

想定南海トラフ地震による強震動と津波を受ける RCラーメン高架橋の信頼性解析

磯辺弘司¹・小川耀²・秋山充良³・越村俊一⁴

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 修（工）大成建設株式会社（〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1）

³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）

⁴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伴い発生した津波により、東北地方の太平洋側沿岸部を中心に多数の橋梁構造が被害を受けた^{1), 2)}。歴史的に、この地域は繰返し津波による被害が報告されているが、橋梁構造が津波により被害を受けたのは初めてのケースである。この教訓に基づき、今後の発生が予想される南海トラフ地震などへの対策を急ぐ必要があり、現在、水理実験や津波数値シミュレーションなどの各種の研究が進められている。一方で、津波ハザード下にある橋梁構造は、同時に地震ハザード下にもあるため、対象となる橋梁構造が置かれる地域の地震と津波ハザードの大きさの違いを考慮し、最も脅威となるハザードへの対策を講じる必要がある。

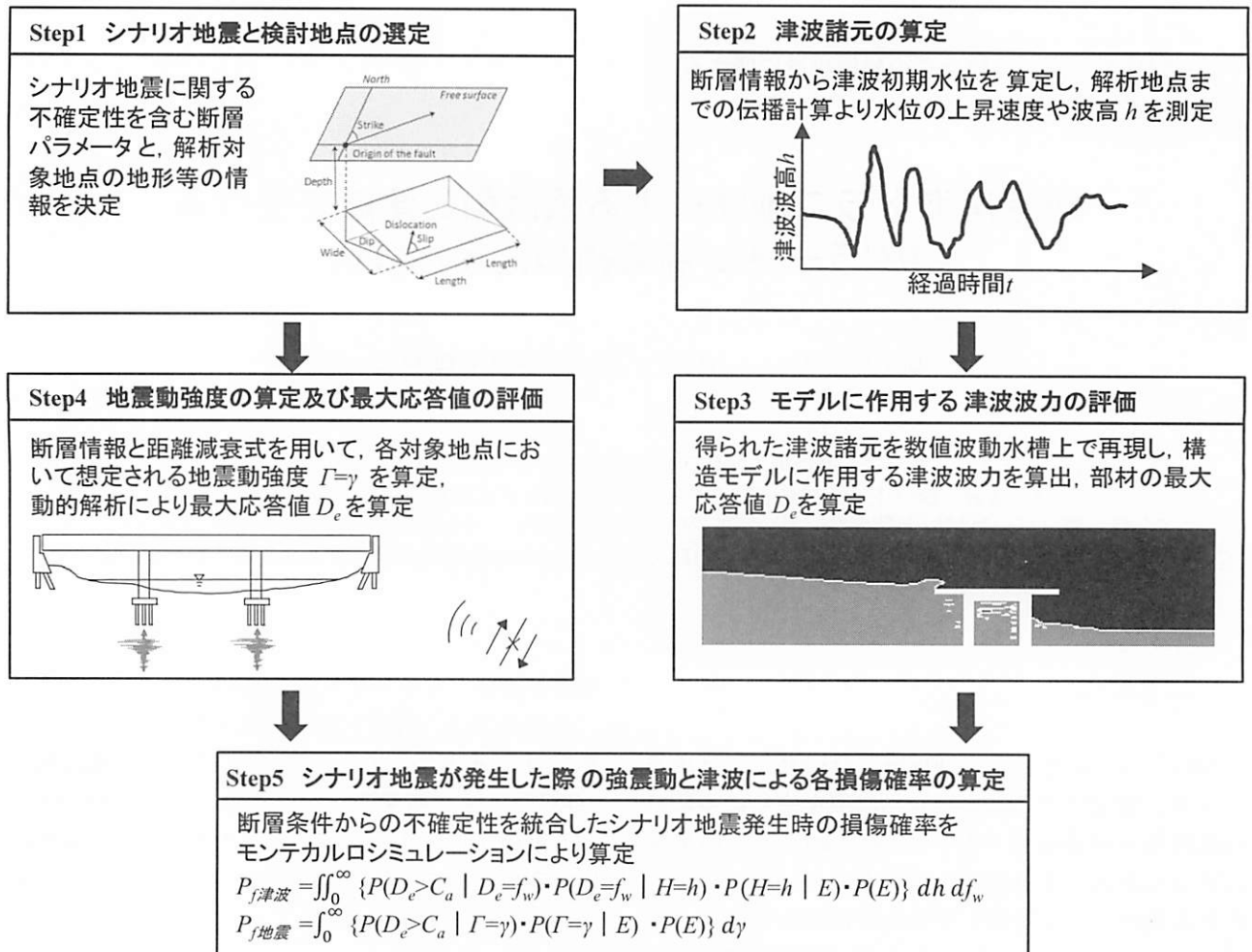
このようなマルチハザードを想定した研究として、例えば、片岡ら³⁾は、2011年東北地方太平洋沖地震で被災した国道45号線に架かる小泉大橋を対象に、架設地点の本震時の強震動と津波を推定した上で、非線形地震応答解析とCADMAS-SURF/3D⁴⁾を用いた津波応答解析を実施し、解析結果と実際の被災状況とを比較している。ただし、このような実際に生じた被害の再現解析とは異なり、将来に発生が予想される地震により生じる強震動や津波の評価には、非常に多くの不確定性を伴うことは避けられない。断層パラメータの設定、構造物に入力される強震動や津波の予測、さらには、構造物の保有水平耐力の推定に伴うばらつきは極めて大きなものとなる⁵⁾。我が国の沿岸部に架かる橋梁構造の安全性評価では、これら不確定性の影響を考慮し、強震動、あるいは津波による作用を受けて損傷する可能性の比較から、

対策が必要となるハザードを選別するべきである。

本研究では、南海トラフ地震を想定し、この影響を受けられる三重県沿岸部にある橋梁構造（RCラーメン高架橋）が強震動、あるいは津波により損傷する確率を算定し、その大小から対象地域にある橋梁構造に被害を及ぼす主たるハザードを同定するフローを提示する。

2. 想定するシナリオ地震と信頼性評価フロー

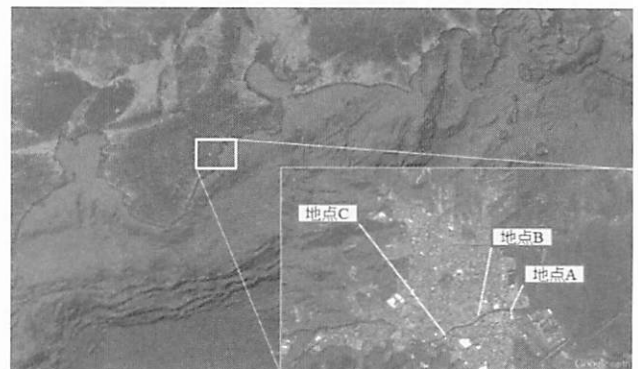
想定地震が発生した際に、検討対象地点に位置する橋梁構造が強震動および津波により損傷する確率を算定する評価フローを図-1に示す。このフローにより導出される損傷確率は想定地震が生起したという条件下で得られる、いわゆる条件付損傷確率であり、この点で参考文献1)や2)に示される地震や津波のハザード曲線と構造物の脆弱性曲線のコンボリューションから得られる損傷確率とは異なる意味を有する。強震動と津波による損傷確率の算定式は図-1内に示した。式中、 $P(E)$ は想定するシナリオ地震が発生する確率であり、南海トラフ地震の生起を前提とする本研究においては1.0となる。 $P[\Gamma=\gamma | E]$ はシナリオ地震が発生した場合に検討対象地点において地震動強度 Γ が $\Gamma=\gamma$ となる確率、 $P[D_e > C_d | \Gamma=\gamma]$ は $\Gamma=\gamma$ のときに橋梁構造の応答値 D_e が耐荷力や変形能の限界値 C_d を超える確率である。想定断層から解析対象地点での強震動を予測する際には、参考文献6)に示される距離減衰式により地動最大加速度を求め、それから定めた強震動により非線形時刻歴応答解析を実施することで $P[D_e > C_d | \Gamma=\gamma]$ （強震動による損傷確率）を求めている。



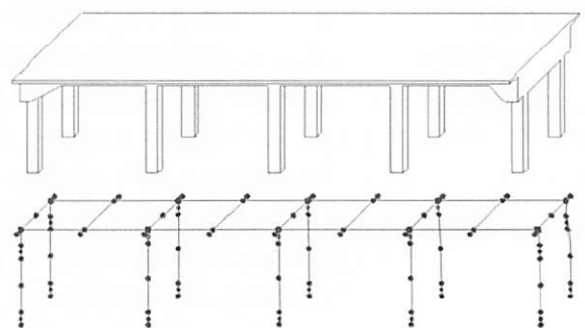
図一1 強震動・津波を受ける構造物のシナリオ地震に対する信頼性評価フロー

$P[H=h \mid E]$ は、シナリオ地震が発生した際に検討対象地点における津波波高 H が $H=h$ となる確率、 $P[D_e=f_w \mid H=h]$ は検討対象地点において $H=h$ のときに津波作用力 D_e が $D_e=f_w$ となる確率、 $P[D_e > C_a \mid D_e=f_w]$ は、 $D_e=f_w$ のときに D_e が C_a 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⁷⁾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。本研究では、断層パラメータのうち、このすべり量を確率変数として扱う。その他の使用する断層パラメータは中央防災会議モデル⁸⁾で示されている値を参照する。想定断層を表現した断層パラメータに対応する初期水位を算定し、これを津波伝播解析の入力値とする。その後、非線形長波理論に基づく平面2次元津波解析モデル(例えば⁹⁾)を使用し、解析対象地点における津波の情報を算定する。津波波力の算定には数値波動水槽CADMAS-SURF/3Dを使用する。数値波動水槽内で津波を再現するに当たり、津波波高と水位の上昇速度が必要なことから、津波伝播解析により得られた津波波高と水位の上昇速度の時刻歴をCADMAS-SURF/3Dへの入力値とし、対象とする橋



図一2 解析対象地点



図一3 解析橋梁モデル

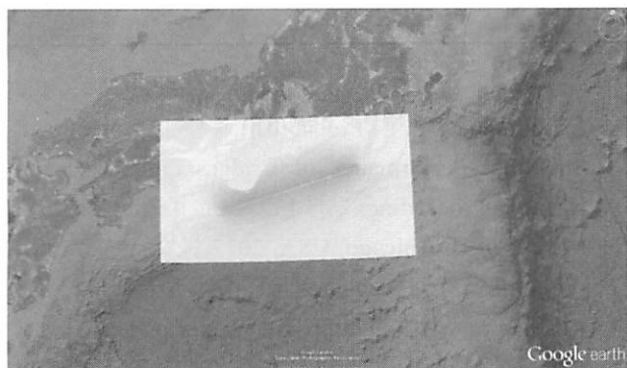


図-4 想定地震の断層位置

梁構造を再現した解析モデルの各部材に作用する波力を求める。最終的には、多質点骨組でモデル化した橋梁構造に対して、得られた波力を漸増载荷するプッシュオーバー解析を行い、 $P[D_e > C_a | D_e = f_w]$ (津波による損傷確率) を算定する。

3. 信頼性評価フローを用いたケーススタディ

本章では、図-1に示した橋梁構造の信頼性評価フローの適用例を示す。解析地点は想定される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とした。解析対象地点を図-2に示す。図に示したように、市内に位置する河川の河口部（地点A）、および同河川の上流470m地点（地点B）と上流950m地点（地点C）の計3地点を解析対象地点とした。図-3に示す仮想のRC1層ラーメン高架橋がA、B、およびCの3地点に位置していると仮定し、南海トラフ地震が発生した際の強震動と津波による損傷確率の比較を行う。

図-4は、断層パラメータの値を適宜変化させた際の断層位置を示している。また、伝播計算により得られた各解析対象地点における津波による水位変動量時刻歴の一例を図-5に示した。図より、上流部においても津波が河川を遡上し、水位の変化が生じていること、上流に向かうほど水位変動量が減少していること、各地点において第一波で最大波高が観測されていることなどが読み取れる。本研究では、損傷確率の計算は、Monte Carlo Simulation (MCS) ベースで行っており、この作業を繰り返すことになるが、図-5に示す特徴は、サンプルによらず共通していた。

MCSにより得られた各検討対象地点における津波波高の確率密度関数を図-6に示す。河口部の地点Aにおいては4.5m付近で津波波高の最頻値を取っている。一方で上流部の地点Cにおいては、断層パラメータの設定によっては、津波が解析地点まで到達しない場合もあった。

次にCADMAS-SURF/3Dを用いて伝播計算で得ら

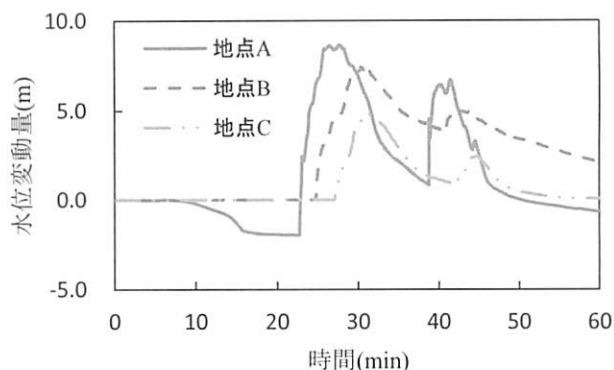


図-5 水位変動の時刻歴

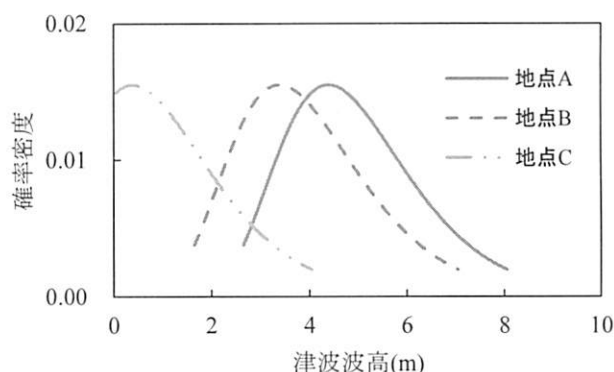


図-6 津波波高の確率分布

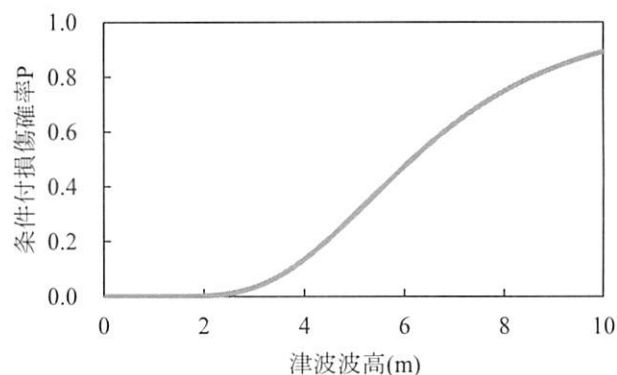


図-7 津波 fragility 曲線

れた津波の時刻歴を再現し、解析モデルに作用する波力を算定した。測定された波力を図-3の橋梁モデルに、プッシュオーバー解析を用いて作用させることで得られた津波 fragility カーブ（縦軸は $P[D_e > C_a | H=h]$ ）を図-7に示す。fragility カーブは津波波高が3m付近で立ち上がり始めている。ただし、本研究では初期水位として2mの水位を想定しているため、浸水深としては津波波高に初期水位2mを足し合わせた値となることに注意する。

本研究では、対象とするRCラーメン高架橋の柱は保有するせん断耐力が曲げ耐力よりも小さいと仮定している。つまり、本稿で示す損傷確率は、RCラーメン高架橋が津波によりせん断破壊する確率である。このとき、図-1内に示した損傷確率の算定式において C_a と D_e はそれぞれ次式で表わされる。

表-1 損傷確率の算定結果

	$P_{f\text{津波}}$	$P_{f\text{地震}}$	備考	損傷定義
地点A	0.300	0.361	河口部	せん断破壊
地点B	0.181	0.361	上流470m	
地点C	0.015	0.361	上流950m	

$$C_a = x_1(V_c + V_s) = x_1 V_{mu} \quad (1)$$

$$D_e = V_{db} \quad (2)$$

ここで、 V_{mu} はコンクリート負担分のせん断耐力 V_c とせん断補強鉄筋負担分のせん断耐力 V_s を合計したせん断耐力、 V_{db} は波力による作用せん断力である。また x_1 はせん断耐力の算定に伴う誤差を考慮する確率変数である。各パラメータの統計量等は参考文献10)に示されている値を使用した。またMonte Carlo法を行う際には、コンクリートの圧縮強度と鉄筋降伏強度、およびそれらのヤング係数も確率変数として扱っている。これらの統計量は参考文献11)に示されている。強震動に関しても図-1のフローに従うことで、強震動によりRCラーメン高架橋がせん断破壊する確率を求めた。損傷確率の算定結果の一覧を表-1に示した。本ケーススタディでは高架橋位置に関わらず、強震動によりRCラーメン高架橋が損傷する可能性が高いという結果となった。そのため、耐震補強が優先されるべき対策と同定されることになる。当然これらの結果は、高架橋が準拠した設計基準、あるいは高架橋位置により異なるものである。

4. 結論

本研究では、南海トラフ地震を想定し、それによる強震動および津波により高架橋が損傷する可能性を算定し、対象構造物にとって最も脅威となるハザードの抽出例を示した。ただし、津波により橋脚基部が洗掘することによる損傷や、桁橋の場合の桁の浮き上がりなど、他の破壊形式も考慮した場合は、損傷確率の大小が入れ替わる可能性がある。今後、各段階における解析結果の精度の向上を図るとともに、他の破壊モードも考慮した損傷確率の算定を行う予定である。

謝辞：本稿作成にあたり、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についてご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Akiyama, M., Frangopol, D.M., Arai, M., and Koshimura, S.: Probabilistic Assessment of Structural Performance of Bridges under Tsunami Hazard, Proceedings of 43rd Structures Congress, March 29-31, Chicago, USA, 2012.
- 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, 29(S1), S295-S314, 2013.
- 3) 片岡正次郎, 金子正洋, 松岡一成, 長屋和宏 : 道路橋の地震・津波複合応答解析, 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp9-16, 2012.
- 4) 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.
- 5) 水野恵太, 高熊秀, 関浜じゅん, 秋山充良, 越村俊一 : 津波作用を受ける鉄筋コンクリートラーメン高架橋の脆弱性評価に関する基礎的研究, 第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp417-420, 2013.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 中央防災会議:第16回東南海・南海地震等に関する専門調査会, 2003.
- 9) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, IUGG/IOC Time Project, 1997.
- 10) 秋山充良, 王衛倫, 前田直己, 鈴木基行 : コンクリート圧縮強度130N/mm²・せん断補強鉄筋降伏強度1200N/mm²までを用いたRC はりのせん断耐力算定式, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.907-917, 2004.
- 11) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Matsuzaki, H.: Life - cycle reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.40, No.15, pp.1671-1687, Jan. 2011.