

津波被害想定に活用するための津波作用に関する 橋梁の被害率曲線の構築とその利活用

Development and implementation of fragility curve of damaged bridges
due to a tsunami load for tsunami damage assessment

○中村 友治¹, 庄司 学², 高橋 和慎³

Tomoharu NAKAMURA¹, Gaku SHOJI², and Kazunori TAKAHASHI³

¹ 筑波大学 大学院 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

² 筑波大学 システム情報系

Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

³ 筑波大学 大学院 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

We assess the tsunami damage on road bridges due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami. For damage assessment of bridges, we obtain the inundation heights at 33 damaged bridges due to the tsunamis by tsunami flow simulations based on shallow water theory, which are discretized by using the finite difference method with a staggered leap-frog scheme. We clarified damage ratio dependent on an inundation height, which is defined by the value of number of bridge damage points divided by total number of exposed bridges, focusing on wash-away girder-type bridges. Finally, we revise the fragility curve of wash-away damage for bridges proposed previously by authors and show how to use the fragility curve for regional risk assessment of road infrastructures.

Keywords : The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami, road structure, bridge, tsunami damage

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、これに伴う巨大津波により道路橋に甚大な被害が発生した。本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震津波において発生した道路桁橋の落橋被害に焦点を当て橋梁の被害率曲線を構築する。被災橋梁における浸水高を浅水理論に基づく Staggered 格子を用いた leap-frog 差分法による津波の伝播及び浸水に関する数値シミュレーションによって求め、構築された被害率曲線を地域レベルの道路網に適用することで橋梁の津波被害想定に関する方法論を示す。

2. 分析対象とする橋梁と分析方法

本研究では、庄司ら¹⁾において示された 2011 年東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けたと考えられる 230 の橋梁を分析対象とする。被災データとしては同様に文献 1) に示された 33 データから被災モードが落橋とされる 20 データを対象とし、それらの中で PC・RC 桁及び鋼桁である 18 の桁橋を分析する(表 1)。図 1 には、これらのデータの地点、浸水域²⁾及び浸水高³⁾の関係を示す。これらの対象橋梁は岩手県に 5 データ、宮城県に 13 データが存在する。これらデータを基に、落橋に関する被害率 R_N^b として被災橋梁数 N_d^b の中の落橋した橋梁数 N_{fd}^b を浸水域内橋梁数 N_t^b で除して次式のように定義した。

$$R_N^b = \frac{N_{fd}^b}{N_t^b} \quad (1)$$

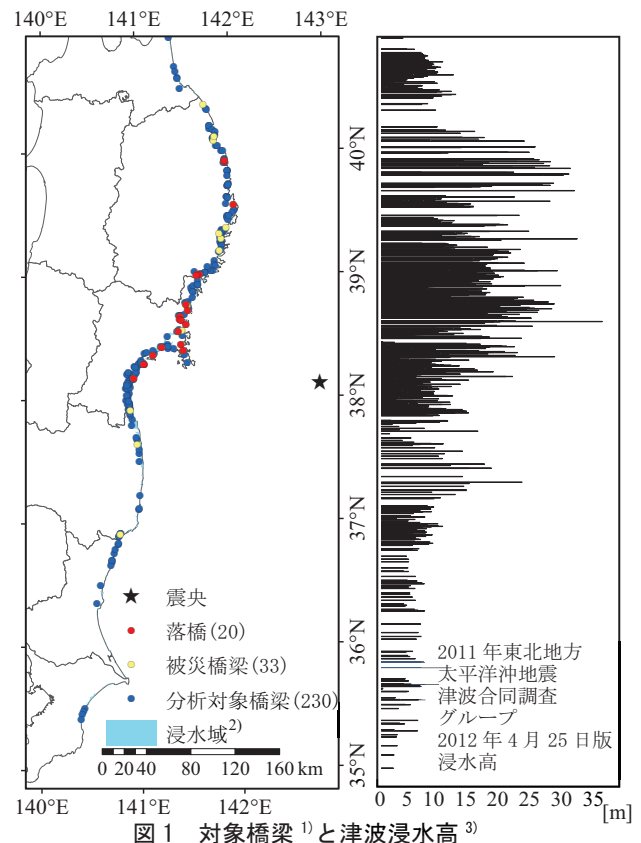


図 1 対象橋梁¹⁾と津波浸水高³⁾

津波作用の指標としては浸水高データを使用する。本来、分析対象とする被災地点における浸水深のデータを

表1 文献1)に示された33被災橋梁及び本研究で対象とする18橋梁(*)と津波シミュレーションにおける計算 Group

計算 Group	名称(33橋梁)	緯度	経度	地名	計算 Group	名称(33橋梁)	緯度	経度	地名
1	和座橋	40.389	141.728	岩手県九戸郡浅野町	13	水尻橋(*)	38.674	141.443	宮城県本吉郡南三陸町
2	広内橋	40.126	141.838	岩手県九戸郡野田村		折立橋(*)	38.647	141.437	
3	米田橋	40.097	141.826	岩手県九戸郡野田村		横津橋(*)	38.638	141.456	
4	ハイベ沢橋(*)	39.927	141.939	岩手県下閉伊郡田野畑村	14	新相川橋(*)	38.603	141.501	宮城県石巻市
	声転橋	39.919	141.939		15	尾の崎橋	38.558	141.460	宮城県石巻市
5	向渡橋(*)	39.573	142.023	岩手県宮古市		新北上大橋	38.547	141.423	
6	浪板橋	39.383	141.937	岩手県上閉伊郡大槌町	16	女川橋(*)	38.447	141.449	宮城県牡鹿郡女川町
7	日ノ神橋	39.336	141.868	岩手県釜石市	17	定川大橋(*)	38.420	141.247	宮城県東松島市
8	鳥谷坂橋	39.300	141.884	岩手県釜石市	18	野々浜橋(*)	38.394	141.470	宮城県牡鹿郡女川町
9	片岸大橋	39.203	141.863	岩手県釜石市	19	松ヶ島橋(*)	38.354	141.157	宮城県東松島市
10	川原川橋(*)	39.009	141.630	岩手県陸前高田市	20	葦森橋(*)	38.290	141.064	宮城県宮城郡七ヶ浜町
	沼田跨線橋(*)	39.009	141.649		21	橋本橋(*)	38.287	141.061	宮城県宮城郡七ヶ浜町
	気仙大橋(*)	39.005	141.621		22	宮下橋(*)	38.177	140.955	宮城県名取市
11	小泉大橋(*)	38.770	141.508	宮城県気仙沼市	23	高浦橋	37.914	140.918	宮城県亶理郡山元町
	外尾川橋	38.768	141.507		24	太田川橋	37.643	140.984	福島県南相馬市
	二十一浜橋	38.759	141.520		25	鮫川大橋	36.912	140.801	福島県いわき市
12	歌津大橋(*)	38.716	141.523	宮城県本吉郡南三陸町					

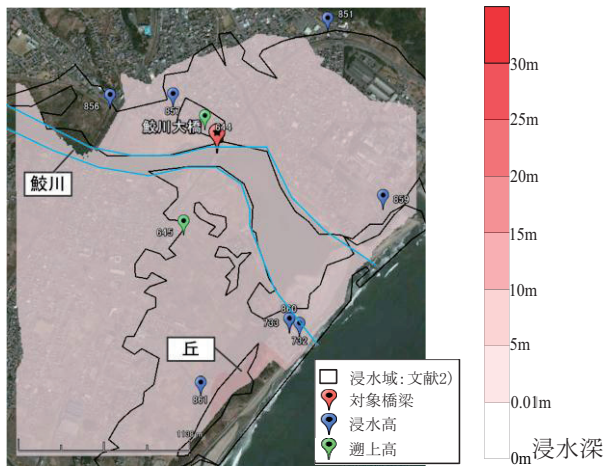


図2 対象橋梁及びその周辺地域の津波浸水域(Group25)

用いて、当該道路構造物に対する津波作用とする必要がある。しかし、上述した道路及び橋梁の被災地点における浸水深を精度良く求めるためには高精度な標高データが必要となる。標高データとしては、文献4)によるDEM(Digital Elevation Model)のデータが一例として挙げられるが、それらの情報を道路及び橋梁の地点での標高として使用するほどの精度が確保できなかったため、浸水深を津波作用とする分析は今後の課題とする。また本研究では、先述したように浸水域内に限定した道路及び橋梁の被害に焦点を当てているため、当該道路及び橋梁における標高が津波来襲時の天文潮位に対して極端に高くなることは考えにくいため、当該道路及び橋梁における浸水高を用いる。

落橋を含む被災橋梁に対しては浸水高を次章で示す数値シミュレーションを用いて求める。それ以外の無被害橋梁($N_i^b-N_d^b$)での浸水高は東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ³⁾の2012年4月25日時点での実測値を基に測量誤差が小さいとされる信頼度B以上の計2738データを抽出して、各橋梁地点に最近傍の浸水高の実測値を付与した。ただし、各橋梁と最近傍の実測地点との距離が250m以上離れている場合には、浸水高が周辺地形による影響を受けて変動することを考慮し、浸水高データの付与を行わず分析データから除外した。これにより分析対象となる橋梁は、数値計算の結果を基にした33橋梁

と観測記録を基にした91橋梁の計124を用いて行う。

3. 被災橋梁地点での浸水高の推定

被災橋梁の地点での浸水高の推定は、東北大学により開発された津波プログラム TUNAMI-CODE (Tohoku University's Numerical Model for Investigation of Tsunami)⁵⁾を用いて津波の伝播及び浸水に関する数値シミュレーションにより計算する。支配方程式は浅水理論に基づき以下の式(2a)-(2c)のようになっており、格子配置はStaggered格子を採用し leap-frog 差分法により計算を実施した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (2c)$$

式(2a)-(2c)において η は海面を基準とした津波波高であり、 M と N はそれぞれ x 、 y 方向の流量フラックス、 D は全水深であり、 g は重力加速度、 ρ は海水の単位体積質量である。また、 n はManningの粗度係数であり、本研究では全計算で一様に0.025としている。数値計算は落橋を含む全33の被災橋梁を25の計算Groupに分割して行い、それら毎に計算領域を、WGS-1984-UTM-54-N座標系により広域のRegion1から狭域のRegion6まで6段階に設定し計算した。各計算Groupの格子数と格子幅を表2に示す。標高及び水深データの作成は、陸域では広域4領域(Region1~Region4)ではGEBCO30⁶⁾のデータを、狭域2領域(Region5,Region6)では国土地理院提供の数値標高モデル(10m間隔)⁴⁾をそれぞれ利用し、海域ではすべての領域で日本水路協会の海底地形デジタルデータM7000シリー

表2 各計算 Group における計算領域の格子数と格子幅

Region	Group No.	X-direction	Y-direction	Grid Size[m]
1	All Groups	480	720	1350
2	All Groups	481	721	450
3	All Groups	481	721	150
4	8,10	541	901	50
	Others	481	721	
5	8	721	481	16.67(50/3)
	10,15,17, 18,19,20	481	721	
	12	601	601	
	Others	721	721	
6	8	931	931	6.67(50/9)
	12	601	601	
	14,16	621	621	
	15	481	721	
	17	721	481	
	18,19,20	931	481	
	Others	721	721	

ズ(1m 間隔等高線)⁷⁾を用いて、各領域でこれらのデータをメッシュサイズに補間した。波源モデルとしては東北大学モデル(version1.1)⁸⁾を利用し初期水位データを作成した。初期水位は Okada(1985)⁹⁾の方法により静的に与えている。計算時間は総計算ステップを 48000、各ステップの刻み幅を 0.15 秒とし、120 分となるように設定した。図 2 には計算 Group25(鮫川大橋周辺)での浸水域の計算結果と国土地理院による浸水域²⁾を示す。また、図 2 には 3 つの被災橋梁と浸水高の実測地点も合わせて示す。

次に実測値と計算値との比較を行った結果、数値計算による浸水高の実測値に対する倍率は 0.51 から 2.85 であった。また、津波シミュレーションの妥当性を式(3a)-(3b)によって求められる K と κ を指標として評価した^{10),11)}。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i \quad (3a)$$

$$\log \kappa = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - (\log K)^2} \quad (3b)$$

ここで、 K_i はある観測点での浸水高の実測値を数値計算により得られたその観測点での浸水高で除した値であり、 i は観測点の番号、 n は観測点の総数である。この指標を用いて、今回の数値計算モデルを各計算領域において橋梁の近傍に存在する 232 点での浸水高の実測値と比較した。その結果、観測点における平均的な補正倍率を表す K は 0.898、各観測点での K_i の平均値 K に対する変動の割合を表す κ は 1.203 となった。これらは共に 1 に近い値であるほど精度が良いとされ、相田¹²⁾は K が 0.92、 κ が 1.2 のモデルが精度良く実際の津波の伝播及び浸水を再現したモデルとしている。これらの比較検討に基づき、各橋梁地点での数値計算の結果がそれぞれの地点での浸水高として妥当であると考え、以降の分析にこれらの値を用いる。

4. 被害率の算出と被害率曲線の構築

浸水高 2.0m 毎の被害率 R_N^b と浸水高の関係を図 3 に示す。浸水高 4.0m までは被害率 R_N^b は 0 を示しているが、浸水高 4.0m~6.0m の領域で被害率 R_N^b は増加して 0.05、浸水高 6.0m~12.0m の領域で被害率 R_N^b は 0.10~0.20、浸水高 14.0m~18.0m で被害率 R_N^b は 0.29 と大きな値を示し、

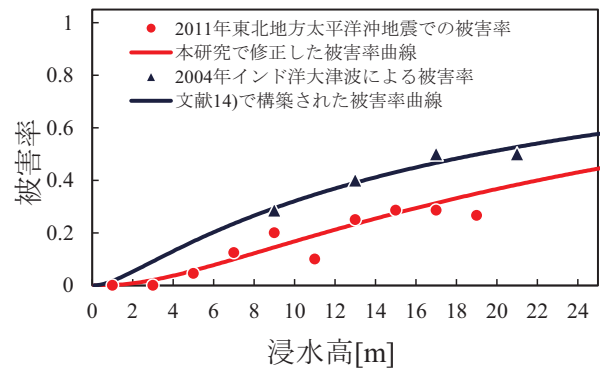


図3 落橋に関する被害率曲線

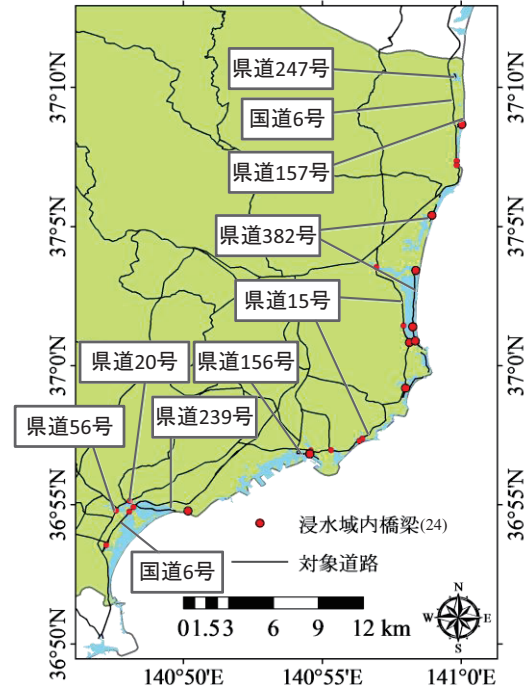


図4 いわき市の浸水域内における道路網

浸水高 18.0m 以上では被害率 R_N^b は 0.27 を示した。被害率 R_N^b が最大値 0.29 を示した地点は、川原川橋、沼田跨線橋、気仙大橋、歌津大橋、横津橋及び新相川橋の周辺であった。

以上で求めた被害率 R_N^b を基に文献 13) で使用したデータの修正を行い、本研究で新たに被害率曲線の構築を行った。構築した被害率曲線及び Shoji and Moriyama¹⁴⁾ が構築した被害率曲線とそれらのデータを図 3 に併せて示す。文献 14) は 2004 年インド洋大津波のインドネシア・スマトラ島における桁橋の落橋被害データを基に分析を行っている。被害率曲線の構築に際しては、浸水高 z における被害率 $R(z)$ が標準正規分布の累積確率 $\Phi(z)$ を用いて、対数正規分布で次式のようにモデル化されると仮定した。

$$R(z) = \Phi\left(\frac{\ln z - \mu_Y}{\sigma_Y}\right) \quad (4)$$

ここで、 μ_Y と σ_Y は $\ln z$ の期待値と標準偏差である。回帰定数は対数確率紙を用いて最小二乗法による線形回帰直線によりそれぞれ算出した。浸水高の各区間における代表値は 0.0m~18.0m においては区間幅 2m 毎の中央値を使用しているが、18.0m 以上の区間では 19.0m とした。表 3 には、本研究で構築した被害率曲線と文献 14) により構築

表 3 被害率曲線の算定式に関する回帰定数

	傾き $1/\sigma_Y$	切片 $-\mu_Y/\sigma_Y$	決定係数 R^2	μ_Y	σ_Y	メジアン m_z	標準偏差 σ_z
本研究で構築した被害率曲線	0.7869	-2.8128	0.77	3.57	1.27	35.67	160.55
文献13)で構築した被害率曲線	0.8999	-3.036	0.75	3.37	1.11	29.18	84.48
文献14)構築された被害率曲線	0.7169	-2.112	0.94	2.95	1.39	19.03	81.38

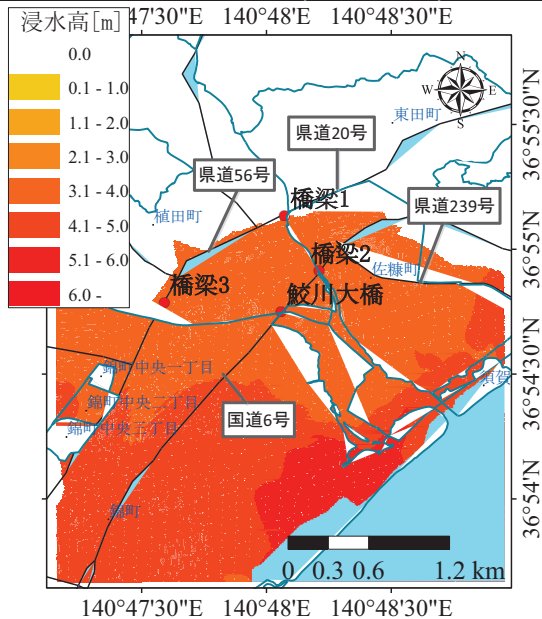


図 5 シミュレーションによる浸水高(鮫川大橋周辺)



図 6 鮫川大橋より植田町方向(2011 年 6 月 13 日撮影)

された被害率曲線の算定式に関する回帰定数を示す。

5. 津波ハザードにさらされる地域の道路網の津波被害推計への適用

このように構築した被害率曲線を今後津波ハザードに晒されると考えられる地域の防災対策に用いるために活用する。本研究では一例として福島県いわき市内の国道及び県道を対象とした場合の適用方法を示す。図 4 にいわき市内全域における国道及び主要地方道と浸水域内における一般県道を示す。また、この図にそれら道路上に存在する 24 の桁橋の位置を併せて示す。本研究では鮫川大橋周辺の対象橋梁に対して 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による浸水を想定し、被害率曲線を適用する。津波シミュレーションの結果を図 5 に示す。また、図 6 には鮫川大橋から植田町方向の様子を示す。各橋梁での浸水高は橋梁 1 と橋梁 2 で 3.4m、橋梁 3 で 3.8m、鮫川大橋で 3.7m と想定される。被害率曲線の結果を各橋梁に適用すると橋桁の落橋する確率はそれぞれ 0.032, 0.032, 0.039, 0.037 となる。橋梁被害が少なかったいわき市の上述の鮫川大橋周辺の地域では橋桁が落橋する確率は小

さいと推定される。このような検討を通じて地域に敷設された道路及び橋梁の被害率の想定から津波対策の優先順位づけ等の防災施策に活用することができる。

6. まとめ

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震津波において発生した道路桁橋の落橋被害に焦点を当てて橋梁の被害率曲線を構築した。このように構築された被害率曲線を津波ハザードに晒された道路及び橋梁の防災施策に活用する方法論を示し、その一例として福島県いわき市の道路網に被害率曲線の適用を行った。

謝辞

本研究で使用した数値計算につきましては東北大学により開発されたプログラムを利用させて頂きました。同大学の今村文彦先生及び越村俊一先生には貴重な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) 庄司学・中村友治・高橋和慎・櫻井俊彰：2011 年東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた道路構造物の被害，土木学会論文集 A1S, Vol.68, 2012，掲載決定。
- 2) 国土地理院：10 万分 1 浸水範囲概況図，<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003>，2011.09.06 参照
- 3) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：痕跡調査結果，<http://www.coastal.jp/tjt/>
- 4) 国土地理院 基盤地図情報数値標高モデル，<http://saigai.gsi.go.jp/fgd/download/download.html>，2011.9 参照。
- 5) Koshimura, S.(2009) : TUNAMI-CODE Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Tsunami, Disaster Control Research Center School of engineering, Tohoku University.
- 6) The General Bathymetry Chart of the Oceans (GEBCO)(2009), <http://www.gebco.net/>，参照 2011-12-21.
- 7) 日本水路協会：海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ
- 8) 今村文彦，越村俊一，村嶋陽一，秋田善弘，新谷勇樹(2011)：東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル(version1.1)，東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター，pp.1-6, 2011.
- 9) Okada, Y.: Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.75, pp.1135-1154, 1985.
- 10) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：確率論的津波ハザード解析の方法(案)，2009，http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/system/files/PTHA20111209_0.pdf
- 11) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：津波評価手法の高精度化研究，土木学会論文集 B, Vol.63, No.2, pp.168-177, 2007.
- 12) 相田勇：東海道沖におこった歴史津波の数値実験，地震研究所集報，Vol.56, pp.367-390, 1981.
- 13) 中村友治・庄司学・高橋和慎：東北地方太平洋沖地震津波の被災データに基づく道路桁橋の落橋被害に関する被害率曲線，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，2012，掲載決定。
- 14) Shoji, G. and Moriyama, T.: Evaluation of the Structural Fragility of a Bridge Structure Subjected to a Tsunami Wave Load, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.29, No.2, pp.73-81, 2007.