

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	浮上式防潮堤の狭小隙間部から流入する津波・高潮流量の評価手法
Title(English)	METHOD OF ESTIMATING INFLOW DISCHARGE CAUSED BY TSUNAMI - STORM SURGE THROUGH THE NARROW GAP OF A FLOODGATE
著者(和文)	高木 泰士, 富安 良一, 荒木 健人, 松原 恭博, 真野 泰人, 巖 峰, 鈴木 正道, 石原 一郎, 森 勇造, 永瀬 翔平, 中村 友哉
Authors(English)	Hiroshi TAKAGI, Ryoichi TOMIYASU, Taketo ARAKI, Yasuhiro MATSUBARA, Yasuhito MANO, Hou GEN, Masamichi SUZUKI, Ichiro ISHIHARA, Yuzo MORI, Shouhei NAGASE, Tomoya NAKAMURA
出典(和文)	土木学会論文集B3 ( 海洋開発 ), Vol. 73, No. 1, pp. 35-42
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 73, No. 1, pp. 35-42
発行日 / Pub. date	2017, 6
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2017 Japan Society of Civil Engineers.

# 浮上式防潮堤の狭小隙間部から流入する 津波・高潮流量の評価手法

高木 泰士<sup>1</sup>・富安 良一<sup>2</sup>・荒木 健人<sup>3</sup>・松原 恭博<sup>4</sup>・真野 泰人<sup>5</sup>・  
巖 峰<sup>6</sup>・鈴木 正道<sup>7</sup>・石原 一郎<sup>8</sup>・森 勇造<sup>9</sup>・永瀬 翔平<sup>10</sup>・中村 友哉<sup>11</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
E-mail: takagi@ide.titech.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 協同エンジニアリング株式会社 (〒870-0876 大分県大分市大字三芳1238-1)  
E-mail: tomiyasu@kyodo-cec.co.jp

<sup>3</sup>正会員 協同エンジニアリング株式会社 (〒870-0876 大分県大分市大字三芳1238-1)  
E-mail: araki@kyodo-cec.co.jp

<sup>4</sup>正会員 協同エンジニアリング株式会社 (〒870-0876 大分県大分市大字三芳1238-1)  
E-mail: matubara@kyodo-cec.co.jp

<sup>5</sup>株式会社センク21 (〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町2-10-9)  
E-mail: mano@senc21.jp

<sup>6</sup>株式会社ネポクコンサルタント (〒213-0033 神奈川県川崎市高津区下作延5-3-3)  
E-mail: genhou@nepoch.com

<sup>7</sup>正会員 オリエンタル白石株式会社 (〒135-0061 東京都江東区豊洲5-6-52)  
E-mail: masamichi.suzuki@orosc.co.jp

<sup>8</sup>中外テクノス株式会社 (〒733-0013 広島県広島市西区横川新町10-21)  
E-mail: i.isihara@chugai-tec.co.jp

<sup>9</sup>日本防蝕工業株式会社 (〒810-0013 福岡県福岡市中央区大宮1-4-34)  
E-mail: mori@nitibo.co.jp

<sup>10</sup>八千代エンジニアリング株式会社 (〒111-0053 東京都台東区浅草橋5丁目20-8)  
E-mail: sh-nagase@yachiyo-eng.co.jp

<sup>11</sup>東京工業大学大学院 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
E-mail: nakamura.t.bc@m.titech.ac.jp

津波到達の直前に港を閉鎖する技術として垂直浮上堤やフラップゲートが注目を集めている。開口部を複数ゲートで締め切る場合、ゲート間で隙間が生じるため、ある程度の港内流入が避けられないが、その幅は狭小であるため広域の津波解析に含めることは難しい。本研究ではモデル津波に対して2D-3Dハイブリッド流体解析を行い、隙間内とその周囲の水位・流速を分析し、流入流量変換式  $Q = \alpha \sqrt{2gh} d W$  を導いた。ここで、 $Q$  は流量、 $g$  は重力加速度、 $h$  は港内外の水位差、 $d$  は水深、 $W$  は隙間幅である。 $\alpha$  は流量係数で数値解析に基づく回帰式より求まる。レベル1津波と潮汐の合成入力波及び高潮に対する試計算を行い、本変換式を用いることで、計算負荷の大きい数値解析に頼らず、表計算ソフトでも精度良く港内の水位変化を計算できることを示した。

**Key Words** : floodgate, gate gap, tsunami, storm surge, inflow discharge, numerical simulation

## 1. はじめに

2011年東日本大震災で発生した津波に対して、漁港や

港湾を守る防波堤が存在したことで、背後地域で人命の生存率が有意に高まった可能性を示す研究成果が発表されるなど<sup>1)</sup>、防波堤の津波被害軽減効果が注目を集めて

いる。しかし、一般論として、津波防波堤ではない通常の防波堤は風波に対して設計されるものであり、もともと津波を想定しているわけではない。したがって津波抑止効果を過度に期待することはできない<sup>2)</sup>。一方で、漁港や港湾の防波堤開口部を津波到達の直前に閉鎖あるいは開口部を十分に狭くすることで、港内および背後地の浸水深を大幅に軽減できることが数値シミュレーションに基づく検証で明らかになっており<sup>2,3)</sup>、静岡県焼津漁港や和歌山県下津港海岸では浮上堤の実証試験が行われている<sup>4,5)</sup>。

国内で津波浮上堤の研究開発は10年以上も前から進められているが、開発が本格化したのは、東日本大震災以降と比較的最近になってからである。一方で同様な技術は、主に高潮に対する防潮施設として諸外国では開発が進み、建設が完了し稼動している場所も多い。例えば、米国・スタンフォード湾ではハリケーン来襲時に湾を締め切るためのフラップゲートが1960年代に設置されている<sup>6)</sup>。イギリス・ロンドンの Thames Barrier やドイツの Ems Barrier では垂直回転式ゲートが建設されている<sup>7)</sup>。また、イタリアではモーゼプロジェクトが進行中で、78機のフラップゲート(図-1)を配置して3mまでの高潮に対して、水の都ベネチアを防護する計画である<sup>8)</sup>。

複数のゲートで同時に締め切る浮上式防潮堤の場合、機構的な理由や施工上の理由により、図-2に例示するようにある程度の隙間が生じる。通常のケーソン式防波堤や護岸でも隣り合う函体間で数センチ程度の目地が存在するが、浮上式の津波防潮堤の場合は、地震による地盤変動やそれに伴う構造体の変形も考慮する必要があるため、さらにその分の余裕も必要となる。

わずかであっても津波や高潮時にはその隙間を通じて海水が港内に向けて流れ込むため、その影響を浮上式防潮堤の検討時に確認しておく必要がある。津波や高潮の解析では、長波理論に基づくシミュレーションが使用されるが、その計算格子間隔は最も狭い領域でも通常数メートルから10メートル程度であり<sup>9)</sup>、防潮堤の狭小隙間部を再現するには明らかに不十分である。隙間部を含めた解析を行うため、仮に10メートルの計算格子から1cmレベルの格子に接続することを考えた場合、3分の1間隔での接続では、さらに6回ほどネスティングを繰り返す必要があり、津波波源域や台風暴風域を包含する広領域(通常、格子間隔数百メートルから数キロメートル程度を設定)からの接続は計算負荷が大きく実用的ではない。

本稿では、浮上式防潮堤の狭小隙間部に関する各種の設計に役立つため、港外水位を流入流量に変換する式を導く。この算定式を用いることで、港外側で津波、高潮、潮汐などの水位変化を与えれば、計算負荷の大きい数値解析に頼らず、締め切った港内側での水位上昇を簡便な方法で評価できることを示す。



図-1 イタリア・ベネチアで建設中のフラップゲート (2016年7月筆者撮影)

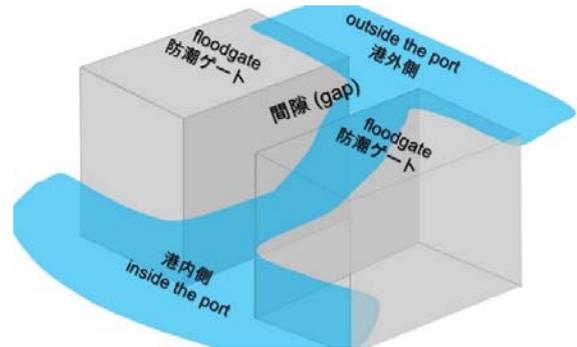


図-2 防潮堤隙間部を流入する津波や高潮のイメージ

## 2. 方法

ここでは、港外水位を港内流入流量に変換する算定式を導くために用いた条件や解析手法等について述べる。

### (1) モデル津波

東日本大震災後、想定津波は数十年から百数十年に一度発生が予想されるレベル1津波と数百年から千年に一度程度の頻度で発生するレベル2津波に分類されるようになった。レベル1については防潮堤など構造物で防ぎ、レベル2については土地利用や避難を含めて総合的に考えるというのが基本方針である<sup>10,11)</sup>。このうち本研究ではレベル1津波相当を検討対象とし、越流はしないが、防潮堤前面で急速に上昇する津波を再現するため、次式のガウス分布に従うモデル波形を入射波として考える。

$$\eta(t) = \eta_0 \exp(-(t-r)^2/r) \quad (1)$$

$\eta(t)$ は時間 $t$ における津波水位、 $\eta_0$ は津波高(m)、 $r$ は津波の立ち上がり時間(分)である。立ち上がり時間が短いほど、津波の波形が急峻となる。

津波高は1~4m、立ち上がり時間として3~7分を想定するとともに、流入流量と津波周期の関係性を確認するため、水位一定のケースについても検討を行う。図-3に想定した計16ケースの入力水位を示す。

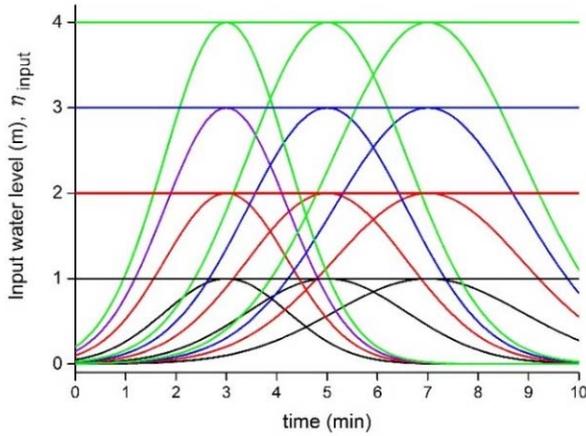


図-3 入力水位の例 (津波高1, 2, 3, 4m, 立ち上がり時間 3, 5, 7分および水位一定の計16波形)

### (2) 解析モデル

以降で示す解析には、オランダのDeltares (旧デルフト水理研究所) が開発したDelft3D FLOW<sup>12)</sup>を使用した。この流体解析モデルは2011年にオープンソース化されたため、本研究では東京工業大学所有のスーパーコンピュータTSUBAME2.5 (汎用CPUとGPU型アクセラレータにより単精度17PFLOPS)に移植し、並列解析により解析時間短縮を図った。

Delft3Dでは2次元、3次元の解析を行うことができる。2次元解析の場合は、津波や高潮の解析で一般的に用いられる非線形長波方程式モデルと同等になる<sup>13)</sup>。3次元解析では静水圧近似に基づいているため、国内で一般的に多層モデルと呼ばれる方法<sup>14)</sup>と同等と考えられる。この方法では、砕波など自由水面付近で多価関数になる激しい流体现象は再現できないが、鉛直方向の流速変化については評価できる。同モデルでは時間積分にはADI法が使用されており、移流項の空間差分にはCyclic法を使用した。その他、遡上計算に適したFlooding法も選択できるが、今回の検討では陸上への遡上問題は考えず、また3次元解析を行う必要があるためCyclic法を選択した。

### (3) 解析領域・条件

防潮堤隙間部では、短区間のうちに急縮、急拡を繰り返す水路断面となるため、津波が引き起こす流体運動もより一層複雑になる。特に、港内外で水位差が顕著な場合、隙間部で急流が発生し、それに伴い強い乱流場が形成される可能性もある。このような現象を再現するためには、隙間部を細かく3次元で表現するとともに、乱流モデルを組み込んだ解析を行う必要がある。一方で、港内側での水位変化や流動をあわせて解析するためには、数〜数十ヘクタールに広がる泊地を含める必要があるため、全ての解析領域を細かく3次元で再現することは、計算負荷の観点から困難である。

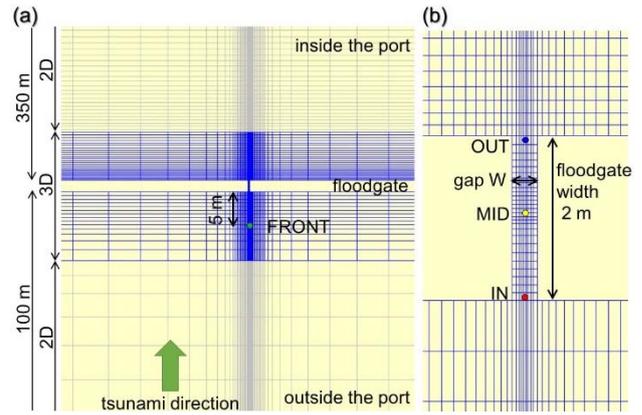


図-4 (a) 解析格子の接続 (港外および港内部: 2次元, 隙間部: 3次元) (b) 隙間部の詳細図. 防潮堤幅は2mを設定. 本図は隙間幅30cm, 隙間数1の例

そこで、本研究では図-4に示すように2次元と3次元のハイブリッド計算格子を作成し、防潮堤 (防潮ゲート) の周囲のみを詳細に3次元解析し、内外は若干粗い格子で2次元解析することとした。格子間隔は、流軸方向について隙間部で最小4cm、港外・港内で最大50cmへ可変していく格子を設定した。領域幅は215mとし、奥行き方向には港外部100m、防潮堤部20m、港内部350mの3領域を設定した。よって、港内面積として約75,000m<sup>2</sup> (7.5ha)を仮定したことになる。これは中規模程度の漁港の広さに相当する。水深は隙間部を含めて全て一定の5mとした。3次元の範囲では、この水深を鉛直20層に分割して解析を行った。

3領域相互の接続は領域分割法 (Domain decomposition method)<sup>12)</sup>による並列解析により行った。この方法は、解析対象となる領域を重なる部分のない小領域に分割し、各部分ごとに解析を行い、反復計算によって全体領域の解を求める方法であり、大規模解析に適している。時間ステップは、狭小な隙間部でも安定した解析を行うため十分に小さくする必要があるが、本研究では事前検討の結果をふまえて0.03秒に設定した。なお、この時間ステップであっても、次章で行う検討ではCFL条件で1を越える瞬間・場所が発生しうるが、Delft3DはADI法を採用しており無条件安定であるため、CFL=1を越えても安定的に解析可能である。但し、一応の目安として、CFL=10以下にするのが望ましいとされており<sup>12)</sup>、今回もこれを満足するように設定した。

防潮堤断面は既存のゲート式防潮堤の断面を参考に幅2m、高さは解析上越流を生じない条件として半無限壁を設定した。また、ゲート間の隙間幅は標準を30cmとし、比較のため入力水位4mのケースについては幅10cm、1mの条件でも解析を行った。なお、底面摩擦は港内外、隙間部ともにマンニングの粗度係数を0.025 (s m<sup>1/3</sup>)に設定し、乱流モデルとしてk-εモデルを使用した。

港外側の境界から図-3に示す計16パターンの水位を入力した。一方、港内側の境界は全て固定壁の条件とした。これは実際の岸壁の条件に類似しているといえるが、陸上への越流は生じない条件になっている。

### 3. 結果

防潮堤隙間部およびその前後での水位や流速変化の解析結果について検証するとともに、そこから導かれる流入流量算定式について述べる。

#### (1) 隙間通過時の水位と流速

図-5に防潮堤前後および隙間内の水位変化を示す。入射波は図-3に示す計16パターンであり、水位の透過率を示すため、防潮堤前面5m(図-4のFRONTと示されている場所)での水位に対する比を示している。隙間の中心線での水位をつないだ包絡線であり、津波の立ち上がり完了した時点、すなわちピーク時の結果である。但し、水位一定のケースは、開始5分後の十分に安定した時点における結果である。

全てのケースで水位が階段状に低下していく傾向がみられる。防潮堤前面で流速がほぼゼロの状態から隙間部に急激に流れ込むことで1回目の水位低下が起こり、次に港内へ流れが広がるときに2回目の水位低下が発生している。

同様に、図-6には断面平均流速の変化を示している。断面平均流速とは水平流速の鉛直平均値のことであるが、Delft3D FLOWでは自動的に計算される仕様になっている。流速は防潮堤前背面では小さな値であるが、隙間内部で顕著に流速が早まっている。津波高が1mのケースでは流速は1.5m/s程度、4mのケースでは6m/s近い流速が発生していることより、この範囲では津波高と流速がほぼ線形の関係にあることがわかる。図-5で津波水位が大きいほど隙間内での水位低減率も大きいのは、この区間では断面2次元方向の運動に限られるため、流速が速くなる分水位低下が余分に発生するためと解釈できる。なお、隙間幅30cmのケースでは、いずれのケースでも強い鉛直流が発生するような状況は見られず、層状の流れが卓越していると考えられる。

次に隙間幅の影響を確認するために、図-7を示す。ここでは、津波高4mのケースについて、隙間幅10cm, 30cm, 100cmの解析結果の比較を示している。港外側入口付近ではいずれのケースでも同じような水位低下の傾向を示しているが、出口付近では明らかに異なる挙動を示している。特に隙間幅10cmのケースでは水位が大きく低下し、その後直ちに回復しており、その変化は極めて急激である。併せて表示しているフルード数からわかるように、これは出口で跳水が発生するためと考えられ

る。但し、フルード数は最大でも2.5以下であり、弱跳水(weak jump)に分類される<sup>15)</sup>。この状態では比較的乱れが小さく、小規模のローラーは発達するが、下流側の動揺は小さいと考えられる。

30cmや100cmに広げたケースではこのような急激な変化は発生していない。また100cmの場合では2段階の水位低下も生じず、指数関数的な減衰を示している。このように一般的な傾向としては、隙間部を狭くするほど急激な水位変化が発生し、それに伴い乱流の影響が現れはじめるといえる。

#### (2) 流入流量変換式

流入流量を評価するためには、隙間内の鉛直測線を横切る流量を計測すればよい。ここでどの測線を考えるかであるが、選択肢としては3測線が考えられる。すなわち、図-4(b)に示す入口地点(IN)、中間地点(MID)、出口地点(OUT)である。本研究では中間地点(MID)を検査測線にとった。

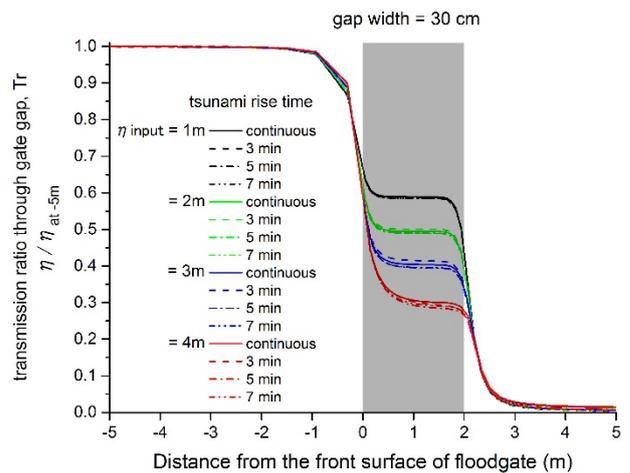


図-5 隙間部 (W=30cm) を通過する際の水位変化。図左側が港外側。グレーの塗りつぶしは防潮堤幅を示す。

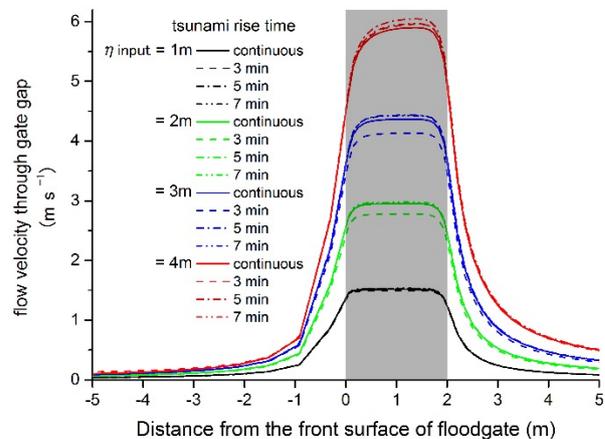


図-6 隙間部 (W=30cm) を通過する際の断面平均流速

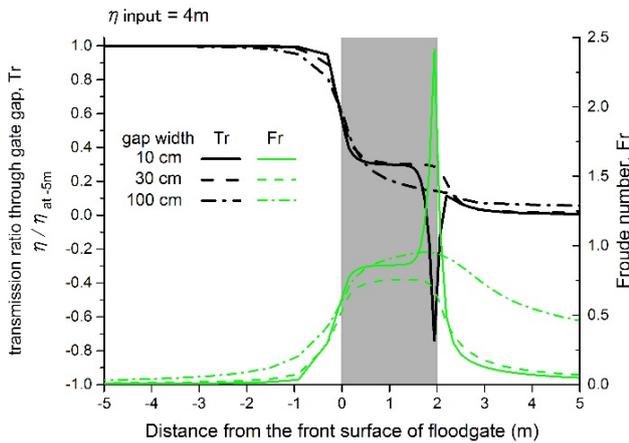


図-7 隙間幅と水位(左軸), フルード数(右軸)の変化

この理由は、図-5、図-6および図-7の各結果より、中間地点付近では水位と流速が一定値に近く、等流に近い状態が現れており、積分より求まる流量の誤差が3測線の中で最も小さいと考えられるためである。また隙間幅が10cmと狭く、跳水が起こる条件でも、この地点であれば流況が安定しており、流量が算出しやすい。定常流に近い場合理論的には隙間内のどの測線でも流量は同じといえるが、格子間隔に左右される積分誤差を極力減らすため、このように中央で計測することが望ましい。

津波の立ち上がり時間の影響については、図-5と図-6よりその影響は小さく、かつ水位を一定にしたケースとも大きな差異が見当たらないことがわかる。これは港内外での水位差は大きくても、今回対象とした3分程度以上の立ち上がり時間であれば、流線網の変化が比較的穏やかで、ポテンシャル流れに近い状態になっているためと考えられる。

このような考察に基づき、水位一定の解析ケースでの流量をもとに流量係数を算出することを考える。流量係数とは、幅広水路から狭小水路に流れ込む際に生じる種々の損失による流量低下を表す1以下の係数であり、次式で算定できる。

$$\alpha = q / \sqrt{2gh} d \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$  : 流量係数、 $q$  : 単位奥行きあたりの流量、 $h$  : 港内外での水位差、 $d$  : 隙間部の水深である。

流量 $q$ は隙間部の中間地点での水平流速を鉛直積分し求めることとし、 $h$ は港外側での入力水位と港内側の平均水位の差で代表する。

式(2)の流量 $q$ は隙間幅により変化するため、流量係数 $\alpha$ も隙間幅 $W$ の関数になる。図-8は、隙間幅10cmと30cmのケースについて、入力水位1~4mの範囲で流量係数を計算し、プロットしたものであり、次の回帰式で表すことができる。

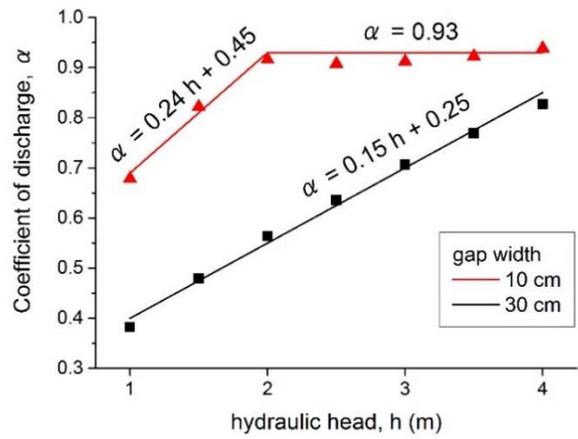


図-8 流量係数 $\alpha$ と港内外水位差 $h$ の相関 ( $1 \leq h \leq 4$ )

$W=10\text{ cm}$  :

$$h \leq 2: \alpha = 0.24 h + 0.45 \quad (3)$$

$$h > 2: \alpha = 0.93 \quad (4)$$

$W=30\text{ cm}$  :

$$\alpha = 0.15 h + 0.25 \quad (5)$$

水位差に比例して流量係数は大きくなるが、隙間幅10cmのケースでは水位差が2mを超えると跳水が発生し始め、下流側(港内外)の影響を受けにくくなるため、流量係数はほぼ一定になる。

なお、隙間幅10cmの場合で屈曲点が明瞭に現れる理由は、解析モデルが不完全跳水から完全跳水への遷移を滑らかに再現できていないためと考えられる。実際にはフルード数1を境に突然モードが変化する訳ではなく、その前後で段階的に遷移していくと考えるのが妥当である。この再現のためには、自由水面や潜り流出に伴う複雑な乱れを考慮できるさらに高度な数値解析モデルを使う必要があるが、実務上は式(3)、(4)の区分を考慮しておけば十分と考える。

以上より、隙間幅 $W$ を流入する流量 $Q$ は次の算定式で簡単に求めることができる。

$$Q = \alpha \sqrt{2gh} d W \quad (6)$$

#### 4. 考察

式(6)の流量変換式を利用すれば、防潮堤前面の水位変化より間接的に港内への流入流量を算定できる。複数の箇所に隙間が存在する場合、その分の流量を掛け合わせれば全体流量が求まり、さらに港内面積で割れば水位上昇速度の平均値を計算することができる。この程度の計算は、表計算ソフトでも簡単に実行可能である。さらに、流入流量を移流拡散シミュレーションの境界条件として与えれば、港内の水位分布に加えて、流速分布も解

析することができ、港内に係留している船舶や養殖いかだへの影響や洗掘問題なども検討することができる。

(1) 津波および潮位に対する検証

ここではテストケースとして、東南海・南海地震（中央防災会議想定 2003 年モデル）をレベル 1 津波として、大分県内の港を想定し検討した。入力波形は関係機関から入手した地震後 6 時間の津波波形（最大津波高 1m 程度）に、潮位変動（周期 12 時間、振幅 1.2m）を加えたものである。潮位変動は地震発生時を平均潮位として、そこから 3 時間後に満潮を迎えるように設定した。また、隙間は 30cm とし、防潮堤沿いに 15m 間隔で合計 5 箇所配置した。したがって、これを 15m/函の防潮堤 6 函の並び（延長 90m）に、隙間 5 箇所が配置されている状況と考えると、約 1.7%の開口率になる。

数値解析での格子は図-4 と同一としたが、ここでは隙間部を含めて全て Delft3DFLOW の 2 次元解析で行ったため、非線形長波方程式による結果と同等になる。また、流量変換式に基づく港内平均水位の計算については、簡単に求められることを示すため市販の表計算ソフトを使用して行った。

図-9 に解析結果を示す。港外での入力波形に対する港内側の水位変化が示されている。入力波形の擾乱が 6 時間後以降消滅しているのは、単に入力津波が 6 時間で終了しているためである。数値解析は防潮堤港内側 50m での出力結果、流量変換式は港内での平均値である。図-7 より、防潮堤背面 4、5m 地点ですでに水位が安定していることがわかるが、さらに十分な余裕をとり、背面 50m を数値解析の出力地点とした。より厳密に評価するためには流量変換式の扱いに合わせて港内水位の空間平均値を算出する必要がある。しかし、図-9 のケースに対して、背面 50m と 350m 地点での水位差を比較したところ、その差は最大でも 2cm 以下であったため、実務上は 50m 地点を代表地点にしても支障は無いと考えられる。

両手法による水位変化は、全体的によく一致している。特に、津波が港内側に瞬時に伝わるのではなく、隙間がある種のフィルタリング効果を果たし、短周期の急激な水位上昇が抑えられて、じわじわと水位が上昇していく様子が流量変換式でも再現できている。また、引き潮時の水位低下の傾向もよく一致している。若干の差異が生じるのは、数値解析ではわずかではあるが港内の水位に空間的分布が生じるためと考えられる。

ここで開口率が 2%にも満たない条件でも、潮汐はあまり減衰せずに伝播することは、浮上式防潮堤の評価に狭小隙間部の評価が不可欠であることを意味している。また、基部の防波堤（浮上式防潮堤の両サイド）が 1 函でも津波により滑動・転倒するような事態が生じれば、そこから津波が伝播してしまうため、浮上式防潮堤が意

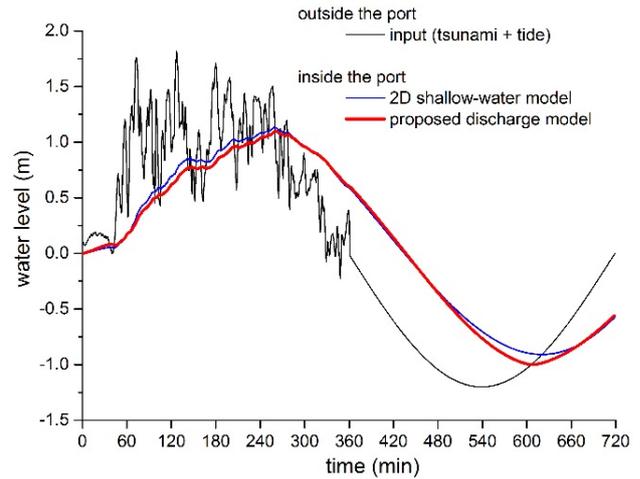


図-9 津波・潮汐の合成入力波と港内水位の解析結果（黒：港外入力波形、青：数値シミュレーションによる結果、赤：提案した流量変換式を使って、表計算ソフトで算出した結果）

味をなさなくなる。よって、浮上式防潮堤の評価は、周囲の既設構造物を含めて検討されるべき問題といえる。

なお、先の流量係数の算出には 2D-3D ハイブリッドモデルを活用したが、今回の結果より非線形長波モデル（2D モデル）であっても再現精度は十分に高いことがわかった。この理由は港内外および隙間部の水深を全て一定に設定したため、鉛直方向に顕著な乱れが発生せず、断面平均流速で流入流量が概ね評価できたためと考える。これに対して、隙間部で大きな段差があったり、港内流入を軽減する目的のためシルや堰を設ける場合には、鉛直方向への流速分布に有意な変化が生じると考えられるため、そのようなケースで流量係数を算定する場合は、3次元解析を併用する必要があると考える。

数値解析はスーパーコンピュータ Tsubame2.5 により実施したが、今回のテストケースでは約 22 時間を要した。これに加えて、数値解析のために必要な準備時間を考えると、このような簡易的な変換式を使った流量評価の実務的な価値は高い。

(2) 高潮に対する検証

次に高潮に対するモデルの適用性を確認するため、2001 年 9 月に発生した台風 15 号（Danas）を取り上げる。この台風がもたらした高潮は、東京湾では過去 40 年で最大と考えられている<sup>16)</sup>。図-10 の入力波形は気象庁晴海験潮所で観測された水位偏差を用いて仮定した高潮波形であり、最大偏差は 1.3m 程度である。第一波目が台風接近時の吸い上げや吹き寄せに伴う主たる水位上昇で、続く第二、第三波目が副振動に起因する水位上昇と考えられる。2013 年にフィリピンにおいて発生した台風 Haiyan では 10 分程度で急激に水位が上昇する状況が確

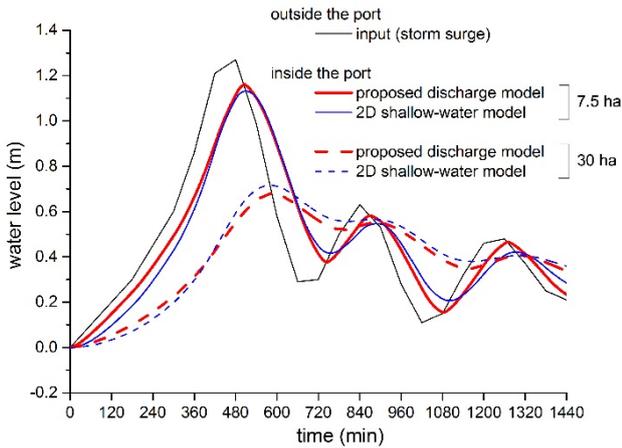


図-10 高潮に対する港内水位の解析結果（黒：港外入力波形，青：数値シミュレーションによる結果，赤：提案した流量変換式を使って，表計算ソフトで算出した結果．実線は港内面積 7.5ha，破線は 30ha のケース）

認されているが<sup>17,18)</sup>，国内ではこのような津波に匹敵するような急激な高潮はこれまでのところ報告されていない。したがって，今回のモデル波形のように数時間かけてじわじわと上昇・下降を繰り返す高潮を対象に検証するのが適当と考える。

この高潮の検討では，隙間の配置条件は 7.5ha のケースと同一で（隙間幅 30cm，5箇所），港内面積を 30ha と一回り広く設定した条件についても解析を行っている。数値解析と流量変換式による港内水位は両ケースともによく一致しており，高潮にも本手法が活用できることがわかる。

入力水位は 1 時間ごとのデータを使用したため所々角ばっているが，津波のケース同様，港内では水位変化が滑らかになっている。一方で高潮は継続周期が長く，津波で見られたようなピークの顕著な減衰は 7.5ha のケースでは確認できない。これに対して 30ha のケースでは最大水位が半減しており，広い港であれば高潮低減効果が高まることがわかる。但し，そのトレードオフとして，海水が滞留し，残留水位が高い時間帯が長引くため，港の再開が遅れる可能性があることには注意が必要である。

## 5. 結論

本研究では，浮上式防潮堤の隙間を通じて港内に流れ込む津波や高潮，潮汐による流入流量を評価するため，隙間部を高解像度で再現した2次元-3次元ハイブリッド流体解析を行った。解析の結果，港内外で水位差が大きい場合でも，通過断面の中心付近で，等流に近い流れの状態が現れることがわかった。また，立ち上がり時間が3分以上の入力波と水位一定のケースを比較し，立ち上がり時間の影響が小さいことを示した。このような考察をふ

まえて，隙間中心での積算流量と港外側の水位の関係を調べることで，流入流量変換式を導いた。その式で使う流量係数は，水位差を変数にとった回帰式で求めることができる。但し，隙間幅にも関係するため，本稿では幅 10cm と 30cm についてスーパーコンピュータを用いた数値解析を行い，隙間幅毎の回帰式を提示した。最後にレベル1相当の津波と潮汐の合成入力波および高潮に対する試計算を行い，この変換式を用いることで，高度な数値解析に頼らず，表計算ソフトでも精度良く港内の水位変化を算定できることを示した。

謝辞：本研究はJSPS 科研費(国際共同研究加速基金 16KK0121, 研究代表者：高木泰士)の支援を受け，浮上式防潮堤研究会の活動の一環として行われた。解析に当たっては大分県の助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Latcharote, P., Suppasri, A., Hasekawa, N., Takagi, H. and Imamura, F.: Effect of breakwaters on reduction of fatality ratio during the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, *J. Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 72, No.2, pp. 1591-1596, 2016.
- 2) Takagi, H. and Bricker, J.: Assessment of the effectiveness of general breakwaters in reducing tsunami inundation in Ishinomaki, *Coastal Eng. J.*, Vol. 56, No.4, 21p., 2014.
- 3) 小田勝也, 早川哲也, 直井秀市: 港湾における防波堤の津波対策効果に関する考察, *海岸工学論文集*, Vol. 52, pp. 291-295, 2005.
- 4) フラップゲート式可動防波堤開発グループ: フラップゲート式可動防波堤実海域試験 (最終報告書概要版), 22p., 2013.
- 5) 中島晋, 高山知司, 小原恒平, 河崎尚弘, 黒川文宏, 小野寺隆柔: 津波防御に向けた直立浮上式防波堤の性能設計, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.67, No.2, pp. 786-790, 2011.
- 6) US Army Corps of Engineers: Stamford Hurricane Protection Barrier, <http://www.nae.usace.army.mil/Missions/Civil-Works/Flood-Risk-Management/Connecticut/Stamford-Hurricane-Barrier/>
- 7) Dircke, P. T. M., Jongeling, T. H. G. and Jansen P. L. M.: An overview and comparison of navigatable storm surge barriers: *32nd Annual USSD Conference New Orleans, Louisiana*, pp. 65-87, 2012.
- 8) MOSE: <https://www.mosevenezia.eu/>
- 9) 国土交通省: 津波浸水想定の設定の手引き Ver. 2.00, 2012.
- 10) 牧紀男: 復興の防災計画, 197p., 鹿島出版会, 2013.
- 11) Shibayama, T., Esteban, M., Nistor, I., Takagi, H., Nguyen, D. T., Matsumaru, R., Mikami, M., Aranguiz, R., Jayaratne, R. and Ohira, K.: Classification of tsunami and evacuation areas, *Natural Hazards*, Vol. 67, No.2, pp. 365-386, 2013.
- 12) Deltares: Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual Delft3D-FLOW, 690p, 2011.

- 13) Takagi, H., Esteban, M., Mikami and T., Fujii, D.: Projection of coastal floods in 2050 Jakarta, *Urban Climate*, Vol.17, pp.135-145, 2016.
- 14) 柿沼太郎, 富田孝史, 秋山実: 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波の数値計算, 海岸工学論文集, Vol.50, pp. 286-290, 2003.
- 15) Chow V. T.: *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 680p., 1959.
- 16) 小西達男: 横浜港の海面変動の特徴について—その他の日本沿岸の海面変動との比較, 神奈川自然史資料, No.27, pp. 1-8, 2006.
- 17) Takagi, H., Li, S., de Leon, M., Esteban, M., Mikami, T., Matsumaru, R., Shibayama, T. and Nakamura, R.: Storm surge and evacuation in urban areas during the peak of a storm, *Coastal Engineering*, Vol. 108, pp. 1-9, 2016.
- 18) Bricker, J. D., Takagi, H., Mas, E., Kure, S., Adriano, B., Yi, C. and Roeber, V.: Spatial Variation of Damage due to Storm Surge and Waves during Typhoon Haiyan in the Philippines, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B2 (Coastal Engineering), Vol. 70, No. 2, pp. 231-235, 2014.

(2017. 2. 13 受付)

## METHOD OF ESTIMATING INFLOW DISCHARGE CAUSED BY TSUNAMI - STORM SURGE THROUGH THE NARROW GAP OF A FLOODGATE

Hiroshi TAKAGI, Ryoichi TOMIYASU, Taketo ARAKI, Yasuhiro MATSUBARA,  
Yasuhiro MANO, Hou GEN, Masamichi SUZUKI, Ichiro ISHIHARA, Yuzo MORI,  
Shouhei NAGASE and Tomoya NAKAMURA

Navigable floodgates such as flap gates and vertical lifting gates are attracting attention as effective countermeasures against tsunamis and storm surges, particularly after the Tohoku tsunami of 2011. A narrow gap between adjacent gate units would inevitably cause an intrusion of seawater into the port basin, which cannot be simply simulated using common tsunami models because the gap is too small to be reproduced in the model. The present study examines the water flow passing through a gate gap by applying a 2D-3D hybrid hydrodynamic model to derive the hydraulic head-to-inflow discharge conversion formula, which is defined as  $Q = \alpha \sqrt{2gh} d W$ , where  $Q$  is the discharge,  $g$  is gravitational acceleration,  $h$  is the hydraulic head,  $d$  is the water depth, and  $W$  is the gap width. The coefficient of discharge  $\alpha$  can be estimated by a linear regression, which varies with the gap width between the relevant floodgates. For example, the relationship  $\alpha = 0.15 h + 0.25$  was derived for the case where  $W = 0.3 m$ . The proposed model was verified through case studies in which a time series of hypothetical water levels composed of a Level 1 tsunami and tide or that of a storm surge alone was simulated for a medium-sized port. With this proposed method and given the water level outside the port, the water level rising over a port basin enclosed by floodgates and breakwaters can be calculated using a spreadsheet or other simple computational means that do not require complex models based on computational fluid dynamics.