

遡上する津波の流速と浸水深さに着目した 時間的变化に関する分析

竹田 周平¹

¹正会員 博（工） 福井工業大学准教授 工学部建築生活環境学科
（〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1）

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、東日本の沿岸部に大津波が来襲し、国道などのインフラに甚大な被害をもたらした。例えば、国道45号に位置するいくつかの橋梁の上部構造が流出する被害や、盛土部の流出も数多く認められている。今後はこれらのインフラに対する津波対策など、それぞれのインフラの重要度などに応じた対策が急務である。

しかしながら、震災から約二年が経過した現在においても復興が思うように進捗していないことに加え、これまでの津波被害が地震被害に比べて数が少ないために、特に構造物に作用する津波反力など未解明なことが多いことが大きな課題である。また国内では、特に南海トラフなど近未来に大津波が来襲する可能性が高いことから、津波防災性を高めるためにも、今後もおお津波の振る舞いを明らかにする調査・研究を推進していくべきである。

そこで本研究では、昨年度から引き続き、東日本大震災で記録された動画に基づき、津波の波力を解明するために、津波の流速やその時刻歴変化、また浸水深さの変化などに着目し分析を試みた。

2. 動画記録の概要

本研究では、津波が来襲した際に記録された貴重なデータを対象に分析を行う方法とした。データは、動画サイトYouTube¹⁾に投稿されている動画記録を検索し、重複しているものを除いたデータを集めて、二段階で分析を行なった。第一段階では、岩手県から福島県の沿岸部に加え茨城県の4県の動画を104件

選定し、その後津波の振る舞いがよく観察できる有効データである27件に絞り津波の流速を分析した²⁾。

第二段階では、第一段階での分析を発展させて津波の浸水深さの時間変化（津波が来襲するときの着目位置における水深の時間変化）、また津波の流速の時間変化（着目地点を通過する津波の速度の時刻歴変化）など、時刻と共に変化する津波の振る舞いを着目し分析を試みた。

図-1に第一段階の動画撮影位置を、図-2の第二段階における動画記録位置を示す。なお動画の分析においては、計測するために必要となるターゲット（漂流物や移動距離や高さ間隔の計測等）の精度の課題、また限られた動画のうち、代表的な部分で記録されたデータを利用しているために、その地域を代表するものではないことを申し添えておく。

3. 分析方法

(1) 浸水速度の評価式

津波の浸水深の測定について説明する。図-3に津波の浸水深さと計測するための基準線との関係を示す。図中の水深1から3は変化する津波の着目した時刻に対する水面位置を示しており、 h_i は各着目時刻間の水位変化量（相対）を、 H_i は水深が0からの総深さ（絶対）を意味する。ここに、浸水深の変化である浸水速度は、式（1）より求めることとした。

$$v_h = \frac{h_i}{t} \quad (1)$$

ここに、 v_h は津波の浸水速度(m/min)、 t は2点間における時間（min）を示す。

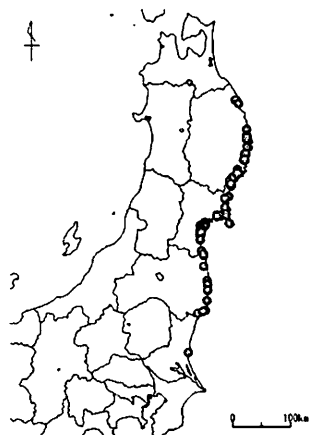


図-1 動画記録位置（第一段階）



図-2 動画記録位置（第二段階）

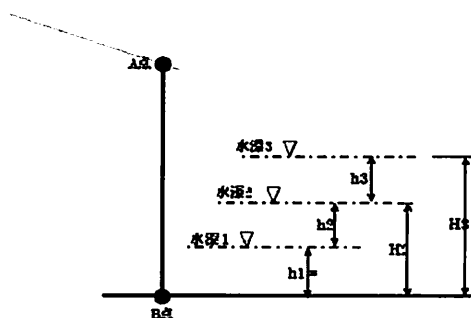


図-3 津波の浸水深さと計測するための基準線との関係

(2) 津波流速の評価式

流速の測定プロセスの概要を説明する。ここでは You Tube¹⁾に代表される動画サイトより、津波が襲来した地域で記録された動画データを検索し、これらから津波の振る舞いが確認できる動画を用いて分析を行う。津波の流速が、津波が遡上してから地形条件（例えば市街地や河川、農耕地など）により大きく変化するが、本研究ではあくまでもその動画が記録された位置における流速に着目した。

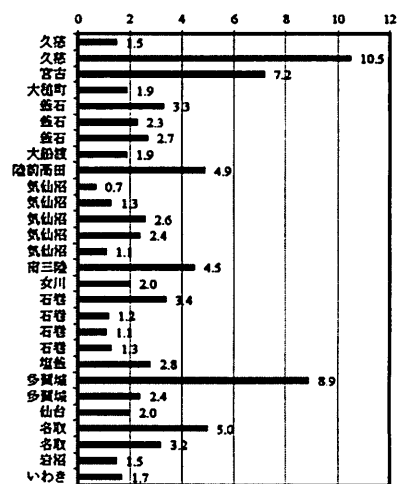


図-4 第一段階における流速の分析結果

流速の測定は、ある2点間（ L ）を定めその点を通過する漂流物などの通過時間（ t ）を計測することで計算を行う方法とし、式（2）により求めた。ここで重要となる2点間の距離の測定方法は、動画及び電子平面などを利用し、着目点の距離計測や、漂流物が通過する付近の建物などの距離が把握できるものから推測を行った。また時間の測定は、ビデオカウンタの計測ではなくストップウォッチを利用した。この速度は、あくまでも着目した位置における流速であり、地形条件によっては撮影地域の津波速度と見なせる場合と見なせない場合がある。

$$v = \frac{L}{t} \quad (2)$$

ここに、 V は波の流速(m/s)、 L は2点間の距離 t は2点間の漂流時間を示す。

4. 分析結果と考察

(1) 第一段階における分析結果

まず、第一段階での分析結果²⁾を説明する。この段階では、マクロ的な流速を把握することを目的としたために、津波流速や水深の変化よりも明確に流速が計測できる1つのイベントのみを対象とした。流速の算定は、ある着目点間の距離を決定し、津波の流れと同調するように流れる漂流物の速度から津波流速を求めた。第一段階での有効動画数は27件であり、岩手県の9箇所と宮城県17箇所、そして福島県の1箇所である。これらの結果を図-4に示す。この図より、久慈で10.5m/sと市街地の多賀城で8.9m/sと比較的早い記録が得られたが、気仙沼では

いる例としては、電柱のように水の当たる面が丸くなっているような場合である。この波力のグラフからは、大船渡市の波力は抵抗係数0.7の場合、 37.9 kN/m^2 、抵抗係数0.4の場合、 21.7 kN/m^2 であった。他の計測値では、抵抗係数が0.7と0.4のどちらも 15 kN/m^2 以上のところが石巻市など3箇所と、 15 kN/m^2 以下のところが釜石市など7箇所あった。

形状係数 K' は、流体が作用する形状に応じて変化する値である。すなわち、流体が生む抵抗力を推定するには、この流体が作用する物体形状を特定することが重要となるために、津波が垂直板に作用する場合の波力も計算した。ここに対象となる垂直板の縦横比を無限大（高さが一定で横幅は連続しているもの）と仮定し $K'=2.01$ と設定した。

この結果、最大値を記録した多賀城（No.9）では 117.4 kN/m^2 となった。また大船渡市（No.6）では 108.8 kN/m^2 と、石巻市（No.8）では 90.6 kN/m^2 となった。この結果より静水圧式より試算される水圧と同等になる等価水深を試算すると、多賀城（No.9）では 12.0 m 、大船渡市（No.6）では 11.1 m 、石巻市（No.8）では 9.2 m となった。

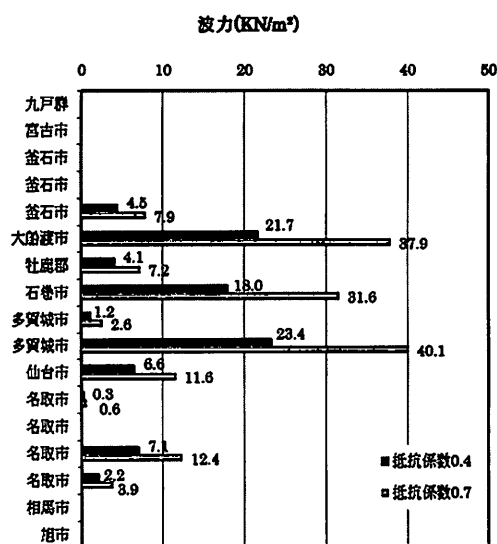


図-7 流速の分析結果一覧

5. まとめ

今回の研究では、津波の浸水深さの時間変化と浸水深さ、また流速の時間変化を分析した。さらには流速の最大値を用いて代表的な個所の津波波力を推定した。ここで得られた結果を下記に示す。

(1) 津波の浸水深さについて

- ・浸水速度の最大値は釜石（No.3）の 13.3 m/min 、

最小値は多賀城（No.9）の 0.4 m/min であった。

また最大値の平均は、 5.5 m/min であった。

- ・釜石（No.3）と相馬（No.16）で浸水速度が速くなったのは、海岸付近に丘（斜面）があり、また市街地であるため、津波がその場で停滞することが要因であるため浸水深が急激に変化したと考えられる。
- ・宮古（No.2）と多賀城（No.9）で浸水速度が遅くなったのは、平野で津波がかなり上流まで遡上し、なおかつ津波が抜けていく道が何本もあり停滞しにくい環境であることが要因であったため、浸水速度が落ちたと考えられる。

(2) 流速について

- ・最大流速は多賀城（No.10）の 10.7 m/s であり、最小値は名取（No.12）の 1.3 m/s であった。観測地毎の最大値の平均は、 5.8 m/s であった。大船渡（No.6）と石巻（No.8）と多賀城（No.10）で流速が速くなったのは、遡上地が市街地であり粗度係数が小さいコンクリート上を通過することが要因と考えられる。
- ・多賀城（No.9）と名取（No.12）で流速が遅くなったのは、周辺に障害物がない場合や粗度係数が大きい田んぼを津波が流れることが要因と考えられる。

(3) 波力について

- ・形状係数を $K=2.01$ とした時の最大波力は、多賀城（No.10）で 117.4 kN/m^2 、大船渡（No.6）で 108.8 kN/m^2 、そして石巻（No.8）で 90.6 kN/m^2 となった。
- ・静水圧式より試算される水圧と同等になる等価水深を試算すると、多賀城（No.10）では 12.0 m と大船渡（No.6）では 11.1 m と石巻（No.8）では 9.2 m となった。

謝辞：本研究ではYouTubeのデータを利用させて頂きました。また福井工業大学学内特別研究費（クラスタ研究C、代表：砂川武義）の助成を受けて実施しました。ここに期して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) You Tube動画サイト, <http://www.youtube.com/>.
- 2) 竹田周平, 幸左賢二：東北地方太平洋沖地震による橋梁の津波被害と津波流速の簡易分析, 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.155-162, 2012.