

津波作用を受ける鉄筋コンクリートラーメン高架橋の フラジリティ評価に関する基礎的研究

水野 恵太¹・高熊 秀²・関浜じゅん³・秋山 充良⁴・越村俊一⁵

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)

³八千代エンジニアリング (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

⁴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)

⁵正会員 博(工) 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒989-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の影響により多数の橋梁が被災した。これを受けて、津波に対する橋梁の設計規準の検討が進められている。一方で、構造物の設計では、構造物に作用する津波や地震などのハザードの評価、それらの作用に対する構造物の脆弱性の評価（フラジリティ評価）、さらには、ハザード曲線やフラジリティ曲線から算定される構造物の信頼性（破壊可能性、破壊確率）の評価を行い、その大小に基づいて、対象とする構造物について最も脅威となるハザードを適切に抽出し、対策の実施の有無を判断することが合理的である。新設構造物であれば、適切な安全マージンを確保するように設計し、既設構造物であれば補強等を施すことになる。

ハザードやフラジリティの評価には、非常に多くの不確定性が含まれることから、それらを適切に定量化し、信頼性解析に反映させる必要がある。既存研究において、津波の作用を受ける構造物のハザード評価やフラジリティ評価に関する研究は非常に限定されている¹⁾。橋梁の津波フラジリティ評価に関する研究では、津波被災地の調査に基づいた報告^{2), 3)}がほとんどである。地震フラジリティ評価⁴⁾のように、観測波や模擬波を用いた橋梁の非線形時刻歴応答解析を多数回実施する、Monte Carlo法ベースの解析的な津波フラジリティ評価の例は著者らの知る限り報告されていない。そこで、本研究では、Monte Carlo法に基づいた解析的な津波フラジリティ評価の基本フローを構築した。また、それを河口部に架かる鉄筋コンクリート(RC)ラーメン高架橋を対象に適用することで、横軸が津波高さ、縦軸が条件付損傷確率である津波フラジリティカーブを得た。

2. RC層ラーメン高架橋の地震と津波被害

本研究で解析対象とするのは、RCラーメン高架橋である。図—1に、仙石線の鳴瀬川橋梁に隣接している多径間RC層ラーメン高架橋を示す。これは、2011年東北地方太平洋沖地震後に撮影したものであり、写真に示されるように、本ラーメン高架橋は津波および浮遊物により大きな横力を受けたと推定される。ただし、地震後に行った目視検査では、高架橋柱などに特に目立った損傷は確認されていない⁵⁾。一方、1978年宮城県沖地震、1995年兵庫県南部地震、2003年三陸南地震、さらには2004年新潟県中越地震により、東北新幹線、山陽新幹線および上越新幹線に使用されていたRCラーメン高架橋は大きな損傷を受けている。これらの強震動による被害を受け、図—2に示されるような鋼板巻き立てによる耐震補強が施されている。このような耐震補強により、着実に既存RCラーメン高架橋の耐震性能は向上しており、2011年東北地方太平洋沖地震でも、耐震補強済みのRC柱はほぼ無損傷だったことが確認されている(図—3)⁶⁾。RCラーメン高架橋の安全性レベルは、地震や津波ハザードの大小、あるいは、高架橋の耐震補強の実施の有無、高架橋を設計した際に用いた適用規準などに依存している。

3. 津波フラジリティ評価の基本フロー

(1) 概説

地震フラジリティ曲線の横軸に使われる地震動強度の指標の選択は議論になる。通常は、地動最大加速度や速度、あるいは対象構造物の一次固有周期に相当する加速度応答スペクトルが用いられる。津波フラジリティ評価では、津波高さや津波



図-1 津波の影響を受けた RC1 層ラーメン高架橋

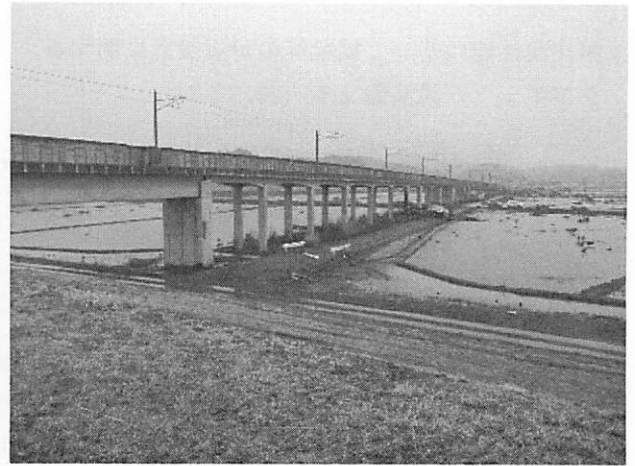


図-3 有効に機能した耐震補強（東北新幹線高架橋）

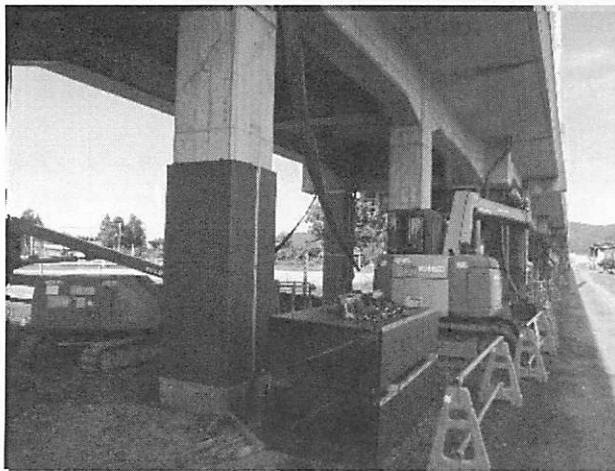


図-2 RC ラーメン高架橋の耐震補強の様子

速度，あるいはそれらから計算される波力が横軸の指標となり得る．本稿では，津波高さを fragility 評価の指標として選択した．津波 fragility 評価の基本フローを図-4 に示す．図-4 では，まず，同じ津波高さを有する多数の波を事前に用意する．その際，同じ津波高さでも構造物に与える影響の違いを考慮するため，碎波の形状や津波の速度，あるいは周期を既往の津波の実測や水理実験のデータなどにに基づき変化させている．対象構造物の地点が特定されれば，その地形等から津波の特性をより限定できると思われるが，ここでは，過去の実測値等に基づき，各パラメータの変動幅を決めている．本研究では，造波し，そして3次元にモデル化した構造物に波を作用させ，水平波力および上揚力を計算する際は，汎用解析プログラム CADMAS-SURF/3D⁷⁾を用いている．最終的には，得られた波力を対象とする鉄筋コンクリートラーメン高架橋に作用させたときの断面力が，高架橋の柱が有するせん断耐力や曲げ耐力に到達する可能性を算定する．

(2) 津波 fragility 解析

図-4 のフローに従い，鉄筋コンクリートラーメン高架橋の津波 fragility カーブを得た．まず，前記の方法で造波した複数の波を高架橋に作用させ，その波力の分布を作成した．図-5 には，津波高さを 4m および 5m に固定し，ラーメン高架橋の頂部で計算された波力の確率密度を示している．横軸は，既存の波力算定式である広井式から求められる波力 P_{Hir} により，CADMAS-SURF/3D から求められる波力 P_{CAD} を無次元化している．図-5 に示されるように，広井式により無次元化された波力分布は，津波高さによらず概ね同形状を有しており，その形状は対数正規密度関数で近似可能であることが分かる．

次に，図-5 の分布を持つ波力をラーメン高架橋に作用させ，fragility 評価を行う．fragility 評価を行う際，RC ラーメン橋脚は，3次元でモデル化し，基礎はモデル化せず，柱の下端部を固定している．また，漸増载荷中に生じる軸力変動は考慮せず，常時の軸力からせん断耐力や曲げの履歴特性を評価した．津波 fragility は式(1)で与えられる．

$$Fragility = P[g_i \leq 0 | \Gamma = \gamma] \quad (1)$$

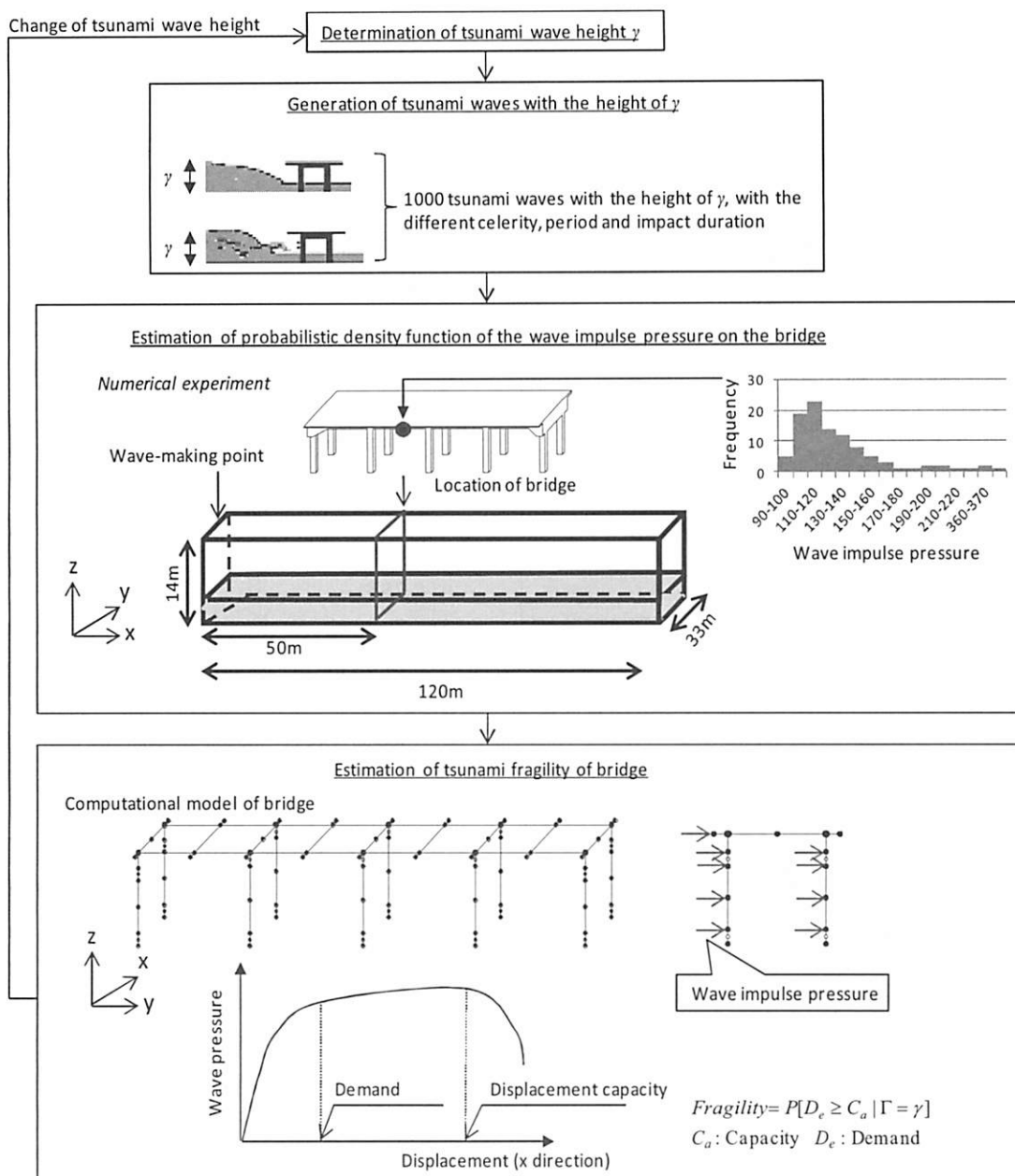


図-4 橋梁の津波フラジリティ評価の基本フロー

ここに、 g_i は性能関数であり、 Γ は津波高さである。本研究では、対象とする鉄筋コンクリートラーメン高架橋の柱は保有する曲げ耐力とせん断耐力がほぼ等しいと仮定し（曲げせん断耐力比が1.0程度）、性能関数としてせん断耐力とせん断力の比較、および曲げ耐力と曲げモーメントの比較の2つを想定する。

$$g_1 = \chi_1(V_c + V_s) - V_{D,b} \quad (2)$$

$$g_2 = \chi_2\theta'_{y,b} - \theta_{D,b} \quad (3)$$

ここに、 V_c はコンクリート負担分のせん断耐力、 V_s はせん断補強鉄筋負担分のせん断耐力、 $V_{D,b}$ は波力による作用せん断力、 $\theta'_{y,b}$ は曲げ降伏回転角、 $\theta_{D,b}$ は波力により生じる部材曲げ回転角、 χ_1 と χ_2 はそれ

ぞれせん断耐力と曲げ降伏回転角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⁸⁾に示されている。このほかに、Monte Carlo法を行う際は、コンクリート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⁹⁾に示されている。

最終的に、 $P[g_i < 0 | \Gamma = \gamma]$ をMonte Carlo法で計算する。これを γ の値を適当に変更して繰り返し、離散的に得られる P の値を対数正規分布で近似したものがフラジリティカーブである。対数正規分布のパラメータは最尤法で定める¹⁰⁾。これらの手順により得られた鉄筋コンクリートラーメン高架橋の津波フラジリティ曲線を図-6に示す。この結果から、本

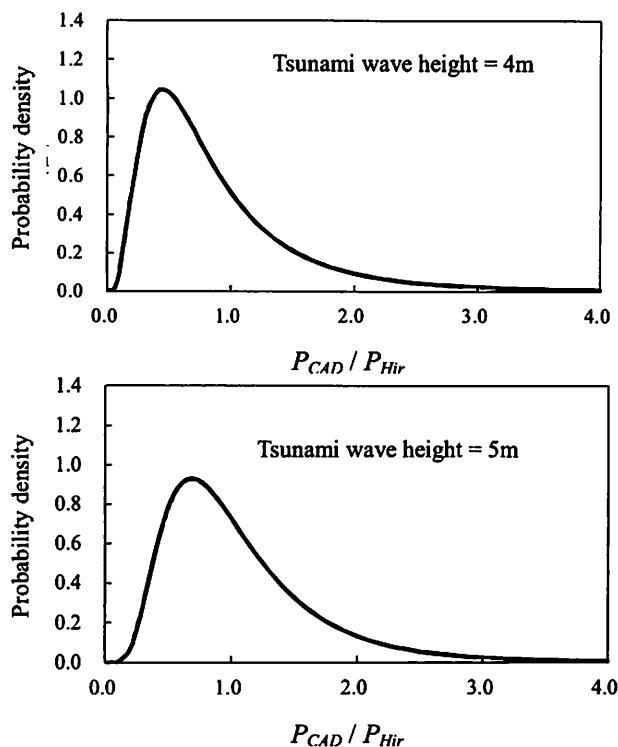


図-5 津波の波力分布の例

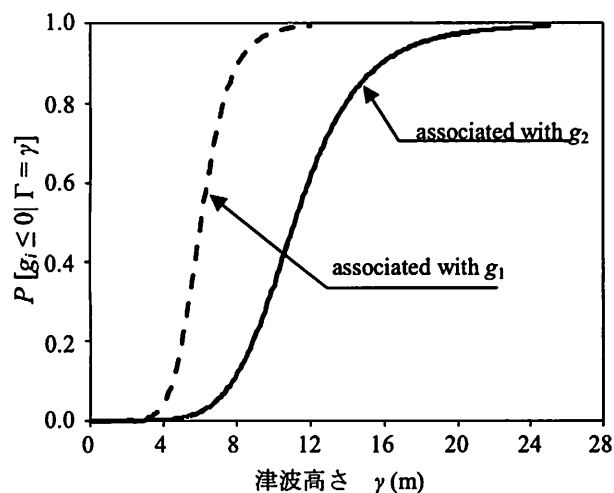


図-6 ラーメン高架橋の津波 fragility カurve

研究で対象とした橋梁では、限界状態としてせん断耐力に着目した場合だと、fragility カurveは津波波高 4m で立ち上がり、10m で損傷確率がほぼ 1 となることが確認される。また、限界状態として曲げ降伏回転角に着目した場合だと、fragility カurveは津波波高 6m で立ち上がり、18m で損傷確率がほぼ 1 となることが確認される。

4. まとめ

本稿では、橋梁の津波 fragility 評価の基本フローを示した。津波の影響を受ける橋梁の破壊可能性の評価、津波と地震のどちらが我が国で設計される橋梁にとって脅威のハザードであるのか、

あるいは、津波の影響を受ける地域にある道路や鉄道ネットワークのリスク評価などを行う上で、津波 fragility カurveは不可欠なデータである。提示した基本フローの各要素技術は、今後、多くの改善が必要であり、それぞれについて高度化を進めていきたい。

参考文献

- 1) Akiyama, M., Frangopol, D.M., Arai, M. and Koshimura, S. 2013. Reliability of bridges under tsunami hazards: Emphasis on the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. *Earthquake Spectra*, 29(S1), S295-S314.
- 2) Shoji, G. and Morikawa, T., 2007. Evaluation of the structural fragility of a bridge structure subjected to a tsunami wave load, *Journal of Natural Disaster Science*, 29, 73-81.
- 3) Suppasri, A., Koshimura, S., and Imamura, F., 2011. Developing tsunami fragility curves based on the satellite remote sensing and the numerical modelling of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand, *Natural Hazards and Earth System Science*, 11, 173-189.
- 4) Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.-K., and Kim, S.-H., 2000b. Nonlinear static procedure for fragility curve development, *Journal of Engineering Mechanics*, 126, 1287-1295.
- 5) Akiyama, M. and Frangopol, D.M., 2012. Lessons from the 2011 Great East Japan Earthquake: Emphasis on life-cycle structural performance, *IALCCE (International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering)*, Vienna, Austria.
- 6) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Mizuno, K. 2013. Performance analysis of Tohoku-Shinkansen viaducts affected by the 2011 Great East Japan earthquake. *Structure and Infrastructure Engineering* (in press).
- 7) 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発、沿岸技術ライブラリー、No.39, 2010.
- 8) Akiyama, M., Matsuzaki, H., Dan, H.T., and Suzuki, M. 2012. Reliability-based capacity design for reinforced concrete bridge structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(12), 1096-1107.
- 9) 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, 2011.
- 10) Kim, S.-H. and Shinozuka, M. Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.19, pp.105-112, 2004.