

津波ハザードを受ける橋梁の損傷確率の算定 およびその地震時損傷確率との比較

小川 耀¹・高熊 秀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）鉄道建設・運輸施設設備支援機構（〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1）

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）

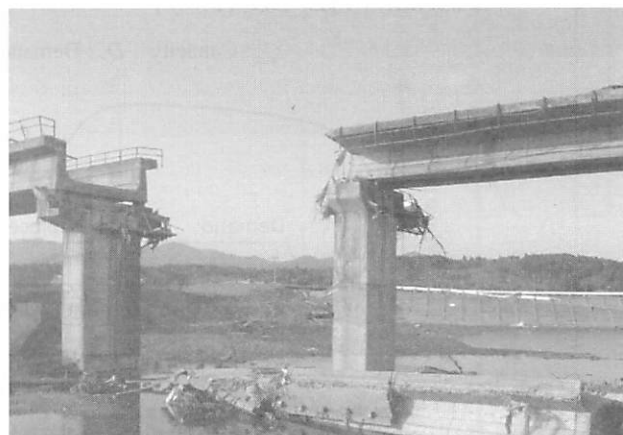
1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の影響により多数の橋梁が被災した。図-1は、宮城県沿岸部にある道路橋および鉄道高架橋の被災状況の写真である。今回の津波による橋梁被害を受けて、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、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の影響を受ける橋梁のライフサイクル解析など、マルチハザード下にあ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、非常に多くの不確実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、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



(a) 小泉大橋



(b) 気仙沼線内 RC 高架橋

図-1 津波により被災した道路橋・鉄道橋の例

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い、地震時損傷確率を算定した。そして、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. 津波ハザードを受ける橋梁の損傷確率の算定およびその地震時損傷確率との比較

津波フラジリティ評価の基本フローを図-2に示

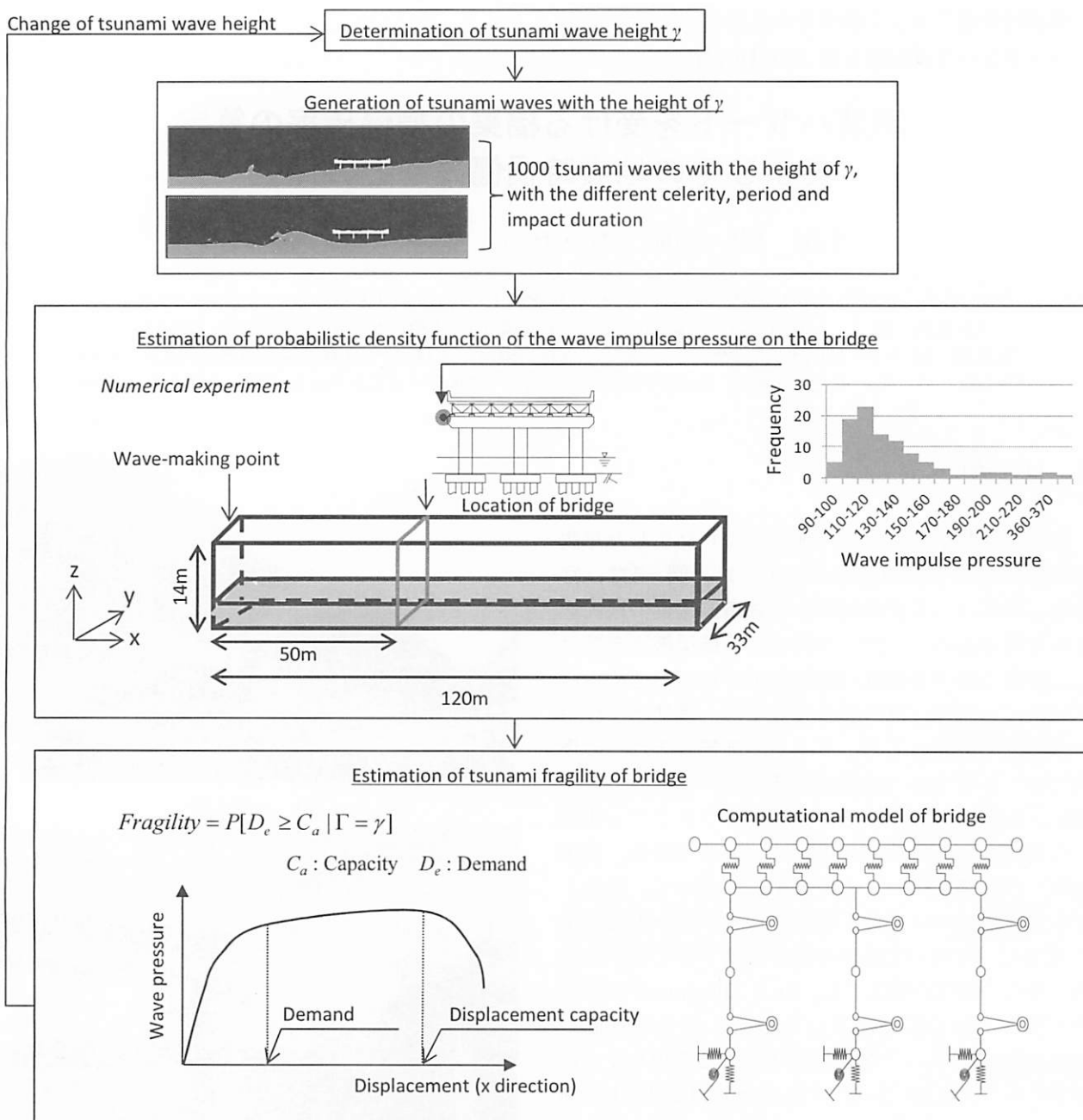


図-2 橋梁の津波フラジリティ解析の手順

す。図-2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。具体的には、Monte Carloシミュレーションにおいて、造波に関するパラメータを実測値や実験結果に基づき変動させることで複数の波を作成し、それぞれを構造物に作用させることで波圧を求めている。この一連の計算には、CADMAS-

SURF/3D⁷⁾を用いた。そして、得られた波力を対象とする橋梁に作用させたときに橋脚が保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-3 に示す橋梁を例にして、津波フラジリティ曲線および地震フラジリティ曲線を計算した結果を図-4 に示す。図-4 の縦軸は、津波や強震動の強さを表すパラメータ Γ が特定の値 γ 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))。

$$Fragility = P[g, \leq 0 | \Gamma = \gamma] \quad (2)$$

各部材(橋脚、固定・可動金属支承)の限界状態は、ある波高 $\gamma_i=h$ を持つ波を入力するプッシュオーバー

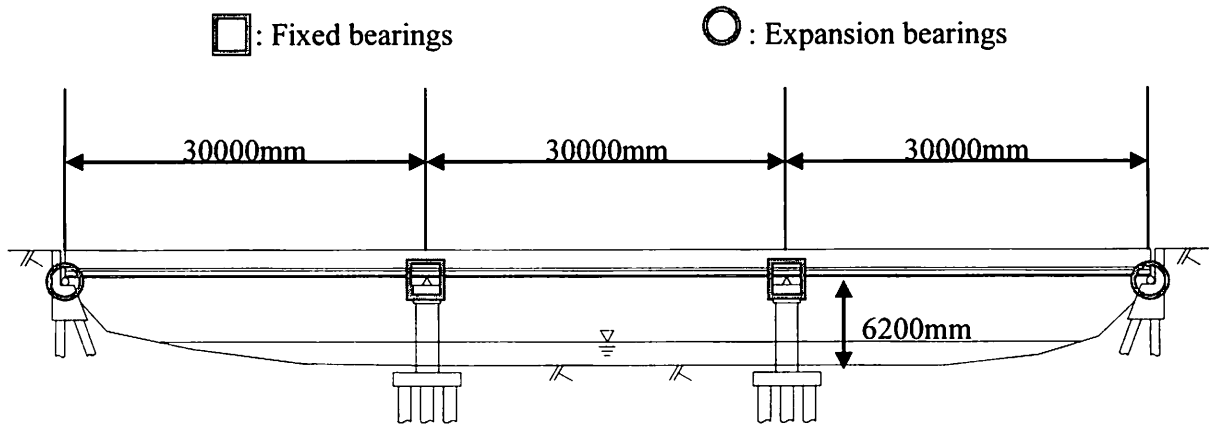


図-3 解析対象橋梁

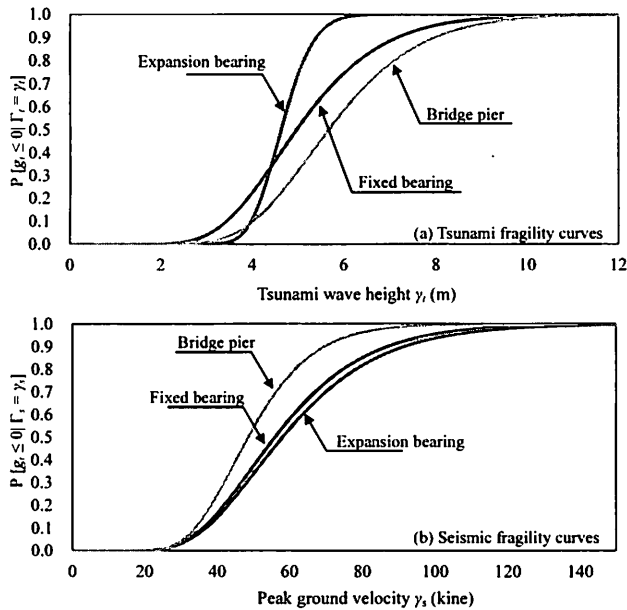


図-4 地震 fragility と津波 fragility の比較

解析から部材ごとの最大応答値 D_e を算定し、算定された最大応答値 D_e が各部材が保有する耐荷力や変形能 C_a を超過する点と定めた。着目した部材は、RC橋脚、固定支承および可動支承であり、限界状態式は以下の式(2)～(4)となる。一方、強震動を受ける橋梁の fragility 曲線を作成する際は、ある地震動強度 γ_s を持つ地震動群を入力し、それぞれの波から得られる各部材の最大応答値 D_e と耐荷力や変形能 C_a を比較する。本研究では、地震動強度 γ_s を地動最大速度とし、 γ_s を大小させた模擬地震動群を作成した。模擬地震動の作成方法は、参考文献⁸⁾と同じにしている。強震動を受ける橋梁の fragility 曲線作成時に用いる限界状態式は、式(5)～(7)となる。

$$g_1 = x_1 C_{a, \text{橋脚}} - x_5 D_{e, s, p} \quad (2)$$

$$g_2 = x_1 C_{a, \text{固定支承}} - x_5 D_{e, s, f} \quad (3)$$

$$g_3 = x_1 C_{a, \text{可動支承}} - x_5 D_{e, s, m} \quad (4)$$

$$g_4 = x_1 C_{a, \text{橋脚}} - x_2 D_{e, s, p} \quad (5)$$

$$g_5 = x_1 C_{a, \text{固定支承}} - x_2 D_{e, s, f} \quad (6)$$

$$g_6 = x_1 C_{a, \text{可動支承}} - x_2 D_{e, s, m} \quad (7)$$

ここに、 $C_{a, \text{橋脚}}$ は交番载荷を受けるRC橋脚で軸方向鉄筋のはらみ出しが生じはじめる限界変位⁹⁾、 $C_{a, \text{固定支承}}$ および $C_{a, \text{可動支承}}$ は、Nielsonによる研究¹⁰⁾で定義される損傷状態4（損傷状態4が終局限界状態）に相当する耐荷力である。 x_1 、 x_3 、および x_5 は、それぞれ、 $C_{a, \text{橋脚}}$ 、 $C_{a, \text{固定支承}}$ および $C_{a, \text{可動支承}}$ の算定に伴う誤差（モデル誤差）を表す確率変数である。ただし、 x_3 と x_5 を評価するだけの十分な統計量が得られていないことから、本研究では、 x_1 と同じ平均値および変動係数を持つガウス変数とした。 x_1 は、参考文献⁹⁾にある実験値と $C_{a, \text{橋脚}}$ の計算値の比から定めている。 $D_{e, s, p}$ 、 $D_{e, s, f}$ 、および $D_{e, s, m}$ は、プッシュオーバー解析により求められる津波に対する応答値であり、 $D_{e, s, p}$ 、 $D_{e, s, f}$ 、および $D_{e, s, m}$ は、模擬地震動群を用いた動的解析により求められる最大応答値である。 x_5 および x_2 は、津波および強震動により生じる橋梁各部位・部材の応答値算定に伴うモデル誤差を考慮する確率変数である。

この fragility 曲線と図-5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。図-5に示すハザード曲線は、東北地方沿岸部の地震ハザードおよび津波ハザードを基に、本ケーススタディのために強弱を変更した仮想のものであり、SH1とTH1が強い津波ハザードと地震ハザード、SH2とTH2が弱い津波ハザードと地震ハザードである。

損傷確率の算定結果を表-1に示す。この検討例では、橋梁の置かれる地点のハザードが、仮に強震動に対してはSH2、津波に対してはTH1の場合には、橋梁に損傷をもたらす支配的なハザードは橋脚・支承ともに津波ハザードである。一方、強震動に対してはSH1、津波に対してはTH2のハザード下に橋梁が置かれる場合には、橋梁に損傷をもたらす支配的なハザードは橋脚・支承ともに地震ハザードである。

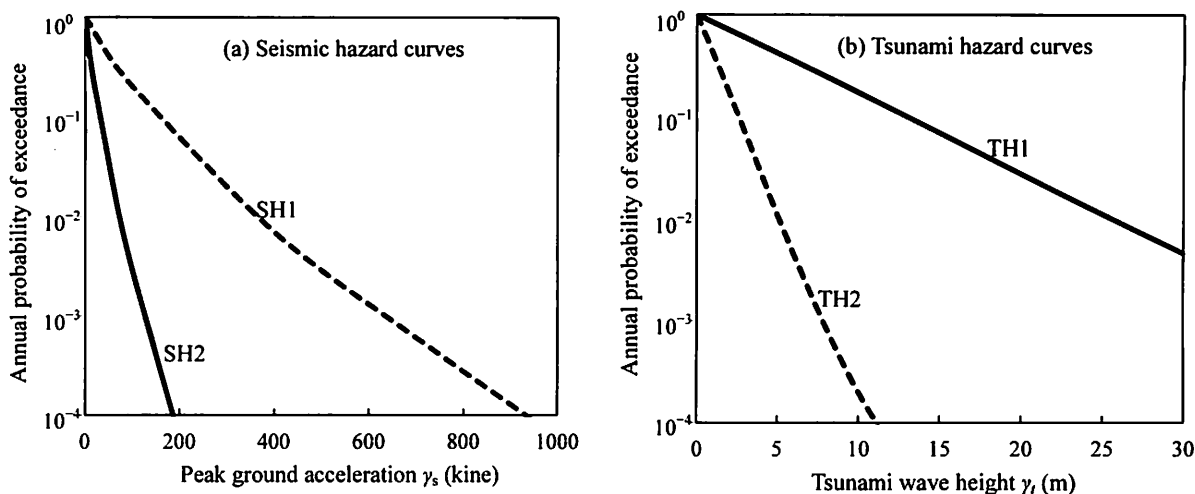


図-5 想定した地震ハザードと津波ハザード

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}

想定する地震と津波ハザードの強弱により，部位や部材の損傷可能性は大きく異なる．信頼性解析を用いることで，マルチハザード下にある構造物について，最も大きな損傷確率をもたらすハザードの同定が可能になる．

3. 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.
- 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) 秋山充良，内藤英樹，鈴木基行：軸方向鉄筋の座屈発生点に対応した終局曲率の簡易算定法およびRC柱とSRC柱の靱性能評価への適用，土木学会論文集，No. 725/V-58，pp. 113-129，2003.
- 10) Bryant G. Nielson：Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones, . Ph.D. thesis, School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 2005.