橋梁構造物に入射する津波の時系列波形と その類型化

中村 友治1・庄司 学2

¹学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:s1220899@u.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

本研究では、東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた桁橋構造の112橋梁を対象に津波シミュレーションを行い、これにより得られた浸水高の時系列波形の水面上昇率を基に類型化を行った.これにより全橋梁の74%が水面上昇率2.0 m/min未満の領域に存在した.また、各分析対象橋梁位置での水面上昇率と津波伝播の過程における海域及び陸域勾配との関係を分析した.水面上昇率が5.0 m/min以上の波が発生するには平均海域勾配がおよそ0.01(1/100) rad以上でなければならないことが示唆され、また平均陸域勾配がおよそ0.05(5/100) rad以上でなければならないことが示唆された.最後に津波前面形状と津波の時系列波形の関係を分析した.

Key Words : the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami, road infrastructure bridge, damage function

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 ($M_w = 9.0$)では、東日本沿岸の広域に及ぶ橋梁等構造物 が津波作用を受け、その多くが被災した.橋梁機能の損 失は道路ネットワークの寸断に直結し発災直後の救援・ 復旧活動に甚大な影響を及ぼす.そのため、例えば文献 ¹⁾においても指摘されているように、それらの物理的被 害を引き起こし得る津波の波形的な特徴を把握し、津波 作用と橋梁等構造物の損傷の関係を明らかにすることは 重要である.

東北地方の太平洋沖合で発生した津波が伝播しながら 東日本沿岸部に到達し、陸域を遡上する過程を明らかに することを目的として、数値解析や映像解析に基づく分 析がこれまで数多く行われている.沖合での津波の伝播 に関しては、河合ら²は全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHASで運用するGPS波浪計、沿岸波浪計及び潮位 計により観測された時系列水位データを解析し、最大水 位到達までの水位変化の特徴を分析している.このよう に得られた津波波高の実測データを基に、Fujii et al.³は津 波インバージョン解析により津波波源モデルを推定・提 案し、このモデルを用いた数値解析により得られる水位 波形と観測波形との比較を行った.さらに、今村ら⁴は 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループにより観測 された痕跡高さデータ⁵及び国土地理院で公開する津波 浸水域に整合する形で断層すべり量を修正し、自らの津 波波源モデル(東北大学モデル version1.2)を提案している.

沖合から沿岸までの津波の伝播過程に関しては、先述 した断層モデル等を初期条件とした津波シミュレーショ ンに基づく検証が行われており、岩手県北部沿岸⁶を始 めとして、宮城県の釜石湾⁷、牡鹿半島地域⁸及び仙台平 野の名取川河口地域⁹、福島県中部沿岸¹⁰及び茨城県沿 岸¹⁰を対象とした数値解析が多数行われている.

海岸線から陸域を遡上する津波を対象とした研究事例と しては、林・越村¹²は仙台平野を遡上する津波の空撮映 像を解析することで、遡上速度及び流速を推定し、それ らと数値計算結果を比較することで津波シミュレーショ ンの再現性を確認している.久木田・柴山¹³は、宮城県 気仙沼市に来襲した津波の映像を解析して水位変化及び 流速を推定し、同様に数値計算結果との比較を行ってい る.さらに、茅根ら¹⁴は宮城県の北上川等の河川を津波 が遡上した際の河川水位データ及び河川堤防に残された 津波痕跡高情報を分析し、河床勾配と遡上距離の関係を 明らかにするなど、津波の伝播・遡上に関わる地形の影 響について考察している.また、佐々木ら¹⁵は岩手県及 び宮城県沿岸を遡上する津波の映像から流速を推定し、



橋梁に及ぼす津波の作用力を分析している.

以上を踏まえ本研究では、東北地方太平洋沖地震にお いて津波作用を受けた桁橋構造の橋梁を対象に津波シミ ュレーションを行い、浸水高の時系列波形の類型化を行 う.また、浸水高の時系列波形の特徴と津波伝播におけ る海域及び陸域勾配との関係を分析し、津波前面形状が 津波の時系列波形に与える影響を分析した.

2. 分析対象データと分析方法

(1) 分析対象データ

本研究では、庄司ら¹⁰で示された、東北地方太平洋沖 地震津波で津波作用を受けたとされる橋梁等構造物から 144の桁橋に焦点を当てる.これらの対象橋梁に入射す る津波の時系列波形は次節で示す津波シミュレーション によって計算し、計算精度が確保された112橋梁におい て分析を行う.対象とした112橋梁と計算及び観測され た浸水高の空間分布を図-1に示す.

(2) 分析対象データ

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)19)を用いた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浸水高を計算する.支配方程式は 浅水理論による以下の式(1)に基づき,格子配列として はStaggered格子を採用しleap-frog差分法で計算を実施した.



赤線:GPS波浪計,青線:計算値 図-2 GPS波浪計及び計算による波高の比較

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$
(1a)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right)$$
$$= -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D}\right)$$
$$= -gD\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}}N\sqrt{M^2 + N^2} \quad (1c)$$

ここで η は津波波高, $M \ge N$ はx,y方向の流量フラックス, $D(= \eta + h)$ は全水深, hは静水深である. なお, Manning



(b) 陸域の標高と橋梁の位置図4 対象橋梁から水深50m地点までの標高

の粗度係数は全計算で一様に0.025とした.数値計算は 112の対象橋梁を47の計算Groupに分割し,それぞれにお いて計算領域を広域(Region1)から狭域(Region6)まで6段階 に設定した.標高及び水深データについては,陸域の広 域4領域ではGEBCO30(General Bathymetry Chart of the Oceans 30s Gridded bathymetry data)のデータ,陸域の狭域2領域で は国土地理院提供の数値標高モデル(10mDEM)である. 海域の広域1領域ではGEBCO30のデータ,海域の狭域5 領域では日本水路協会の海底地形デジタルデータM7000 シリーズを利用した.各領域でこれらのデータをKriging 法で補間した.波源モデルはFujii *et al.*³⁾によるものを利用 し,初期水位はOkada²⁰の方法により静的に与える.座 標系はWGS-1984-UTM-54-Nを用いた.計算時間は刻み 幅0.10秒で総計算時間は120分から240分とした. このように計算された津波シミュレーションの妥当性 の評価を行う.まず,6基のGPS波浪計による津波の観 測値と津波シミュレーションによる計算による波高の比 較を行い,図-2に示す.また,比較を行ったGPS波浪計 の位置は図-1に示す.なお,図-2に示す時系列波形につ いては海岸線から沖合にかけての領域に入射する波のリ ファレンスを示している.

次に図-3には浸水高の実測地点における数値計算の結果と観測値との関係を示す.津波シミュレーションの妥当性評価については観測点iに対して浸水高の観測値 R_i の計算値 H_i に対する比を K_i と定義した上で,以下の式(2)によって得られる対数平均Kと対数標準偏差 κ を指標として評価できる²¹).



図-5 水面上昇率毎の橋梁数

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \log K_i$$
 (2a)

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

ここでnは観測点の総数である.これら指標を用いて, 各計算領域において浸水高の計算値と橋梁の近傍に存在 する1,201点での浸水高の観測値⁵⁾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0.896,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 1.215となった.これらは共に1に近いほど精度が良いと され,相田²²はKが0.92, κが1.2となる津波波源モデルが 精度良く実際の津波の伝播及び浸水を再現するモデルと している.こ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津波シミュレーション による計算値を用いる.

(3) 海域及び陸域の標高勾配の算出

海域及び陸域の標高勾配(以下,海域勾配及び陸域勾 配)については,陸域では国土地理院提供の数値標高モ デル(5mDEM),海域では津波シミュレーションで使用し たRegion3~4の地形データをそれぞれ使用し,各グリッ ドにおいてNS方向とEW方向の標高勾配の二乗和平方根 で最大勾配を定義した.なお,陸域において橋梁周辺の 5mDEMが存在しない9橋梁においては震災前の10mDEM を使用した.河川上に存在する対象橋梁では河川に沿っ て対象橋梁から海岸線までの最大勾配の平均値,跨線橋 においては各橋梁から最近傍の海岸線までの最大勾配の 平均値をそれぞれ平均陸域勾配と定義し,これを海岸線 の極近傍に位置する5橋梁を除いた計107橋梁で算出した. なお,海岸線は標高0mと定義している.対象橋梁と最 近傍の海岸線から海底勾配の影響を受けて津波が非線形



図-6 水面上昇率と最大波高の関係

化すると考えられるおよそ水深50m²³となる海域までの 最大勾配の平均値を平均海域勾配と定義し,全112橋梁 の対象橋梁に関わる領域で算出した.図-4には次章で取 り上げる代表的な橋梁位置から水深50mとなる地点まで の標高の断面図を示す.

3. 時系列波形の分析と類型化

(1) 時系列波形の類型化

各橋梁地点の波形の特徴に基づき,類型化する際に使用するパラメータ Δt_{st} , h_{max} を定義する.ここで Δt_{st} は最大波の立ち上がり開始時刻から最大浸水高を記録した時刻までの時間である.また, h_{max} は最大浸水高から初期の河川水面標高を差し引いたものであり,以降で最大波高と定義する.このように定義した h_{max} を Δt_{st} で除すことにより水面上昇率 $h_{max}/\Delta t_{st}$ と定義した上で112橋梁での時系列波形の類型化を行った.水面上昇率のヒストグラムを図-5に示す.

水面上昇率2.0 m/min未満に83橋梁, 2.0 m/min以上5.0 m/min未満に18橋梁, 5.0 m/min以上10.0 m/min未満に6橋梁, 10.0 m/min以上15.0 m/min未満に2橋梁, 15.0 m/min以上に3 橋梁となった. これより, 74%の橋梁が2.0 m/min未満の 領域に存在した. 図-6に水面上昇率と最大波高の関係を 示す. また, 図-7には代表的な橋梁位置における時系列 波形を示す.

(2) 平均海域勾配及び平均陸域勾配と水面上昇率の 関係

平均海域勾配並びに平均陸域勾配と水面上昇率との関係を図-8に示す.図-8(a)に示すように、平均海域勾配は0.0015 radから0.0681 radの間の値を示しており、平均海域勾配が大きくなるに従い水面上昇率も大きな値を示す傾向となる.2.0 m/min未満の水面上昇率を示す橋梁の平均海域勾配は0.0015 radから0.0681 radの間と最も広い区間を



- 5 -



図-8 水面上昇率と標高勾配の関係

示し、同様に2.0 m/min以上5.0 m/min未満の水面上昇率を 示す橋梁でも平均海域勾配は0.0016 radから0.0289 radの間 の値を示した.水面上昇率が5.0m/min以上10.0m/min未満 に高まると平均海域勾配が0.0095 radから0.0324 radの間と 比較的狭い区間に集中し、その値も0.0090 rad以上と勾配 が高くなる. 10.0 m/min以上15.0 m/min未満の水面上昇率 を示す2橋梁でも同様の傾向を示している. さらに15.0 m/min以上の極めて高い水面上昇率を示す橋梁では、平 均海域勾配が0.0309 radから0.0379 radの間の極めて狭い区 間に集中し、かつ0.0300 rad以上の極めて高い平均海域勾 配を示している. これらの結果から水面上昇率が5.0 m/min以上となる津波の発生する条件として、平均海域 勾配がおよそ0.01(1/100) rad以上の必要があり、さらに水 面上昇率が15.0 m/min以上の波が発生するには、平均海 域勾配がおよそ0.03(3/100) rad以上でなければならないこ とが示唆される.一方,水面上昇率が5.0 m/min未満の津 波については、平均海域勾配がおよそ0.01 radから0.05 rad 以上の間と極めて広い区間に分布していることも大きな 特徴である. ただし、以上で論じた水面上昇率の高低は 津波波面の形状に大きく起因していると考えられる. さ らに、橋梁の位置近傍の地形の起伏という波の入射にと っての境界条件によっても大きく変化することが考えら れるため、以上の2点について今後詳細に検討していく

必要がある.

一方,図-8(b)に示すように、平均陸域勾配は0.0028 rad から0.1352 radの間の値を示しており、平均海域勾配との 関係と同様に平均陸域勾配が大きくなるに従い水面上昇 率も大きな値を示す傾向となる. 2.0 m/min未満の水面上 昇率を示す橋梁の平均陸域勾配は0.0028 radから0.1123 rad の間と広い区間を示し、同様に2.0 m/min以上5.0 m/min未 満の水面上昇率を示す橋梁でも平均海域勾配は0.0048 rad から0.1352 radの間の値を示した. 水面上昇率が5.0 m/min 以上10.0 m/min未満に高まると平均陸域勾配が0.0488 rad から0.1026 radの間と狭い区間に集中し、その値もおよそ 0.0500 rad以上と勾配が極めて高くなる. 10 m/min以上の 水面上昇率を示す橋梁でもこの傾向は同様で、平均陸域 勾配が0.0619 radから0.0917 radの間と極めて狭い区間に集 中している. これらの結果から水面上昇率が5.0 m/min以 上となる津波の発生する条件として, 平均陸域勾配がお よそ0.05(5/100) rad以上でなければならないことが示唆さ れる.一方,平均海域勾配の場合と同様に水面上昇率が 5.0 m/min未満の津波については、平均陸域勾配が広い区 間に分布している.

先述したように、水面上昇率の高低は津波波面の形状 に大きく起因しているとともに、橋梁の位置近傍の地形 の起伏という波の入射にとっての境界条件にも極めて影 響を受けやすいと推察される.そのため、今後の検討課 題として入射波形の空間相関を分析するとともに、陸域 における土地利用上の粗度の空間的分布を考慮し、さら には橋梁の位置近傍における標高モデルの再現精度や分 解能を向上していく予定である.

(4) 津波前面形状との関係

津波前面形状と水面上昇率との関係を代表的な橋梁で ある気仙大橋, 韮森橋, 片岸大橋, 米田橋, ハイペ沢橋 において分析する. それぞれの橋梁位置に入射する津波 の断面形状を図-9に示す.水面上昇率の高いハイペ沢橋 及び米田橋では津波前面が段波の襲来によって最大浸水 高を示しており,水面上昇率の低い気仙大橋及び片岸大 橋では津波前面形状がゆるやかに上昇している.また, 韮森橋においては段波形状の津波が入射しているが、最 大浸水高を記録する62分前後の水面上昇の時点ではすで に段波は崩れてゆるやかに水面上昇している. すなわち, 高い水面上昇率を示す場合には段波が襲来している可能 性が高いと考えられるが、段波が襲来していても韮森橋 のように段波の規模が小さい場合には必ずしも水面上昇 率が高くなるとは限らない、 今後、 残りの橋梁において も津波前面形状を分析することによりより詳細な分析を 行う.



図-9 橋梁に入射する津波の断面図

4. 結論

東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた桁橋 構造の112橋梁を対象に津波シミュレーションを行い, 浸水高の時系列波形の類型化を行うとともに,津波伝播 における海域勾配及び陸域勾配との関係を分析した.以 下に得られた知見を示す.

(1)水面上昇率を基に浸水高の時系列波形の類型化を 行った.水面上昇率2.0 m/min未満に83橋梁,2.0 m/min以 上5.0 m/min未満に18橋梁,5.0 m/min以上10.0 m/min未満に 6橋梁,10.0 m/min以上15.0 m/min未満に2橋梁,15.0 m/min 以上に3橋梁となった.これより,74%の橋梁が2.0 m/min 未満の領域に存在した.

(2)平均海域勾配と水面上昇率の関係については、水 面上昇率が5.0 m/min以上となる津波が発生する条件とし て、平均海域勾配がおよそ0.01(1/100) rad以上の必要があ り、さらに水面上昇率が15.0 m/min以上の波が発生する には平均海域勾配がおよそ0.03(3/100) rad以上でなければ ならないことが示唆された.一方、水面上昇率が5.0 m/min未満の津波については、平均海域勾配がおよそ 0.01 radから0.05 rad以上の間と極めて広い区間に分布した. 平均陸域勾配と水面上昇率の関係については、水面上昇 率が5.0 m/min以上となる津波が発生する条件として、平 均陸域勾配がおよそ0.05(5/100) rad以上でなければならな いことが示唆された.また、平均海域勾配の場合と同様 に水面上昇率が5.0 m/min未満の津波については、平均陸 域勾配が広い区間に分布した.

謝辞:本研究で使用した数値計算については東北大学に 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 を多々頂きました.同数値計算の実行に際して筑波大学 の石川尚樹氏及び元筑波大学の高橋宏允氏にご協力頂き ました.また,防衛大学校の鴫原良典先生には有用な助 言を多々頂きました.ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 例えば、片岡正次郎:構造物に対する津波作用の研究と今後の展望東日本大震災報告会~震災から2年を経て~、国土交通省国土技術総合研究所、 http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/houkoku 3/happyou/130319-04.pdf
- 河合弘泰,佐藤真,川口浩二,関克己:GPS 波浪計 で捉えた平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波,土木 学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_1291-I_1295, 2011.
- Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T.: Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp.815-820, 2011.

- 今村文彦,越村俊一,馬渕幸雄,大家隆行,岡田清 宏: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 (version1.2),東 北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター, http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/to hoku_2011/model/dcrc_ver1.2.pdf
- 5) 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 20121229 版, http://www.coastal.jp/ttjt/
- 6) 犬飼直之, 永沢薫:数値計算による東北地方太平洋 沖地震津波による岩手県北部での構造物被災状況の 把握, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_306-I_310, 2012.
- 米山望,森信人,三輪真揮:2011 年東北地方太平洋 沖地震津波の釜石湾における挙動の数値解析,土木 学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_161-I 165, 2012.
- 齋藤正文,高橋智幸,岩間賢一,岩嵜 隼人:東北地 方太平洋沖地震津波による牡鹿半島地方港湾の被害, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_266-I_270, 2012.
- 9) 村嶋陽一,越村俊一,岡秀行,村田泰洋,藤間功司, 杉野英治,岩渕洋子:非線形分散波理論モデルによ る東北地方太平洋沖地震津波のソリトン分裂の再現, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_206-I_210, 2012.
- 10) 佐藤愼司, Yeh, H., 磯部雅彦, 水橋光希, 相澤広志, 芦野英明:福島県中部沿岸における 2011 年東北地方 太平洋沖地震津波の挙動, 土木学会論文集 B2(海岸工 学), Vol.68, No.2, pp.I_346-I_350, 2012.
- 信岡尚道, 鵜崎賢一, 伊藤広樹, 坪井拓夢: 2011 年 東北地方太平洋沖地震津波の数値再現に基づく茨城 県沿岸の津波ハザード, 土木学会論文集 B2(海岸工 学), Vol.68, No.2, pp.I_296-I_300, 2012.
- 12) 林里美,越村俊一:映像解析による 2011 年東北地方 太平洋沖地震津波の流速測定,土木学会論文集 B2(海 岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_366-I_370, 2012.
- 13) 久木田駿一,柴山知也:東北地方太平洋沖地震津波 における津波襲来時の映像の解析と津波の数値計算, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I_49-I_54, 2012.
- 14) 茅根康佑,田中仁,Adityawan,M.B.: 津波の河川遡 上に対する河床勾配の影響に関する検討,土木学会 論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_176-I_180, 2012.
- 15) 佐々木達生,幸左賢二,鄭玉龍:桁抵抗力津波作用 力比に基づく橋梁の被害分析,土木学会構造工学論 文集, Vol.59A, pp.417-427, 2013.
- 16) 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 A1 (構造・地震工 学), Vol.68, No.4, pp.I_1300-I_1306, 2012.
- 17) 全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS:東北地方太平洋沖地震による津波観測データ, http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub300.html
- 国土地理院:10 万分 1 浸水範囲概況図, http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003
- Disaster Control Research Center (DCRC), Tohoku University: TUNAMI-CODE Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of tsunami, 2009.

- 20) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, pp.1135-1154, 1985.
- 21) 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.
- 22) 相田勇:東海道沖におこった歴史津波の数値実験, 地震研究所彙報, Vol.56, pp.367-390.
- 23) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室,国土交通省 国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室:津 波浸水想定の設定の手引き Ver.2.00, 2012.

CLARIFICATION OF TSUNAMI WAVEFORMS ACTING ON A BRIDGE STRUCTURE SUBJECTED TO THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI

Tomoharu NAKAMURA and Gaku SHOJI

We clarify the features of tsunami waveforms acting on a bridge subjected to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami. We classify the waveforms into 5 types from view of points of the rate of wave surface increase and inclination of waveformt. For 74% of bridges, the rates of wave surface increase and the slope angles of sea and land areas around a bridge are revealed. The tsunami waveforms with the rate of wave surface increase of more than 5.0 m/min require the slope angles of more than 0.01 rad of sea areas and more than 0.05 rad of land areas. Finally, we clarify the dependency of the shape of waveform on the rate of wave surface.