

マルチハザード（地震と津波）を受ける橋梁の信頼性評価に関する基礎的研究

早稲田大学 学生会員 ○小川直也, 高熊 秀

早稲田大学 正会員 秋山充良

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。既往の研究では、Li & Ellingwood¹⁾の地震とハリケーンの影響を受ける住宅の安全性評価、Basu & Prasad²⁾による地震と洪水による洗掘を受ける橋梁のリスク評価、あるいは Akiyama et al.³⁾による地震と飛来塩分を受ける橋梁のライフサイクル解析など、このような異なる複数のハザード（マルチハザード）を受ける構造物の設計法や安全性評価法が研究されている。一方、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。

ただし、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⁴⁾。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経験的フラジリティの報告^{5),6)}がほとんどである。

本研究ではまず、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桁橋形式の橋梁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。また、同じ橋梁を対象に耐震信頼性評価も行うことで、地震と津波ハザードを受ける橋梁の安全性に影響する支配的なハザードの抽出についての基礎検討を行った。

2. 橋梁の津波フラジリティ解析

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、砕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

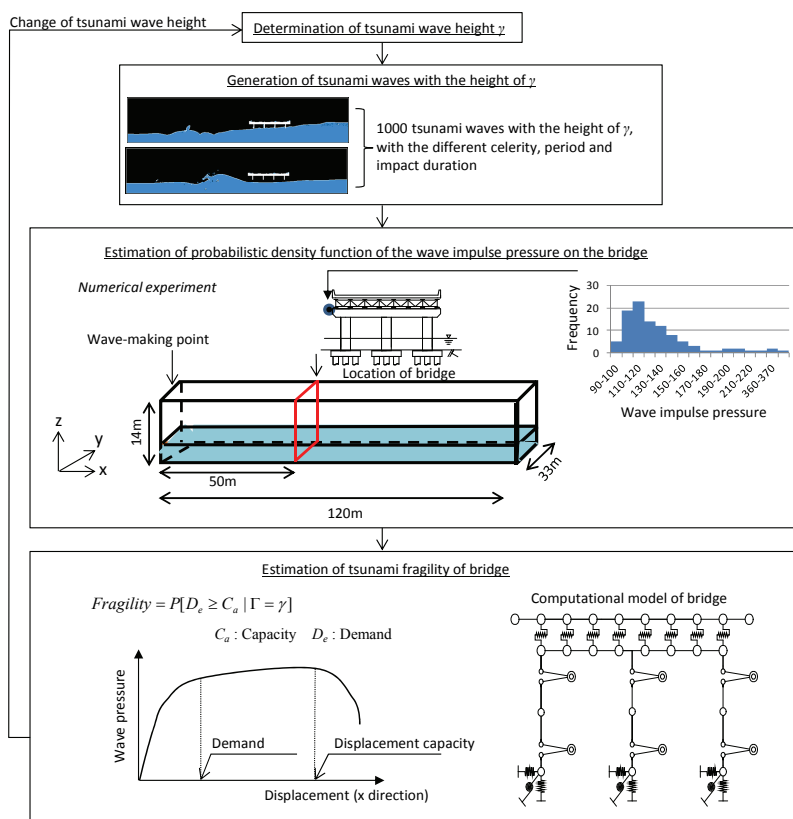


図-1 橋梁の津波フラジリティ解析の手順

□: Fixed bearings

○: Expansion bearings

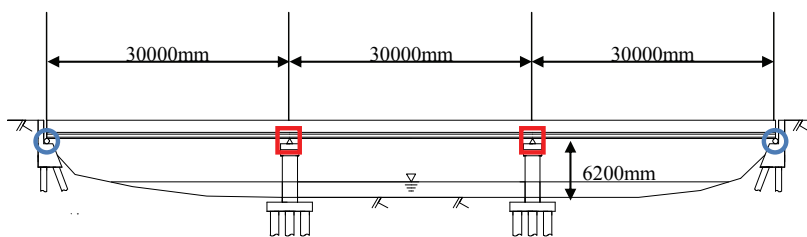


図-2 解析対象橋梁

Key Words : 津波, 信頼性評価, フラジリティ解析, ハザード, 橋梁

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

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、水平波力を計算する際は、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橋梁に作用させたときに橋梁の柱が有する変形能や支承の限界耐力に到達する可能性を算定する。

図-2に示す橋梁を例に、図-1の手順により津波 fragility 曲線を計算した例を図-3(a)に示す。図-3(a)の縦軸は、津波高さ Γ_t が特定の値 γ_t のときに、支承や橋脚に対して設定した限界状態 g を超える事象が生起する条件付確率を示している(式(1))。

$$\text{Fragility} = P[g_i \leq 0 | \Gamma_t = \gamma_t] \quad (1)$$

同様に、同じ橋梁に対して地震 fragility を計算した結果を図-3(b)に示す。地震 fragility 曲線は、地震動強度(地動最大速度・PGA) Γ_s が特定の値 γ_s のときに支承や橋脚が強震動で損傷する確率と γ_s の関係を示す。

この fragility 曲線と図-4に示すハザード曲線のコンボリューションにより橋梁の津波および地震に対する損傷確率が算定される。損傷確率の算定結果を表-1に示す。想定する地震と津波ハザードの強弱により、部材の損傷可能性を支配するハザードは変化する。

4. まとめ

本稿では、マルチハザード(地震と津波)を受ける橋梁の信頼性評価の例を提示した。すべてのハザードを考慮し、対策を講じることは合理的ではない。ハザードの大きさや頻度、あるいは部位や部材の耐力や変形能評価に伴う不確定性の大きさなどから、対象とする構造物にとって最も脅威となるハザードを抽出する必要がある。このような作業を行う上で、信頼性のアプローチは有効である。

参考文献 1) Li, Y. and Ellingwood B.R. 2009. Framework for multihazard risk assessment and mitigation for wood-frame residential construction. *Journal of Structural Engineering*, 135: 159-168. 2) Basu, S.B. and Prasad, G.G. 2012. Seismic risk assessment of reinforced concrete bridges in flood-prone regions. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(9): 952-968. 3) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Matsuzaki, H. 2011. Life-cycle reliability of RC bridge piers under seismic and air-borne chloride hazards. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40(15): 1671-1687. 4) 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. 5) 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. 6) 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. 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.

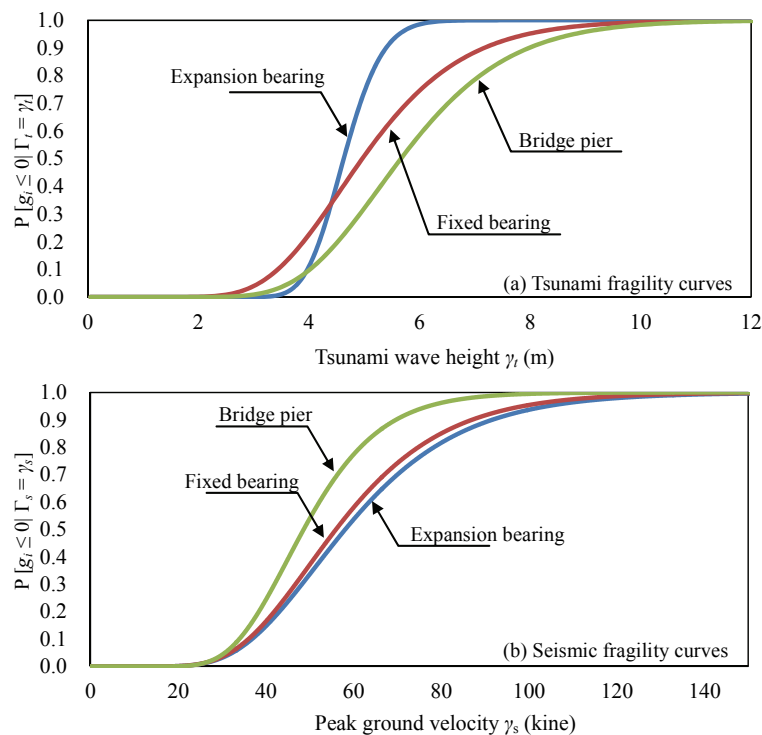


図-3 地震 fragility と津波 fragility の比較

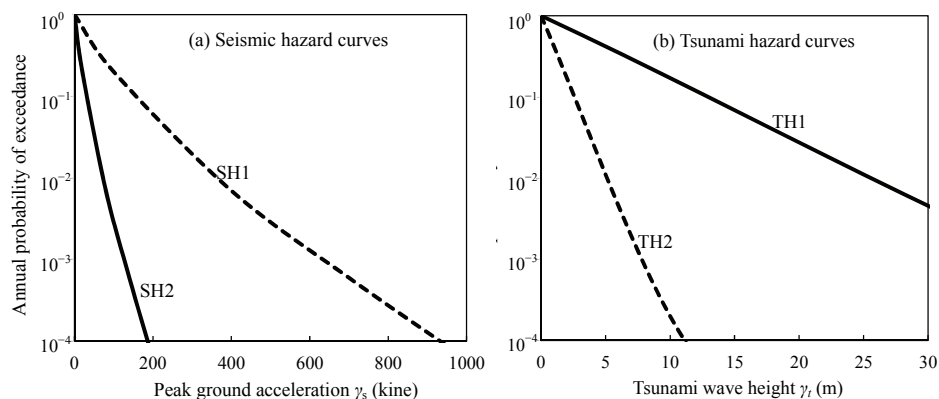


図-4 想定した地震ハザードと津波ハザード

表-1 地震と津波ハザードを受ける橋梁の信頼性の比較

	Seismic hazard		Tsunami hazard	
	SH1	SH2	TH1	TH2
RC bridge pier	1.9×10^{-2}	8.5×10^{-4}	2.9×10^{-2}	3.7×10^{-3}
Fixed bearing	2.1×10^{-2}	9.0×10^{-4}	3.2×10^{-2}	5.2×10^{-3}
Expansion bearing	2.5×10^{-2}	1.1×10^{-3}	3.3×10^{-2}	5.5×10^{-3}