

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	防波堤基礎捨石より流入する津波や高潮に関する水理実験および数値解析
Title	Hydraulic experiment and numerical analysis on tsunami/storm surge entering through breakwater mound
著者	高田 佳史, 高木 泰士
Authors	Yoshifumi Takata, Hiroshi Takagi
出典	土木学会論文集B3 (海洋開発) , Vol. 75, No. 2, pp. 7-12
Citation	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 75, No. 2, pp. 7-12
発行日 / Pub. date	2019, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 (c) 2019 Japan Society of Civil Engineers.

防波堤基礎捨石より流入する津波や高潮に関する水理実験および数値解析

高田 佳史¹・高木 泰士²

¹ 東京工業大学 環境・社会理工学院 修士課程 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: takata.y.ab@m.titech.ac.jp

² 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

港の開口部に可動式の水門や防波堤を設置し、津波・高潮襲来時に港内やその背後地域の被害を防ぐ技術に注目が集まっている。既設構造物と組み合わせて効果を発揮するため、可動部のみでなく、その周囲からの海水流入にも留意する必要がある。特に防波堤の基礎部分は捨石を積み上げた構造が多く、港内外に水位差が生じると捨石の間隙を通じて港内に海水が流入する可能性がある。しかし、基礎捨石を浸透する津波や高潮のリスクはこれまで十分に認識されておらず、流入流量の検討を行うための手法が確立されていない。本研究では防波堤・捨石模型を設置した小型水槽実験と OpenFOAM によるポーラスを配置した数値流体解析を行い、捨石部からの流入量について検討した。両者の比較を行い、非ダルシー則の係数として Ergun の推定式が適用できることを明らかにした。また、閉鎖した実物スケールの港を想定した試算では、基礎捨石より流入する津波や高潮が港内で有意な水位上昇をもたらすことを示した。

Key Words : tsunami, storm surge, breakwater mound, hydraulic experiment, numerical analysis

1. はじめに

平成23年東北地方太平洋沖地震において発生した津波は、青森県から千葉県までの広い地域に浸水被害をもたらした。特に岩手県、宮城県、福島県では事前に想定されていた高さを超える津波が襲来し甚大な被害を出した。この経験を教訓に我が国の津波対策が大幅に見直されることとなり、津波を数十年から数百年に1回という頻度で発生し高さは低いものの大きな被害をもたらすL1津波と、数百年から数千年に1回という極めて低い頻度ながら甚大な被害をもたらすL2津波の2つのレベルに分類する考え方が導入された。前者に対しては防波堤や防潮堤をはじめとする海岸構造物により津波の内陸への侵入を防ぐことで、沿岸住民の人命のみならず財産も守ることを目的とする「防災」対策を取り、後者に対しては沿岸住民の生命を守ることを最優先とし、経済的損失などについてはその軽減を図ることを目的とする「減災」対策を取るようになった。

構造物による津波対策としては、粘り強く耐えるように防波堤を改良することや防潮堤の嵩上げ・拡幅が代表的な対策と言える。一方、河口や港の開口部を可動式の水門や浮上式の防波堤・防潮堤で閉鎖する対策にも注目が集まっている^{1), 2)}。

陸上設置型で港を閉鎖する水門は、沼津港の大型展望水門 (図-1左) や兵庫県・由良港の小型水門 (同

右) など国内で多く設置されている。一方、海底設置型水門は実績が少なく、実用上の課題も残されているが、埋設した鋼管杭を浮上させる方式³⁾、フラップゲートを立ち上げる方式⁴⁾、ニューマチックケーソン内に収納した鋼壁を浮上させる方式⁵⁾などが提案されている。このうち、フラップ型については岩手県大船渡の漁港で建設が始まっている。

本来防波堤は港内への波浪の伝播を抑制し、静穏域を作り出すことを目的に設置されており、津波被害を抑えることは想定していない²⁾。したがって、水門や防波堤を港口に設置する場合、既設の防波堤を含めて港全体で津波を抑止できるか、詳細な検証が必要となる。例えば、ケーソン防波堤の場合、各函体の間にわずかであるが隙間が存在するが、そのような狭小な隙間からも海水は流入する⁶⁾。津波の周期が短い場合、流入量は限定的であるが、周期が長くなるにつれて、流入量は多くなっていく。高潮の周期は津波より長いいため、その影響はさらに顕著になると考えられる⁶⁾。

さらに、一般的な防波堤ではその基礎部分に捨石が用いられていることが多く、津波により防波堤内外で水位差が発生した場合、捨石間隙から海水が流入し港内の水位が上昇する可能性がある。その場合、締切り水門が正常に稼働しても港内および後背地への津波流入が生じる可能性がある。

ところが、基礎捨石より流入する津波や高潮のリスクはこれまで十分に認識されておらず、流入量の評価方法が確立されていない状況にある。

本研究では、水理模型実験と数値解析により、基礎捨石からの流入量を推定する方法を提案する。次にモデル防波堤を設定して、津波や高潮の襲来時に港の開口部を閉鎖しても、基礎捨石を通じて港内に流入するリスクが無視できないことを具体的に示す。



(2016年12月筆者撮影) (2018年9月筆者撮影)
 図-1 港口閉鎖方式の水門 (左: 沼津港, 右: 由良港)

2. 捨石内部の浸透流の評価

粒径の小さい土壌や岩石等の多孔質体を通過する流れは流速が小さく、動水勾配と浸透流速の関係が線形となり、Darcy 則と呼ばれる式(1)で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{1}{k}U \quad (1)$$

ここで、 x : 浸透距離[m], h : 全水頭[m], U : 浸透流速[m/s], k : 透水係数[m/s]である。

Darcy 則は流れが層流において成り立つ関係である。これに対して、実際の捨石は粒径 50cm 程度と大きく、多孔質体を浸透する流れは速く、一般的に動水勾配と浸透流速の関係は非線形を示す⁷⁾。このような流れに関して、Forchheimer は乱れに伴う摩擦抵抗を加えて Darcy 則を式(2)のように拡張した。

$$\left| \frac{\partial h}{\partial x} \right| = \alpha U + \beta U^2 \quad (2)$$

ここで、 α [s/m]および β [s²/m²]は係数である。

このような非 Darcy 域の係数 α , β については、理論や実験に基づき Ward の推定式や Kadlec and Knight の推定式など幾つかの推定式があるが、吉岡ら⁸⁾は Ergun の提案した以下の式⁹⁾が実験結果と特に整合性が高いとしている。

$$\alpha = \frac{150\nu(1-\phi)^2}{g\phi^3D^2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1.75(1-\phi)}{g\phi^3D} \quad (4)$$

ここで、 D : 粒径[m], ϕ : 間隙率, ν : 動粘性係数[m²/s], g : 重力加速度[m/s²]である。

本研究では、Ergun の推定式が基礎捨石を通過する流れに対しても適用できるか検証する。

3. 水理模型実験及び数値解析の概要

本研究では、防波堤前後に強制的に水位差を付ける還流水槽実験を行い、捨石からの流入流量を測定する。その結果と捨石部を多孔質体で模擬した数値解析を比較し、Ergun の推定式の妥当性を確認する。最後に流入流量の簡易評価式を提案し、現地スケールの仮想港における流入流量を評価する。

(1) 水理模型実験

水理模型実験では、平均粒径 1.12cm (標準偏差 2.5×10^{-2} cm) の砕石を用いて捨石マウンドを構築し、その上にアクリル製のケーソン模型を配置した。捨石マウンドは浸水試験より間隙率が 40.2%であることを確認した。上下流に高さの異なる越流堰を設けることで、防波堤前後に一定の水位差を作った。流れが定常状態となった時点で下流側より流出する水量を測定し、ケーソン模型直下の捨石マウンドの断面積で割ることにより、捨石を通過する定常的な流速を測定した。下流側の堰は 10cm に固定し、上流側の堰を 20cm (この場合は越流なし), 15cm, 14cm, 13cm, 12cm と変化させることで 5 段階の水位差を再現した。また、ホース吐出口する乱れを極力減らすため、消波ブロック模型とシルを配置した。堰高が 20cm のときの模型形状を図-2 に、実験の様子を図-3 に示す。

(2) 多孔質体内の圧力損失について

数値解析には OpenFOAM を使用した。VOF 法を用いた非圧縮二相流のソルバが実装されており、津

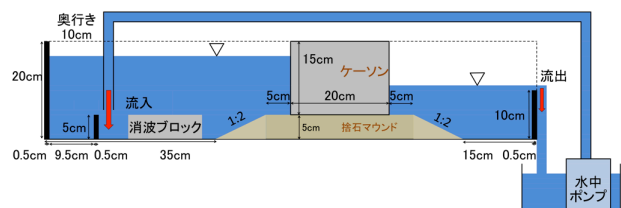


図-2 ケース 1 (20cm 堰) の模型形状

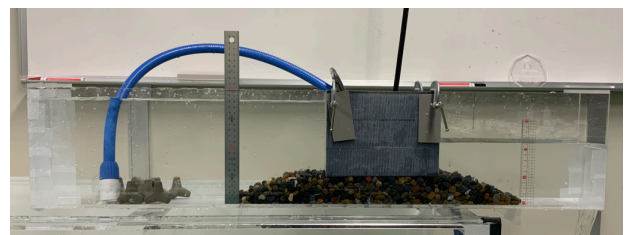


図-3 ケース 1 (20cm 堰) の実験の様子

波の防潮堤越流メカニズムや消波構造物に作用する波の解析など複雑な水理現象に適用できる^{10), 11)}. 以下にその基礎方程式を示す.

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p^* + \nabla \cdot \tau + \rho g + f_s \quad (6)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot U \alpha + \nabla \cdot U_c \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (7)$$

ここで, U : 速度ベクトル[m/s], ρ : 密度[kg/m³], p^* : 疑似動圧[Pa], τ : 粘性応力テンソル[Pa], g : 重力加速度ベクトル[m/s²], f_s : 表面張力に相当する体積力[Pa], α : 流体の体積率を表す VOF 値 ($0 \leq \alpha \leq 1$), U : 気液相の平均流速[m/s], U_c : 気相と液相の相対流速[m/s]であり, U_c は次式で定義されている.

$$|U_c| = \min [c_\alpha |U|, \max (|U|)] \quad (8)$$

ここで, c_α は $0 \leq c_\alpha \leq 1$ の範囲で任意に設定できるが, 段波—構造物衝突のような複雑な現象においてはこの値が自由表面の挙動や構造物への作用波圧に繊細に影響を及ぼす¹⁰⁾. これに対して本研究の条件では, 激しい運動は生じず自由水面が比較的容易に判別できるため, 初期値の $c_\alpha = 1$ を使用した.

また, OpenFOAM では多孔質体内の流体解析が可能であり, 多孔質部分における圧力損失 S は粘性成分と慣性成分の和として以下の式(9)で表される.

$$S = -(\mu A + \frac{1}{2} \rho |U| B) U \quad (9)$$

ここで, μ [Pa · s]: 粘性係数, ρ [kg/m³]: 流体密度, A [1/m²], B [1/m] は実験係数である. この式(9)は式(2)を圧力で表したものであり, 式(2)の両辺に水柱メートルの 9806.65 [Pa/mH₂O] を掛けたものと同義である. 以上より数値解析に用いる係数 A , B を以下のように求めることができる.

$$A = \frac{\alpha}{\mu} \times 9806.65 = \frac{\alpha}{\nu \rho} \times 9806.65 \quad (10)$$

$$B = \frac{2\beta}{\rho} \times 9806.65 \quad (11)$$

さらに Ergun の式(3), 式(4)を代入することで以下の式を得る.

$$A = \frac{150(1 - \varphi)^2}{\rho g \varphi^3 D^2} \times 9806.65 \quad (12)$$

$$B = \frac{3.5(1 - \varphi)}{\rho g \varphi^3 D} \times 9806.65 \quad (13)$$

(3) 解析条件

数値解析では水理模型実験の全ケースを再現し, 係数の妥当性を確認した. 数値解析上の境界条件や

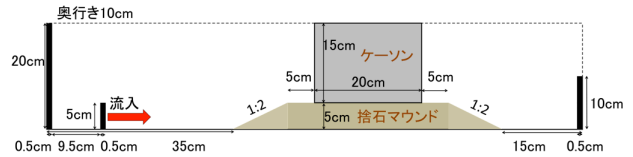


図-4 ケース1の再現形状

構造物形状を図-4に示す. 水は上流から下流に向けて平行に吹き出す条件を設定した. 下流側の堰を越流した水量と同量を上流側から還流させて, ケーソン前後の水位が一定になることを確認した.

式(12), 式(13)の多孔質体についての係数は, 密度 $\rho = 1000$ [kg/m³], 重力加速度 $g = 9.8$ [m/s²], 実験で用いた捨石の粒径 $D = 1.12 \times 10^{-2}$ [m], 間隙率 $\varphi = 0.402$ を代入することで, $A = 6.57 \times 10^6$ [1/m²], $B = 2.87 \times 10^3$ [1/m] を得る. 数値解析にはこの数値を用いた.

4. 数値解析の結果及び妥当性の確認

数値解析では, 予め港外部は 17.5cm, 港内部は 11.0cm まで水を張った状態から 400 秒分の解析を行うことで, 流れは十分に定常状態になることがわかった. そこで 400 秒後の防波堤前後の水位及び防波堤中央部直下の捨石内の流速を出力して, 検証を行った. 流速分布の一例を図-5, 各ケースの数値解析及び実験との比較を表-1に示す.

水位, 流速ともに実験と数値解析の誤差は±1%未満に収まっており, 解析精度が非常に高いといえる.

5. 流入流量評価式の導出

前節での検証を通じて, Forchheimer 式の係数を

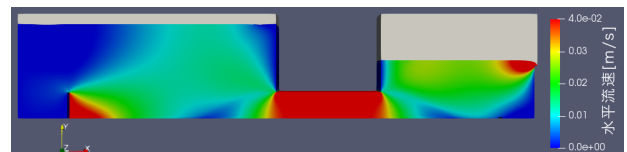


図-5 数値解析の様子 (ケース1)

表-1 数値解析の結果及び実験との誤差

実験ケース	ケース1		ケース2		ケース3		ケース4		ケース5		
	港外	港内	港外	港内	港外	港内	左	右	左	右	
境界条件	20	10	15	10	14	10	13	10	12	10	
堰高さ[cm]	18.0	11.1	15.5	10.9	14.6	10.9	13.7	10.8	12.8	10.8	
水位差[cm]	6.90		4.60		3.70		2.90		2.00		
捨石内流速[cm/s]	4.13		3.29		2.94		2.57		2.08		
数値解析	水位[cm]	17.9	11.0	15.5	10.9	14.6	10.9	13.7	10.8	12.7	10.7
	水位差[cm]	6.89		4.56		3.70		2.88		1.98	
	捨石内流速[cm/s]	4.13		3.31		2.96		2.58		2.10	
誤差	水位誤差[%]	-0.341	-0.474	-0.0764	0.276	-0.0322	-0.0753	0.112	0.345	-0.669	-0.646
(数値解析/実験)	水位差誤差[%]	-0.127		-0.910		0.0948		-0.753		-0.797	
	捨石内流速誤差[%]	-0.0257		0.601		0.541		0.462		0.937	

Ergun 式で評価することで、基礎捨石内の浸透流を精度よく推定できることがわかった。

そこで、ここでは Ergun 式を実物スケールのモデル防波堤に適用して、多孔質体で模擬した捨石部からの流入について数値解析を行う。前後に一定の水位差を作り、以下に述べる方法で防波堤中央部直下の捨石内の流速を計測し、浸透流量評価式の導出を行った。数値解析上の境界条件や構造物形状を図-6に示す。先の模型の約 50 倍のサイズを想定している。

式(12), 式(13)の多孔質体についての係数は、密度 $\rho = 1000[\text{kg}/\text{m}^3]$, 重力加速度 $g = 9.8[\text{m}/\text{s}^2]$, 実物スケールの捨石粒径 $D = 5.00 \times 10^{-1} [\text{m}]$, 間隙率 $\phi = 0.4$ を代入することで、 $A = 3.38 \times 10^3 [1/\text{m}^2]$, $B = 6.57 \times 10 [1/\text{m}]$ を得る。数値解析にはこの数値を用いた。港外からの流入速度は $0.02\text{m}/\text{s}$ から $0.32\text{m}/\text{s}$ まで $0.02\text{m}/\text{s}$ ごとに 16 ケースを作成した。水深 5m の静水状態から流入を開始し、1600 秒の解析を行うことで全てのケースで十分に安定した結果が得られた。流速分布の一例を図-7, 各ケースの数値解析の結果を表-2 に示す。捨石内流速は、ケーソン中央部直下の断面平均値である。この結果をもとに、水位差と捨石内流速の関係を表したグラフを図-8に示す。

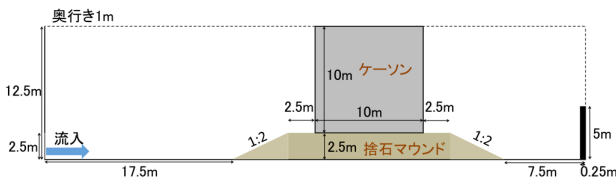


図-6 モデル防波堤のケース

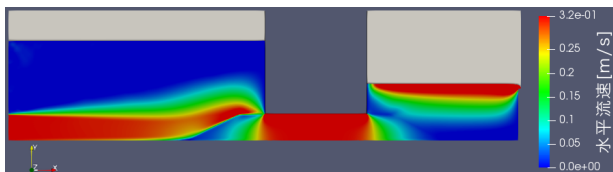


図-7 解析結果の一例 (境界流入速度 $0.32\text{m}/\text{s}$ のケース)

表-2 数値解析の結果—水位差と捨石内流速の関係

ケース	1	2	3	4	5	6	7	8
流入速度[m/s]	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
左水位[m]	5.12	5.20	5.33	5.47	5.64	5.84	6.08	6.34
右水位[m]	5.10	5.14	5.18	5.21	5.23	5.26	5.28	5.31
水位差[m]	0.0163	0.0650	0.146	0.260	0.405	0.584	0.794	1.04
捨石内流速[m/s]	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16

ケース	9	10	11	12	13	14	15	16
流入速度[m/s]	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32
左水位[m]	6.64	6.96	7.31	7.70	8.13	8.58	9.06	9.57
右水位[m]	5.32	5.34	5.36	5.37	5.39	5.41	5.42	5.43
水位差[m]	1.31	1.62	1.96	2.33	2.74	3.17	3.64	4.14
捨石内流速[m/s]	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32

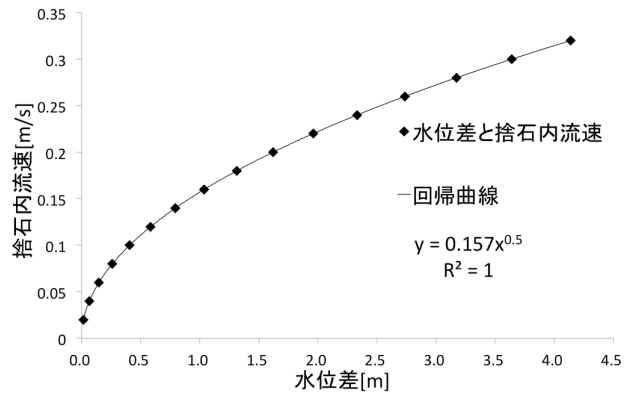


図-8 水位差と捨石内流速の相関曲線

式(14)は水位差と捨石内流速の回帰式である。

$$v = 0.157\sqrt{H} = \beta\sqrt{2gH} \quad (14)$$

ここで、 v : 捨石内の断面平均流速[m/s], H : 防波堤前後の水位差[m]である。回帰式の決定係数 R^2 はほぼ 1 であり、水位差のみで流速が推定できることがわかった。なお、 β は回帰式をより一般化する場合の係数で、本研究では $\beta = 0.0354$ になる。

奥行き 1m を設定し数値解析を行ったため、式(14)に捨石厚さ (2.5m) を掛けることで、単位奥行きあたりの流入流量の評価式が得られる。

$$q = 0.393\sqrt{H} \quad (15)$$

ここで、 q : 奥行き 1m あたりの流入流量[m³/s], H : 防波堤前後の水位差[m]である。

6. モデル港における検証

最後に、現実スケールのモデル港を想定し、津波・高潮来襲時の水位変化を確認する。この検証では、L1 津波対策として、既設防波堤や防潮堤の嵩上げに加えて、港口で水門の整備が進んでおり、基礎捨石については未対応の状況を想定している。仮想モデル港の形状を図-9に示す。

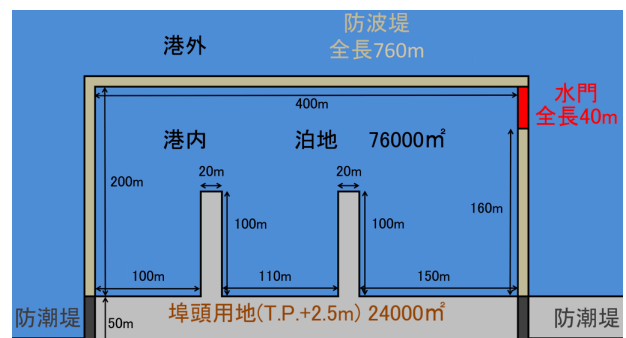


図-9 モデル港の形状

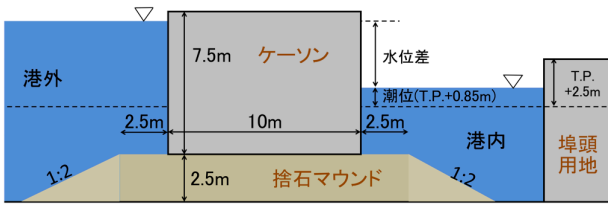


図-10 防波堤部分の断面図

港は泊地 76,000 m²及び埠頭用地 (T.P.+2.5m) 24,000m²からなり、その周辺を防潮堤とモデル防波堤(全長 760m, 断面を図-10 に示す)が囲んでいる。港の開口部には全長 40m の水門が設置され、津波・高潮襲来時には閉鎖できるようになっている。

平均潮位時 (T.P.+0.85m) に 4 種類の正弦波形を入力し、港内の水位変化や陸地 (埠頭用地) の浸水状況を検討した。入力波は振幅 3.3m とし、周期のみ 15 分, 30 分, 1 時間, 2 時間と変化した (ケース 1~4)。これにより、津波を想定した比較的短い周期から高潮を想定した比較的長い周期の長波を対象にできる。一方この間の潮汐変動, 締切り水門の隙間やケーン目地からの流入, 防波堤の越流などその他の流入要因は考慮していない。

簡易計算を行うため、既往^{6), 12)}の手法を参考に、市販の表計算ソフトを用いて、式(15)から港内外の水位差より流入流量を求め、これを港内の水域面積で割ることで 1 秒毎の港内水位を計算した。ケース 1, 2 については 1 時間分、ケース 3, 4 については 4 時間分の計算を行った。計算式を式(16)に示す。

$$y(t+1) = y(t) \pm \frac{0.393\sqrt{H(t)}}{A} \quad (16)$$

ここで、 $y(t)$: t 秒時点における港内水位[m], $H(t)$: t 秒時点における防波堤前後の水位差[m], A : 港内の水域面積[m²]である。

各ケースの港外水位、港内水位、陸の浸水深の計算結果を図-11~図-14 に示す。陸の浸水深は港内水位から陸地の海拔を引いた簡易的な推定値である。港外水位は防波堤前面 7.5m 地点の水位である。高木ら⁶⁾は、防潮堤の狭小隙間から海水が流入した場合でも、中規模程度の広さの港では港内の水位はほぼ一様に上昇し、場所的な水位変化は微小であることを確認している。このため、本研究では防波堤背面 7.5m の地点の水位を港内水位の代表値とした。

ケース 1 における陸上部の最大浸水深は約 5cm であり、浸水は限定的である。一方で、ケース 2, 3 と周期が長くなるにつれて浸水深は 0.76m, 1.4m と大きくなり、ケース 4 では浸水深は 1.64m に達する。ケース 1 では港内で水位が半分程度に低減し、2.5 分程度の時間遅れも生じている。これに対してケー

ス 4 では水位がほぼ全く低減せず、港内外の水位ピークの時間差もほとんど生じていない。

いずれのケースでも、港内で有意な水位上昇が認められ、基礎捨石からの海水流入が無視できないことがわかる。港内での水位は港外の水位に大きく依存するが、特に周期が長くなるにつれて、既設防波堤の基礎捨石からの流入が顕著になる。このような場合、港口閉鎖が完璧に行われても、捨石を通じた津波や高潮の流入により港内で有意な水位上昇が生じる可能性がある。

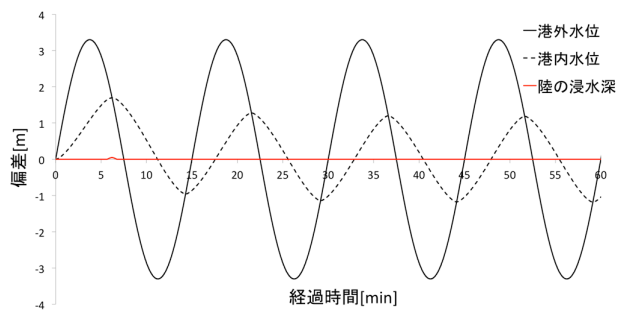


図-11 ケース 1 の計算結果

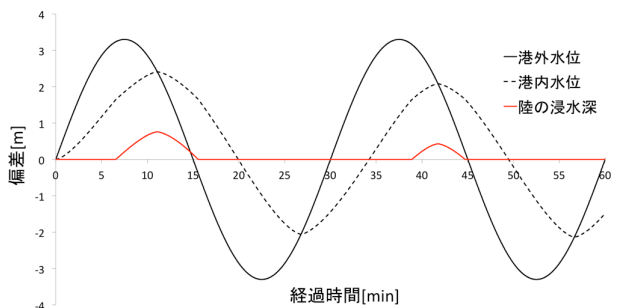


図-12 ケース 2 の計算結果

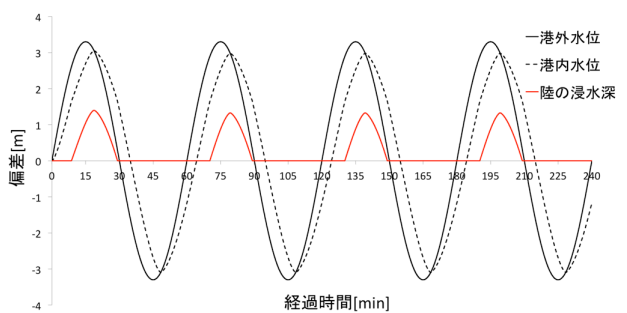


図-13 ケース 3 の計算結果

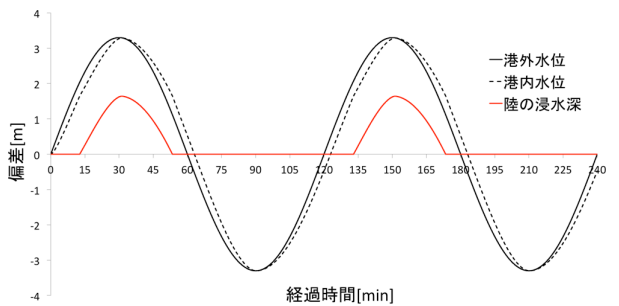


図-14 ケース 4 の計算結果

7. 結論

本研究では、流入流量を定量的に評価するため、水理模型実験および OpenFOAM を用いた流体解析を実施した。両者の比較を行い、非ダルシー則の係数として Ergun の推定式が適用できることを明らかにした。その結果に基づき、基礎捨石を通じた海水流入流量の評価式を導出した。モデル港を想定した検討として、港口を閉鎖する 40m の水門と全長 760m の既設防波堤からなるモデル港に対して、振幅一定で、周期の異なる 4 パターンの水位波形入力時の港内外の水位差を検証した。特に周期が長い場合には、波形の低減、遅延が生じず港外水位がほぼそのまま港内に伝わる可能性があることを示した。このように、津波・高潮対策として可動式の水門や防潮堤を設置し港を閉鎖した場合でも、既存防波堤の基礎捨石から海水が有意に流入する可能性がある。

謝辞：本研究は、前田記念工学振興財団研究助成および科研費(16KK0121)の支援を受けて行われたことを記し、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 不動雅之, 中村隆, 磯部雅彦, 長野章, 中泉昌光, 後藤卓治: 漁港における防波堤と防潮堤による多重防護の適用検討事例, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.343-348, 2014
- 2) Takagi H., Bricker J. Assessment of The Effectiveness of General Breakwaters in Reducing Tsunami Inundation in Ishinomaki, *Coastal Engineering Journal*, 56(4), 21p., 2014.
- 3) 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.
- 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) Fujii N. *et al.* Self-elevating Sea Wall Constructed with Pneumatic Caisson Method, 43rd Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, pp.265-274, 2018.
- 6) 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: 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, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.73, No.1, pp.35-42, 2017.
- 7) 高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹, 丸山憲治: 津波来襲時の防波堤マウンド内の非線形浸透流解析とボイリングの発現特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp.1053-1058, 2015.
- 8) 吉岡真弓, 登坂博行: 高透水性多孔質体中の非ダルシー流れに関する考察, 地下水学会誌, 第 52 巻第 3 号, pp.275-284, 2010.
- 9) Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Progress* 48(2), 1952.
- 10) 川崎浩司, 松浦翔, 坂谷太基: 3次元数値流体力学ツール OpenFOAM における自由表面解析手法の妥当性に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.748-753, 2013.
- 11) 関口翔也, 高木泰士: 極浅水域の円柱列周りの 3次元流体解析と波浪実験による精度検証, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 74, No. 2, pp.551-556, 2018.
- 12) 山根隆行, 有川太郎, 伊藤政人, 増田琢也, 亀井幸雄, 宮坂政司: 直立浮上式防波堤の開発, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.115-120, 2005.

(2019.2.7 受付)
(2019.4.24 受理)

HYDRAULIC EXPERIMENT AND NUMERICAL ANALYSIS ON TSUNAMI/STORM SURGE ENTERING THROUGH BREAKWATER MOUND

Yoshifumi TAKATA and Hiroshi TAKAGI

Installing floodgates and movable breakwaters —such as flap gates and self-elevating seawalls at the opening of a port— are attracting attention as effective countermeasures against tsunamis and storm surges. However, a previous study revealed that inflow of seawater takes place through small gaps in the movable gates. Additionally, it is necessary to consider intrusion from the other parts, as these floodgates are used in combination with existing structures such as breakwaters and coastal dykes. In particular, a breakwater consists of a rubble mound, and thus there is a concern that tsunamis and storm surges will enter the port through the voids between stones when different water levels occur on each side of the breakwater. Because this risk has yet to be adequately recognized by engineers, an inflow rate assessment method has not been established to date. In this study, a method for evaluation of the inflow discharge through a breakwater mound by conducting a hydraulic experiment and numerical analysis is proposed. As a result, it was identified that seawater inevitably enters a port through the porous rubble mound when tsunamis and storm surges occur. In particular, it was found that a long-period wave tends to be less attenuated even if the opening is perfectly enclosed by floodgates.