貞山運河による津波減災効果に関する数値的検討

Numerical examination on Tsunami Mitigation Effect of Teizan Canal

新美達也¹・川崎浩司²・馬淵幸雄¹・長山恒紀³・辻 貴仁¹・大家隆行¹・松田和人⁴

Tatsuya NIIMI, Koji KAWASAKI, Yukio MABUCHI, Koki NAGAYAMA
Takahito TSUJI, Takayuki OIE and Kazuto MATSUDA

Video images taken in the 2011 Tohoku Earthquake qualitatively showed that the Teizan canal has a potential for the reduction effect of tsunami disaster. The main purpose of this study is to examine the tsunami mitigation effect of the Teizan canal numerically with the numerical wave flume “CADMAS-SURF”. The numerical results revealed that the present Teizan canal has some effects on tsunami disaster reduction, such the time delay of tsunami run-up and the decrease of inundation depth. The prevention and mitigation functions of the canal for tsunami disaster were confirmed to go up by increasing the height of the dike and the width of the canal. Furthermore, the tsunami mitigation effect of the canal was found to be more efficient for small-scale tsunami than large-scale tsunami.

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は、未曾有の大津波を発生させ、東北地方を中心とした広範囲に被害をもたらしたことは記憶に新しい。宮城県仙台平野においても、大津波の来襲により沿岸域では多くの人命・財産が失われた。一方で、図-1に示すような、宮城県を阿武隈川から北上川まで縦断する水路、通称「貞山運河」が津波の緩衝となり、津波の遡上時間の遅延、遡上速度の低減、遡上距離の短縮といった津波減災に寄与する効果があったことが、当時の映像等から確認されている。しかし、運河復旧時の断面諸元設定に際しての詳細な水路の津波減衰効果についてはこれまで議論されていないのが現状である。

本研究では、浅海・極浅海域での波浪変形を高精度に解析可能である数値波動水路CADMAS-SURF（断面二次元モデル）を用いて、貞山運河による津波の減災効果について数値的に検討することを目的としている。

2. 数値計算の概要

本研究では、数値波動水路CADMAS-SURF（沿岸開発技術研究センター，2001；沿岸技術研究センター，2008）を用いて津波の遡上計算を行った。

(1) 検討対象位置

検討対象位置は、別途実施した平面2次元津波解析において、流速が比較的速く、広範囲に遡上した範囲として、図-2に示す仙台空港周辺を検討対象位置として設定

図-1 貞山運河

した。図-3に、CADMAS-SURFで使用した計算断面図を示す。

(2) 解析条件

a) 入射波の設定

入射波については、平面2次元津波計算の結果から得られた津波水位、及び津波波形から非線形性を考慮した津波の流速分布を設定した。紙面の都合上、図示しないが再現性については確認している。

b) 設定条件

CADMAS-SURFの主な設定条件を表-1に示す。ここで、

1 正会員	修(工)	パシフィックコンサルタンツ(株)
2 正会員	博(工)	名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
3	修(工)	宮城県土木部河川課
4	修(工)	パシフィックコンサルタンツ(株)

図-2 平面2次元津波解析による最大流速分布と検討位置

図-3 検討断面のモデル図

表-1 解析条件一覧

計算時間	間隔 Δt	$10^{-5} \sim 0.1s$
	終了時刻	5500s
造波方法	造波モデル	造波ソース
格子間隔	x方向	$\Delta x = 0.50$ (貞山運河周辺) $\sim 10.00m$
	z方向	$\Delta z = 0.25$ (貞山運河周辺) $\sim 2.00m$
差分スキーム	DONORパラメータ	0.8
TimerDoor法	気泡上昇量	0.2m/s
	水滴落下速度	自由落下
境界条件	速度・圧力	対数則による粗面を設定
	VOF関数F	フリー条件

DONORパラメータは差分のパラメータであり、1.0に近づくとも一次風上差分、0.0に近づくとも2次中心差分となる。本検討では津波の進行性の性質を踏まえ、0.8と設定した。

速度と圧力については、対数則による粗面となる境界条件を設定した。

3. CADMAS-SURFによる津波遡上計算の再現性

(1) ビデオ解析による津波の進行速度との比較

宮城県 (2013) によると、ビデオ解析 (毎日新聞社提供の空撮) に基づく津波の進行速度は、図-4に示すように、貞山運河の海側で9.2m/s、運河内で1.6m/s、運河の陸側で4.5m/sと算出された。

一方、CADMAS-SURFにより浸水深が0.2mとなった時間を津波の遡上時間と定義し、海岸線から対象地点までの距離を遡上時間で除することにより津波の遡上速度を算出した結果を図-4と図-5に示す。計算結果は、貞山運河の海側で8.3m/s、貞山運河内で4.5m/s、貞山運河の陸側で4.8m/sと概ねビデオ解析の結果と近い傾向を示している。しかし、貞山運河内においては、CADMAS-SURFの速度が速くなっている。その理由として、現地では運河の縦断方向にも津波が移動するのに対して、CADMAS-SURFでは平面的な広がりによる影響を考慮していないことが考えられる。

図-2に示した平面2次元津波解析によると、海岸線から内陸2km程度まで流速は7~9m/sとなっており、図-5に示すCADMAS-SURFの計算結果も同程度で、平面2次元津波解析との整合がとれている。しかし、海岸線から2km以上の内陸部では、平面2次元津波解析では5m/s未満となっているが、CADMAS-SURFでは顕著な低減はみられない。上述したように、平面2次元津波解析では、津波が遡上につれて平面的に広がることにより、流速が低減される。しかし、CADMAS-SURFは断面2次元場を対象としているため、平面的な効果を考慮することができずに過大評価となったと推察される。別の理由として、

図-4 津波の遡上速度の比較

図-5 CADMAS-SURFによる津波の遡上速度

底面粗度係数を設定できないことの影響も考えられる。

4. 東日本大震災時における運河の減災効果

(1) 津波の遡上時間の遅延効果

海岸線からの各距離における津波の遡上時間（浸水深が0.1mとなった時間と定義）と遡上速度について、貞山運河の有無別に解析した結果を図-6に示す。同図より、貞山運河の効果により遡上速度が運河背後において減少し、津波の遡上時間が遅延しているのがわかる。特に、運河背後においては平均で17sの遅延効果が認められる。

(2) 津波の浸水深の低減効果

沿岸からの距離と津波の浸水深を図-7に示す。運河より陸側においては浸水深が約0.1～0.2m程度低減していることが確認できる。津波の遡上距離については、仙台東部道路まで達しており、両ケースの差異はみられない。

5. 運河の形状による津波減災効果

東日本大震災時の大津波を対象として、貞山運河の形状を嵩上げ及び拡幅した場合の運河による津波の抑制効果について検討する。

(1) 計算ケース

計算ケースは、貞山運河の無い場合、現況地形の場合、図-8に示す計画1～3の運河形状の場合（海側・陸側の二重堤）で、計5ケースとした。ここで、計画1は運河を現在の位置で嵩上げた場合、計画2は海側に拡幅した場合、計画3は海側に拡幅及び嵩上げた場合である。

(2) 津波の遡上時間の遅延効果

図-9は、沿岸からの各距離における津波の第1波の遡

図-6 津波の遡上時間と遡上速度

図-7 運河の有無による浸水深の違い

図-8 検討ケース図

図-9 沿岸からの距離と第1波の遡上時間

上時間を示す。現況と比べて、各ケースともに遡上時間が長くなることがわかり、運河による一定の効果が確認できるが、現況と計画2の差は殆ど無く、運河断面の拡幅による効果はほとんどないことがわかり、計画1と計画3の結果から、津波の遡上を遅延させるためには運河を嵩上げすることが有効であることが明らかとなった。

(3) 津波の浸水深の低減効果

沿岸からの距離と浸水深について各ケースの計算結果を図-10に示す。同図から、運河がある場合は、運河なしの場合と比べて全体的に浸水深の低減が確認できるが、その差は小さい。計画3については、運河背後から内陸部の800～1500mの位置まで浸水深が0.6m程度低減していることがわかる。

6. 小規模津波時の運河による津波の低減効果

東日本大震災級の大津波に対しても、運河による津波遡上の遅延効果や浸水深の低減効果が確認できた。ここでは、大津波より発生確率の高い小規模な津波に対しての運河の効果について検討する。

図-10 沿岸からの距離と浸水深

(1) 計算ケース

計算ケースは先に述べたケースと同様とし、対象津波は東日本大震災級の10mから、明治三陸地震津波より若干大きい7mまでを1mビッチの4ケースを実施した。

(2) 津波遡上の遅延時間について

海岸線から1.5km遡上するまでの時間（浸水深が0.1mとなった時間と定義）を遡上時間と定義し、津波高及び運河形状による効果の違いについて図-11に示す。同図より、現況の運河ありのケースでは、東日本大震災級の津波高10mの場合、17sの遅延効果であったが、堤防を嵩上げた計画1及び3では、2倍程度の遅延時間となることからわかる。また、津波高が小さくなるにつれて、運河の津波低減効果が大きくなり、津波高が7mのとき、10mの場合の3～4倍程度の遅延時間となることが明らかとなった。

(3) 津波の遡上距離について（第1波の到達距離）

第1波の到達距離を遡上距離と定義し、津波高及び運河形状による効果の違いについて図-12に示す。東日本大震災のような大規模津波に対しては、遡上距離の短縮効果は認められないが、津波高が8m以下となると、遡上距離の短縮が確認できる。また、計画1及び計画3の結果をみると、津波高7～8mに対しては、遡上距離が0.5～1km程度短縮され、運河による津波減災効果が確認できる。

図-11 津波高別の運河による津波遡上の遅延時間

図-12 津波高別の津波の遡上距離

(4) 運河周辺における流速の計算

以上のように、運河形状と津波高によっては運河による津波減災が期待できることがわかった。ここでは、運河による津波遡上時間の遅延効果（遡上速度の低減、遡上時間の遅延）及び浸水深の低減効果のメカニズムについて把握するために、運河内の流速に着目し、解析を行った。

a) 解析ケース

計算ケースは、現況地形及び対策工として効果の高い計画3の2ケースとした。計算断面は図-13に示すとおりである。また、津波高は東日本大震災級の津波高10と小規模津波の7mの2ケースとした。

b) 運河背後域における流速について

図-14に、津波高10mの場合の津波が現況の運河を通過した直後及び通過4分程度経過後の流速の空間分布を示す。同図から、運河を通過した直後は海側の運河背後で激しい流れと渦が発生していることがわかる。この傾向は、別途実施した模型実験においても同様の流況を確認している。また、津波が遡上中においても、運河内で大きな渦が形成されている。

津波高10mに対して、計画3の運河と現況運河の背後陸側約100m ($x=900\text{m}$)の地点における流速の時系列を図-15に示す。両ケースともに、津波の来襲に伴い、流速が8m/sまで急速に上昇し、その後、10分程度で徐々に低減している。したがって、東日本大震災のような大津波については、運河背後における流速の低減効果は小さいといえる。しかし、流速の時間的変化に着目すると、現況運河においては瞬間的に流速が増加するのに対し、計画3では若干緩やかに大きくなっていることがわかる。計画3では、拡幅により運河の容量が増加し、津波の瞬間的な越流量が減少したためと考えられる。一方で、越流の開始時においては、計画3の流速の方が大きい。これは、堤防の嵩上げに伴い、越流時に加速したことが要因と推察される。津波がピークを超えると、 $t=4700\text{s}$ 以降で、現況運河の流速値と逆転している。

津波高を7mと小規模とした場合を図-16に示す。津波高7mの場合、津波の来襲に伴い、流速が計画3で5m/s、現況で6m/s程度まで急速に上昇し、その後、8分程で

図-13 解析ケース

図-14 現況の貞山運河周辺における流速分布

図-15 運河背後における流速（津波高10mの場合）

図-16 運河背後における流速（津波高7mの場合）

徐々に減少していることが確認できる。流速の発生時刻については、計画3の場合、1分程度遅れるとともに、流速値についても現況と計画3では1m/s程度小さくなることが確認され、大津波の場合と比べて運河の効果が相対的に大きくなることがわかる。

以上より、今次津波級に対しては運河の流速の低減効果は小さいものの、津波高7m程度の小規模津波に対しては、流速を1m/s程度低減させる効果が期待でき、この流速の低減が津波の遡上時間、遡上距離や浸水深を抑制

しているといえる。

7. おわりに

東日本大震災のような大津波に対しても、貞山運河によって、15秒程度の津波遡上の遅延、0.1～0.2m程度の浸水深の低減が明らかとなった。運河の形状によっては、減災効果がより一層期待できる可能性があることを示した。特に、運河の堤防高を高くすることが有効であり、運河を拡幅しても低減効果が小さいことが判明した。さらに、東日本大震災級の津波に対する津波低減効果は小さいものの、発生確率の高い小規模津波に対しては、1分以上の津波遡上の遅延効果、1km程度の遡上距離の短縮が期待されることが示された。そして、これらの効果は、運河背後の流速が低減することが要因であることがわかった。

以上のように、貞山運河は、津波減災に寄与可能な施設であると評価でき、運河の形状によっては防災機能を高めることが可能であるといえる。

謝辞：最後に、本研究は宮城県及び毎日新聞社より膨大なデータを提供いただいた。ここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 沿岸開発技術研究センター（2001）：CADMAS-SURF数値波動水路の研究・開発，457p.
- 沿岸技術研究センター（2008）：CADMAS-SURF実務計算事例集，368p.
- 宮城県（2013）：貞山運河津波減衰効果検討業務 報告書