

# 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及び数値解析

東京工業大学 環境・社会理工学院

修士1年 高田佳史

東京工業大学 環境・社会理工学院

准教授 高木泰士

# 研究背景1 — 「防災」と「減災」

## 東日本大震災以降の津波対策

**L2**津波：数百～千年に1回/甚大な被害をもたらす

→ 構造物・避難による「**減災**」対策

**L1**津波：数十～数百年に1回/大きな被害をもたらす

→ 構造物による「**防災**」対策



「目指すべき堤防高」を決定  
海岸構造物の補修・整備



図1 防波堤嵩上げ工事(大洗町) 2

# 研究背景2 — 水門・可動式防波堤

沿岸部・港は防波堤・防潮堤・堤防で津波・高潮を防ぐ



港の入り口は開いており津波・高潮が流入

→津波・高潮襲来時に開口部を閉鎖する技術に注目

## 水門



図2 沼津港に設置された「びゅうお」

## 可動式防波堤

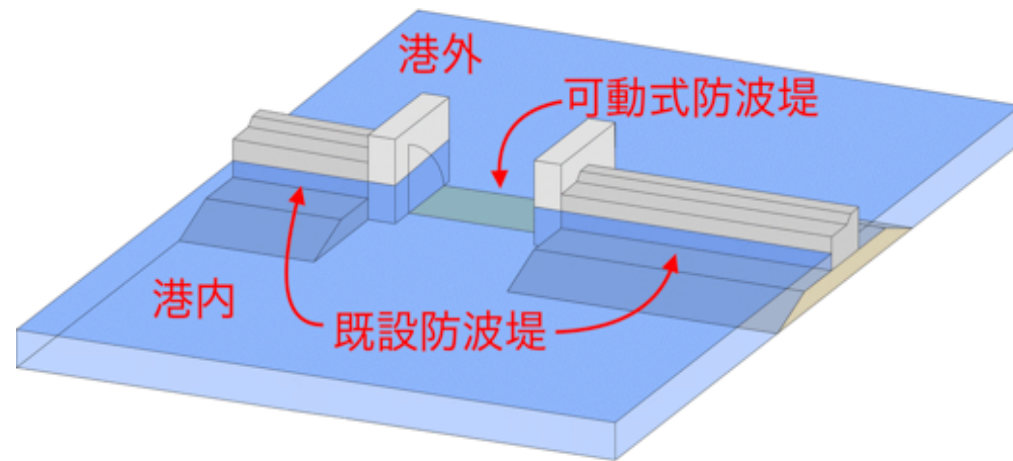


図3 フラップ式浮上式防波堤のイメージ図

# 研究目的 — 対策の問題点

水門・可動式防波堤と併用される既設防波堤

- ・基礎は捨石を積み上げた構造が多い
- ・捨石同士の間隙から海水浸入

→ 開口部を閉鎖しても港内に海水流入するリスク

↑ 今まで十分に認識されていない

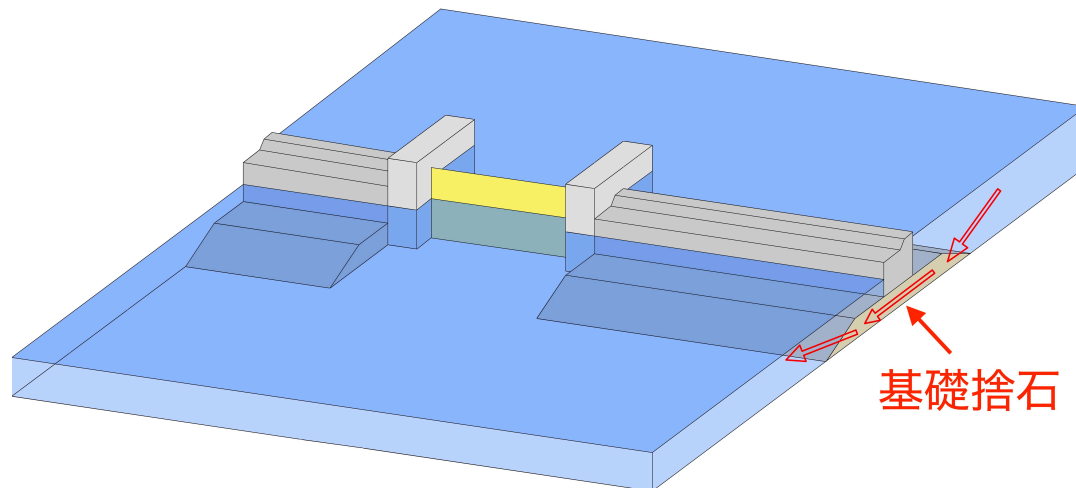


図4 基礎捨石からの海水流入原理

本研究ではこのリスクを実験・数値解析で検証

# 捨石内の流入流量評価 — Forchheimer式

Darcyの式

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

$\frac{\partial h}{\partial x}$ : 動水勾配  $k$ [m/s]: 透水係数  $U$ [m/s]: 浸透流速

- ・粒径の小さい多孔質体を通過する流れの動水勾配と浸透流速の関係を表す

Forchheimerの式

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

$\alpha$ [s/m],  $\beta$ [s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]: 係数

- ・ForchheimerがDarcyの式を拡張
- ・粒径の大きい多孔質体を通過する比較的速い流れに適用
- ・動水勾配と透流速の関係は非線形

防波堤の基礎に使われる捨石は粒径50cm程度  
→動水勾配と流入流速の関係は非線形(Forchheimerの式)

# 捨石内部の流入流量評価 — Ergunの提案式

Forchheimer式  $\left| \frac{\partial h}{\partial x} \right| = \alpha U + \beta U^2$  の係数  $\alpha$ ,  $\beta$

- ・理論や実験に基づいて幾つかの提案式がある
- ・吉岡ら(2010)は実験結果などの文献から,

Ergun(1952)の提案した式が最も整合性があるとした

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

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

$D$ [m]: 粒径,  $\phi$ : 間隙率,  $\nu$ [m<sup>2</sup>/s]: 動粘性係数,  $g$ [m/s<sup>2</sup>]: 重力加速度

→本研究ではこの提案式を用いて数値解析を行う

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, pp275-284, 2010.

Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Progress* 48(2), 1952.

# 水理実験

防波堤模型の前後に水位差を作り，マウンドを通過する流速を測定  
マウンド捨石の平均粒径11.2mm 間隙率は40.2%

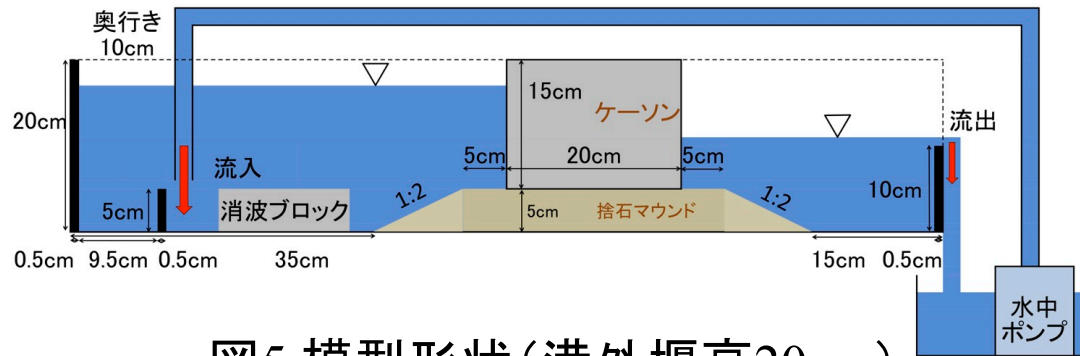


図5 模型形状(港外堰高20cm)

港内(右)の堰高は10cm固定，港外(左)の堰高を変え(20cm, 15cm, 14cm, 13cm, 12cm)，5ケースの水位差を作り，水位と各ケースでの流速を測定

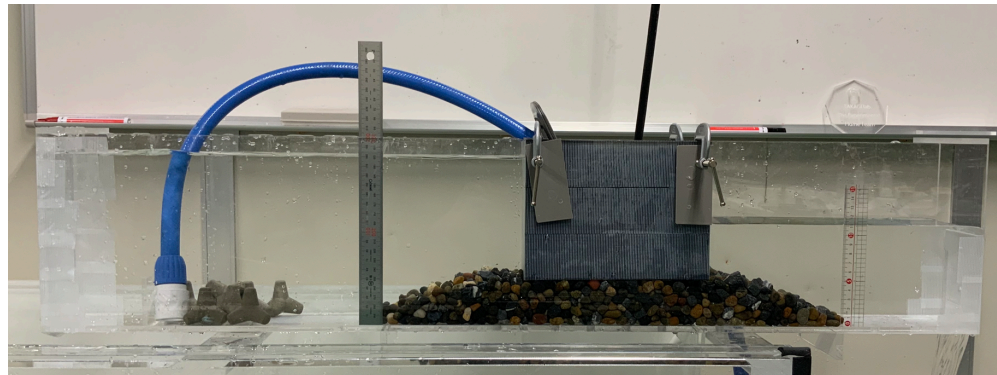


図6 実験の様子(港外堰高20cm)

# 数値解析

水理実験の全ケースを数値解析(OpenFOAM)で再現

- ・OpenFOAMでは多孔質体内の解析が可能
  - 捨石マウンドを多孔質体で再現
- ・Ergunの提案式をもとに圧力損失式の係数を決定し数値解析
  - 実験と数値解析の結果を比較, Ergunの提案式の妥当性を確認

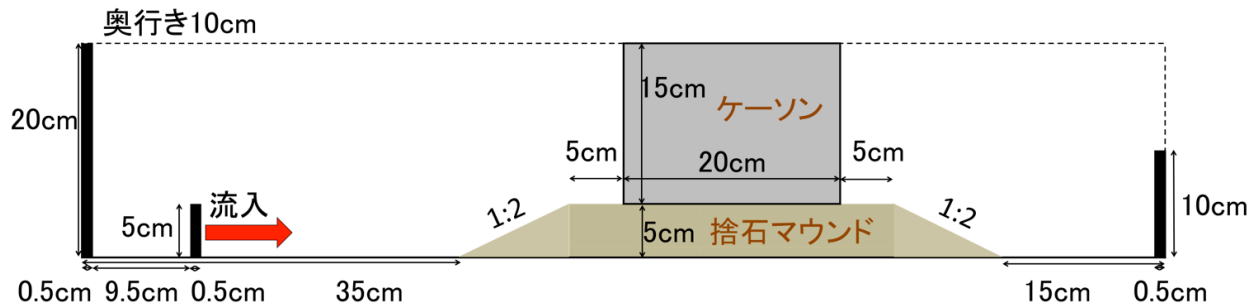


図7 実験の再現ケース形状

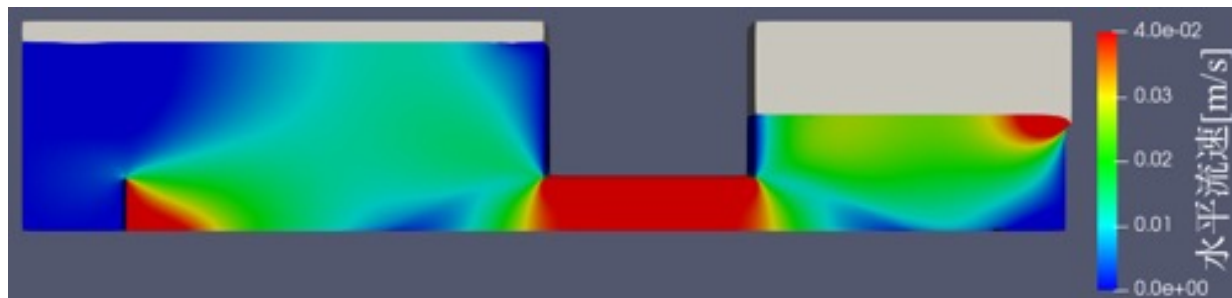


図8 数値解析の様子(港外堰高20cm)



# 水理実験 vs 数値解析

表1 実験値と数値解析の結果との比較

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	
条件	境界条件	港外	港内	港外	港内	港外	港内	港外	港内	港外	港内
	堰高さ[cm]	20	10	15	10	14	10	13	10	12	10
実験結果	水位[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]	6.9		4.6		3.7		2.9		2.0	
	捨石内流速[cm/s]	4.13		3.29		2.94		2.57		2.08	
数値解析	水位[cm]	17.94	11.05	15.49	10.93	14.60	10.89	13.72	10.84	12.71	10.73
	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 (数値解析 /実験)	水位誤差[%]	-0.341	-0.474	-0.0764	0.276	-0.0322	-0.0753	0.112	0.345	-0.669	-0.646
	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	

誤差は±1%以内に収まっており、解析精度は高い

→Forchheimer式の係数としてErgunの提案式を適用可能

# 流入流量評価式の導出 – モデル防波堤

モデル防波堤を設定し数値解析

- ・マウンド捨石の粒径50cm 間隙率は40%
- ・流入速度を0.02m/s(50L/s)～0.32m/s(800L/s)の16パターンを設定
- ・発生した水位差と捨石内流速を解析→流入流量評価式を導出

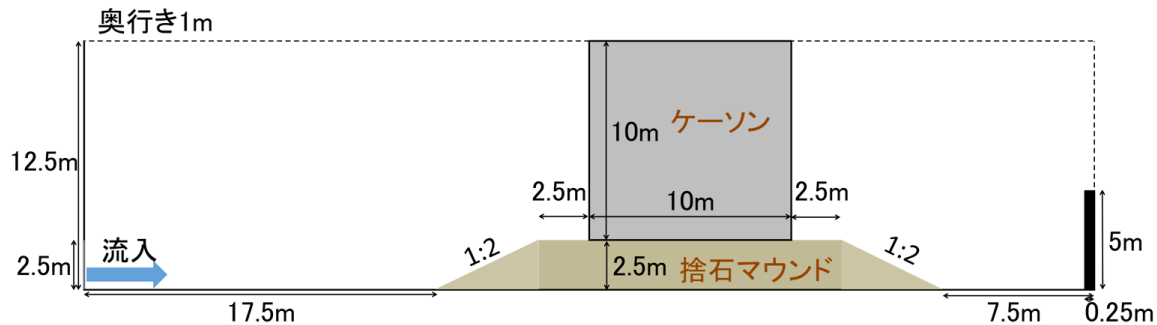


図9 モデル防波堤のケース

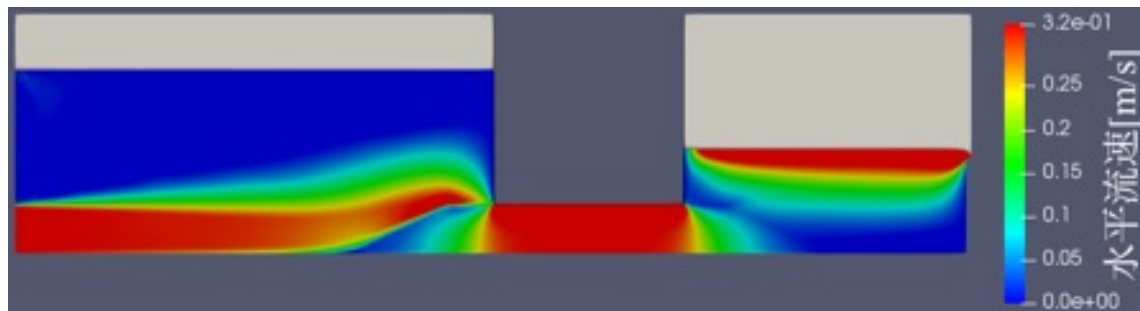


図10 数値解析の様子(流入速度0.32m/s)

# 流入流量評価式の導出 — 解析結果

## 回帰式

$$v = 0.157\sqrt{H}$$

$v$ [m/s]: 流入流速  $H$ [m]: 水位差

モデル防波堤のマウンド高さ: 2.5m



モデル防波堤奥行き1mあたりの  
流入流量評価式

$$q = 0.393\sqrt{H}$$

$q$ [m<sup>3</sup>/s]: 流入流速  $H$ [m]: 水位差

表2 数値解析の結果

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

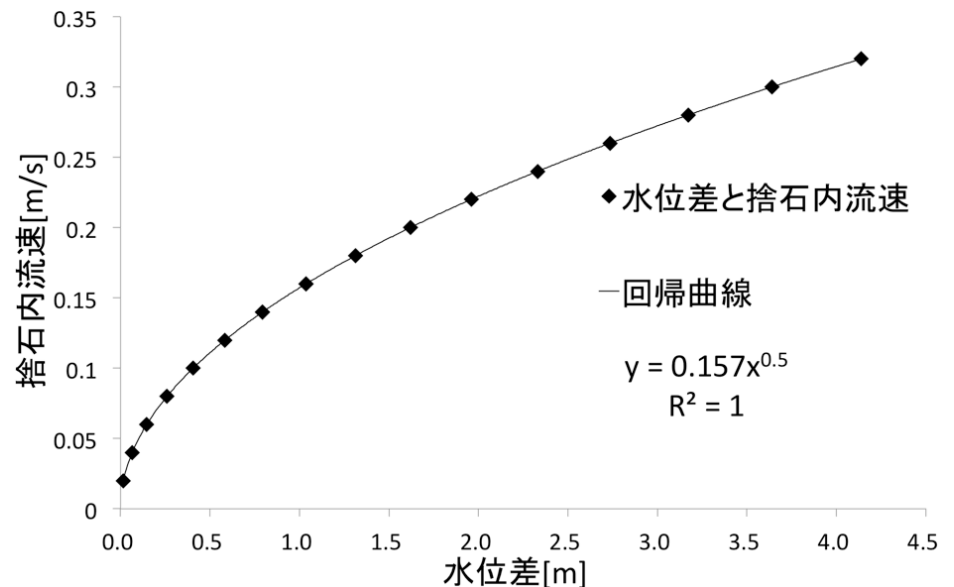


図11 水位差と捨石内流速の関係 11

# モデル港における検証

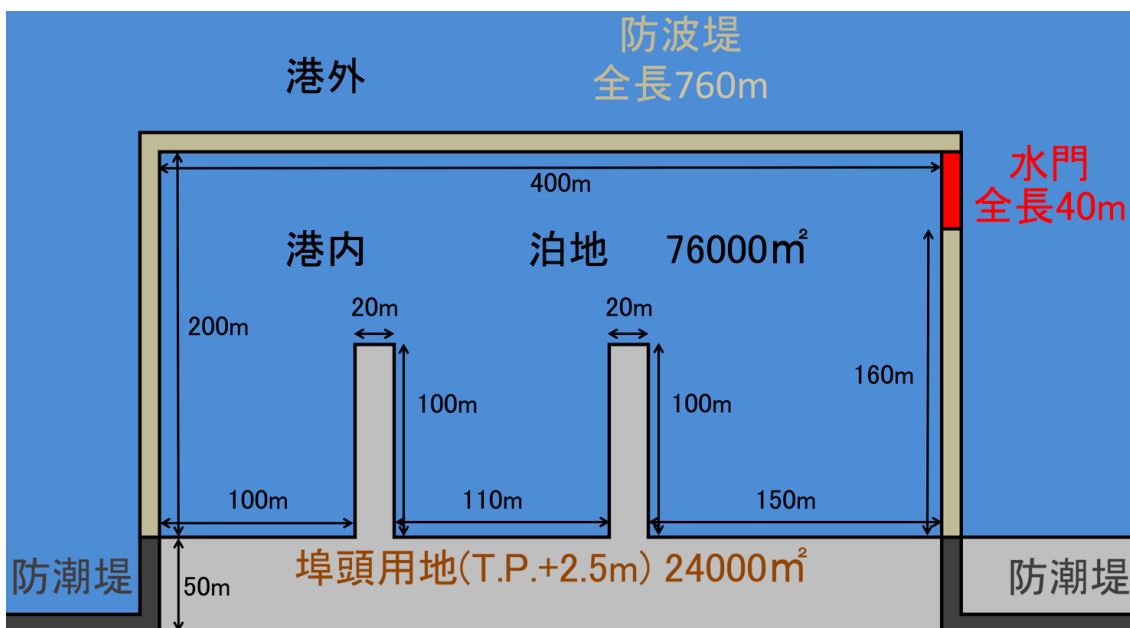


図12 モデル港の形状

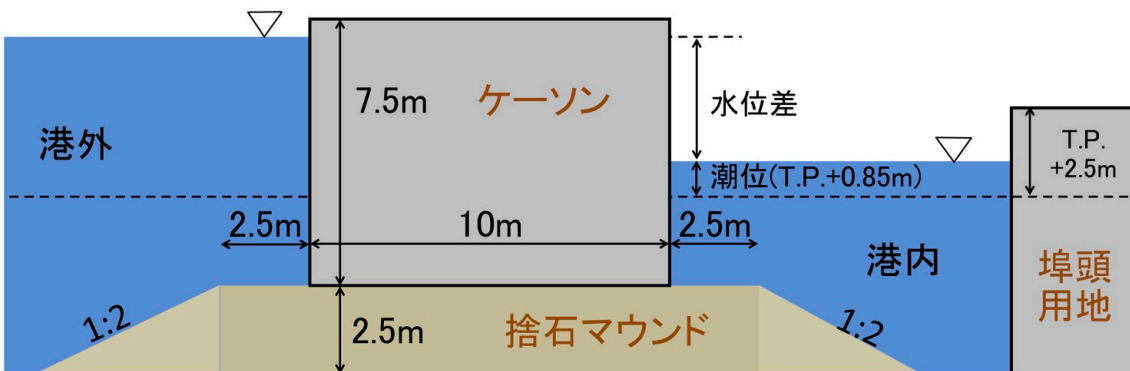


図13 防波堤の断面図

## モデル港の条件

- 中規模漁港  
泊地 76000m<sup>2</sup>  
埠頭用地 24000m<sup>2</sup>
- L1津波対策済  
防波堤・防潮堤の嵩上げ  
港開口部に水門設置
- 基礎捨石からの海水流入  
**未対応**

# モデル港における検証

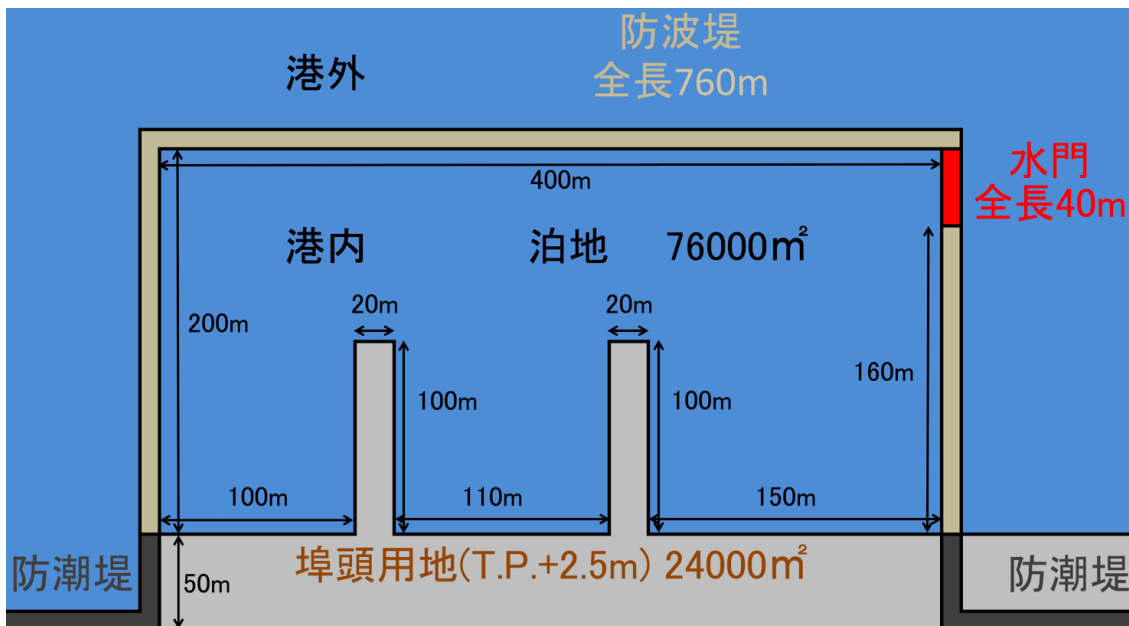


図12 モデル港の形状

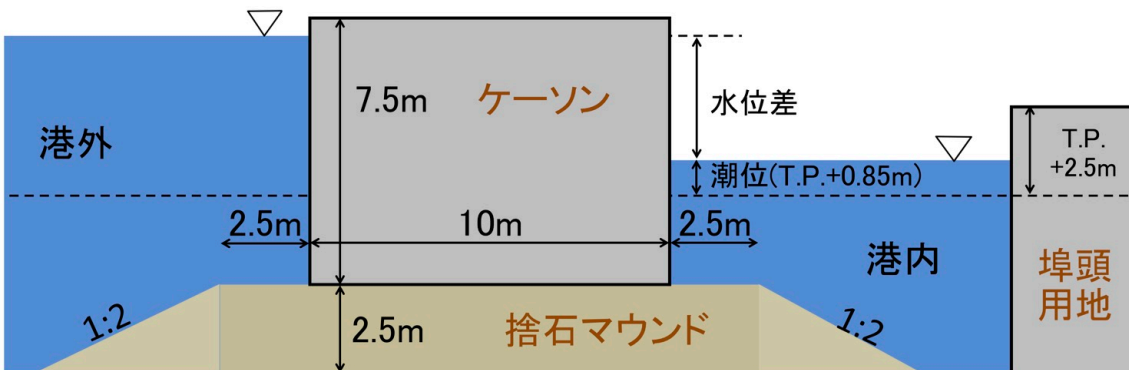


図13 防波堤の断面図

## 入力波の条件

- ・潮位0.85mで一定
- ・振幅3.3mの正弦波
- ・4パターンの周期

①周期15分

②周期30分

③周期1時間

④周期2時間

①②は1時間分

③④は4時間分検証

# 検証結果 — 周期の違いで浸水深に差

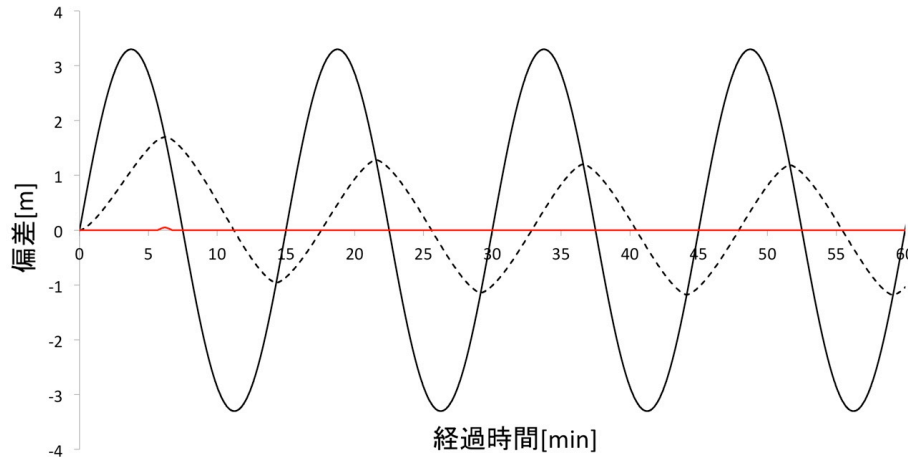


図14 周期15分の計算結果(5cm)

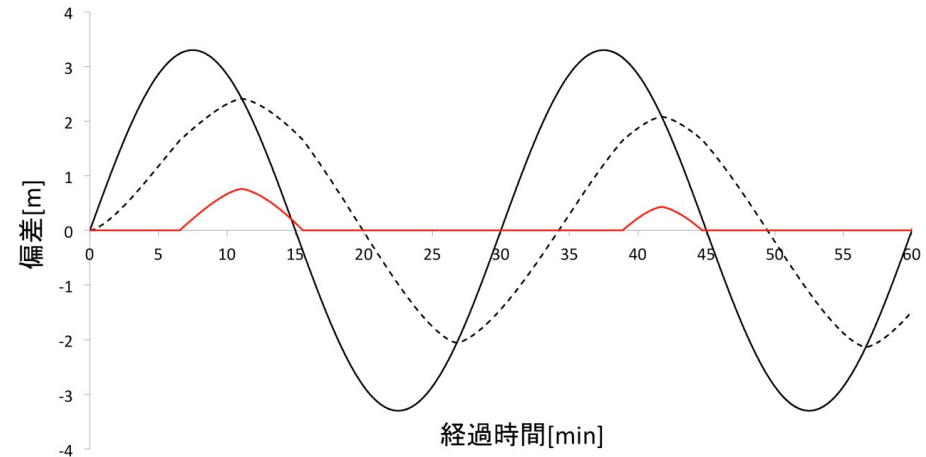


図15 周期30分の計算結果(76cm)

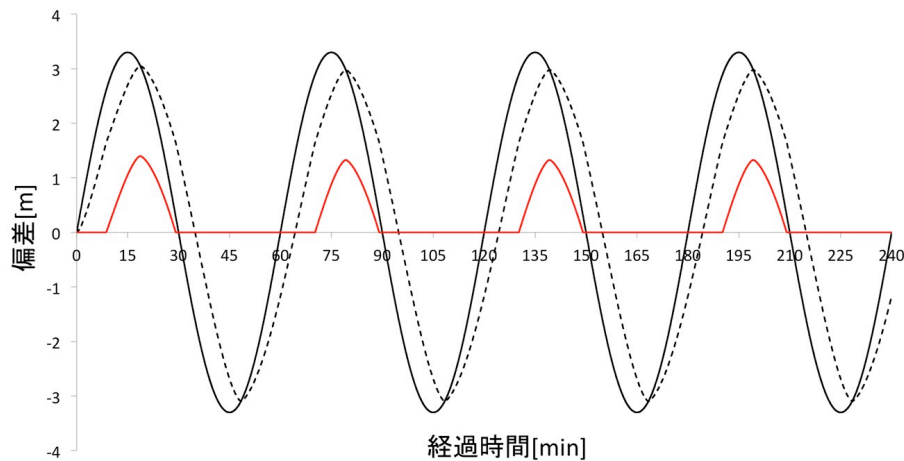


図16 周期1時間の計算結果(1.4m)

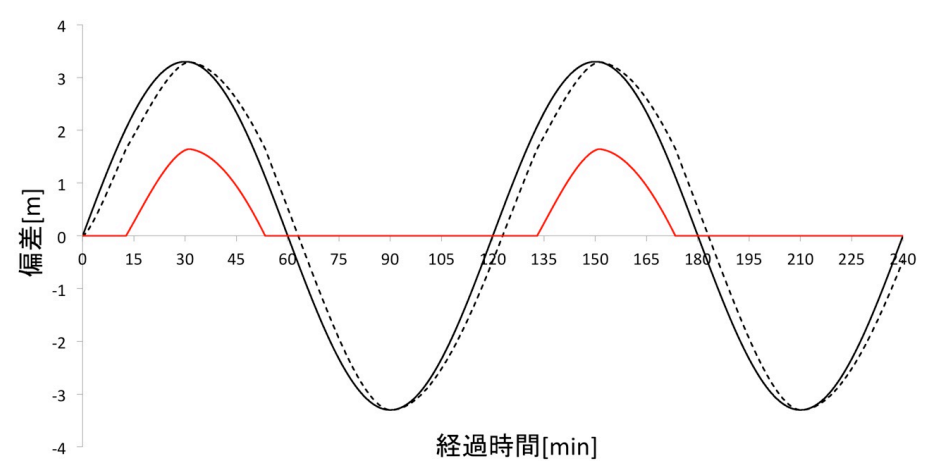


図17 周期2時間の計算結果(1.64m)

凡例： — 港外水位    - - - 港内水位    — 陸の浸水深

# 結論

- ・防波堤前後に水位差が生じたときに基礎捨石から海水が流入する
- ・モデル防波堤について流入流量の評価式を導出

$$q = 0.393\sqrt{H} \quad q[\text{m}^3/\text{s}]: \text{奥行き1mあたりの浸透流速} \quad H[\text{m}]: \text{水位差}$$

- ・モデル港における検証では周期15分の短い津波でも陸に浸水
- ・周期が2時間と長くなると開口部を閉鎖しても流入抑止効果無し

津波・高潮襲来時に港の開口部を閉鎖する対策



併用される既設防波堤の基礎捨石より海水流入

特に周期の長い津波・高潮に対しては効果が発揮できないリスク有