

鉄筋コンクリートラーメン高架橋の津波フラジリティ評価に関する基礎的研究

早稲田大学 学生会員 ○水野恵太, 高熊 秀
早稲田大学 正会員 秋山充良

八千代エンジニアリング 関浜じゅん
東北大学 正会員 越村俊一

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、そのハザードに対する性能照査を行い、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、解析的な津波フラジリティ評価の基本フローを構築し、それを鉄筋コンクリートラーメン高架橋を対象に適用することで、津波フラジリティカーブを得た。

2. 津波フラジリティ評価の基本フロー

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、津波高さをフラジリティ評価の指標として選択した。津波フラジリティ評価の基本フローを図-1に示す。図-1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

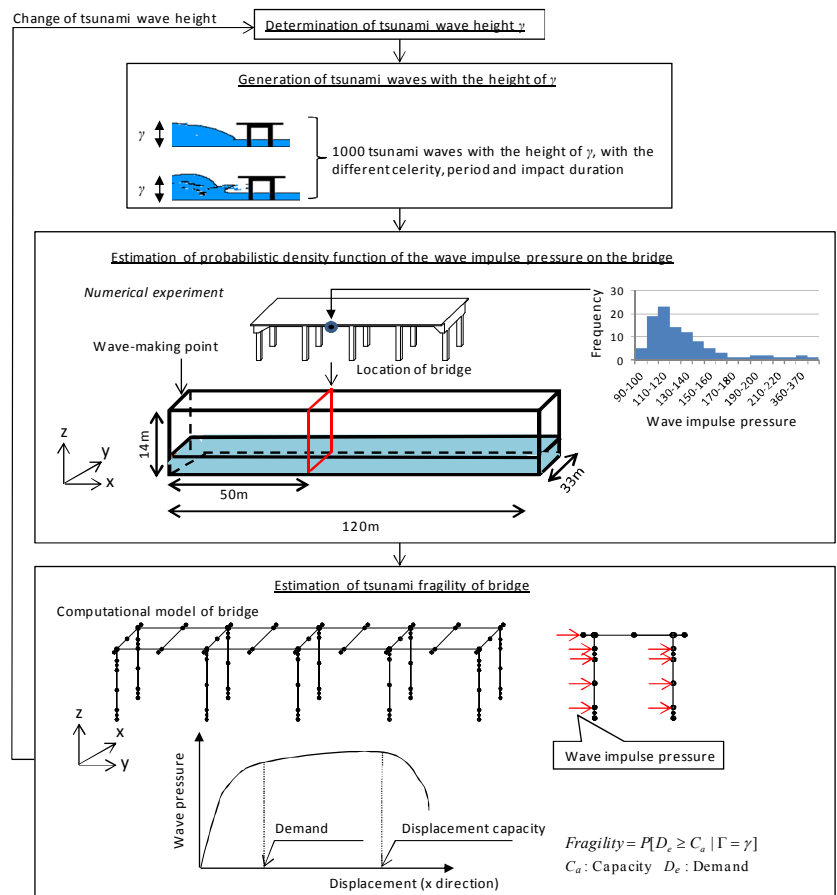


図-1 橋梁を対象とした津波フラジリティ評価の基本フロー

Key Words : 津波, フラジリティ解析, コンクリート構造物, 信頼性評価

連絡先 : 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学部社会環境工学科 TEL : 03 (5286) 2694

CADMAS-SURF/3D⁵⁾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。

3. ラーメン高架橋の津波フラジリティカーブ

図-1 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フラジリティカーブを得た。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-2 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 から求められる波力 P_{CAD} を無次元化している。図-2 に示されるように、広井式により無限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-2 の分布を持つ波力をラーメン高架橋に作用させ、フラジリティ評価を行う。フラジリティは式(1)で与えられる。

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

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。

$$g_1 = \chi_1(V_c + V_s) - V_{D,b} \quad (2) \quad g_2 = \chi_2\theta'_{y,b} - \theta_{D,b} \quad (3)$$

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⁶⁾に示されている。

最終的に、 $P[g_i < 0 | \Gamma = \gamma]$ と γ の関係を対数正規分布で近似したものが津波フラジリティカーブである。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-3 に示す。

4. まとめ

本稿では、橋梁の津波フラジリティ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、津波フラジリティカーブ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, (in press). 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) 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. 6) Akiyama, M., et al., 2012. Reliability-based capacity design for reinforced concrete bridge structures. Structure and Infrastructure Engineering, 8(12), 1096-1107.

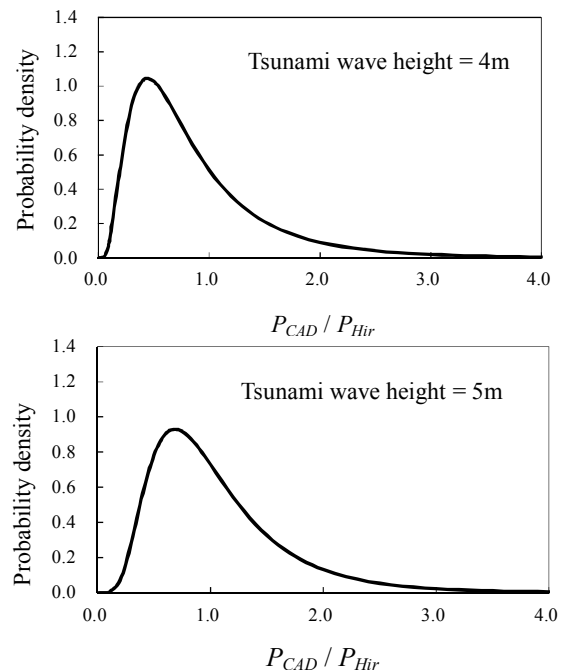


図-2 津波の波力分布の例

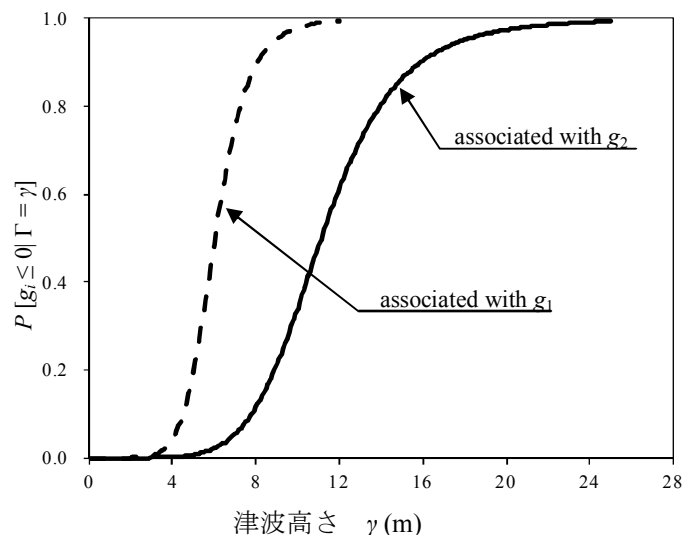


図-3 ラーメン高架橋の津波フラジリティカーブ