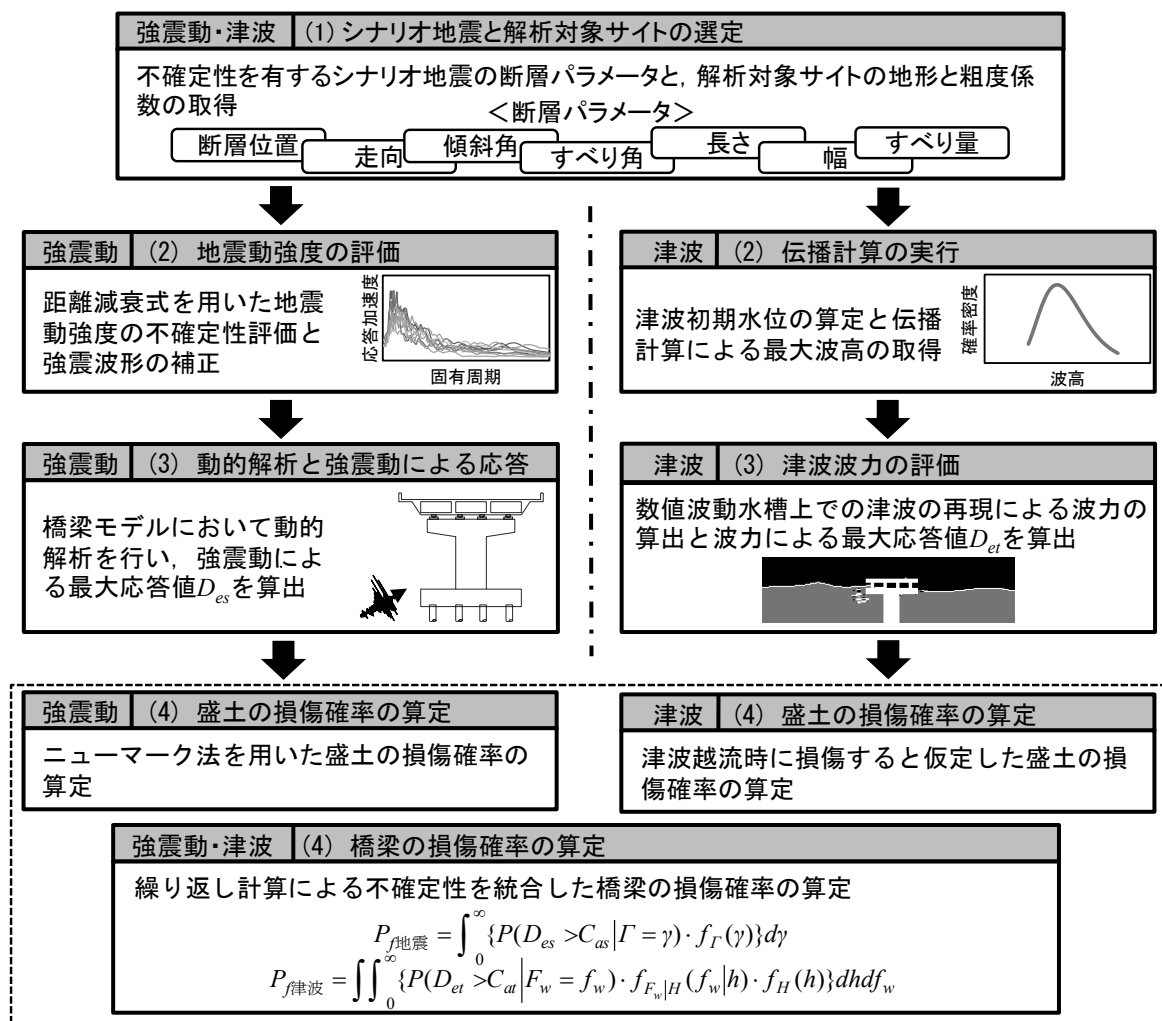


図-1 地震・津波ハザードを受ける土木構造物の信頼性評価フロー

地震の生起確率は考慮しない。なお、断層のモデル化において、本研究では、内閣府「南海トラフ巨大地震モデル検討会」³⁾（以下、検討会）の平均応力降下量の統計量を用いた。当該地震で想定する断層位置を図-2に示す。動的解析で使用する加速度波形は野津ら⁴⁾の距離減衰式から得た最大加速度となるように、検討会の想定する強震波形(100波)を振幅調整している。津波の評価では、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による津波伝播計算⁵⁾を行い、最大波高を得ている。そして、数値波動水槽CADMAS-SURF/3D⁶⁾から橋梁に作用する水平波力を算定した。また、鉛直波力により上部工が流出するケースも考慮する。

続いて、盛土の損傷確率の算定手順を述べる。強震動による損傷確率を算定する際、すべり変形特性の評価にはニューマーク法を用いた。ここでは、修正フェレニウス法を用いて円弧すべり安全率⁷⁾が1.0となるときの降伏震度を求める。橋梁の場合と同様に、検討会の想定する強震波形(100波)を逐次入力し、

損傷確率の算定を行った。

津波による盛土の損傷確率の算定では、幸左ら⁸⁾により検討された破壊判定基準図を用いて津波高さのケースごとに盛土の損傷の有無を判定した。破壊判定基準図から想定した盛土高さ毎の限界越流水深を読み取り、各ケースごとの越流水深がこれを超えている場合に損傷するとした。

3. ケーススタディ

本章では、図-1に示した橋梁・盛土構造物の信頼性評価フローの適用例を示す。解析地点は、南海トラフ地震により大きな被害が生じると懸念されている都市の一つである三重県尾鷲市とした。尾鷲市は地形が複雑に入り組んだ内湾にあり、有史以来、数回、大津波の被害に見舞われてきた⁹⁾。断層位置と尾鷲市の位置関係を図-2に示す。

解析対象橋梁は、図-3に示すような同一河川上の地点A(河口部)と地点B(上流約700m地点)に置かれるものと仮定した。橋梁モデルを図-4に示す。また、

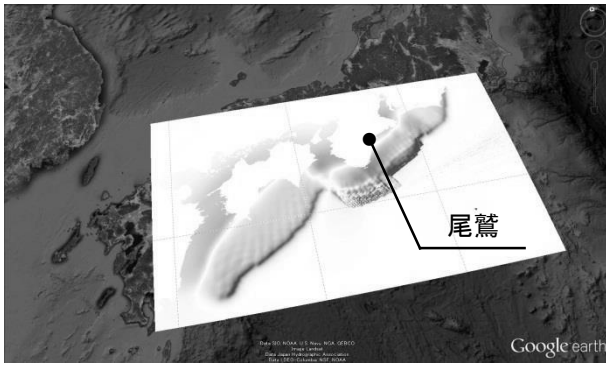


図-2 想定地震の断層位置

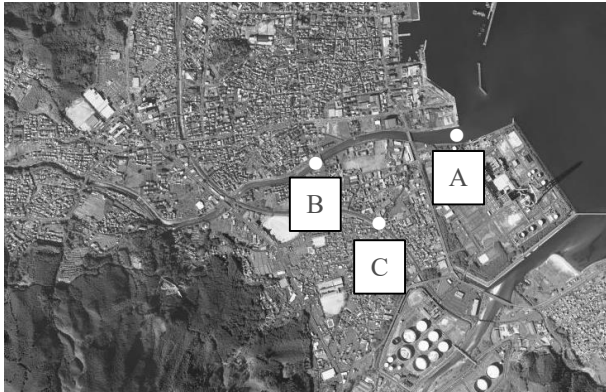


図-3 解析対象橋梁・盛土の位置

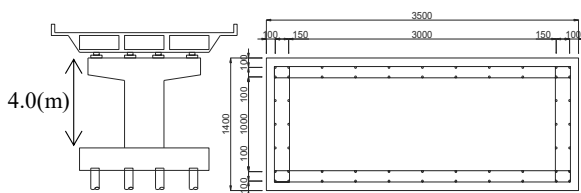


図-4 橋梁モデル

表-1 構造諸元

軸方向鉄筋比		0.33(%)
帯鉄筋比	橋軸方向	0.05(%)
	橋軸直角方向	0.12(%)

その構造諸元を表-1に示す。なお、地点Aと地点Bに全く同一の橋梁が置かれると仮定している。この橋梁は昭和41年発行の書籍¹⁰⁾を基に試設計したものである。I種地盤上に位置する橋脚高さ4mのRC構造となっている。損傷の判定は土木学会巨大地震災害への対応検討特別委員会¹¹⁾に準じて、残留変位に関する照査、せん断破壊に関する照査および曲げ降伏後のせん断破壊に関する照査を行った。断層パラメータは、検討会によって示されている値を用いた。

津波による損傷確率の算定に際しては、前章に示

したように、各すべり量の値から断層位置における津波の初期水位を得る。その後、津波伝播解析を実施し、図-5に示す水位変動の時刻歴を得る。この検討に關係する各不確定性を考慮したMonte Carloシミュレーションにより水位変動の時刻歴とその中の最大波高を繰り返し求め、最終的に各橋梁位置における最大波高の確率密度関数を得る。

次に、CADMAS-SURF/3Dで津波を造波し、得られた波圧を橋梁に作用させて図-6の津波 fragility 曲線を得る。鉛直波力に関しては、炭村ら¹²⁾に従い、橋桁を橋脚と結合させるサイドブロックが損傷する場合に橋桁が流出するとした。サイドブロックの損傷は、サイドブロック上部の耐力、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する。この結果、本モデルにおいては、上部工が浸水するとの条件下で上部工が流出する確率は0.884となった。これに上部工が浸水する確率を掛けることで損傷確率が算定される。

強震動による橋梁の地震 fragility 曲線は、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Monte Carloシミュレーションにて算定し、その結果を対数正規分布で近似することで求めている。そして、各地震動強さ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。結果を表-2に示す。震度法で耐震設計された橋梁であることもあり、強震動に対する損傷確率が大きい。本研究のケーススタディでは、河口部に橋梁が位置する場合でも、強震動が支配的なハザードとして同定された。

盛土に関しては、図-3に示すような海岸線から約800m陸上にある地点Cにあると想定し、損傷確率の算定を行った。盛土は高さ3m、その地盤パラメータは内部摩擦角45°を想定している。強震動を盛土に作用させ、前章に示した修正フェレニウス法を用いることで、図-7に示すような盛土の地震 fragility 曲線が得られる。また、盛土の津波による損傷確率を破壊判定基準図を基に得ることで、強震動と津波に対する盛土の損傷確率として表-2に示す各値を得た。橋梁と同様に、盛土も強震動が支配的なハザードとして同定された。また、このケーススタディでは、優先的に取り組むべき対策は、橋梁の耐震対策となる結果となった。なお、橋梁と盛土では、対策費用も異なり、また損傷後の復旧に要する時間にも大きな違いがある。今後は、影響度（経済的損失・復旧時間等）の違いも反映したリスクベースでの検討を行い、対策優先度判定を行う必要がある。

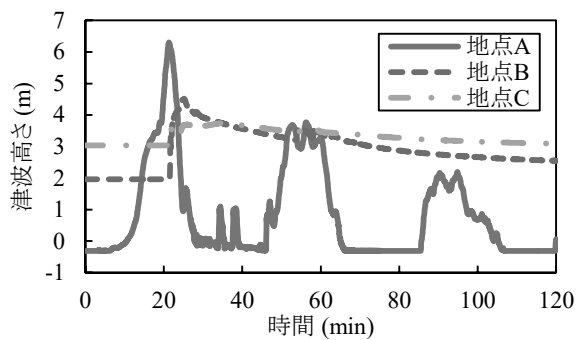


図-5 水位変動の時刻歴の例

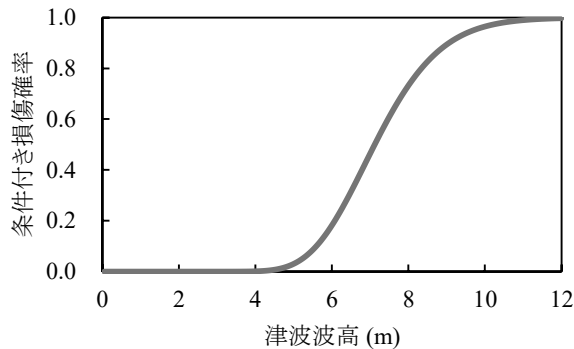


図-6 津波フラジリティ曲線 (橋梁)

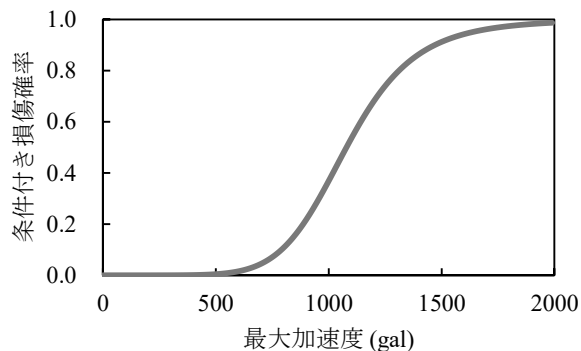


図-7 地震フラジリティ曲線 (盛土)

表-2 損傷確率の算定結果

	強震動	津波
橋梁 (地点A)	0.912	0.217
橋梁 (地点B)	0.912	0.027
盛土 (地点C)	0.047	0.024

4. まとめ

本研究では南海トラフ地震が発生した際に強震動および津波により橋梁と盛土構造物が損傷する確率を算定し、各構造物の信頼性に影響を与える支配的なハザードの同定例を提示した。

今後、異なる橋梁や盛土、あるいは他の都市も対象とした検討を行い、また、損傷確率の計算に関係

する各不確定性の定量化の見直しを進め、対策優先度の判定フローを高度化したい。

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) 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.
- 2) 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.
- 3) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会，2015.
- 4) 野津厚，上部達生，佐藤幸博：工学的基盤における最大加速度の断層面からの距離減衰の検討，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp27-34，1997.
- 5) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, IUGG/IOC Time Project, 1997.
- 6) 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.
- 7) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計基準・同解説—土構造物，丸善株式会社，pp.65-69，2007.
- 8) 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：津波による道路構造物の被害予測とその軽減策に関する研究，道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート，No.19-2，pp.33-40，2010.6.
- 9) 津波デジタルライブラリ・尾鷲を襲った地震と津波（<http://tsunami-dl.jp/document/006>，アクセス日：2015年12月1日）
- 10) 下部構造研究会：橋台，橋脚の設計々算例及解説，現代社，1966.
- 11) 土木学会巨大地震災害への対応検討特別委員会：巨大地震災害への対応検討特別委員会報告書，優先度WG，pp.57-60，2006.3.
- 12) 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.