巨大地震津波による東京都心部の 中小河川の氾濫予測

ESTIMATION OF INUNDATION AREA IN CENTRAL TOKYO DUE TO
ASCENDING TSUNAMI ALONG RIVER GENERATE BY MEGA EARTHQUAK

高崎忠勝¹・土屋十罔²

Tadakatsu TAKASAKI and Mitsukuni TSUTIYA

¹正会員 博(工) 東京都土木技術支援・人材育成センター (〒136-0075 東京都江東区新砂一丁目9-15)

²フェロー会員 工博 中央大学理工学研究所 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

It is estimated that maximum sea water level became 3m at area of Tokyo bay based on the earthquake tsunami that report II of committee on the Mega earthquake model of the Nankai Troughs. Therefore, we carried out an analysis of ascending tsunami at a small river in the central Tokyo. We had investigated by unsteady flow of 1 D analysis, still more, using an observation data that changing of river water level in the east Japan great earthquake. Further more, we analysis under condition of an estimated tsunami of 3m, and two case of water gates open and close. The result is following, if water gate could not close in the Kamejima river, inundation area was simulated at around of river area due to flow in tsunami, maximum inundation water depth and area became 4.8m, 0.65km². It was found that the most important mater is management of water gates when Mega earthquake occur.

Key Words : Capital area, maximum tsunami water level, management of water gates, inundation area, Mega earth quake

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(以下、本地震)では、東北地方から関東地方の広範囲にわたって直轄区間および都道府県管理区間において堤防の被災や水門閉鎖や遠隔操作に支障を生じた事例がみられた¹⁾。東京の東部低地帯には高潮対策として多くの水門や排水機場が設置されている。これらの施設は本地震に対しては被災しなかったものの、今後発生する巨大地震においては機能の損失が危惧される。

地震による被災に加えて本地震に伴う津波(以下、本津波)によって東北地方や関東地方の太平洋側を中心に破堤等の被害が生じている²⁾。本津波による河川水位の上昇は、東京を流れる河川においても確認され、例えば、荒川下流域では0.8mの水位偏差が報告されている³⁾。

本地震以降、巨大地震に伴い発生する津波について再検討が行われている。2012年4月18日に公表された首都直下地震等による東京の被害想定⁴⁾では、地殻変動を考慮した場合に中央区晴海で2.41mの最大津波高が生じることが示された⁵⁾。南海トラフの巨大地震モデル検討会では、東京都区部の最大津波高として2012年3月31日の

第一次報告⁵⁾で2.3m、2012年8月29日の第二次報告⁶⁾においては3mであることを示している。東京の中小河川においても満潮時と巨大地震に伴う津波が重なることで極めて大きな水位が生じる可能性がある。

都心部では地下空間が高度利用され、かつ、多くの資産や昼間人口が集中しているため、津波氾濫が生じた場合、甚大な被害を生じる可能性がある。このため、都心部を流れる多くの中小河川について地震津波に対する影響を十分に検討する必要があると考える。

本研究では、津波に対する中小河川の影響検討の一事例として、今後発生が想定される巨大地震に伴う津波

(以下、想定津波)に対する中小河川の影響検討の一事例として、都心部を流れる中小河川について検討を行う。具体的には、神田川の下流域および日本橋川、亀島川について本津波時に下流で観測された水位を入力値とする一次元不定流計算を行い、本津波に対する水位変化の再現性を検証する。次に、想定津波の外力を設定し、この外力に対する河川水位の変化を計算する。なお、これらの計算においては亀島川の上下流端に設置されている水門の状態を開放と閉鎖の両方について行う。また、水理計算において水位が堤防を超えた区間の周辺を対象に氾濫計算を行い、浸水深および浸水範囲を確認する。

2. 対象範囲

検討対象としたのは図-1に示すように神田川の下流域および日本橋川、亀島川である。神田川はJR水道橋駅付近で日本橋川と分派し、東方向に流下し、JR浅草橋駅付近で隅田川に注ぐ一級河川である。日本橋川は神田川から分派後、南東方向に流下し、日本橋水門地点で亀島川と分派し隅田川に注ぐ延長4.8kmの河川である。亀島川は日本橋川から分派後、南方向に流れ隅田川に注ぐ延長1.1kmの河川であり、上下流端にはそれぞれ日本橋水門と亀島川水門がある。これらの水門は高潮時に閉鎖され、本津波に対してもこれらの水門は閉鎖された。上下流端に水門がある亀島川の堤防天端は、隅田川や日本橋川より低いものとなっている。これらの河川の他に水理計算区間には上流から江戸橋分水路、水道橋分水路、お茶の水分水路がある。

3. 本津波による水位偏差

(1) 再現計算

本津波による対象河川の水位変化について、MIKE11（デンマーク水理・環境研究所）を用いて一次元不定流計算により再現計算を行い、対象区間の水理特性を確認する。水理計算の対象区間は図-1に示したように神田川下流域の8kmおよび日本橋川と亀島川の全延長である。亀島川にある2つの水門は本津波到達前に閉鎖されているが、本計算では2つの水門が開いている状態と閉鎖している状態のそれぞれを対象とした。計算に用いた河川断面は、神田川が62断面、日本橋川が43断面、亀島川が12断面の計117断面であり、他に江戸橋分水路、水道橋分水路、お茶の水分水路についても断面を入力した。粗度係数は河川計画および流量観測結果⁷⁾をもとに護岸コンクリート部を0.0225とし、護岸矢板部および河床部を0.04にした。上流端の流量は低水流量観測結果⁸⁾より $4\text{m}^3/\text{s}$ とし、神田川、日本橋川、亀島川の各河川の下流端水位は隅田川の清澄排水機場水位の観測値とした。計算間隔は0.1秒とし2011年3月9日から14日までを計算期間とした。

本地震当日3月11日における4地点の水位および下流端水位を図-2に示す。一休橋地点と白鳥橋地点は津波の影響のある期間が欠測となっているが、潮汐に伴う水位変化を計算値が再現できていることを確認した。飯田橋地点と日本橋水門地点は計算期間を通じて水位が観測できており、最高水位についてみると飯田橋地点では観測値がA.P.+2.43mに対して計算値はA.P.+2.59mであり観測値と計算値の差は0.16mである。日本橋水門地点では観測値がA.P.+2.77mに対して計算値はA.P.+2.64mであり、その差は0.13mである。亀島川の水門が閉鎖している条件

図-1 検討対象範囲

図-2 再現計算結果

で3月11日24時間について計算値と観測値の差をみると飯田橋地点では平均が-0.08m, 標準偏差は0.16m, 日本橋水門地点では平均が0.08m, 標準偏差は0.11mであり, 2地点の再現性に大きな違いはない。また, 計算期間を通じて計算値は観測値と同様の変化をしており, 本計算において設定した条件で津波による河川水位の変化を再現できるものと判断した。

(2) 下流端における水位偏差

一次元不定流計算において下流端水位に設定した清澄排水機場について, 津波がない場合の水位 (以下, 津波除外水位) を推定し, 津波除外水位と観測水位の違いから本津波による水位偏差を把握する。水位観測が行われている清澄排水機場地点では, 実績データによる学習結果をもとに予測を行うニューラルネットワークモデル (以下, ANN) を用いることで, 潮汐, 気圧, 風向風速を考慮した水位を推定できる⁹⁾。津波除外水位を図-3に示すように入力層, 中間層, 出力層の3層からなる階層型ネットワークのANNにより推定する。入力データは天文潮位, 気圧, 風向・風速であり, 出力が河川水位となる。各ユニットにおいて式(1)および式(2)による計算を行う。

$$y_i = \frac{1}{1 + \exp(-x_i)} \quad (1) \quad x_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} y_j + b_i \quad (2)$$

ここに, y_i : ユニット*i*の出力値, x_i : 入力値, w_{ij} : 結合荷重, b_i : ユニット*i*のバイアス値。

2002年から2010年のデータを用いてバックプロパゲーション法によりANNの学習を行い, 学習後のANNに予測時の天文潮位, 気圧, 風向・風速を入力し, その出力を津波除外水位とした。

2011年3月10日から13日における隅田川清澄排水機場の河川水位について, 観測値とANNによって推定した津波除外水位を図-4に示す。観測値の最大値はA.P.+2.75mであり19時23分に発生している。津波除外水位についてみると本地震発生前は観測値と概ね一致しているが, 地震発生後しばらくすると観測値と大きな違いを生じる。観測値と津波除外水位の変化から16時47分に津波が到達したものと判断した。

河川水位の観測値と津波除外水位の差が津波による水位偏差であると考えられる。図-5に清澄排水機場の水位偏差を示す。水位偏差は3月11日が特に大きく, 水位偏差の最大値1.47mは19時23分に発生している。水位偏差の最大値の発生時刻は観測水位の最大値と同時である。水位偏差は津波到達以降, 計算期間末までみられ本津波による水位への影響は数日間に及んでいる。

(3) 津波の有無による河川の水位偏差

津波がある場合とない場合の神田川, 日本橋川の河川水位を計算し, 各河川の水位偏差を求める。津波がない場合の計算は, 16時47分以降を図-4に示した津波除外水

位としたものを下流端水位とし, その他の設定を図-2に示した再現計算と同じ条件として行った。また, 亀島川の水門は本地震時の状況と同様に閉鎖しているものとした。津波がある場合の計算は, 図-2の再現計算の内, 水門閉鎖の条件で計算したものとした。

図-6に一休橋地点と日本橋水門について本津波の有無

図-3 津波除外水位推定に用いたANN

図-4 清澄排水機場の河川水位

図-5 清澄排水機場の水位偏差

図-6 津波の有無による水位の変化

による計算水位の変化を示す。また、本津波の有無による水位の差である水位偏差を図-7に示す。本津波による水位偏差の最大値は一休橋地点が1.51m、白鳥橋地点が1.34m、飯田橋地点が1.23m、日本橋水門が1.36mとなっており、4地点で最上流に位置する一休橋地点が最も大きくなった。水位偏差の最大値の発生時刻をみると下流に位置する日本橋水門が19時30分、一休橋地点が19時47分であり、17分の違いがある。2地点間には8km離れており、水位偏差の最大値が発生した時刻をもとに津波の伝播速度を計算すると7.8m/sとなる。

4. 想定津波による影響

(1) 河川水位

想定津波に対する河川水位の変化を把握することを目的として、まず、下流端における想定津波の波形を作成する。ここでは南海トラフの巨大地震モデル検討会で示された東京都区部の最大津波高3mを想定する。最大津波高3mは満潮位T.P.0.93m¹⁰⁾および沈下量を含んでおり、本検討の対象地域における沈下量は0～0.1m¹¹⁾とされている。本検討では下流端水位波形を次の手順で作成した。対象地域における沈下量を一律0.1mとし、最大津波高3mから満潮位0.93mおよび沈下量0.1mを控除すると、最大水位偏差が1.97mとなる。図-5に示した本津波による水位偏差波形に対して最大水位偏差が1.97mとなるように補正（1.34倍）し、この波形に朔望平均満潮位A.P.+2.077m¹²⁾を加えたものを図-8に示す下流端水位とした。

想定津波に対する計算は、沈下量0.1mを考慮して河川断面全体の標高を0.1m下げたものとした。図-8に示した下流端水位を入力し、その他の設定は図-2の再現計算と同様とした。また、亀島川の水門は閉鎖と開放の両方の条件とした。

図-9に4地点における想定津波時の水位を示す。水門の閉鎖、開放による水位の違いをみると日本橋水門以外の3地点ではほとんど違いがみられない。また、日本橋水門においても最高水位については水門の閉鎖、開放による違いは小さい。水門開放時の4地点の最高水位は、一休橋地点がA.P.+4.59m、白鳥橋地点がA.P.+4.35m、飯田橋地点がA.P.+4.20m、日本橋水門地点がA.P.+4.15mである。

神田川の3地点の最大水位は沈下量0.1mを考慮した場合においても堤防天端高より低くなっている。また、日本橋水門地点の最高水位は沈下量を考慮した日本橋川の堤防天端高より低いものの、現況で概ねA.P.+4.0mの亀島川の堤防天端高を上回っている。亀島川全体の最高水位についてみると日本橋水門の下流地点がA.P.+4.15m、亀島川中間付近がA.P.+4.15m、亀島川水門の上流地点がA.P.+4.09mとなっている。

図-7 4地点の水位偏差

図-8 想定津波に対する下流端水位

図-9 想定津波時の水位変化

亀島川の2つの水門を閉鎖した場合、日本橋川や神田川の最高水位は堤防天端高より低いので氾濫を生じないが、亀島川の水門が閉鎖できなかった場合には、亀島川の周辺で氾濫が生じる。本地震においては全国で水門閉鎖に際して様々な支障があったことが報告されており¹⁾、巨大地震に伴う津波に対して亀島川の水門の機能維持は極めて重要である。

水門閉鎖時の日本橋水門と一休橋地点の3つ目のピーク水位の発生時間をみると、日本橋水門は161分経過時点、一休橋地点は177分経過時点であり、16分の違いがある。ピーク水位の発生時間をもとに津波の伝播速度を計算すると8.3m/sとなり、本地震に対する伝播速度より速くなっている。

(2) 都心部の氾濫状況

亀島川溢水時の氾濫状況をi-RIC2.0.0 (iRICプロジェクト) のソルバーNays2D Floodを用いて計算した。地盤高は国土地理院の基盤地図情報(数値標高モデル) 5mメッシュ(標高)を用い、堤防および河床に位置する地盤高にはそれぞれの高さを入力した。沈下量0.1mを考慮するため全ての地盤高を0.1m低く補正した。氾濫計算に際しては10m格子データを作成し、各格子の粗度係数は式(3)を用いることにより建物占有率を考慮した¹³⁾。

$$n^2 = n_0^2 + 0.02 \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times h^{\frac{4}{3}} \quad (3)$$

ここに、 n : 粗度係数、 n_0 : 底面粗度係数、 θ : 建物占有率、 h : 水深。

対象範囲では建物以外の多くを道路が占めることから $n_0=0.047$ とし、使用ソフトが浸水深に応じて粗度係数を変更することができないため、浸水域の平均的な水深を試算によって確認し $h=0.3\text{m}$ として粗度係数を計算した。

初期水位を0.00mとして、図-8に示した想定津波水位を亀島川の上流側および下流側に与え、津波到達時から300分経過後まで計算を行った。なお、氾濫計算ではポンプ等の雨水排水施設は考慮していない。また、計算を行った地域では様々な地下空間利用が行われているが、計算において地下空間への浸水は考慮していない。

図-10に津波到達100分後、110分後、120分後の浸水深を100m格子と共に示した。(a)に示した100分後では亀島川から約300m離れた位置までが浸水範囲となり、約100m離れた位置に大きな浸水深がみられる。また、地下に位置する東京メトロの茅場町駅と八丁堀駅、JR京葉線八丁堀駅が浸水範囲に含まれている。(b)の110分後では(a)と比べて100m程度浸水範囲が広がり西端は周辺地盤より低い位置にある首都高都心環状線に到達する。また、大きな浸水深が亀島川から約300m離れた位置にみられる。(c)の120分後は(b)と比べて浸水範囲は大きくは変わらないが首都高都心環状線の浸水深が大きくなっている。

図-10 津波氾濫予測(浸水深)

図-11 津波氾濫予測（最大浸水深）

図-11に津波到達180分後の最大浸水深を示した。この時点の最大浸水深は首都高都心環状線における3.7mであり、浸水深0.05m以上の範囲は0.64km²となっている。浸水範囲についてみると図-10の(c)と比べて亀島川の東側は広がっているが亀島川の西側は大きくは変わらない。津波到達300分後の浸水範囲は0.65km²であり180分後とほとんど変わらないものの首都高都心環状線における最大浸水深は4.8mと大きくなる。

浸水範囲ではビルの地下等についても様々な利用がされており、こうした場所への浸水によって大きな被害が生じる可能性がある。

5. まとめ

東京都心部を流れる神田川、日本橋川、亀島川を対象に、今後発生が想定される巨大地震に伴う津波に対する河川水位の変化を計算し、水位が堤防を越える区間の周辺を対象に氾濫計算を行った。これらの計算をもとに考察した結果、以下の知見を得た。

津波による中小河川の水位変化を一次元不定流計算により良好に再現することが可能である。本解析では多くの河川や分水路から構成される比較的複雑な区間を対象としており、他の中小河川においても同様の方法で十分な再現性を得ることができると考えられる。また、感潮域の洪水計算では流入量把握の問題から水理計算に用いる粗度係数の妥当性を検証することは難しいが、津波に対する再現計算では平時時の流量を考慮すればよいので、適切な粗度係数の設定が容易である。感潮域の中小河川においては粗度係数の検証を目的として津波に対する再現計算を行うことは有用だと思われる。

想定津波に対して亀島川の2つの水門を閉鎖した場合、氾濫は生じない。津波対策において水門機能の維持管理

は極めて重要であり、巨大地震発生時に想定される様々な障害に対して機能が失われない対策を講じることが望まれる。

想定津波に対して亀島川の水門を閉鎖できなかった場合、亀島川周辺で氾濫が生じる。浸水範囲では地下空間利用が多く行われていることから、地下空間においては津波による浸水も考慮することが望まれる。

今回検討を行った神田川、日本橋川、亀島川以外の中小河川においても津波氾濫が生じる可能性がある。特に地下空間利用が行われている都市部においては地震に対する安全性や防災対策を検討する際に、周辺を流れる中小河川について地震津波の影響を十分に考慮することが必要だと考える。

参考文献

- 1) 東北地方太平洋沖地震を踏まえた河口堰・水門等技術検討委員会：東日本大震災を踏まえた堰・水門等の設計、操作のあり方について、pp.6-14, 2011.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，2011.
- 3) 国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所：記者発表資料 平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震における荒川下流管内の被災状況について(とりまとめ)，2011.
- 4) 東京都防災会議：首都直下地震等による東京の被害想定報告書，pp.2-42～2-74, 2012.
- 5) 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告），巻末資料，2012.
- 6) 南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等（第二次報告）及び被害想定（第一次報告）について，資料1-2 都府県別市町村別最大津波高一覧表＜満潮位＞，2012.
- 7) 東京都土木技術センター：神田川他流量観測等調査委託報告書，2008.
- 8) 増田信也，高崎忠勝：神田川流域における粗度係数の実態，平成16年東京都土木技術研究所年報，pp.171-186, 2004.
- 9) 高崎忠勝，河村明，天口英雄：ニューラルネットワークによる都市中小河川感潮域の水位推定，水工学論文集，第55巻，pp.S1603-S1608, 2011.
- 10) 南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）津波断層モデル編ー津波断層モデルと津波高・浸水域等についてー計算結果集（津波高等），pp.97, 2012.
- 11) 南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）強震断層モデル編（別添資料）ー液状化可能性、沈下量についてー，pp.25, 2012.
- 12) 東京都港湾局：平成24年東京港24時間潮位表，2012.
- 13) 建設省土木研究所：氾濫シミュレーション・マニュアル（案），pp.12-14, 1996.

(2012. 9. 30受付)