

論文 コンクリート桁に作用する波形状に関する検討

佐々木 達生*1・幸左 賢二*2・佐藤 崇*3

要旨: 東日本大震災では、津波が襲来する模様を撮影した多数の空撮画像が撮影された。これらの中には、沖合から陸域に向かって伝搬する津波の形状の変化や、陸域を遡上する津波の形状がつぶさに観察できる。そこで、長時間撮影された空撮画像が存在する 2 地区を対象に画像解析を実施し、陸域に襲来する津波の形状を分析した。陸域に存在する橋梁には、遡上する津波の先端にみられる孤立波タイプとその後に続く準定常的な持続流である定常流タイプの 2 種類の形状が作用することが想定され、特に橋梁の海側に防潮堤等の防護施設が存在する場合には津波先端の水頭差は小さくなることを明らかにした。

キーワード: 津波, 橋梁, 津波形状, 津波作用力

1. はじめに

東日本大震災では、津波が襲来する模様を撮影した画像記録が多数存在する。中でも空撮画像は、沖合から陸域に向かって伝搬する津波の形状や、陸域を遡上する津波の形状が観察できるものが少なくない。

空撮画像を分析した既往研究は、例えば林ら¹⁾が NHK の空撮画像を用いて、閑上地区を遡上する津波の流速に着目して障害物の有無による減衰効果等の性質を明らかにしている。太田ら²⁾も同様に NHK 空撮画像を用い、名取川を遡上する津波と名取川左岸部の堤内地を遡上する津波特性の違いを伝搬速度を用いて説明している。このように、空撮画像から得られる実現象の情報は、津波の作用の下で、インフラ施設に発生する被害の状況を解明していく上では非常に貴重な資料であるといえる。

ところで、2013 年 9 月に国土交通省から防波堤の耐津波設計ガイドライン³⁾が公開され、防波堤を対象とする要求性能を含めた基本的な設計思想が示された。同資料は津波の形状に基づく防波堤に作用する波力算定式が示され、設計対象地点の特性に応じた波力算定式の使い分けの指標となっている。一方、東日本大震災で多数の上部構造流出被害を受けた橋梁では、現行の設計基準⁴⁾で津波の影響を踏まえて橋梁計画を行うことが追記されたものの、津波の影響を被る既設橋梁等の具体的な設計方法は現在まで確立していない。津波の形状に対応した波力は、既往研究^{5)・6)}の適用が考えられるものの、橋梁に作用する波形状が明らかでは無く、橋梁設計時に津波の形状を如何に評価するかが課題と考えられる。

本研究では、橋梁に作用する津波の形状を明らかにすることを目的として、東日本大震災の津波の模様を撮影した空撮画像に基づいて沖から海岸線に伝搬する津波と陸域を遡上する津波の波形状を分析する。その上で、橋

梁の耐津波設計で考慮すべき津波形状の提案を行う。

2. 検討の対象とする地区

著者らがこれまでに収集した 100 強の画像資料のうち、比較的長時間に渡って撮影された空撮映像は図-1 に示す[a]久慈市、[b]陸前高田市の 2 つのエリアである。

本稿では津波が沖から伝搬して陸域を遡上するまでの画像記録のある[a]久慈市と、陸域の遡上状況が詳細に確認できる[b]陸前高田市を取り上げ、それぞれの地区に襲来する津波の特性を分析することで、沖から海岸線までの伝搬過程における津波形状の変化と陸上を遡上する際の津波形状を明らかにするとともに、[b]陸前高田市では海底地形勾配と水面勾配の関係に着目した分析を行う。

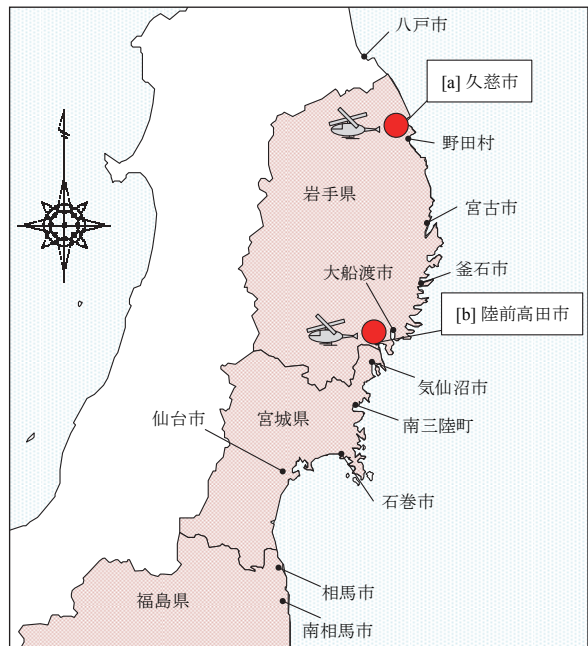


図-1 検討対象とする地区

*1 大日本コンサルタント(株) 技術統括部 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 Ph.D. (正会員)

*3 (株)長大 福岡構造技術部(正会員)

3. 久慈港に襲来する津波の形状

3.1 画像解析に用いる画像の諸元

図-2 に示すのは、久慈市の浸水範囲に加えて画像解析に用いた空撮画像の範囲と空撮ヘリの飛行経路である。

空撮ヘリは陸上自衛隊が保有するもので、空撮画像も陸上自衛隊が撮影している。2011年3月11日の15:17に撮影を開始しており、図中[a]に示す撮影範囲を津波の進行とともに陸に向かって移動しながら撮影している。

3.2 湾内を進行する津波形状の時系列変化

まず、前述の空撮画像から代表的な画像を用いて、久慈湾内を進行する津波形状の時系列変化を説明する。

(1) 15:19:03のキャプチャー画像

湾口に進入した津波が波の形状を呈するのは、撮影開始からおよそ36[sec]経過した15:17:36の時点であるが、写真-1に示すのは、さらに1分37秒が経過した15:19:03の時点の画像である。この間に津波の先端は約2[km]陸向きに進行するとともに波高が増幅し、同写真の[2]に確認できるように巻き波型砕波となる。一方、同写真の[1]と[3]の範囲は巻き波型砕波から砕け寄せ型砕波に変化しており、先端の変化の過程を孤立波から巻き波型砕波、その後に砕け寄せると仮定すれば、[2]の範囲は[1]と[3]の範囲に比して若干遅れる。この遅れは、[2]の範囲が[1]と[3]に比して水深が深いために生じたと考えられる。

また、津波の先端が進行した速度を波速と定義すれば、この距離と時間の関係から波速は16[m/sec]と求められ、さらに1分30秒後には先端部は海岸線に向かって約1[km]進行することから、波速は11[m/sec]に減少する。

このことから湾内に進行した津波は、津波の進行とともに水深が浅くなることで波速が減少して砕波限界を超えて砕波したと考えられる。なお、この先端部は図-2の[b]の防波堤の位置を超えると再度孤立波状の形状を形成するが、その後巻き波型砕波から砕け寄せ型砕波に変化し、砕け寄せ型砕波状となって海岸線に襲来する。

(2) 久慈港に進入する津波形状

前述の久慈湾を進行する津波形状の時系列変化の様態を整理すると、概ね図-3並びに図-4に示すようである。まず陸上部を遡上する津波の伝搬過程について、図-3に示すA-A'断面を代表として説明する。

- 1) 湾内に進入を開始すると、津波の先端部は徐々に明確な波の様相を呈し、施工中のケーソン高さに対比して推定すれば5[m]程度の水頭差を有する孤立波状の波に変化する。なお、先端の後方400[m]にも視認可能な波を有する(図-4(a))。
- 2) 津波が陸に向けて進行するにつれて水深が浅くなるため、浅水変形により波高が発達して巻き波型へと変化し、さらに砕け寄せ型となって砕波する。砕け寄せた津波の先端の水頭差は低下する。突堤(防波

堤)を超える際には越流波に変化した後、再度孤立波が形成されるものの、巻き波型砕波、砕け寄せ型砕波へと変化しながら海岸線に向けて進行し、突堤の高さに対比して推定した波高は海岸線位置で概ね2[m]程度となる(図-4(b))。

- 3) 陸上遡上時には海岸線の防潮堤を超えて越流波に変化し、その先端部は砕け寄せ型砕波状となる。このため、遡上津波の先端部は白波だっていることに加えて岸壁に衝突して跳ね上がり等が確認されるもの

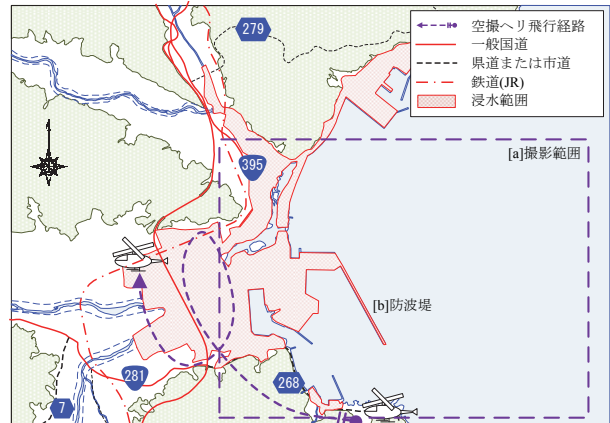


図-2 久慈市の浸水範囲と空撮範囲



写真-1 湾口付近の砕波(15:19:03)

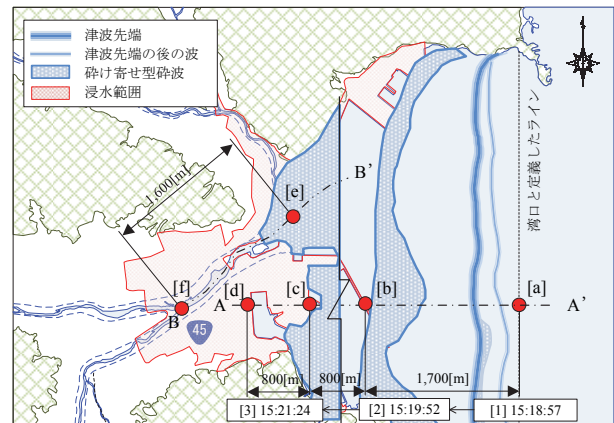


図-3 湾内を進行する津波の時系列変化(平面図)

の、岸壁上の照明柱や電柱等の高さに対比した推定した波高は概ね2[m]程度と推定される(図-4(c))。続いて図-3のB-B'で定義する久慈川の河川法線方向の縦断線に沿った津波形状を説明する。

図-5に示すのは、図-3に示すB-B'断面の[c]から[f]の範囲の津波の遡上状況を模式図化した図である。

沖合から進行してきた津波の先端部は、海岸線に到達する前に巻き波型砕波となり、直後に砕け寄せる。この砕け寄せた津波の先端は、久慈川前面の海側にはA-A'断面のように防波堤や防潮堤がないため、砕け寄せた状態のまま河川に進入する。河川に侵入した津波の先端部は概ね2[m]程度の水頭差を有したまま砕波状となって河川内を遡上して、図中に示す海岸線から900[m]上流の市道橋や、さらに700[m]上流の図中[f]の一般国道45号の橋梁に到達するが、これらのPC橋は十分な桁下高を有するため、2[m]程度の波高を有する砕波段波状の先端部は橋桁には直接作用せず、桁下を通過するのみである。その後、水位は徐々に上昇し、これらのPC橋には準定常的な流れによる水平作用力が作用したと推測される。

以上より、久慈港に襲来する津波の例をとれば、沖合で段波状であっても防波堤の位置で砕け寄せ型に変化することや防潮堤の位置で砕けた後に越流するなど、海岸線に到達して陸上を遡上する際には明確な波高はなく徐々に水位が上昇し、防波堤や防潮堤が無い場合も砕け寄せ型砕波状で波高は低い。

4. 陸前高田に襲来する津波の形状

本章は前章と同様に空撮画像が存在する陸前高田地区を対象に、陸域を遡上する津波と河川を遡上する津波のそれぞれの形状を説明する。

4.1 陸上を遡上する津波

図-6は防潮堤を有する海岸線から陸側の津波の遡上状況について、気仙川の東北東約2.5[km]に位置するPC桁である沼田跨線橋から海岸線までの断面図である。

同図は、陸上へ遡上を開始した15:25分頃の空撮画像に基づき作成している。津波は海岸線の防潮堤の天端高を超えて越流する。越流した津波は周囲の家屋や立木を巻き込みながら防潮堤より235[m]陸側に位置する沼田跨線橋に向かって遡上するとともに水位が上昇する。ここで、陸上を遡上する津波の漂流物(倒木)の移動速度を計測すると7[m/sec]と求められることから、沼田跨線橋に作用する津波作用力は徐々に水位を増す定常流タイプの流れが7[m/sec]の流速で作用する。

4.2 気仙川を遡上する津波

次に河川を遡上する津波に着目する。図-7は、画像資料に基づいて推定した気仙川を遡上する津波の形状を時系列で示している。津波の先端部は高さ2[m]程度の段波

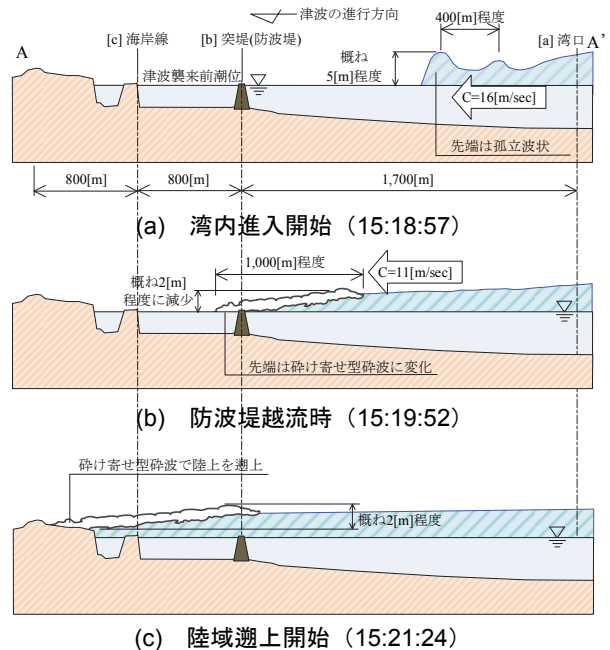


図-4 湾内を進行する津波形状の変化(A-A'断面)

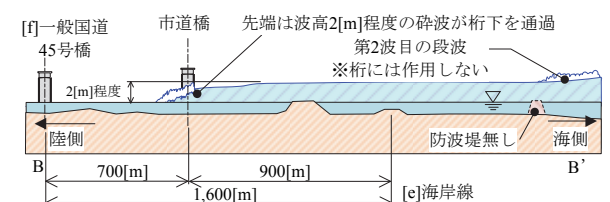


図-5 久慈川を遡上する津波形状(B-B'断面)

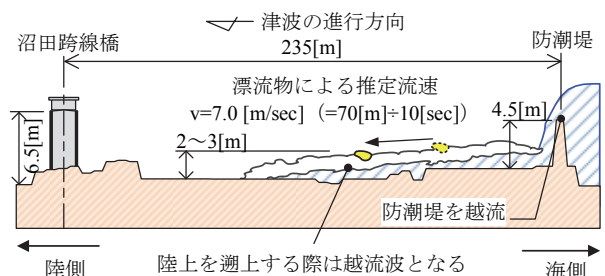


図-6 陸上を遡上する津波

状となっている。波が上流側へ遡上しても先端部の形状に大きな変化は無く、概ね段波の形状を呈したまま5~6[m/sec]の速度で河川内を遡上する。姉齒橋を通り抜けてから、その遡上速度は河道地形の影響を受けて7~8[m/sec]まで上昇するものの、この先端部は桁には直接作用せず、その後続く準定常的な流れが桁に作用する。この流れは、姉齒橋付近の漂流物の移動速度から、概ね5.5[m/sec]の流速であったと推測される。さらに、準定常的な流れの水面勾配は、 $i=1/85$ (0.7°)と非常に緩い勾配であり、河口から700[m]上流の気仙大橋や、1350[m]上流の姉齒橋には5[m/sec]程度の流速を持つ定常流状の流れが作用する。これらは鋼桁に作用する津波の形状であるが、前述のPC桁に作用する津波形状に違いは無い。

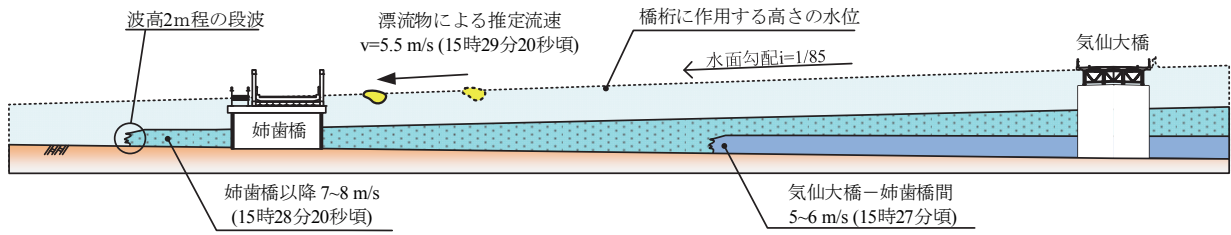


図-7 気仙川を遡上する津波の形状の変化状況

4.3 海底勾配と水面勾配

前節まで、遡上津波の特性（形状、流速）を河川を遡上する場合と陸上を遡上する場合に分けて述べた。本節では、陸前高田地区を対象に画像解析結果との比較で解析結果の妥当性を検証した非線形長波理論に基づく2次元数値解析の結果を用いて、沖合から海岸線までの水位波形の変化を海底勾配を用いて考察する。

図-8に海底勾配と水面勾配の定義を示す。同図の左側を陸側、右側を海側を示し、海底勾配は時計回りを正の値として水平距離と鉛直距離の比をパーセンテージで表す。水面勾配も同様に時計回りを正の値とするが、度数表記とした。

図-9は、前述の数値解析結果を示しており、横軸に海岸線を0[m]として海側を正の値とする距離を示している。ここで、横軸の幅は1波長が表示できる程度の30[km]の範囲とした。

同図(a)は海底地形図と地震発生後30[分]、35[分]、40[分]の水位分布を示す。海岸線から沖へ29[km]の地盤標高はT.P.-155[m]であり、海岸線に向かって徐々に地盤標高が増加して、海岸線位置ではT.P.-1.0[m]となる。

一方、30[分]から40[分]までの水面勾配は、図中の[1]、[2]、[3]に示すように時間経過とともに徐々に切り立つ。35[分]の水位は最頂部と最低部でそれぞれT.P.+11.1[m]、T.P.-3.2[m]と、波高が14.3[m]、1/2波長が15.2[km]である。次いで40[分]の波高は浅水変形によって16.5[m]に増幅し、1/2波長は8.6[km]に減少する。

同図(b)は同図(a)と同範囲の海底勾配と水面勾配を示す。海底勾配は局所的に-1.4%となる箇所が確認されるものの、全体的には非常に緩い遠浅の海底地形であるといえる。一方、水面勾配は陸上に遡上を開始した区間が最大勾配となるものの、35分、40分のそれぞれで0.15°、0.33°と非常に緩い勾配であることがわかる。海岸線より沖側ではいずれの時間帯でも0.1°未満の水面勾配である。従って、海岸線より陸側の1[km]区間では水面勾配が切り立つ傾向を呈するものの最大でも1°未満の勾配であり、全体的にも非常に緩やかな勾配である。これは、例えば35[分]の1/2波長が15[km]と非常に周期が長い波であったためと考えられる。

以上より、沖合から海岸線に向かって進行する津波は

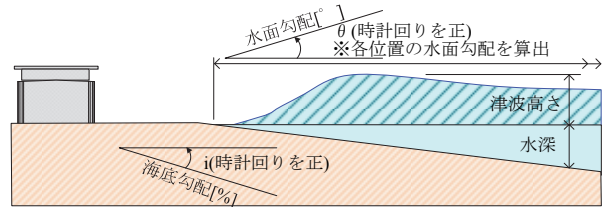
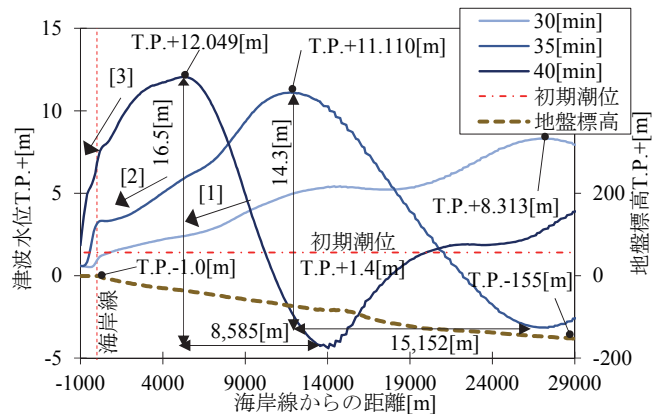
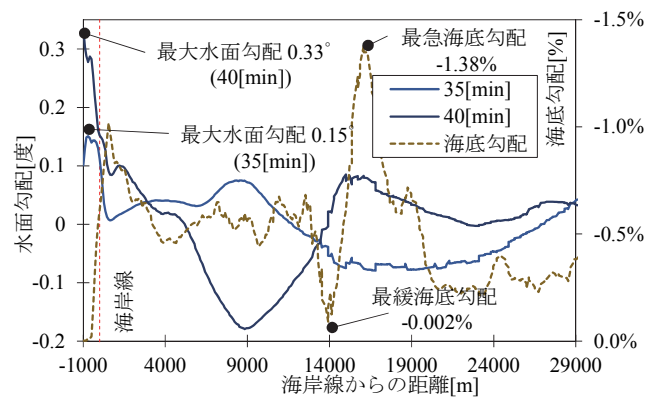


図-8 海底勾配と水面勾配の定義



(a) 海底地形と水位波形



(b) 海底勾配と水面勾配

図-9 海岸線までの海底勾配と水面勾配

遠浅な海底地形を伝搬するものの、その水面勾配は非常に緩く段波状の波は河口に侵入してから形成されることが考えられる。津波の先端波高は2[m]程度と小さく、先端部通過後は徐々に水位が上昇する流れになると推測される。

5. 橋梁に作用する津波の形状

本章では陸域に架橋される橋梁に作用する津波の形状を分類し、その上で津波作用力を算定するにあたって

考慮すべき津波の形状を提案する。

5.1 津波形状の分類

図-10 に橋梁に作用する津波形状を類型化した図を示す。橋梁が海岸線よりも内陸に位置する場合、陸上を遡上する津波の先端部は同図 (a) に示すように砕け寄せた状態となる。さらに橋梁の桁下空頭が高い場合、この砕け寄せた津波の先端は桁下を通過した後に徐々に水位を増して、同図 (b) に示したように準定常的な流れが橋梁に作用する。

一方、前述の観測結果に基づけば、河川橋などの河川を遡上する津波の影響を受ける橋梁は、その前面側（海側）が河口であるため防潮堤等の防護施設を有していない場合が多く、気仙川や久慈川を遡上する津波にみられるように、砕波段波状の津波の先端は海岸線に到達する前に砕け寄せ、遡上を開始する際には同図 (a) に示すように水頭差 2[m] 程度まで小さくなると考えられる。先端部の波は桁に直接作用せずに桁下を通過する 경우가多く、実際には準定常的な流れの作用を考慮すれば良いと考えられるもの、桁下空頭が小さい場合、すなわち桁の高さ方向の位置が低い場合を勘案して、設計上は孤立波が作用すると考えるのが良いと考えられる。

5.2 作用力の評価フロー

図-11 に橋梁の耐津波設計で考慮する津波の形状に応じた津波作用力の算定方法を示す。同図は文献³⁾を参考とし、本研究で得た知見から橋梁の海側に防潮堤等の防護施設の有無で考慮する津波形状を変えることとした。すなわち、橋梁の海側に防潮堤等の防護施設が無い場合は先端部は砕けて小さくなった波高の波が作用するとして、孤立波タイプの作用力を考慮する。逆に防護施設が有る場合は、津波の先端は越流波に変化するため定常流タイプの流れが作用するとして定常流タイプの作用力を考慮する。ここで、同図に示す算定フローは橋梁の上部構造を対象としており、橋脚や橋台等の下部構造は別途検討が必要である。また、漂流物による衝撃荷重や受圧面積の増加が見込まれる場合も、同様に別途検討が必要である。

なお、同図に示す算定フローは海岸線よりも陸側に位置する陸上橋や河川橋を適用範囲としている。また、津波高さと水深は防波堤の位置で判定し、防波堤が無い場合は該地域の湾口の位置を目安に判定すると考える。

(1) 孤立波タイプの津波作用力評価式

図-12 に示すのは孤立波を模擬した桁に作用する津波作用力の実験結果⁸⁾である。同図は横軸に作用力を桁側面面積と波高を関数とする波圧 $\rho g a_H$ で除した値を、縦軸に水深から桁位置中心までの距離を波高で除した値をプロットしたものである。また、鉛直作用力の実験結果も同様の処理をして、これらの実験結果を包括する近似

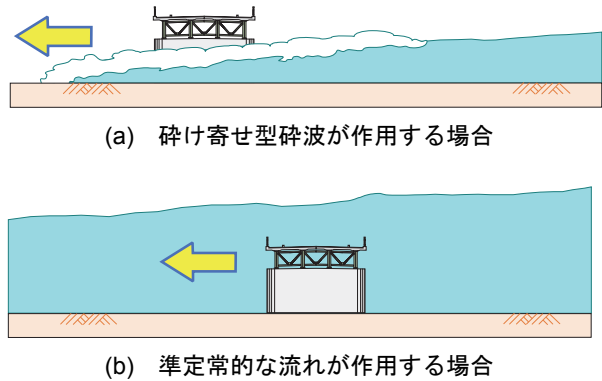
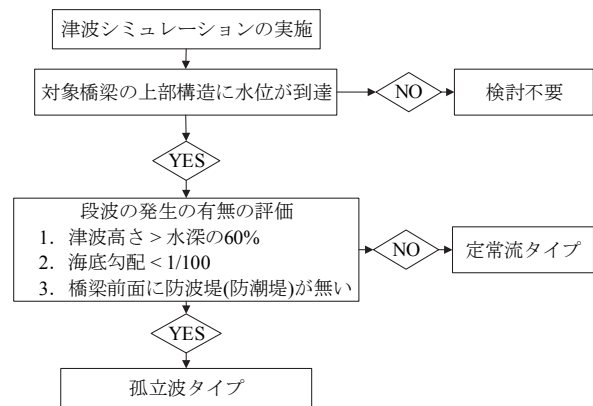
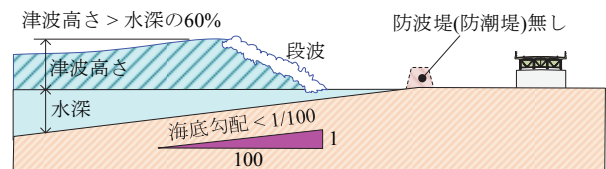


図-10 橋梁に作用する津波形状の類型化



(a) 津波作用力の算定フロー



(b) 段波が作用する条件

図-11 橋梁に作用する津波作用力の算定手順

線から桁の単位面積当たりの作用力を求めた⁵⁾。その結果、水平方向は式(1)、式(2)、鉛直方向は式(3)で求められる。

・ $Z/a_H \geq 0.5$ の場合

$$q_x = \rho g (3.10 a_H - Z/0.42) \quad (1)$$

・ $Z/a_H < 0.5$ の場合

$$q_x = 1.90 \rho g a_H \quad (2)$$

$$q_z = \rho g (0.53 a_H - Z/2.18) \quad (3)$$

ここに、 q_x : 単位面積あたりの水平力[kN/m²], q_z : 単位面積あたりの鉛直力[kN/m²], ρ : 海水の単位体積重量[t/m³], g : 重力加速度(=9.81[m/sec²]), a_H : 孤立波の波高[m], Z : 静水面から桁中心までの距離[m]

(2) 定常流タイプの津波作用力評価式

定常流を模擬した水理実験⁶⁾の結果から桁側面の単位

面積あたりの水平作用力は式(4)で、桁底面の単位面積あたりの鉛直作用力は式(6)で求める。

$$q_x = \frac{1}{2} \rho C_d v^2 \quad (4)$$

$$C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & 1 \leq B/D < 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/D \end{cases} \quad (5)$$

$$q_z = \frac{1}{2} \rho C_l v^2 \quad (6)$$

ここに、 q_x ：単位面積あたりの水平力[kN/m²]、 q_z ：単位面積あたりの鉛直力[kN/m²]、 ρ ：海水の単位体積重量[t/m³]、 g ：重力加速度(=9.81[m/sec²])、 C_d ：式(5)で求める抗力係数、 B ：橋の総幅[m]、 D ：橋の総高[m]、 C_l ：揚力係数(=0.5)、 v ：桁位置における桁が無い場合の水平方向流速[m/sec]

6. まとめ

東日本大震災で撮影された空撮画像に基づき、橋梁に作用する際の津波は2種類の形状であることを明らかにした。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 久慈湾の空撮画像を用いて画像解析を実施した結果、久慈港に襲来した津波は、波高5[m]程度の段波状の波が進行するとともに砕波する。海岸線より沖の防波堤を越流した後に再度孤立波状の波を形成するものの、海岸線に到達した際に再度砕波し、陸上を遡上する津波の先端部の水頭差は2[m]程度に減少する。
- (2) 久慈川を遡上する津波の先端部は、海岸線よりも沖側で砕け寄せ型砕波となった形状を維持する。この場合も津波先端部の水頭差は2[m]程度であり、沖合を進行してきた段波の波高5[m]に比して小さくなる。これは、沖合を進行する津波の先端部が孤立波状であるのに対して、河川を遡上する際には砕波して砕けた状態となるためである。
- (3) 陸前高田市の空撮映像を用いて津波特性を分析した結果、海岸線に防潮堤を有する平地では、防潮堤を越流することで越流波となって遡上する。一方で、河川を遡上する津波は先端部で2[m]程度の波高をもつ段波が先行するものの、その後は概ね1/85の水面勾配をもつ流れとなる。数値解析で得た海岸線までの水面勾配は0.1°、陸域において若干の前傾化をみせるものの最大で0.3°(1/190)と非常に緩いことから、陸前高田市に襲来した津波は先端部に水頭差を持つものの、非常に周期の長い緩やかな水面勾配を持つ波であったと推測される。
- (4) 陸域に架橋される橋梁に作用する津波の形状は、画像解析に基づく分析結果によれば、波段波状に作用

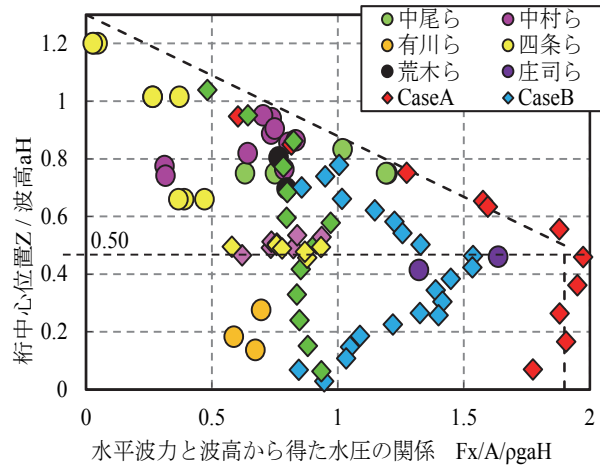


図-12 孤立波の実験結果のまとめ(水平作用力)

する場合と準定常的な流れが作用する場合の2種類に分類することができ、特に橋梁の前面(海側)に防潮堤などの防護施設を有する場合は津波の先端が砕波段波状であってもその水頭差は2[m]程度となる。津波先端が桁に作用せずに桁下を通過する場合は、その後の緩やかな水面勾配を持つ流れが徐々に水位をあげ、桁に作用する時点では準定常的な流れとなって作用することに加え、コンクリート桁と鋼桁とで桁に作用する際の波形状に明確な差異は無い。

参考文献

- 1) 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.1_386-I_370, 2012.
- 2) 太田外氣晴, 山中浩明: 東日本大震災における津波の伝播特性の評価と避難の問題点, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第5号, pp.1-17, 2013.
- 3) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, pp.21-25, 2013.9.
- 4) (社)日本道路協会; 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.7-8, 2012.3.
- 5) 幸左賢二, 秋吉秀一, 二井伸一, 出口一郎: 津波による橋梁への水平作用力に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.442-453, 2011.3.
- 6) 佐藤崇, 幸左賢二, 佐々木達生, 付李: 橋桁に作用する準定常的な持続波力の実験的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1_876-I_880, 2014.
- 7) 神宮司博志, 幸左賢二, 佐々木達生, 佐藤崇: 画像及び数値解析手法を用いた気仙大橋の津波被害分析, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.271-281, 2014.3.
- 8) 例えば, 清水裕文, 庄司学: 橋桁に作用する津波波力と津波流速の関係: 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, I_941-I_945, 2013.