津波の河川遡上に対する河床勾配の影響に関する検討

Influence of River Bed Slope for Tsunami Propagation into Rivers

茅根康佑¹・田中 仁²・Mohammad Bagus ADITYAWAN³

Kosuke KAYANE, Hitoshi TANAKA and Mohammad Bagus ADITYAWAN

Tsunami intrusion into river is investigated in this study. Investigation and analyses were conducted based on water level measurement data and bed slope at several rivers in Tohoku region during The Great East Japan Tsunami, 2011 and The Great Chilean Tsunami, 2010. These data were used to proposed an empirical method for estimating dissipation coefficient. The empirical method was used to approach the intrusion length by assuming that the furthest distance is given for the ratio of local tsunami wave height to the tsunami wave height at the river entrance of 0.05 (5%). The intrusion length from the proposed method in this study shows good comparison with measurement data.

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に日本の太平洋三陸沖を震源として東北地方太平洋沖地震が発生した。Mw.9.0 (気象庁)と日本観測史上最大の規模を持つこの地震は、巨大な津波を引き起こし、関東地方から東北地方にかけて甚大な被害を及ぼした。日本気象協会によると、沿岸部での津波高さは最大で8~9mと津波の規模がかなり大きく、海岸線から最大6km内陸まで津波が遡上したことが確認されている。この際に、津波の河川遡上が発生し、内陸部に対して大きな影響を与えた。

また、2010年2月27日午後3時34分に発生した2010年チリ地震による津波も東北地方の河川を遡上したことが確認されている。Mw.8.8 (気象庁)である2010年チリ地震による津波はチリ沿岸部に大きな被害を与えただけでなく、太平洋を横断し日本を含む多くの国々へと来襲した。この際に、東北地方の河川で津波遡上が確認されている (田中ら, 2011)。

海岸堤防等に防護された海岸部に比べ、河口部は津波に対する脆弱性を有する。また、陸地を伝播する津波に比べ、河川内の津波は伝播速度が速く、上流まで波エネルギーを維持して伝播することが盧ら (2012) によって確認されおり、このことから河川における津波防災の重要性が窺える。河川の一義的な機能は洪水を速やかに流下させることであり、これは河川における津波低減と一般的に相容れないものであり、今後、河川における津波防災を検討しなければならない。その為、津波防災案を策定する上で河川に関わる諸現象を明らかにする必要がある。

一般的に河川における津波の特性は河川の地形特性及び津波の規模によって異なると言われている。そのため、津波の河川遡上特性を把握するには、複数の河川、複数の津波を対象とした調査が必要である。津波の現地調査・現地資料に基づくものとしては、Abe (1986)、田中ら (2006)、安田ら (2004)、田中ら (2011) や茅根ら (2011) がある。また、数値計算によるものとして、岩崎ら (1977)、松宮 (2009) など、実験による安田 (2006) などが挙げられる。これらのうちで、様々な検討で使用された現地資料としては、1983年日本海中部地震時の米代川のもの、2003年十勝沖地震時の十勝川でのデータが代表的であるが、複数の河川及び異なる規模の津波を対象とした調査はほとんど見られない。

本研究では、2010年のチリ地震時の河川水位データと2011年東北地方太平洋沖地震時の河川水位データ及び津

図-1 宮城県の研究対象河川

1 学生会員
2 フェロー 工博
3 正会員 Ph.D.

東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
東北大学教授 工学研究科土木工学専攻
東北大学大学院PD 工学研究科土木工学専攻

図-2 2011年の地震時鳴瀬川の水位データ
(括弧内の数字は観測所の河口からの距離)

図-3 2011年の津波による痕跡高さ

図-4 2010年の地震時の鳴瀬川の水位データ
(括弧内の数字は観測所の河口からの距離)

波痕跡高情報を用いて、2011年と2010年の規模の異なる津波が、宮城県複数の河川（図-1）において示した挙動を解明し、津波遡上特性における共通の傾向を明らかにした。

2. 使用データと津波高さの定義

(1) 2011年水位データ

国土交通省各事務所によって河川内の時系列水位データが取得されている。2011年の津波は規模が大きく、沿岸域と河川内で多くの水位観測所が破壊されデータが流失してしまった。しかし、いくつかの観測所は破壊を免れており、これにより得られたデータから津波高さの算出が可能である。多くの水位データは10分間隔であるが、一部には1時間間隔のものを含む。図-2に鳴瀬川の津波による水位変動を示す。宮城県内の多くの場所で地震に伴う地盤沈下が起きており、水位変動と推算潮位の関係が不自然な観測点がある。このことから、時系列での津波高さの変動を算出することは難しい。そこで、2011年東北地方太平洋沖地震では、ほとんどの河川で来襲直後に津波高さのピークが訪れていることを利用し、津波来襲直前の水位から津波来襲後のピーク水位を引いたものを2011年東北地方太平洋沖地震時の水位データによる津波高さの最大値として使用した。

(2) 2011年津波痕跡情報

一方、痕跡高情報では河川堤防に残った津波痕跡が各河川事務所によってT.P.を基準に記録されている。これ

により、津波による河川水位の最大値を得ることが出来る。鳴瀬川の津波痕跡情報による最大水位を図-3に示す。この値から、津波来襲前の推定水位を引いたものを2011年の痕跡情報による津波高さとして使用した。推定水位は上述の水位データから算出した。図-3のように各観測点の津波来襲直前の水位から距離に対する一次関数を算出し利用した。

(3) 2010年水位データ

2010年チリ地震津波来襲時においても先述の(1)と同じ様に水位データが取得されており、これにより津波高さの算出が可能である。図-4にチリ地震時の鳴瀬川の水位データを示す。図のように、2010年チリ地震津波では太平洋を横断する過程で波形が変形しており、2011年のように来襲直前と直後の水位から最大波高を求めることは難しい。よって、移動平均により津波の影響を受けていない水位変動を求め、その高さに対する上昇分を津波高さとして最大値を解析に利用した。

3. 河川内における津波高さの特徴

(1) 水位変動の比較

2010年の津波では図-4の鳴瀬川野蒜観測点のように河口からの距離が近い観測点では水位変動が潮位変動に沿った形で振動していることがわかる。2011年の津波では、図-2のように津波による流量が大きく、それが河川から

抜けきるまでに長い時間がかかっており、水位変動と潮位変動の間に乖離が見られる。このように、同じ観測点であっても津波の規模によって河川内の水位変動の形が大きく異なっている。

(2) 潮汐の影響

また、茅根ら(2011)によって、東北地方の河川における2010年チリ地震津波の波高が潮汐による水深変化に依存することが明らかにされており、それは図-4の小野観測点における水位変動からも確認できる。図-2を見ると、2011年の津波でも、低潮位時において一時的に津波の振幅が小さくなっており、潮汐が波高に影響を与えていることが確認できる。同様に北海道の新釧路川で、2011年の津波による河道内の水位変動量の大・小の時間帯が満潮・干潮時とそれぞれ一致したことが阿部ら(2012)によって確認されており、このことから津波の規模によらず潮汐が津波の波高に影響を与えたと考えられる。

(3) 堰の影響

北上川、阿武隈川では、それぞれ河口から10km、17kmの位置にある大堰による影響が見られた。北上川と阿武隈川の大堰付近の2011年痕跡情報による津波高さを図-5に示す。この図から大堰の下流で波高が上昇していることが確認できる。どちらの河川も大堰下流2km当たりから津波高さの上昇が始まり、これにより最大1~2m大きくなっていることがわかる。これは波が大堰に反射し、津波高さが大きくなったことが原因と考えられる。また、大堰による水深の変化により、大堰上流では津波の高さが大幅に減衰している。以上のことから、大堰が2011年の津波に与えた影響は大きく、このような河川構造物による津波の遡上特性の変化を今後検討する必要がある。なお、以降の解析には、大堰の影響が見られるデータは使用しない。

4. 津波の減衰係数の算出

波浪の減衰過程は以下の式で表されることが多い。

$$H = H_0 e^{-kx} \quad (1)$$

ここで、 x ：河口からの距離 (m)、 H ：距離 x の地点での津波の高さ (m)、 H_0 ： $x=0$ での津波の高さ (m)、 k ：波高減衰係数 (m^{-1}) である。図-6に宮城県6河川の、2011年東北地方太平洋沖地震時の水位データと津波痕跡情報、2010年チリ地震時の水位データにより算出した津波高さの最大値をそれぞれプロットした片対数グラフを示す。どの河川においても津波は指数関数的に減衰しており、どちらの津波も上式に従って減衰したと考えられる。そこで、河川毎に最小二乗法を用いて近似式を求め、上式における減衰係数 k を算出した。結果、求めた値を水位データは10分間隔のものを使用した為、痕跡データと関係が不自然な

(a) 北上川

(b) 阿武隈川

図-5 堰周辺における2011年の津波痕跡高さ

図-6 河道内における津波の減衰

図-7 河床勾配Sと減衰係数kの関係

ものが多少あるが、ほとんどの河川で2010年と2011年で減衰係数がほぼ同じ値を示し、津波の規模が減衰係数kに影響を与えないことが明らかとなった。

5. 河床勾配と減衰係数の関係

Adityawanら(2012)は2011年の津波の河川遡上距離と河床勾配の間に良好な関係を確認しており、津波高さの減衰にも同じことが考えられる。そこで、2011年の痕跡高から算出した各河川の減衰係数kを、河口から遡上距離までの河床勾配Sに対しプロットした。プロットしたグラフを図-7に示す。グラフには2011年の津波痕跡情報による津波高さの減衰係数kを使用した。ただし、砂押川のみ、痕跡によるデータが得られなかった為、水位計データを使用した。その結果、減衰係数と河床勾配の間に指数関数的な関係が得られた。従って、河川内の波浪の減衰と河床勾配の間には密接な関係が存在することが明らかとなった。また、この値から最小二乗法を用いて算出した経験式を以下に示す。

$$k = 4.77 \times 10^{-5} \exp(4.67 \times 10^3 S) \text{ (m}^{-1}\text{)} \dots\dots\dots (2)$$

図-8 河床勾配Sと遡上距離 x_p の関係

6. 河床勾配と遡上距離の関係

$H/H_0=0.05$ となる地点を遡上端と仮定し、得られた経験式(2)を $H/H_0=e^{-kx}$ に代入することで、遡上距離 x_p と河床勾配Sの間に関係式を導くことができる。以下に、その式を示す。

$$x_p = 6.28 \times 10^4 \exp(-4.67 \times 10^3 S) \text{ (m)} \quad \cdots \cdots (3)$$

この結果を理論値として図-8に示した。さらに、実測値との比較を行った。実測値として使用したのは水位観測所のデータ及びAdityawanら(2012)によるデータである。水位観測所のデータは水位データに津波による変動が見られる最も上流の観測点と変動が見られない最も下流の観測点の間に遡上端があると考え使用した。従って、図中の×印で結ばれた直線の中に遡上端がある。

また、図中の丸印はAdityawanら(2012)により現地データをもとに確認された遡上距離である。その結果、実測値と理論値の間に良好な関係を得ることが出来た。これにより、津波に対して特に防災のための策を必要とする河川区間の長さを推定することが可能である。

7. おわりに

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震時の河川水位データ及び津波痕跡高情報、2010年チリ地震時の河川水位データの解析を行うことで、津波の河川遡上特性の把握を行った。以下に主要な結論を示す。

(1) どの河川においても津波は河口からの距離に対し、指数関数的に減衰し、2010年および2011年の二つの規模の異なる津波でも、同じ河川においては減衰係数がほとんど同じ値を示すことが明らかとなった。

(2) 得られた減衰係数kと河床勾配Sの間に指数関数

的な相関が見られた。

(3) kとSの関係に対してられた経験式から、遡上距離と河床勾配の間の関係式を導出した。式は現地調査および水位計データから得られた実測値との間に良好な一致を示した。

謝辞：本研究を行うに当たり国土交通省東北地方整備局ならびに宮城県河川課より貴重な河川水位データの提供を受けた。また、日本学術振興会科学研究費(基盤研究(B) No.22360293, 特別研究員奨励費 No.2301367)、中国四川大学国家重点実験室のOpen Fund Research、(財)河川環境管理財団による河川整備基金、および東北建設協会建設事業に関する技術開発支援の助成を受けた。ここに記して関係各位に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 阿部孝章・吉川泰弘・安田浩保・平井康幸(2012): 2011年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波の北海道内における河川遡上, 土木学会論文集B1(水工学), B1-68, pp.I_1525-I_1530.
- 岩崎敏夫・阿部至雄・橋本 潔(1977): 河川津波の特性に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp.74-77.
- 茅根康佑・盧 敏・田中 仁・Nguyen Xuan Tinh(2011): 津波の河川遡上に対する河口地形・潮位変動の影響に関する検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), B2-67, pp.I_246-I_250.
- 田中 仁・中川 一・石野和男・矢野真一郎・Bandara Nawarathna・安田浩保・渡邊康玄・長谷川和義(2006): スマトラ沖地震津波によるスリランカでの被害に関する現地調査-河川被害を中心として-, 水工学論文集, 第50巻, pp.577-582.
- 田中 仁・Nguyen Xuan Tinh・Min Roh・Nguyen Xuan Dao(2011): 2010年チリ地震津波の東北地方河川への遡上-河口地形と遡上特性の関連, 土木学会論文集B1(水工学), B1-67, pp.I_1627-I_1632.
- 盧 敏・田中 仁・Mohammad Bagus Adityawan・真野 明・有働恵子(2012): 河川遡上津波の波速・流速の評価に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), B1-68, pp.I_253-I_258.
- 松宮弘信・米山 望・田中 尚・鯨島竜一・佐藤広章(2009): 河川遡上津波発生時の淀川大堰上流部における塩水挙動解析, 自然災害科学, pp.125-135.
- 安田浩保・渡邊康玄・藤間功司(2004): 2003年9月の十勝沖地震に伴い発生した津波の河川遡上, 土木学会論文集, No.768/II-68, pp.209-218.
- 安田浩保(2006): 河川を遡上する津波の一次元解析手法の提案と実現象への適用, 水工学論文集, 第50巻, pp.1417-1422.
- Abe, K. (1986): Tsunami propagation in rivers of the Japanese Islands, Continental Shelf Research, Vol.5, No.6, pp.665-677.
- Adityawan, M.B., Roh, M., Tanaka, H., Mano, A. and Udo, K.(2012): Investigation of tsunami propagation characteristics in river and on land induced by the Great East Japan Earthquake 2011, Journal of Earthquake and Tsunami (submitted)