

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1274 September 2013

防波堤開口部の耐津波安定性についての実験ならびに数値計算

作中淳一郎
有川 太郎

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 実験および計算概要	4
2.1 実験施設	4
2.2 実験模型および実験条件	4
2.3 計算概要	6
3. 開口部における流れ場の実験および再現計算	8
3.1 測定方法	8
3.2 計算結果と実験結果の比較	9
4. 潜堤に作用する流体力と滑動安定性	14
4.1 潜堤に作用する流体力の算定方法	14
4.2 流体力の計算結果と実験結果の比較	14
4.3 数値波動水槽を用いた潜堤の滑動安定性の評価	15
5. 被覆ブロックの滑動安定性	18
5.1 測定方法	18
5.2 実験における被覆ブロックの滑動特性	18
5.3 被覆ブロック重量の算定手法	21
5.4 数値波動水槽を用いた被覆ブロックの滑動安定性の評価	21
6. おわりに	25
謝辞	25
参考文献	25
記号表	25

Research on Stability of Opening Section at Baymouth Breakwater

Junichiro SAKUNAKA *

Taro ARIKAWA**

Synopsis

The baymouth breakwater is to protect the port area from tsunami. It narrows the bay mouth and prevents tsunami from flowing in the port area. A submerged breakwater is built at the central opening section of the baymouth breakwater (Tsunami breakwater) to close the bay mouth as much as possible. Because of narrowness, it is expected strong current is generated at the opening section of the breakwater when tsunami occurs. The submerged breakwater consisting of a rubble mound foundation and a submerged caisson must have stability against the strong current.

The estimation method of the stability against sliding of the submerged caisson and armor block was proposed on the result of experiments. However, using a numerical simulation calculates velocities and pressures at all points and examines the mechanism of the stability against sliding of the submerged caisson and armor block more exactly.

The purpose of this study is to examine the stability of the opening of the breakwater on the basis of the result of numerical wave tank (CADMAS-SURF/3D: Arikawa et al. 2005). Thus, conducting the experiments of the stability of the opening of the breakwater in large flume confirms the validity of results of CADMAS-SURF/3D (called CS3D). The main conclusion is shown below.

- 1) CS3D calculates velocities and water surface elevations around the opening section of the baymouth breakwater within 20% error of the value of experiments in most cases. CS3D reproduces pressures on the submerged caissons in some cases.
- 2) By using CS3D, the horizontal pressure acting on submerged caisson is calculated within 10% error of the value of experiments in most cases, and the lifting pressure acting on submerged caisson is calculated within 30% error of the value of experiments in most cases. By using CS3D, the validity of the stability against sliding of the submerged caisson is confirmed from the result of the sliding experiments of the submerged caisson.
- 3) By applying a velocity calculated by CS3D and Isbash's constant to Equation of CERC(1977) and calculating the weight of the armor blocks on sliding limited condition, it is cleared the armor blocks where CS3D predicts that armor blocks slide at first in experiment. The average of weight ratio correlates with the rate of the sliding of armor.

Key Words: hydrodynamic forces, stability of sliding, Isbash's constant, CADMAS-SURF/3D

* Former Researcher, Maritime Structures Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division
(Nagoya Port and Airport Technology Investigation Office, Tyubu Regional Development Bureau)

** Senior Researcher, Marine and Structures Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5043 Fax : +81-46-842-7846 e-mail:sakunaka-j@pari.go.jp

防波堤開口部の耐津波安定性についての実験ならびに数値計算

作中 淳一郎*・有川 太郎**

要 旨

津波の陸上への遡上の防止あるいは軽減を目的として建設されている防波堤は開口部を狭めることで津波の港内への流入を抑制させる。そのような防波堤では開口部面積を縮小するために、開口部に潜堤を設けることが多い。しかし、津波発生時には著しい狭窄部となる開口部に強い流れが発生することが予想される。こうした流れに対して、開口部は安定でなければならない。

開口部の安定性に関する既往の研究では、実験により潜堤および被覆ブロックの滑動安定性の評価手法が提案されている。しかしながら、数値計算を用いることで任意の場所の流速および圧力を算出することが可能であり、潜堤に作用する流体力、潜堤および被覆ブロックの滑動安定性のメカニズムをより詳細に検討できる。

本研究では、数値シミュレーションを用いて、防波堤開口部における潜堤ならびに周辺構造物の安定性の検討を行うことを目的とする。堤頭部周辺の流れや渦を計算するために、有川ら（2005）によって開発された3次元数値波動水槽（CADMAS-SURF/3D、以下CS3Dと呼ぶ）を用いて、開口部の流れ場の計算を行い、潜堤および被覆ブロックの滑動安定性の評価を行う。また、数値計算の妥当性を検証するために、大規模な水槽に湾口防波堤の開口部の模型を作製し、津波を想定した流れを発生させて、開口部周辺の流れ場、潜堤に作用する流体力の計測および潜堤、被覆ブロックの滑動実験を行う。本研究で得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 防波堤開口部周辺の流速、水位については、CS3Dを用いて誤差20%以内で再現できることを確認した。潜堤に設置した計測点における圧力の再現性については、ケースおよび計測場所によって異なることがわかった。
- (2) CS3Dを用いることで潜堤に作用する水平圧力 f_H を実験値の誤差10%以内の範囲で、揚圧力 f_V を実験値の誤差30%以内の範囲で再現できることがわかった。潜堤の滑動実験結果からCS3Dを用いた滑動安定性の評価の妥当性を確認できた。
- (3) CS3Dを用いて算出した流速およびイスバッシュ定数をCERCの式（1977）に代入し、被覆ブロックの安定限界重量を算定したところ、滑動すると判定された領域の被覆ブロックが、実験で初期移動することがわかった。また、CS3Dで算出した重量比の平均値と実験における被覆ブロックの被災率に相関関係があることもわかった。

キーワード：流体力、滑動安定性、イスバッシュ定数、3次元数値波動水槽

* 元海洋研究領域耐波研究チーム研究官（現中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所）

** 海洋研究領域耐波研究チーム上席研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5043 Fax：046-842-7846 e-mail:sakunaka-j@pari.go.jp

1. はじめに

津波の陸上への遡上の防止あるいは軽減を目的として建設されている湾口防波堤は開口部を狭めることで津波の港内への流入を抑制させる。湾口防波堤では開口部面積を縮小するために、開口部に潜堤を設けることが多い。しかし、津波発生時には著しい狭窄部となる開口部に強い流れが発生することが予想される。こうした流れに対して、開口部は安定でなければならない。

開口部の安定性に関する既往の研究として、岩崎ら(1984)、谷本ら(1988)は潜堤に作用する流体力の実験的な検討を行い、開口部潜堤に作用する流体力を算定するための圧力係数を示している。谷本ら(1988)は算定した圧力係数の妥当性を滑動実験によって確認している。また、岩崎ら(1984)、谷本ら(1988)は被覆ブロックの滑動実験を行い、滑動限界に対する実験係数(イスバッシュ定数)を提案している。これらの研究では実験的に潜堤および被覆ブロックの滑動安定性の評価手法が提案されている。しかしながら、数値計算を用いることで任意の場所の流速および圧力を算出することが可能であり、潜堤に作用する流体力、潜堤および被覆ブロックの滑動安定性のメカニズムをより詳細に検証できる。

本研究では、数値計算を用いて湾口防波堤の開口部における安定性の検討を行うことを目的とする。堤頭部周辺の流れや渦を計算するために、有川ら(2005)によって開発された3次元数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D、以下CS3Dと呼ぶ)を用いて、開口部の流れ場の計算を行い、潜堤および被覆ブロックの滑動安定性の評価を行う。また、数値計算の妥当性を検証するために、大規模な水槽に湾口防波堤の開口部の模型を作製し、津波を想定した流れや波を発生させて、開口部周辺の流れ場、潜堤に作用する流体力の計測および潜堤、被覆ブロックの滑動実験を行う。

まず、実験における開口部周辺の流れ場をCS3Dで再現できること確認する。次に、CS3Dの計算結果より潜堤に作用する水平圧力および揚圧力を算出し、力のつり合い式より潜堤の滑動判定を行い、実験における潜堤の滑動状況を再現できることを確かめる。最後に被覆ブロックの滑動実験の流れ場をCS3Dで再現計算し、得られた流速およびイスバッシュ定数をCERCの式(1977)に代入して被覆ブロックの安定限界重量を算定することで、実験における被覆ブロックの滑動状況の再現を試みる。

2. 実験および計算概要

2.1 実験施設

実験は当所所有の総合沿岸防災実験施設(長さ50m、幅10m、高さ4.5m)において行った。この施設では、潮流発生装置および造波装置が設置されていて、定常流の発生および造波が可能である。図-2.1に潮流発生装置の全体系統概略図を示す。この

水槽は上部水路と環流水路の二層で構成されていて、その間に設置されている軸流ポンプによって循環流を発生させるものである。ポンプの運転を制御することにより、循環流量が調節できて、模型を設置している床上において所要の流量が得ることができる。軸流ポンプは水槽の端部に設置され、水槽幅10mを2分割し、5mに1台で合計2台の軸流ポンプ(定格45kW/台)が備えられている。軸流ポンプは4枚翼のインペラ(直径1,000mm)を使用しており、アナログ信号により回転数を任意に変えることが可能である。

造波機は図-2.2に示した位置に設置されて水槽幅10mを4分割し、2.5mに1台で合計4台の造波機(定格63.5kW/台)が備えられている。造波装置は、ピストン-フラップ複合型であり、最大ストロークは±2.0mである。本研究では規則波の造波をピストン機能のみ用いて行っている。

2.2 実験模型および実験条件

実験を行った断面は図-2.2のように防波堤と潜堤が一直線上に並ぶ配置とした。写真-2.1は下流側から見た全景である。開口部は捨石マウンドと潜堤からなる構造形式とし、防波堤部分は捨石マウンドと防波堤からなる構造形式とした。表-2.1に示すとおり潜堤模型は高さ0.1m(AD)、0.2m(BE)、0.3m(CF)の3種類を使用し、各ケース1種類の模型13個を開口部に並べた。上流側から見て左側の防波堤模型の側面から目地を1から2mm程度にして潜堤模型を設置した。反対側の端部については、潜堤幅を開口部長さに応じて調整するため、潜堤模型と同じ高さの調整板を設置し、板間にコンクリートブロックを詰めている。図-2.3(a)、(b)、(c)に示すように前面法線は防波堤の上流側の側面に揃えている。高さ0.1mの潜堤については、前面法線を防波堤の上流側の側面から0.45m下流側の地点に揃えて配置したケース(AD2)も行った(図-2.3(d))。マウンド幅は防波堤については2.0m、潜堤の中央については1.2mであり、マウンド幅が異なる部分の接続は下流側で行った。模型縮尺は1/30とし、相似律はフルード相似則を使用した。

実験では、軸流ポンプを定格の25%~70%の出力とした定常流の発生および造波を行った。ポンプの出力と開口部の流速の関係を表-2.2に示す。なお、開口部の流速は後述の図-3.1の開口部中央の潜堤模型の上面から9cmの高さの電磁流速計(V3)で計測した定常状態におけるx方向平均流速である。開口部での流速は0.5~2.0m/s(現地換算では2.74~10.9m/s)程度である。定常流および造波の方向は、図-2.2の矢印の方向であり、実験の初期水深は水槽床から1.33mとした。

実施した実験は次の3種類である。

- 1) 開口部周辺の流れ場および潜堤に作用する圧力の計測
- 2) 流れに対する潜堤の滑動安定性
- 3) 流れに対する被覆ブロックの滑動安定性

1) についてはCS3Dの流れ場の計算の検証に用いるために、開口部周辺の流速、水位および潜堤に作用している圧力を計測

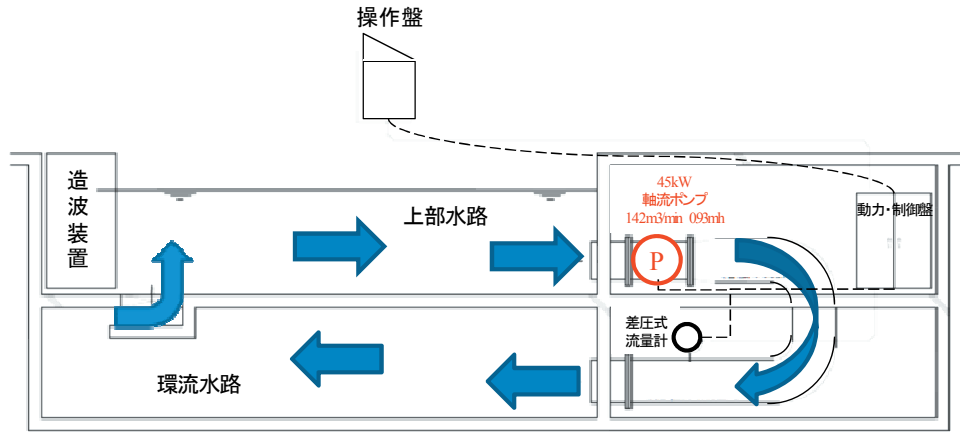


図-2.1 潮流発生装置の全体系統概略図

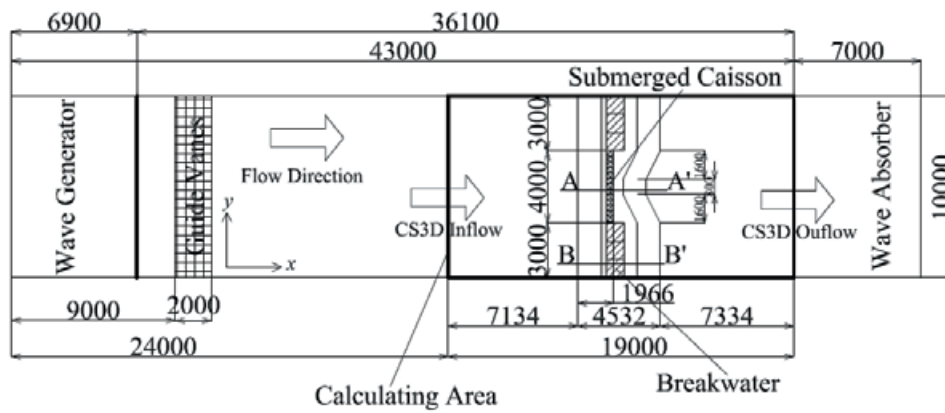


図-2.2 水槽平面図 (単位:mm)

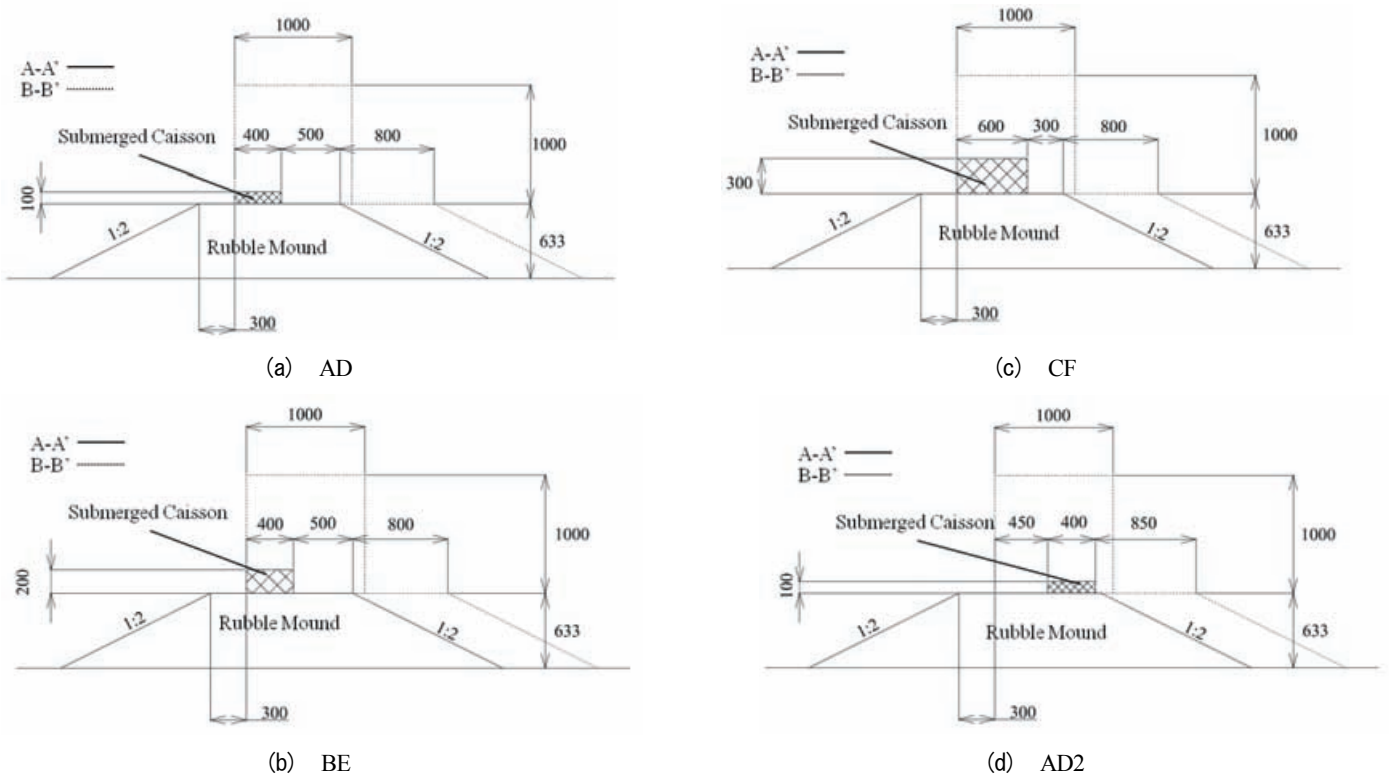


図-2.3 水槽断面図 (単位:mm)



写真-2.1 実験水槽の全景

表-2.1 潜堤模型の諸元

ケース	高さ [m]	幅 (岸沖方向) [m]	奥行 [m]	水中重量 [kN]
AD	0.1	0.4	0.3	0.153
BE	0.2	0.4	0.3	0.306
CF	0.3	0.6	0.3	0.688

表-2.2 実験条件

(a) AD

ポンプの出力	開口部流速 [cm/s]	実施した実験の種類
30%	70.5	1), 2)
40%	93.5	1), 2)
50%	121.8	1), 2)
60%	150.0	1), 2)
※	187.9	2)

※波高 20cm, 周期 20s の規則波を造波し, 流速は最大値を記載

(b) BE

ポンプの出力	開口部流速 [cm/s]	実施した実験の種類
25%	66.3	1), 2), 3)
30%	81.9	1), 2), 3)
40%	122.2	1), 2), 3)
45%	132.7(V4)	3)
50%	153.8	1), 2), 3)
55%	154.7(V4)	3)
60%	186.2	2), 3)
70%	207.0	2), 3)

45%, 55%では V3 において計測を実施していないため V4 の流速を記載

(c) CF

ポンプの出力	開口部流速 [cm/s]	実施した実験の種類
30%	105.6	1), 2)
40%	137.7	1), 2)
50%	159.5	1), 2)
60%	176.1	1), 2)

(d) AD2

ポンプの出力	開口部流速 [cm/s]	実施した実験の種類
30%	71.5	1)
40%	95.0	1)
50%	126.5	1)
60%	151.3	1)

した. 2) の実験では, CS3D における潜堤の滑動安定性の検証に用いるために, すべてコンクリート製の潜堤模型を用いて, 開口部の流速を徐々に大きくして, 潜堤の滑動の観察を行った. 3) では, CS3D における被覆ブロックの滑動安定性の検証に用いるために, 開口部のマウンドに被覆ブロック模型を設置して, 流速を徐々に大きくして, 被覆ブロックの滑動状況の観察を行った. 表-2.2 にケース毎に実施した実験の種類を記載している.

2.3 計算概要

再現計算に用いる3次元数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) は, 砕波・越波などの複雑な水面変形計算が可能である. また, スリット構造物など複雑な形状のケーソンや護岸に作用する波力や, ブロックおよびマウンド内部の流速等を算定することが可能である.

CS3Dは自由表面解析モデルにVOF法を採用したモデルであり, 基礎方程式に3次元非粘性非圧縮流体を対象とした連続式およびNavie-Stokes方程式をポーラスモデルに拡張した式である.

・連続式

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_p \quad (2.1)$$

・Navie-Stokes方程式

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vu}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}
\lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uv}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vv}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z wv}{\partial z} &= -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\
+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \\
+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v
\end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}
\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vw}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} &= -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\
+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\
+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \\
- \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho}
\end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで、 t は時間、 x 、 y は水平方向座標、 z は鉛直方向座標、 u 、 v 、 w は x 、 y 、 z 方向の流速成分、 ρ は基準密度、 ρ^* は浮力を考慮した密度、 p は圧力、 v_e は分子粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和、 g は重力加速度、 γ_v は空隙率、 γ_x 、 γ_y 、 γ_z は各方向の面積透過率、 D_x 、 D_y 、 D_z はエネルギー減衰帯のための係数、 S_p 、 S_u 、 S_v 、 S_w は造波ソースに関する係数、 λ_u 、 λ_v 、 λ_w は構造物から受ける慣性力効果を示したパラメータであり、以下の式で求める。

$$\begin{aligned}
\lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\
\lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\
\lambda_y &= \gamma_y + (1 - \gamma_y) C_M \\
\lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M
\end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで、 C_M は慣性力係数である。また、 R_x 、 R_y 、 R_z は抵抗力を示す項であり、以下のように計算される。

$$\begin{aligned}
R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\
R_y &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta y} (1 - \gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\
R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}
\end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで、 C_D は抗力係数、 Δx 、 Δy 、 Δz は各空間方向の格子間隔である。消波ブロックや捨石など空隙を有する透過性構造物の計算を行う場合には透過性構造物の領域に対して空隙率以外に、慣性力係数および抗力係数を設定する必要がある。本研究では捨石マウンドを透過性構造物と設定し、既往の研究結果より空隙率 $\gamma_v=0.43$ 、慣性力係数 $C_M=1.2$ 、抗力係数 $C_D=1.0$ としている。

計算領域は図-2.2 に太線で示した枠内であり、計算領域の長さおよび格子間隔は表-2.3 に示すとおりである。流入および流出の境界条件は、後述の図-3.1 のV3における流速およびWG6における水位を基準として決定した。流入および流出の境界条件の流速を表-2.4 に示す。流入境界については、計算開始時間から2.5秒まで v_{in} の1/2の値の一定流速を与え、計算時間が2.5秒から5.0秒まで与える流速を一定の割合で大きくし、5.0秒から計算終了時間までは v_{in} の値の一定流速を与えた。境界面に対しては一律に流速を与えた。流入境界に流速の時系列を与える方法の例（潜堤模型：BE、ポンプ出力：50%）を図-2.4 に示す。流出境界については、計算開始時間から計算終了時間まで v_{out} の値の一定流速を境界面に対して一律に与えた。

表-2.3 計算領域および格子間隔

	長さ [m]	格子間隔 [m]	格子数
x方向	19.00	0.05	380
y方向	10.00	0.05	200
z方向	2.50	0.05	50
			総格子数 3,800,000

表-2.4 境界条件の流速

(a) AD		
ポンプの出力	流入境界の流速 v_{in} [cm/s]	流出境界の流速 v_{out} [cm/s]
30%	15.0	15.1
40%	18.3	18.6
50%	24.3	24.9
60%	28.7	30.0
(b) BE		
ポンプの出力	流入境界の流速 v_{in} [cm/s]	流出境界の流速 v_{out} [cm/s]
25%	12.8	13.0
30%	13.5	13.7
40%	18.5	19.0
45%	18.8	19.5
50%	21.0	22.0
55%	23.8	25.0
60%	27.0	29.0
70%	32.7	37.0
(c) CF		

ポンプの出力	流入境界の流速 v_{in} [cm/s]	流出境界の流速 v_{out} [cm/s]
30%	13.7	17.7
40%	17.8	18.7
50%	21.5	23.2
60%	32.5	39.0

(d) AD2

ポンプの出力	流入境界の流速 v_{in} [cm/s]	流出境界の流速 v_{out} [cm/s]
30%	13.5	13.5
40%	16.3	16.5
50%	22.1	22.6
60%	26.5	27.4

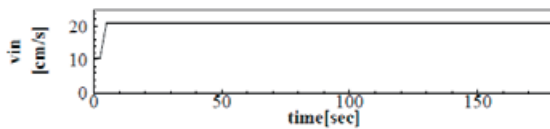


図-2.4 流入境界流速の時系列の例
(潜堤模型：BE，ポンプ出力：50%)

3. 開口部における流れ場の実験および再現計算

図-2.2 および図-2.3 の実験断面で定常流を発生させ、開口部周辺の流速、水位および潜堤に作用している圧力を計測し、実験における開口部周辺の流れ場を CS3D で再現できること確認する。

3.1 測定方法

開口部およびその周辺の水位、流速および潜堤に作用する圧力の測定を行った。図-3.1 は容量式波高計および電磁流速計の設置位置を示す平面図である。WG1～8 に容量式波高計，V1～7 に電磁流速計を設置した。表-3.1 に電磁流速計 V1～7 の設置高さおよび測定を実施した実験の種類を示している。実験の種類は 2.2 の 1)～3) に示したものである。1) における実験では、潜堤に作用する圧力の測定は、アクリル製の潜堤模型に圧力計を設置して行った。圧力測定用の潜堤模型を図-3.2 に示す開口部中央の位置に 1 個設置して、残り 12 個についてはコンクリート製の模型を設置した。圧力計は潜堤模型 AD、AD2 の模型に計 6 個、BE に計 8 個、CF に計 12 個を用いて、図-3.3 に示すように上面、底面および岸沖方向の側面に設置した。サンプリング周波数は 500Hz とした。

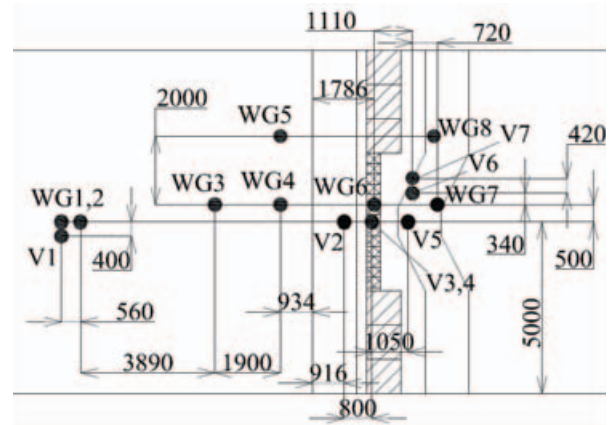


図-3.1 容量式波高計および電磁流速計設置場所
(単位:mm)

表-3.1 電磁流速計の設置高さ

電磁流速計	設置高さ	設置した実験の種類
V1	水槽底面より 65cm	1), 2), 3)
V2	マウンド上面より 20cm	3)
V3	潜堤上面より 9cm	1), 2)
V4	潜堤上面より 18cm	1), 2), 3)
V5	マウンド上面より 20cm	3)
V6	マウンド上面より 20cm	3)
V7	マウンド上面より 5, 15, 20, 30, 40, 50, 60cm	3)

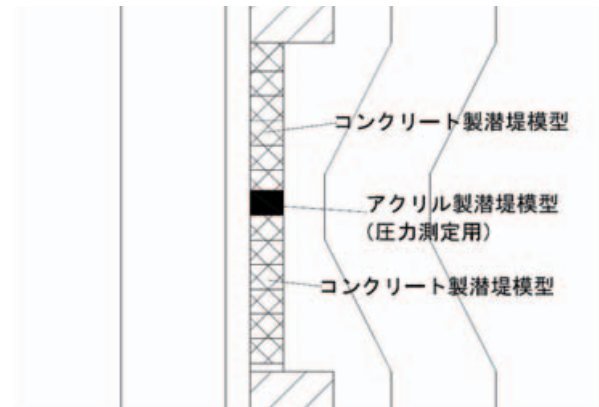
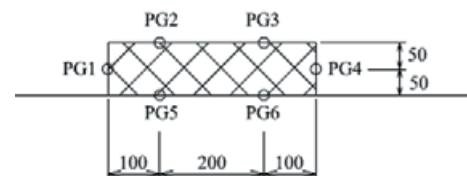
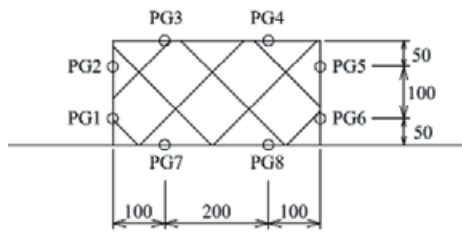


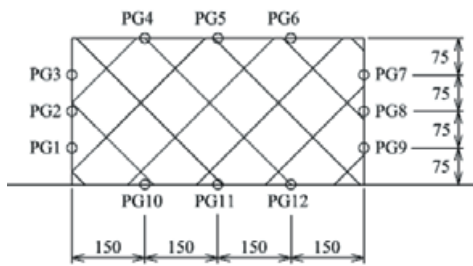
図-3.2 圧力測定用潜堤模型設置場所



(a) AD, AD2



(b) BE



(c) CF

図-3.3 圧力測定用の潜堤模型に設置した圧力計の位置 (単位: mm)

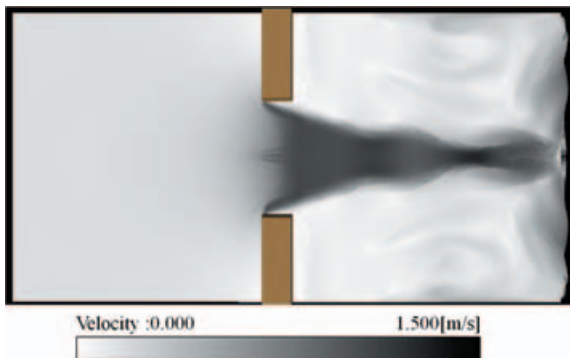


図-3.4 CS3Dで計算した流速の平面分布 ($z=92.5\text{cm}$)

3.2 計算結果と実験結果の比較

(1) 時系列比較

潜堤模型がBE, ポンプ出力が50%の定常流について, CS3Dを用いて再現計算した流速の平面分布 ($z=92.5\text{cm}$) を図-3.4に示す. $z=92.5\text{cm}$ は潜堤上面より9.2cm上で, 電磁流速計V3が設置されている高さとはほぼ同じ高さである. 開口部に流れが集まり, 開口部から下流側の中央付近にかけて流速が大きいことがわかる.

図-3.5はV1~7における流速のx方向成分の計算結果と実験値の時系列比較で, 潜堤模型がBE, ポンプ出力が50%のときのものである. V1はCS3Dの流入境界に隣接している格子であり, 流速は計算結果の方が実験値より大きい.

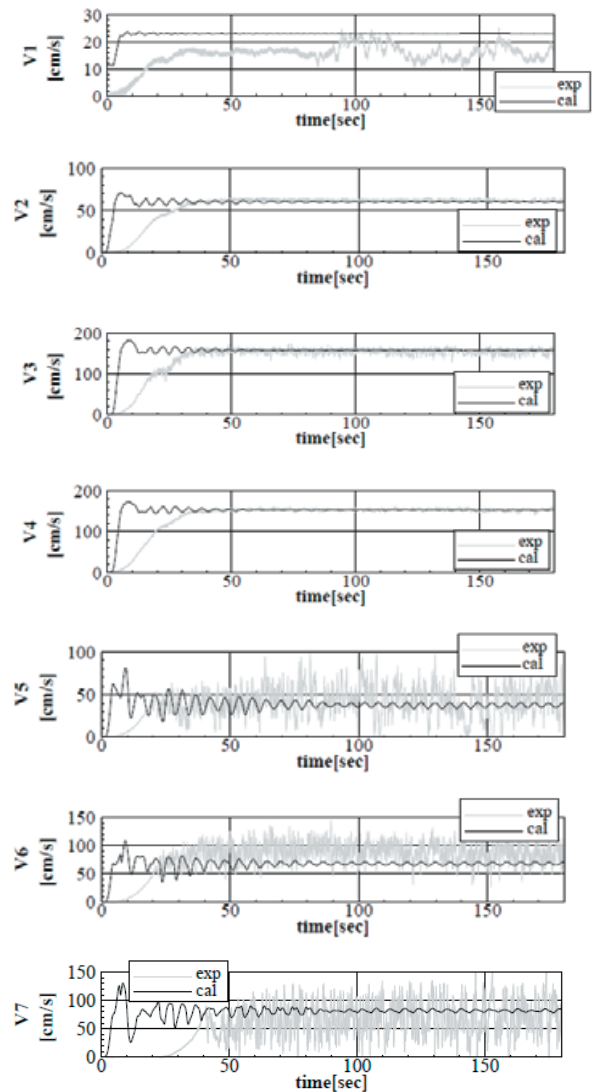


図-3.5 x方向流速の計算結果と実験値の時系列の比較 (V7はマウンド上面より20cmの位置)

これは, 実験水路においては, 流入口が上向きであるため, 入射境界付近では, 流速分布は, 鉛直方向に一樣ではないと考えられるが, 計算では, 計算領域の短縮のため水平に一樣な境界で与えていることに起因する. そこで, V1で計測した流速より2, 3割程度大きい流速を流入境界に与えたところ, 潜堤上面の9cm上のV3では, 計算結果と実験値が一致した. 潜堤の上流側であるV2および潜堤上面の18cm上のV4では, 定常状態における計算結果と実験値がよく一致している. 潜堤より下流側のV5~V7については, 実験における流速の乱れが大きい. 平均的に比較するとV5およびV7 (マウンド上面より20cmの高さ) については, 計算結果と実験値がほぼ一致していて, V6については計算結果が実験値より小さいことがわかる.

図-3.6は図-3.1中のV7における流速のx方向成分の鉛直分布について計算結果と実験値を比較したものである。流速は定常状態である120sから180sまでの平均値で比較して、潜堤模型がBE、ポンプ出力が50%のケースのものである。上層の高さ60cmの場所で計算結果が実験値に比べて小さくなっているが、下層から中層にかけて、実験の様子を数値計算でよく再現できていることがわかる。

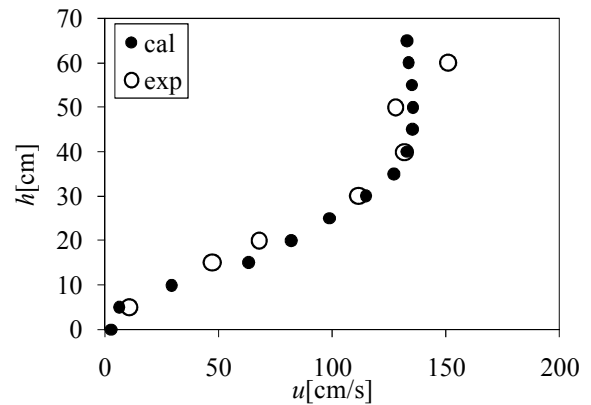


図-3.6 V7における流速のx方向成分の鉛直分布

WG1~8における水位の計算結果と実験値の比較を図-3.7に示す。潜堤上面のWG6については表-2.4にある境界条件を入力することで、定常状態における実験値と計算結果が一致することを確認できる。開口部より上流側にあるWG1~5については、計算結果が実験値より2~3cmほど大きい。潜堤より下流側マウンド上のWG7,8については、実験における水位の振動が大きい。平均的に比較すると、WG7では計算結果の方が実験値よりやや小さくて、WG8では計算結果と実験値がほぼ一致している。

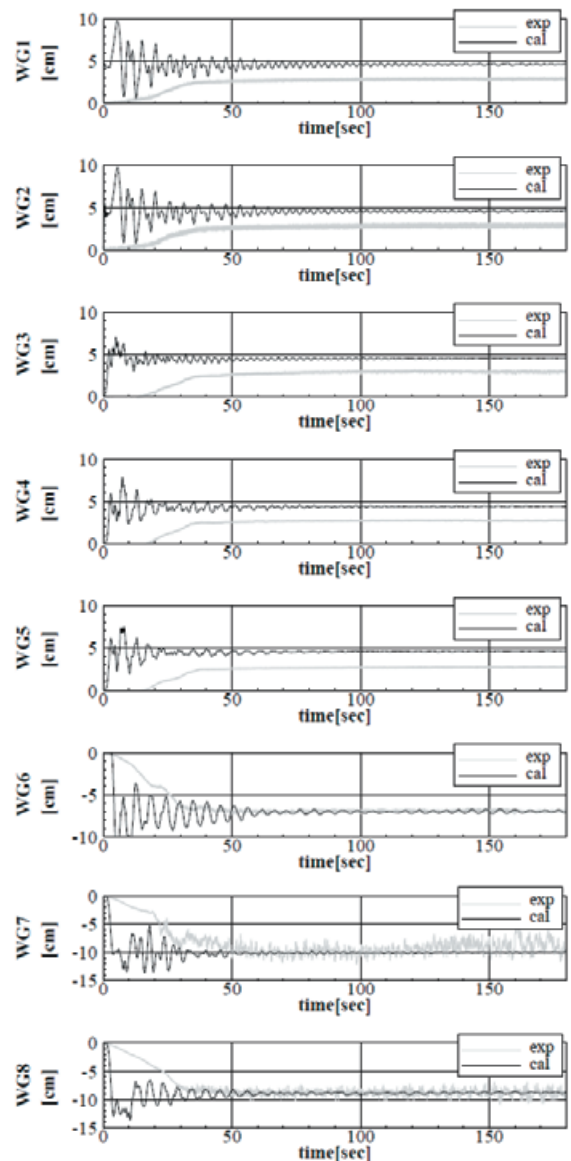


図-3.7 水位の計算結果と実験値の時系列の比較

潜堤模型がBE、ポンプ出力50%のときの圧力の計算結果と実験値の時系列比較を図-3.8に示す。上流側の側面のPG1,2および潜堤上面のPG4については、実験における圧力値の振動が大きい。計算結果と実験値を平均的に比較すると、上流側の側面のPG1における圧力の計算値が実験値より0.1 kN/m²ほど大きく、もう一方の上流側の側面のPG2、潜堤上面のPG3,4および下流側の側面のPG5,6については、定常状態における圧力を数値計算で再現できていることがわかる。底面のPG7,8については、計算結果の方が実験値より0.1~0.2kN/m²ほど小さい。

(2) 平均値の比較

潜堤模型およびポンプ出力の違いによるCS3Dの再現性の傾向を確認するために、実験を実施した全てのケースの流速、水位および潜堤に作用する圧力の実験値とCS3Dの再現計算結果の比較を行う。マウンド上を対象とし、定常状態である120sから180sまでの平均値の比較を行う。

図-3.9は潜堤上面より9cm上のV3における平均流速の計算結果と実験値の比較である。CF40%および60%のケースで計算結果がやや大きくなっているが、それ以外のケースで表-2.4にある境界条件を入力することで、実験値と計算結果が一致することを確認できる。図-3.10は潜堤上面18cm上のV4における平均流速の計算結果と実験値の比較である。図中の破線は実験値との誤差が20

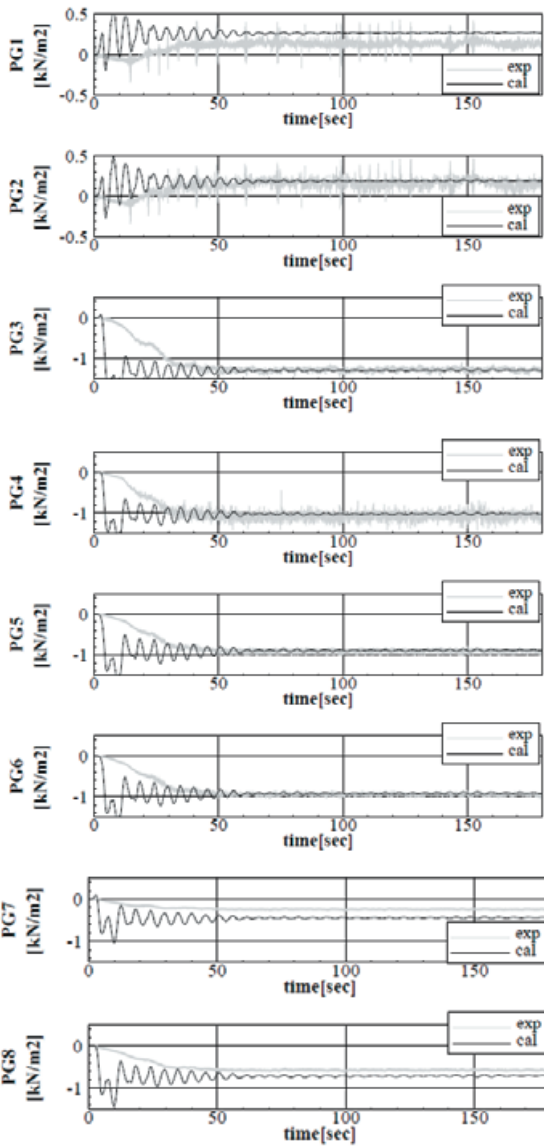


図-3.8 圧力の計算結果と実験値の時系列の比較

%であることを示している。AD, AD2, CFで計算結果が大きくなっているケースがあるが、ほとんどのケースで誤差20%の範囲で実験結果を再現できることがわかる。

2.2の3)で示した実験のときに計測したV2, V5, V6, V7における平均流速について、計算結果と実験値の比較を図-3.11に示す。図中の破線は実験値との誤差が20%であることを示している。潜堤より上流側にあるV2については、計算結果と実験値が一致している。下流側となるV5~V7については、ケースによって一致の度合いにばらつきが見られるが、ほとんどのケースで誤差20%の範囲で実験結果を再現できている。

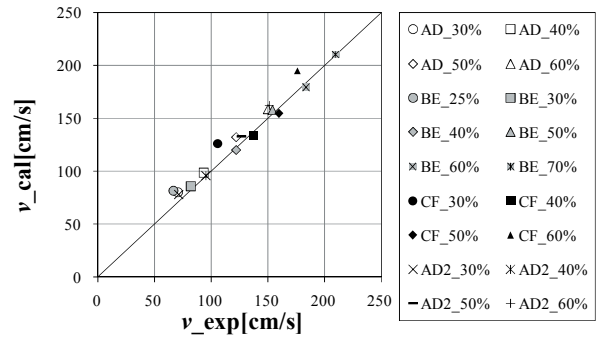


図-3.9 V3の平均流速の計算結果と実験値の比較

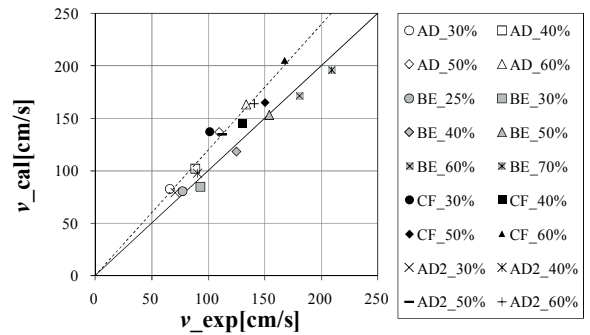


図-3.10 V4の平均流速の計算結果と実験値の比較(破線: 誤差20%)

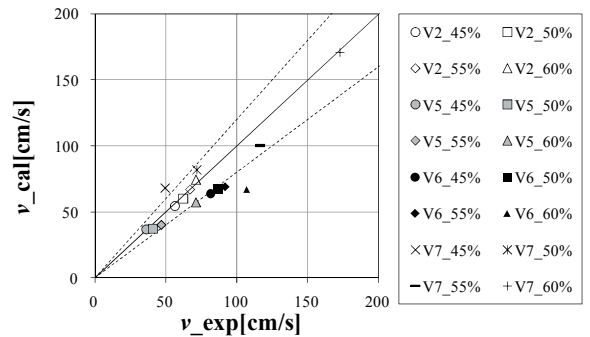


図-3.11 V2, V5, V6, V7の平均流速の計算結果と実験値の比較(潜堤模型: BE; 破線: 誤差20%)

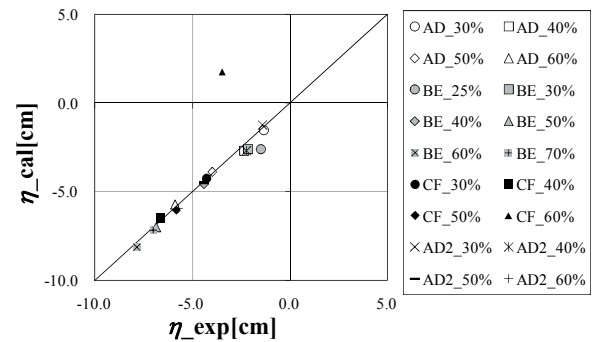


図-3.12 WG6の平均水位の計算結果と実験値の比較

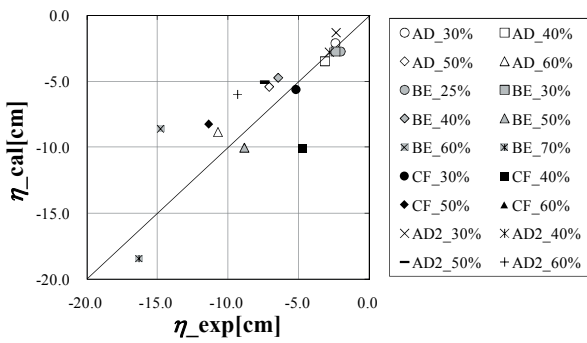


図-3.13 WG7の平均水位の計算結果と実験値の比較

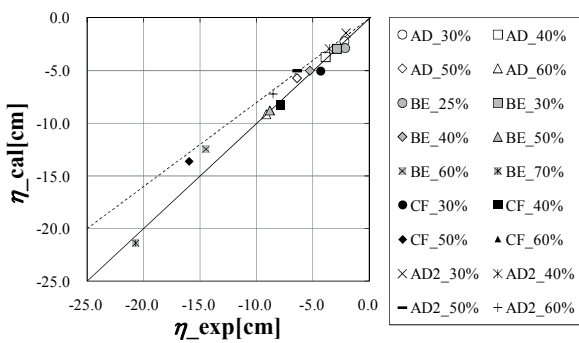


図-3.14 WG8の平均水位の計算結果と実験値の比較
(破線：誤差20%)

図-3.12は潜堤上面のWG6における平均水位の計算結果と実験値の比較である。ほとんどのケースで、表-2.4にある境界条件を入力することで、実験値と計算結果が一致することを確認できる。ただし、CF60%のケースでは、水位は再現できなかった。図-3.13は潜堤より下流側のWG7における平均水位の計算結果と実験値の比較である。水位低下が小さい箇所では、実験値と計算結果がほぼ一致していたが、水位低下が大きい箇所では、計算結果と実験結果が倍半分異なるケースが見られる。図-3.14は潜堤より下流側のWG8における平均水位の計算結果と実験値の比較である。図中の破線は実験値との誤差が20%であることを示している。ほとんどのケースで実験結果と計算結果が異なるケースでも誤差20%の範囲で実験結果を再現できている。なお、CF60%のケースのWG7,8の比較については、相違が大きいためグラフの範囲外に点がプロットされている。

図-3.15は潜堤模型ADに作用する平均圧力の計算結果と実験値の比較である。破線は実験値との誤差が20%であることを示していて、ポンプ出力30%、40%、50%、60%のケ

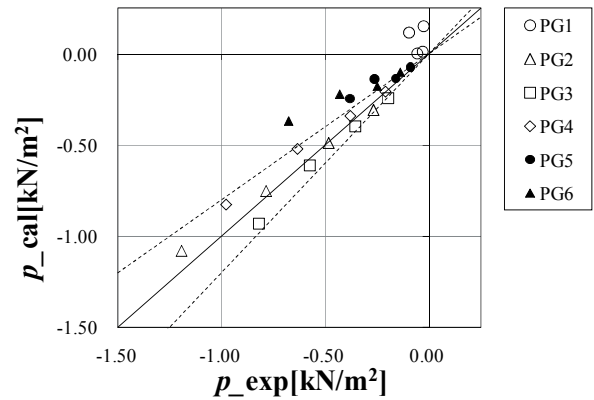


図-3.15 平均圧力の計算結果と実験値の比較（潜堤模型：AD；破線：誤差20%）

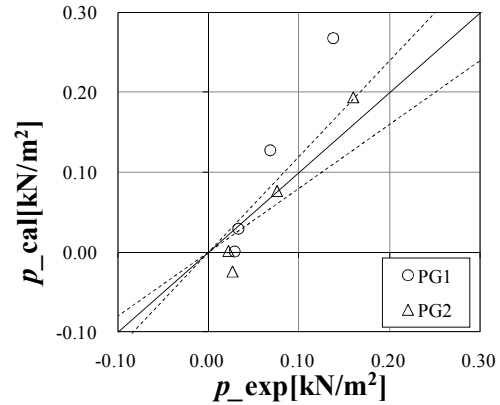


図-3.16 平均圧力の計算結果と実験値の比較（潜堤模型：BE；破線：誤差20%）

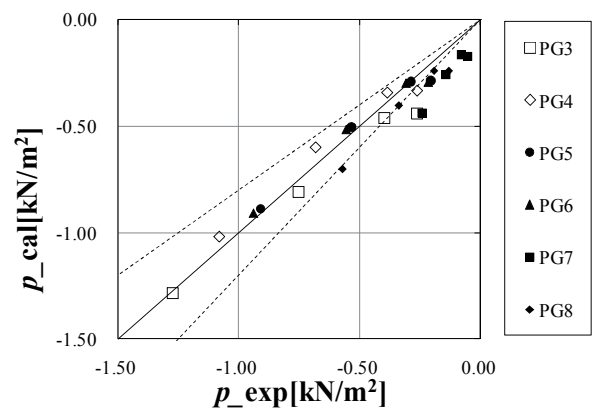


図-3.17 平均圧力の計算結果と実験値の比較（潜堤模型：BE；破線：誤差20%）

ースについて比較している。上流側の側面PG1および底面のPG5, 6の平均圧力は計算結果が過大評価となっているケースが多い。上面のPG2, 3および下流側の側面PG4については、誤差20%以内で再現できている。図-3.16および図-3.17は潜堤模型BEに作用する平均圧力の計算結果と実験値の比較である。破線は実験値との誤差が20%であることを示していて、ポンプ出力25%, 30%, 40%, 50%のケースについて比較している。上流側の側面PG1, 2については、平均圧力の一致の度合いにばらつきがある。上面のPG3, 4については、負圧の絶対値が小さい箇所では計算結果と実験値に相違が見られるが、それ以外の範囲では実験結果の誤差20%の範囲で平均圧力を再現できている。下流側の側面PG5, 6についても負圧の絶対値が小さい箇所では計算結果と実験値に相違が見られるが、それ以外の範囲ではほとんどのケースで計算結果と実験結果が一致している。底面のPG7では、ほとんどのケースで実験値との誤差が20%を超えていて、底面のPG8では、ほとんどのケースで計算結果と実験値の誤差が20%である。図-3.18および図-3.19は潜堤模型CFに作用する平均圧力の計算結果と実験値の比較である。破線は実験値との誤差が20%であることを示していて、ポンプ出力30%, 40%, 50%, 60%のケースについて比較している。上流側の側面PG1, 2, 3および上面PG4, 5, 6については、ほとんどのケースで誤差が20%以上となっている。下流側の側面PG7, 8, 9およびPG10を除く底面PG11, 12では、ほとんどのケースで計算結果と実験結果の誤差が20%以内である。しかし、PG10ではほとんどのケースで実験値との誤差が20%を超えている。図-3.20は潜堤模型AD2に作用する平均圧力の計算結果と実験値の比較である。破線は実験値との誤差が20%であることを示していて、ポンプ出力30%, 40%, 50%, 60%のケースについて比較している。すべての計測点において、ほとんどのケースで計算結果と実験結果の誤差が20%以内で実験結果を再現できた。

本章では開口部周辺の流速、水位および潜堤に作用している圧力のCS3Dにおける再現性を時系列および平均値で検討した。開口部周辺の流速、水位については、特定のケースおよび計測場所を除いて、ほとんど誤差20%以内で再現できることを確認した。一方で潜堤に設置した計測点における圧力の再現性については、潜堤の寸法、ポンプ出力および計測場所によって異なることがわかった。

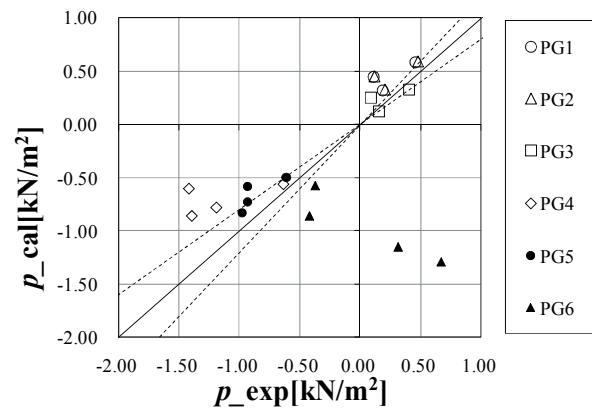


図-3.18 平均圧力の計算結果と実験値の比較（潜堤模型：CF；破線：誤差20%）

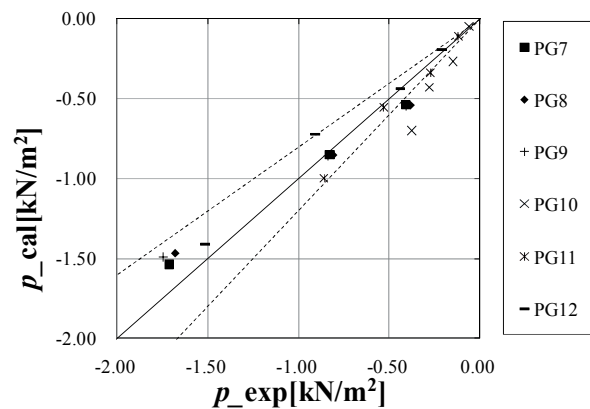


図-3.19 平均圧力の計算結果と実験値の比較（潜堤模型：CF；破線：誤差20%）

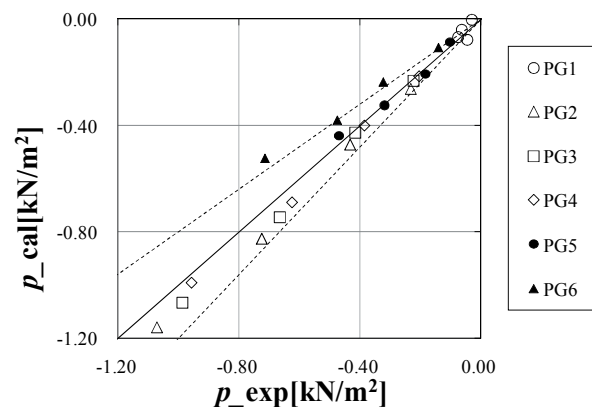


図-3.20 平均圧力の計算結果と実験値の比較（潜堤模型：AD2；破線：誤差20%）

4. 潜堤に作用する流体力と滑動安定性

ここでは CS3D の計算結果より潜堤に作用する水平圧力および揚圧力を算出し、実験結果と比較する。CS3D を用いて滑動安定性の評価を行い、その妥当性を潜堤の滑動実験結果より検証する。

4.1 潜堤に作用する流体力の算定方法

潜堤の滑動安定性を評価するために、潜堤に作用する流体力を算出する必要がある。定常流中に置かれた潜堤模型 BE に作用する水平圧力 f_H および揚圧力 f_V は、2.2 の 1) の実験において、開口部中央の模型に設置した圧力計で計測した各点の圧力の平均値から式(4.1) および式(4.2) のとおりに算出する。

$$f_H = \frac{\sum_{i=1}^2 p_i S_i - \sum_{i=5}^6 p_i S_i}{A_H} \quad (4.1)$$

$$f_V = \frac{-\sum_{i=3}^4 p_i S_i + \sum_{i=7}^8 p_i S_i}{A_V} \quad (4.2)$$

ここで、 p_i は圧力計 PG*i* ($i=1,2, \dots,8$) で計測した定常状態における圧力の平均値、 S_i は図-4.1 に示す圧力計 PG*i* の代表面積、 A_H, A_V は潜堤模型の水平および鉛直投影面積である。

また、CS3D において、潜堤模型 BE に作用する水平圧力 f_H および揚圧力 f_V は、図-4.2 に示す潜堤周辺のポーラスセルでそれぞれ計算した圧力の平均値から式(4.3) および式(4.4) のとおりに算出する。

$$f_H = \frac{\sum_{i=1}^5 p_i' S_i' - \sum_{i=13}^{17} p_i' S_i'}{A_H} \quad (4.3)$$

$$f_V = \frac{\sum_{i=5}^{13} p_i' S_i' - \left(\sum_{i=17}^{24} p_i' S_i' + p_1' S_1' \right)}{A_V} \quad (4.4)$$

ここで、 p_i' は 図-4.2 に示す潜堤周辺のポーラスセルで計算した定常状態における圧力の平均値、 S_i' はセルの代表面積である。なお、潜堤 AD, CF, AD2 についても、

圧力計の個数およびセルの数に応じて同様に水平圧力 f_H および揚圧力 f_V を算出する。

4.2 流体力の計算結果と実験結果の比較

2.2 の 1) の実験で実施したすべてのケースにおいて、潜堤に作用する水平圧力 f_H の計算結果と実験値の比較を図-4.3 に示す。図中の破線は実験値との誤差が 10%であることを示している。CF30%のケースでは計算結果と実験値の 2 倍となっているが、それ以外のケースでは計算結果と実験値はほぼ一致している、最大の誤差が 10%以内の精度で水平圧力を再現できることがわかる。揚圧力 f_V の計算結果と実験値の比較を図-4.4 に示す。図中の黒色の破線は実験値との誤差が 30%、グレーの実線は実験値との誤差が 15%であることを示している。AD および AD2 のケースでは、計算結果が 15%ほど過大評価であり、BE のケースでは、計算結果が 30%ほど過小評価である傾向がみられた。CF については、一致度にばらつきがみられた。これは潜堤上面から水表面までの距離に比して、計算格子サイズが相対的に大きくなっていることが原因のひとつとして考えられる。今後、計算機が発展した際に確認すべきと考えられる。なお、図-4.3 および図-4.4 における CF60%の比較については、相違が大きいためグラフの範囲外に点がプロットされている。

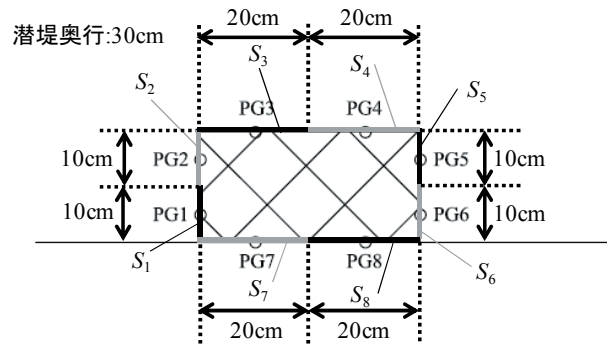
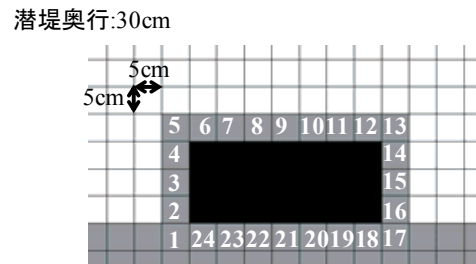


図-4.1 実験における圧力計の代表面積 (潜堤 BE)



黒:障害物セル, 白:流体計算セル, グレー:ポーラスセル

図-4.2 CS3D における潜堤 BE のセル

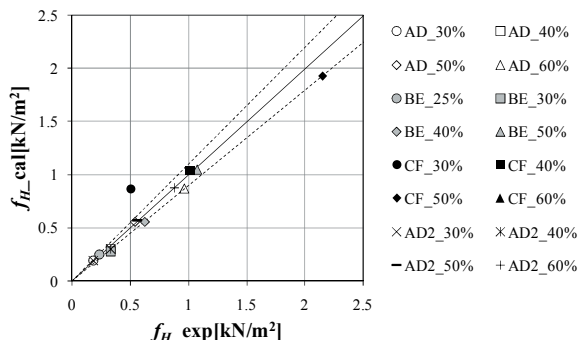


図-4.3 潜堤に作用する水平圧力 f_H の計算結果と実験値の比較（横軸：実験値；縦軸：計算結果；破線：誤差 10%）

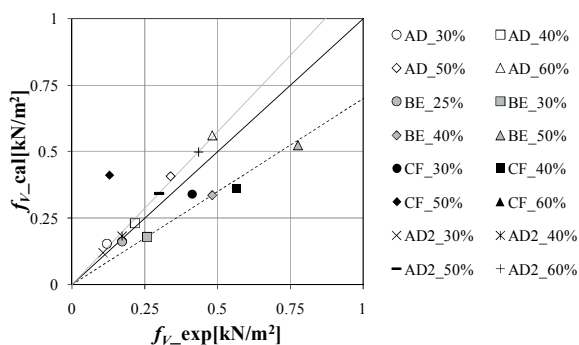


図-4.4 潜堤に作用する揚圧力 f_V の計算結果と実験値の比較（横軸：実験値；縦軸：計算結果；黒色破線：誤差 30%，グレー実線：誤差 15%）

4.3 数値波動水槽を用いた滑動安定性の評価

2.2の2)の潜堤の滑動安定性の実験については、すべてコンクリート製の模型を用いて、表-2.1に示すとおり3種類（AD, BE, CF）の重量で実施した。ポンプの出力が小さい順から1ケース180sの定常流を発生させて、潜堤の変化を観察した。ただし、ADのケースについては、造波も行っている。表-4.1に潜堤模型AD, BE, CFにおける潜堤の観察結果を示す。ADについては、規則波で波高20cm, 周期20sの造波時に滑動し、そのときのV3の流速が187.9cm/sであった。BEについては、ポンプ出力が60%のケースで滑動し、13個の潜堤が扇形に広がるように滑動したので、隣り合う潜堤どうしがかみ合った。その後、ポンプ出力が70%の計測を行ったところ、潜堤がかみ合ったまま滑動しなかった。CFについては、ポンプの出力を60%, V3の流速を176.1cm/sまで上昇させたが、潜堤模型は滑動しなかった。

表-4.1 潜堤の観察結果

(a) AD

ポンプの出力	V3 流速 [cm/s]	結果
30%	70.0	滑動なし
40%	93.2	滑動なし
50%	121.3	滑動なし
60%	150.2	滑動なし
※	187.9	滑動

※波高 20cm, 周期 20s の規則波を造波し, V3 が 187.9cm/s ときに滑動

(b) BE

ポンプの出力	V3 流速 [cm/s]	結果
25%	65.6	滑動なし
30%	83.7	滑動なし
40%	123.0	滑動なし
50%	154.7	滑動なし
60%	186.2	滑動
70%	207.0	かみ合ったまま滑動せず

(c) CF

ポンプの出力	V3 流速 [cm/s]	結果
30%	105.6	滑動なし
40%	137.7	滑動なし
50%	159.5	滑動なし
60%	176.1	滑動なし

一般に滑動限界時には次の関係が成り立つ。

$$F_H + \mu F_V = \mu W' \quad (4.5)$$

$$F_H = f_H A_H, F_V = f_V A_V$$

ここで、 F_H および F_V は水平および鉛直力で、 μ はコンクリートと捨石マウンド間の摩擦係数 (=0.6)、 W' は水中重量である。CS3D を用いて、表-4.1 のケースの流れ場を再現し、式(4.3)~(4.5) を用いて開口部中央の潜堤に作用する力を算定し、滑動安定性の評価を行った。なお、滑動安定性の評価には、式(4.6)にある滑動安全率の式を用いた。これは式(4.5)の滑動限界時の式から導出したものである。

$$S.F. = \frac{\mu(W' - F_V)}{F_H} \quad (4.6)$$

ここで、 $S.F.$ は滑動安全率である。 $S.F. > 1.0$ のときに非滑動、 $S.F. < 1.0$ のときに滑動することを示している。

図-4.5 に、AD における、V3 の流速および滑動安全率の関係を示す。図-4.5 はポンプ出力が 30%、40%、50%、60% のケースおよび V3 が 187.9cm/s の定常流のケースを CS3D で再現計算した流速値と圧力の計算結果から算出した滑動安全率の関係である。白抜き四角点は、再現計算の対象とした実験において潜堤模型が滑動してなくて、黒塗りの四角点は、再現計算の対象とした実験において潜堤模型が滑動したことを示している。また、図-4.5 には、2.2 の 1) の実験において、V3 で計測した流速値と PG1~6 で計測した圧力値から式(4.1)、(4.2)、(4.5) および(4.6) を用いて算出した滑動安全率の関係を丸点でプロットしている。プロットした丸点に近似曲線を引いたところ、指数近似曲線が最も一致していたので、図中に指数近似曲線を実線で示している。表-4.2 (a) には実験結果および CS3D の再現計算結果による潜堤模型 AD の V3 の流速および滑動安全率の値を示す。CS3D で再現計算した結果から算出した滑動安全率は、実験結果から算出した滑動安全率の指数近似曲線上にほぼ一致している。実験において潜堤模型が滑動していない場合、実験結果およびその再現計算における滑動安全率の値は、ともに 1.0 以上であり、潜堤模型の挙動と滑動安全率の値の整合性がとれていることがわかる。潜堤模型が滑動したケースを CS3D で再現計算した結果から算出した滑動安全率の値は 1.0 より小さい 0.89 であり、実験において潜堤模型が滑動したことを CS3D で評価できていることがわかる。

図-4.6 は、BE における、V3 の流速および滑動安全率の関係を示す。四角点はポンプ出力が 25%、30%、40%、50%、60%、70% のケースにおける CS3D で計算した流速の再現計算と圧力の計算結果から算出した滑動安全率の関係である。四角点のうち白抜きは、再現計算の対象とした実験において潜堤模型が滑動してなくて、黒塗りは再現計算の対象とした実験において潜堤模型が滑動したことを示している。また、図-4.6 には、2.2 の 1) の実験において、V3 で計測した流速値と PG1~8 で計測した圧力値から算出した滑動安全率の関係を丸点でプロットしている。図中の実線は丸点の指数近似曲線で、破線は丸点の誤差 20% の点の指数近似曲線を表している。表-4.2 (b) に実験結果および CS3D の再現計算結果による潜堤模型 BE の V3 の流速および滑動安全率の値を示す。CS3D で再現計算した結果から算出した滑動安全率は、実験結果から算出した滑動安全率の誤差+20% の指数近似曲線上にほぼ一致している。実験において潜堤模型が

滑動していない場合、実験結果およびその再現計算における滑動安全率の値は、ともに 1.0 以上であり、潜堤模型の挙動と滑動安全率の値の整合性がとれていることがわかる。しかし、潜堤模型が滑動したポンプ出力 60% のケースでは CS3D で再現計算した結果から算出した滑動安全率の値は 1.0 より大きい 1.54 であり、実験において潜堤模型が滑動したことを CS3D で評価できていない。これは、実験の V3 の流速が 186.2cm/s に対して、CS3D 再現計算の V3 の流速が 179.3cm/s であり、CS3D における流速の過小評価が滑動安定性の過大評価につながった可能性が考えられる。また、図-4.7 に潜堤模型 BE、ポンプ出力が 60% のケースを再現計算したときの潜堤の滑動安全率の幅方向分布を示す。破線は誤差-20%で、潜堤 No. については、図-4.8 に示す。図-4.6 より実験の滑動安全率が CS3D で算出した滑動安全率より 20% 小さいことを考慮に入れると、図-4.7 の破線が実験の滑動安全率であると考えられる。この場合、堤頭部近くの No.1 および No.13 の潜堤の滑動安全率は 1.1 程度まで下がるので、堤頭部付近の潜堤から滑動した可能性が考えられる。ポンプ出力 70% のケースでは、CS3D で再現計算した滑動安全率の値は 1.0 より小さい 0.92 であったが、潜堤模型は動かなかった。これはコンクリートの底面と捨石マウンド間の摩擦に加えて、隣接する潜堤模型同士で摩擦が生じたため、潜堤模型が動かなかったと考えられる。

図-4.9 に、CF における、V3 の流速および滑動安全率の関係を示す。四角点はポンプ出力が 30%、40%、50%、60% のケースを CS3D で再現計算した流速値と計算結果から算出した滑動安全率の関係である。また、図-4.9 には、2.2 の 1) の実験において、V3 で計測した流速値と PG1~12 で計測した圧力値から算出した滑動安全率の関係を丸点でプロットしていて、図中の実線は丸点の指数近似曲線である。表-4.2 (c) には実験結果および CS3D の再現計算結果による潜堤模型 CF の V3 の流速および滑動安全率の値を示す。CS3D で再現計算した結果から算出した滑動安全率は、実験結果から算出した滑動安全率の指数近似曲線上にほぼ一致している。潜堤模型が滑動していない 30%、40%、50% の実験においては、実験結果およびその再現計算における滑動安全率の値は、ともに 1.0 以上であり、潜堤模型の挙動と滑動安全率の値の整合性がとれていることがわかる。潜堤模型が滑動していないケースでも 60% の場合では、CS3D で再現計算した結果から算出した滑動安全率の値は 1.0 より小さい 0.87 であった。しかしながら、実験の V3 の流速値が 174.9cm/s に対して CS3D で再現計算した V3 の流速値が

195.0cm/s であるので、図中の指数近似曲線から流速が 195.0cm/s のとき滑動安全率が 1.0 以下であると考えられる。したがって、実験で 195.0 cm/s の流速が得られていれば、潜堤模型が滑動する可能性があったと考えられる。

CS3Dを用いて潜堤に作用する水平圧力 f_H を実験値の10%の誤差の範囲で、揚圧力 f_V を実験値の30%の誤差の範囲で再現できることがわかった。CS3Dで実験の流況を再現できれば、実験結果から得られた滑動安全率を再現できた。また、数値計算の誤差を考慮に入れば、潜堤の滑動判定をほぼ正確できることがわかった。

(破線：誤差-20%)

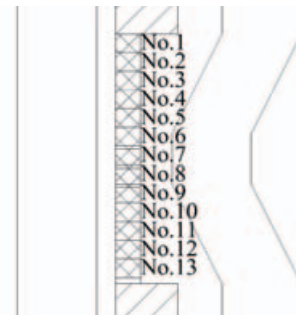


図-4.8 潜堤模型の配置

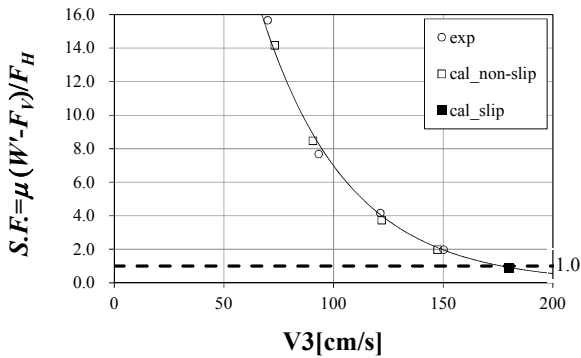


図-4.5 潜堤模型 AD における V3 の流速と滑動安全率の関係 (実線：exp の指数近似曲線)

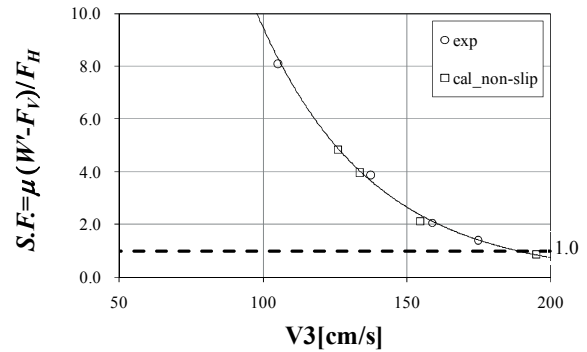


図-4.9 潜堤模型 CF における V3 の流速と滑動安全率の関係 (実線：exp の指数近似曲線)

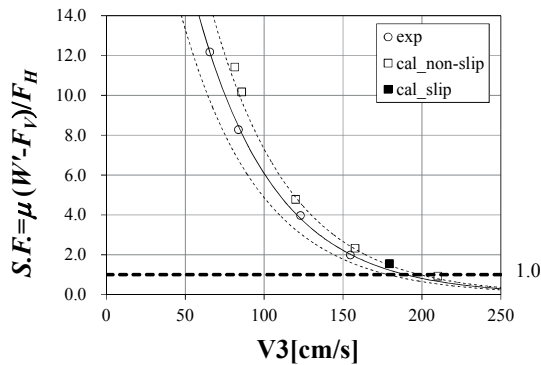


図-4.6 潜堤模型 BE における V3 の流速と滑動安全率の関係 (実線：exp の指数近似曲線；破線：exp の誤差±20%の指数近似曲線)

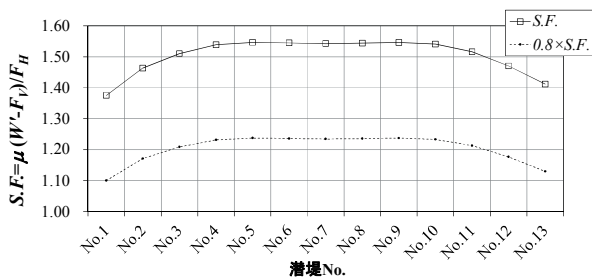


図-4.7 潜堤模型 BE, ポンプ出力 60% のケースを再現計算したときの潜堤の滑動安全率の幅方向分布

表-4.2 実験および CS3D の再現計算による潜堤の滑動安全率と滑動実験結果

(a) AD

ポンプの出力	実験結果			CS3D 計算結果	
	V3 流速 [cm/s]	滑動安全率	潜堤の挙動	V3 流速 [cm/s]	滑動安全率
30%	70.0	15.65	滑動なし	79.8	14.16
40%	93.2	7.67	滑動なし	98.7	8.46
50%	121.3	4.16	滑動なし	132.1	3.74
60%	150.2	1.97	滑動なし	158.7	1.97
※	187.9	—	滑動	192.4	0.89

※実験では波高 20cm, 周期 20s の規則波を造波, CS3D では V3 が 187.9cm/s となるような定常流を計算

(b) BE

ポンプの出力	実験結果			CS3D 計算結果	
	V3 流速 [cm/s]	滑動安全率	潜堤の挙動	V3 流速 [cm/s]	滑動安全率
25%	65.6	12.18	滑動なし	81.4	11.42
30%	83.7	8.28	滑動なし	85.9	10.17
40%	123.0	3.97	滑動なし	119.9	4.77
50%	154.7	1.98	滑動なし	157.6	2.32
60%	186.2	—	滑動	179.3	1.54

70%	207.0	—	かみ合ったまま滑動せず	210.0	0.92
-----	-------	---	-------------	-------	------

(c) CF

ポンプの出力	実験結果			CS3D 計算結果	
	V3 流速 [cm/s]	滑動安全率	潜堤の挙動	V3 流速 [cm/s]	滑動安全率
30%	105.2	8.10	滑動なし	126.1	4.83
40%	137.4	3.88	滑動なし	133.7	3.97
50%	158.9	2.06	滑動なし	154.6	2.13
60%	174.9	1.40	滑動なし	195.0	0.87

5. 被覆ブロックの滑動安定性

ここでは開口部の流れによる被覆ブロックの被災状況を調べ、CS3D で被災した流況を再現し、計算結果およびCERCの式を用いて、被覆ブロックの滑動判定を行う。

5.1 測定方法

図-5.1 に本実験の断面図を示す。BE のケースの潜堤を用いて、潜堤の岸沖方向の両側面に根固ブロックを設置し、マウンドの天端と傾斜部の上半分の領域に被覆ブロックを設置した。本実験では、図-5.2 に示す寸法の被覆ブロック A および被覆ブロック B を使用した。被覆ブロックの重量は被覆ブロック A が 158g、被覆ブロック B が 150.9g (ともに現地換算にして約 4t) で、B には作用する揚圧力を減少させるための穴が開いている。図-5.3 にそれぞれの被覆ブロックの設置場所を示している。被覆ブロック A は図-5.3 に示す領域 A1 (上流側) に被覆ブロック A を 297 個、領域 A2 (下流側) に被覆ブロック A を 473 個配置した。被覆ブロック B については図-5.3 に示すとおり、領域 B1 (上流側) に 229 個、領域 B2 (下流側) に 399 個の被覆ブロック B 配置した。

ポンプの出力が 25%~70% である流れをそれぞれ 180s 発生させ、計測が終了した毎に被覆ブロックが滑動している個数を目視で測定した。各計測後に滑動した被覆ブロックがあっても、設置し直すことなく計測を進めた。潜堤は 65% のケースで滑動し、計測は 70% のケースまで行った。

5.2 実験における被覆ブロックの滑動特性

写真-5.1 は被覆ブロックの被災状況の (a) ~ (c) の順に時系列で示したものである。写真-5.1 (a) は流れを作用させる前の被覆ブロックの設置の様子である。なお、

対象とする被覆ブロックは、写真-5.1 (a) の丸印に示した潜堤の岸沖方向の側面に設置している被覆ブロックで、

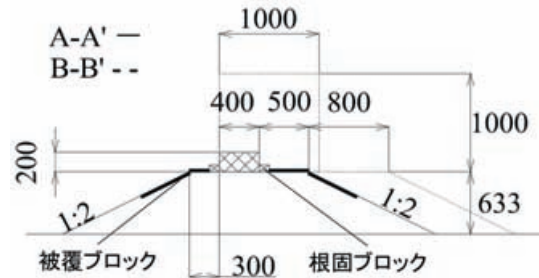


図-5.1 実験断面図 (A-A', B-B'は図-2.2を参照)

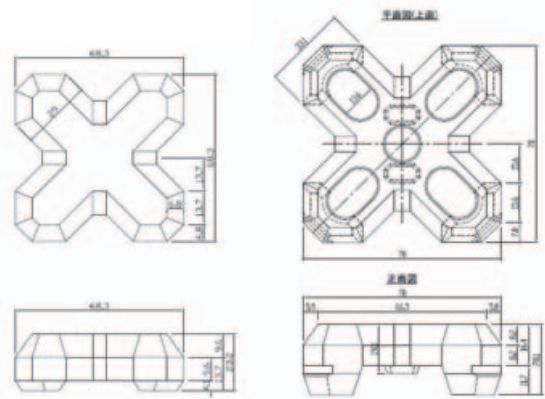


図-5.2 被覆ブロック寸法 (単位: mm)

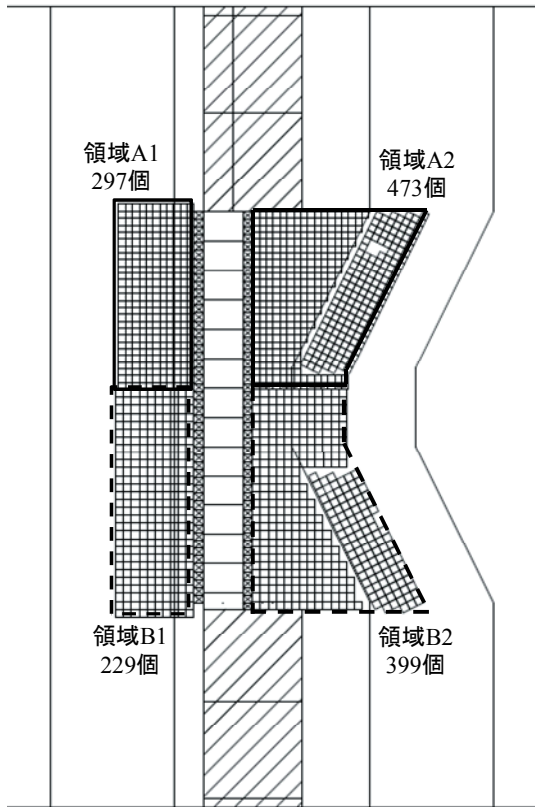
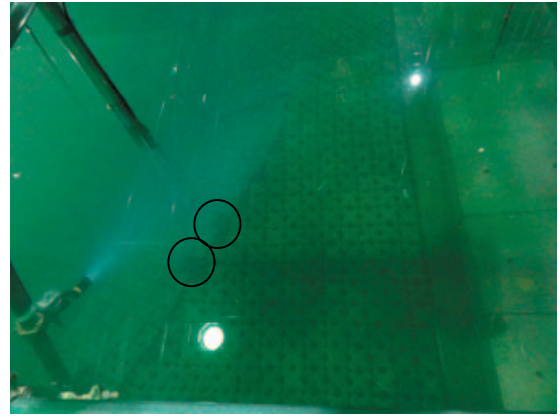


図-5.3 被覆ブロックの設置場所



(a) 被覆ブロックの設置の様子



(b) 被覆ブロック A が初期移動した状態 (ポンプ出力 45%; 被覆ブロック A)



(c) 潜堤滑動時の被覆ブロックの被災状況 (ポンプ出力 70%作動後)

写真-5.1 被覆ブロックの被災状況の時系列

防波堤の側面に設置している被覆ブロックはダミーとする。ケース毎に流速を増して、ポンプ出力 45%としたときに写真-5.1 (b) の丸印に示すように法肩付近で被覆ブ

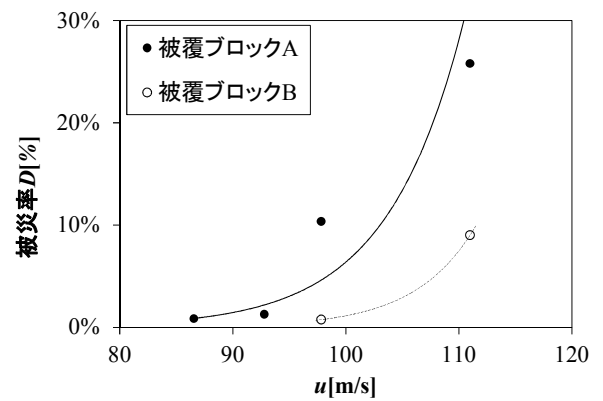
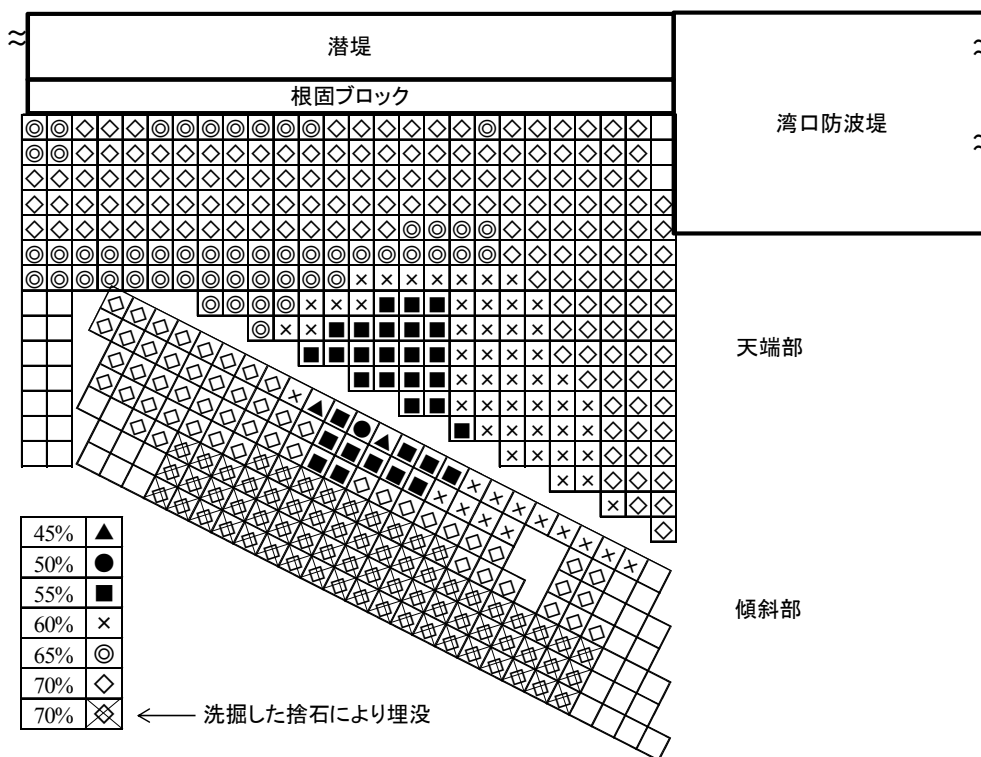


図-5.5 V6 と被覆ブロックの被災率の関係 (下流側)

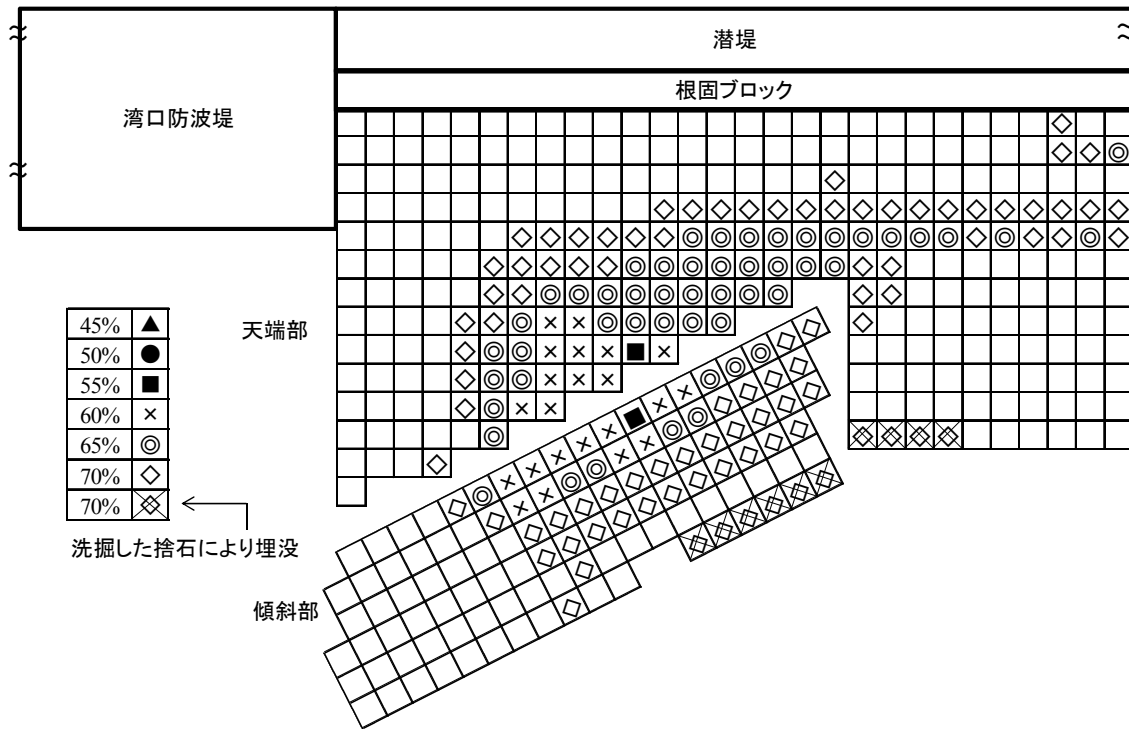
ロックの初期移動が生じた。さらに流速を大きくし、ポンプ出力70%としたケースで、潜堤も滑動し、写真-5.1(c)に示すように潜堤と被覆ブロックがともに被災を受けた。

図-5.4(a)は被覆ブロックAのケース毎の下流側の被災範囲を示す。ポンプの出力が45%のケースで法肩斜面部分に被災が生じている。流速が大きくなっていくにたがって、初期移動した部分から、被災範囲が広がっていく様子が見える。潜堤滑動後のケースでは、潜堤の滑動によって被災した被覆ブロックも存在した。また、被覆ブロック滑動後に捨石の洗掘が生じていて、洗掘された捨石によって埋没していた被覆ブロックも多く見られた。最終的に、流れの方向と平行な傾斜部および防波堤側の傾斜部では、被災は見られなかった。図-5.4(b)は被覆ブロックBの被災過程である。被覆ブロックAがポンプ出力45%で初期移動したのに対して、被覆ブロックBは55%で初期移動した。これにより被覆ブロックB

の方が滑動に対する安定性が高いことがわかる。初期被災場所については、被覆ブロックAと大きくは変わらない。また、A、Bともに上流側における被覆ブロックの被災はなかった。図-5.5はV6で計測したx方向流速と被覆ブロックAおよびBの被災率の関係である。被災率は当該ケースまでに被災したブロックの個数を対象領域(被覆ブロックAは領域A2、被覆ブロックBは領域B2)のブロック総数で除することによって算出している。V6はマウンド上20cmに計測器を設置している。被覆ブロックAがBより先に被災し、被災率もBより高いことがわかる。なお、被災率は被覆ブロックが流れに起因して滑動した60%のケースまで示して、流れ以外の要素によって滑動した被覆ブロックが含まれる65%以上のケースは示していない。



(a) 被覆ブロックA (下流側)



(b) 被覆ブロック B (下流側)

図-5.4 被覆ブロックの被災状況

5.3 被覆ブロック重量の算定手法

滑動限界状態における被覆ブロック所要重量の算定式として、以下に示す CERC (1977) が提案したイスパッシュ式がある。

$$M = \frac{\pi \rho_r u_d^6}{48 y^6 g^3 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (5.1)$$

ここで、 M はマウンド被覆材の所要重量、 u_d は被覆ブロック周辺の流速、 θ はマウンド傾斜角 (天端部 : 0, 傾斜部 : 26.6°), ρ_r はマウンド被覆材の密度、 S_r はマウンド被覆材の比重、 g は重力加速度、 y はイスパッシュ定数である。イスパッシュ定数とは被覆ブロックの滑動限界状態における定数で、CERC (1977) は、露出した石で 0.86、埋め込まれた石で 1.20 の値を提案している。また、過去の研究では、岩崎ら (1984) が津波防波堤の開口部にマウンド被覆材を用いた捨石堤の場合について二次元定常流による実験を行っている。この場合には天端付近でのマウンド被覆材の初期移動に対する式(5.1)のイスパッシュの定数として、露出した石で 0.86、埋め込まれた石で 1.20 の中間の値 1.08 を得ている。

表-5.1 に被覆ブロックの被災率と CERC の式における係数 y の値を示す。表-5.1(a) より被覆ブロック A につ

いては、被災率が 0% と 0.85% の間で滑動限界状態となる。被災率が 0%, 0.85% に対応する y の値はそれぞれ 1.04, 1.18 である。したがって、実験結果より被覆ブロック A のイスパッシュ定数は $y=1.04$ と 1.18 の間の値である。被覆ブロック B については、表-5.1(b) より被災率が 0% と 0.43% の間で滑動限界状態となる。被災率が 0%, 0.43% に対応する y の値はそれぞれ 1.27, 1.33 である。したがって、実験結果より被覆ブロック B のイスパッシュ定数は $y=1.27$ と 1.33 の間の値であり、被覆ブロック A よりも安定性の高い値を示している。

5.4 数値波動水槽を用いた被覆ブロックの滑動安定性の評価

数値波動水槽および CERC の式を用いて被覆ブロックの滑動判定を行う。まず、CS3D を用いて図-5.6 に示した黒塗りの点における定常状態の鉛直平均流速を算出し、流速の平面分布を作成する。鉛直平均流速は x, y, z 方向の合成流速とした。図-5.7 に CS3D で計算した鉛直流速分布と実験における被覆ブロック A の滑動箇所を示す。×印は実験において対象ケースまでに滑動した被覆ブロックを示す。実験では、ポンプ出力 45% および 50% でブロックが初期移動する。初期移動する箇所は対象領域における流速の最大値ではないことがわかる。55%, 60% と滑動が進むにつれて、実験では被覆ブロックが初期移

動した箇所から、放射状に滑動箇所が広がる。しかしながら、被覆ブロックの滑動の広がる方向は必ずしも流速の最大値ではないことがわかる。図-5.8にCS3Dで計算した鉛直流速分布と実験における被覆ブロックBの滑動箇所を示す。被覆ブロックAと同様に実験における初期移動箇所は対象領域における流速の最大値ではなく、滑動が進むにつれて初期移動した箇所から、放射状に滑動箇所が広がり、広がる方向は必ずしも流速の最大値ではないことがわかる。

表-5.1 被覆ブロックの被災率と CERC の式における係数 y の関係

(a) 被覆ブロック A

ポンプの出力	V6x 方向流速 [cm/s]	被災率 D [%]	y
25%	50.4	0.00	0.69
30%	55.8	0.00	0.76
40%	76.1	0.00	1.04
45%	86.6	0.85	1.18
50%	92.8	1.27	1.27
55%	97.8	10.36	1.33
60%	111.0	25.79	1.51

(b) 被覆ブロック B

ポンプの出力	V6x 方向流速 [cm/s]	被災率 D [%]	y
25%	50.4	0.00	0.69
30%	55.8	0.00	0.76
40%	76.1	0.00	1.04
45%	86.6	0.00	1.18
50%	92.8	0.00	1.27
55%	97.8	0.75	1.33
60%	111.0	9.02	1.51

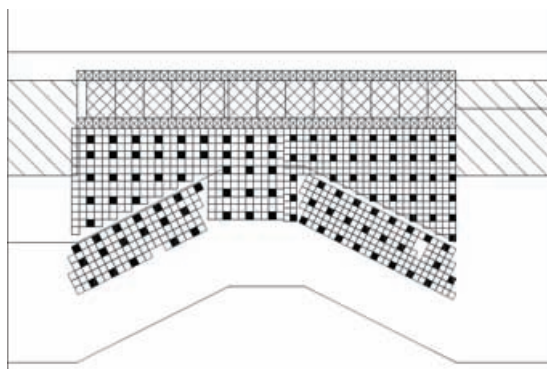
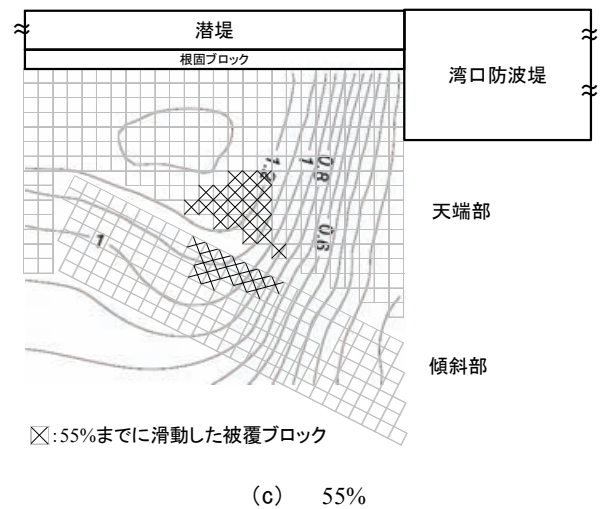
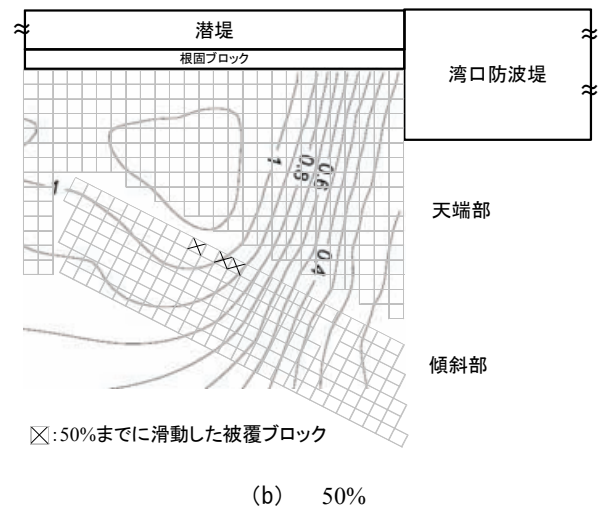
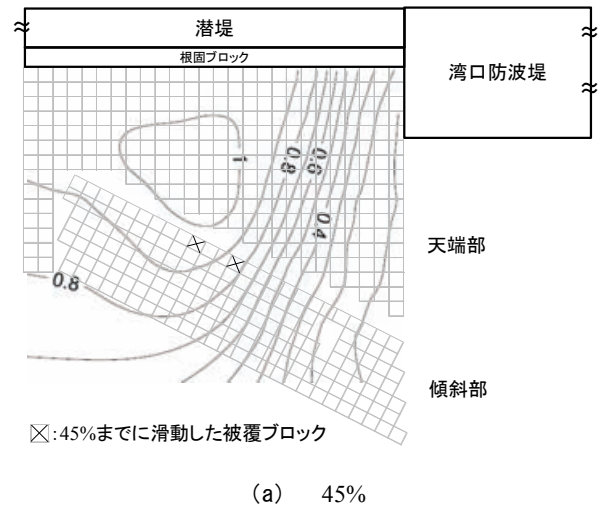


図-5.6 鉛直平均流速出力地点



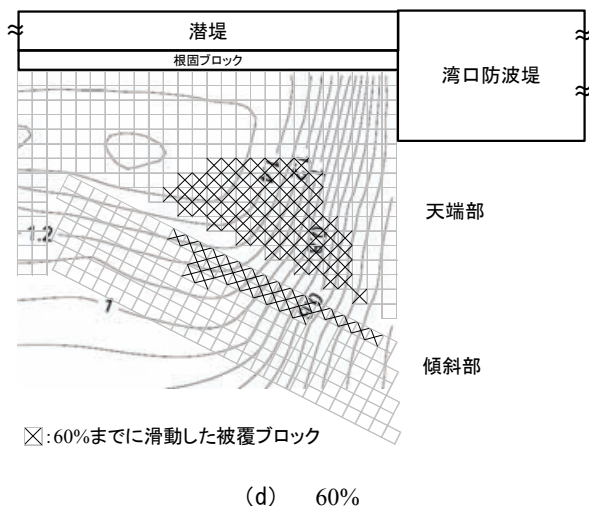


図-5.7 CS3D で計算した鉛直流速分布と実験における被覆ブロック A の滑動箇所 (コンター：流速[m/s])

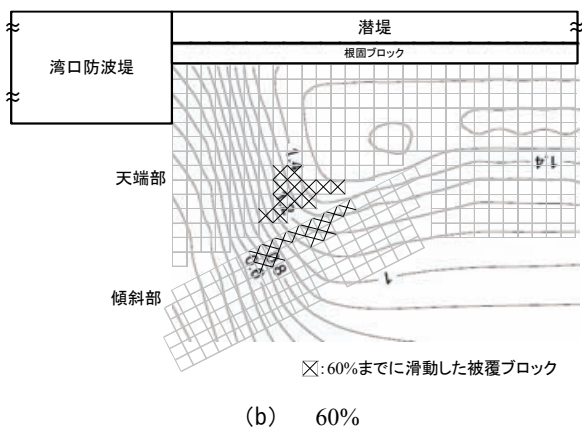
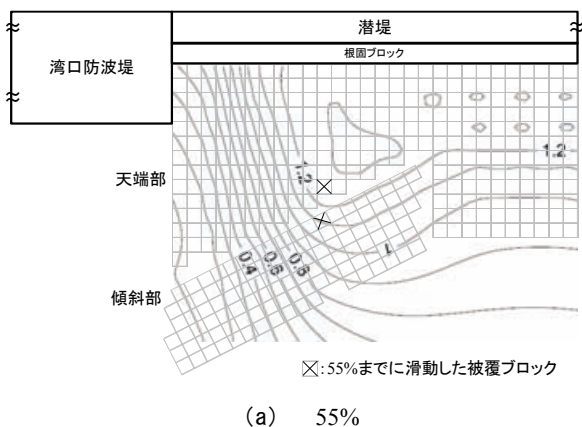


図-5.8 CS3D で計算した鉛直流速分布と実験における被覆ブロック B の滑動箇所 (コンター：流速[m/s])

次に、CS3D で計算した流速から被覆ブロックの滑動限界重量を CERC の式を用いて算出する。この重量を計算重量 M_c と定義する。イスパッシュ定数は $y=1.08$ を用いた。滑動判定は重量比 (計算重量 M_c / 実験における被覆ブロックの重量 M) で行っていて、重量比 (M_c/M) >1 の場合、計算上被災する。図-5.9 に CS3D で計算した重量比 (M_c/M) の平面分布と実験における被覆ブロック A の滑動箇所を示す。×印が実験において対象ケースまでに滑動した被覆ブロックを示す。図-5.9 より、被覆ブロックが初期移動したポンプ出力 45% および 50% のケースでは、実験の初期移動箇所は $M_c/M >1$ の領域であり、 $M_c/M <1$ の領域では、実験で被災していないことがわかる。被覆ブロックの滑動が進んだポンプ出力 55% のケースにおいても、滑動した被覆ブロックのほとんどが $M_c/M >1$ の領域である。しかしながら、流速分布の場合と同様に、実験における被覆ブロックの滑動範囲は重量比のピーク値の方向に広がるわけではない。ポンプ出力 60% のケースでは、 $M_c/M <1$ の領域であるにもかかわらず滑動する被覆ブロックが見られた。図-5.10 に CS3D で計算した重量比 (M_c/M) の平面分布と実験における被覆ブロック B の滑動箇所を示す。被覆ブロック A と同様に被覆ブロックが初期移動したポンプ出力 55% のケースでは、実験における初期移動箇所は $M_c/M >1$ の領域である。滑動が進んだポンプ出力 60% のケースにおいても、実験で滑動した被覆ブロックのほとんどが $M_c/M >1$ の領域であるが、被覆ブロックの滑動の広がる方向と重量比のピーク値は一致していない。

図-5.11 に対象領域 (被覆ブロック A は領域 A2、被覆ブロック B は領域 B2) における重量比の平均値と実験における被覆ブロックの被災率を示す。被覆ブロック A の初期移動が発生したポンプ出力 45% および 50% のケースでは、平均重量比が 1.0 程度で被災率が 5% 以下であることがわかる。滑動が進んだ 55% のケースで平均重量比が 2.5 程度で被災率が 10% 程度となり、60% では、平均重量比が 7.0 程度で被災率が 25% 程度であることがわかる。図中の直線は、被覆ブロック A の重量比と被災率の関係をプロットした点の線形近似直線であり、この直線の相関係数は 0.989 である。被覆ブロック B については、初期移動が発生したポンプ出力 55% のケースでは、平均重量比が 4.0 程度で被災率が 5% 以下で、滑動が進んだ 60% のケースで平均重量比が 12.0 程度で被災率が 10% 程度であることがわかる。

CS3D を用いて算出した流速およびイスパッシュ定数を CERC の式(1977) に代入し、被災判定を行ったところ、滑動判定された領域で、被覆ブロックの初期移動するこ

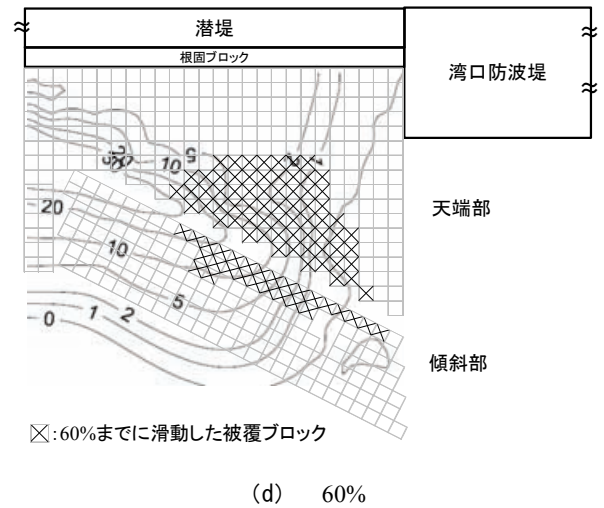
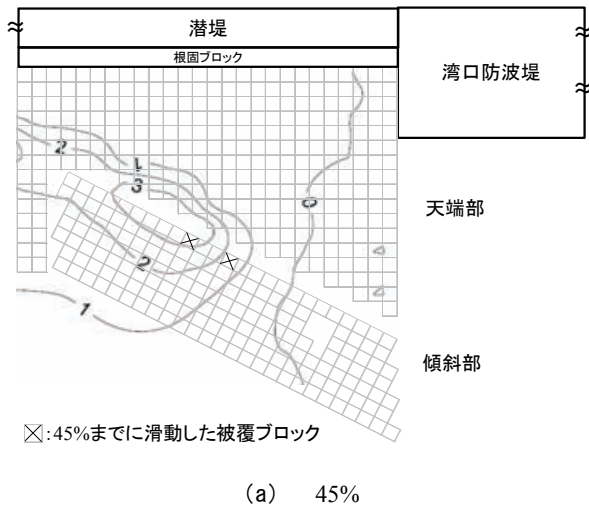


図-5.9 CS3D で計算した M_c/M の平面分布と実験における被覆ブロック A の滑动箇所 (コンター: M_c/M の値)

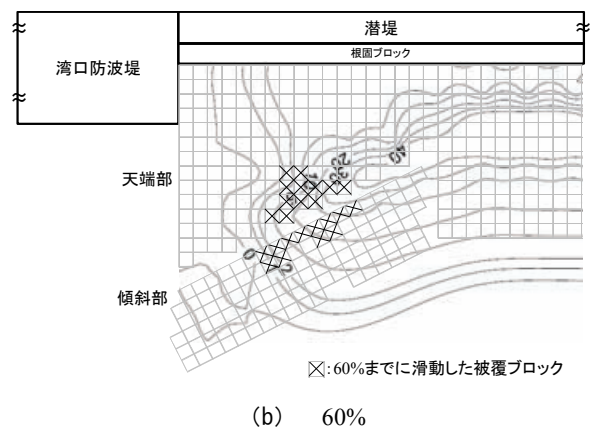
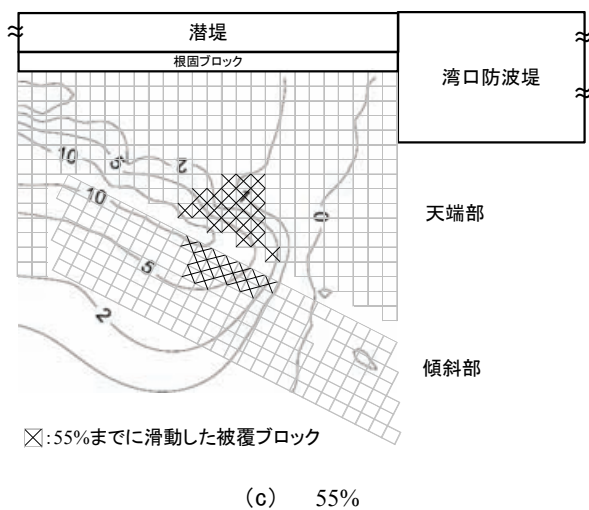
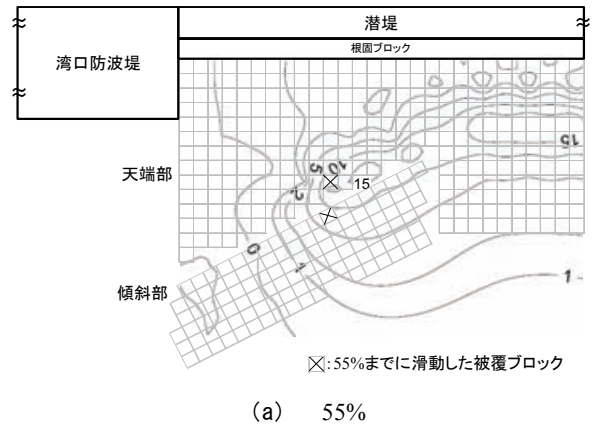
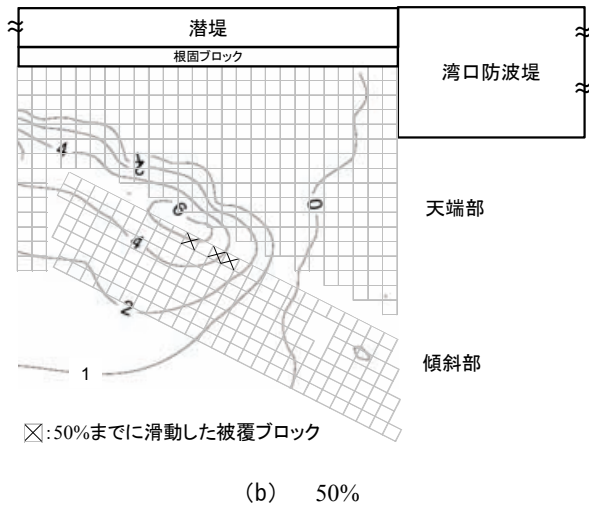


図-5.10 CS3D で計算した M_c/M の平面分布と実験における被覆ブロック B の滑动箇所 (コンター: M_c/M の値)

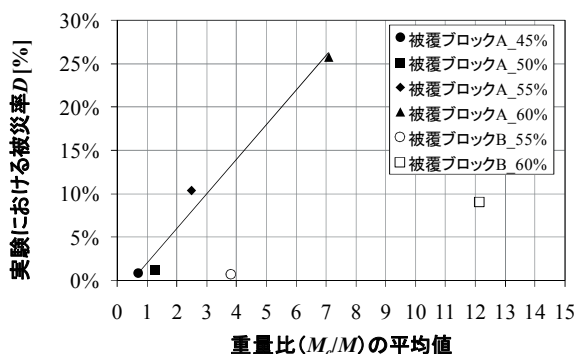


図-5.11 対象領域における重量比の平均値と実験における被覆ブロックの被災率

とがわかった。また、CS3D で算出した重量比の平均値と実験における被覆ブロックの被災率に相関関係があることもわかった。詳細な被覆ブロックの飛散もしくは滑動のメカニズムを明らかにするには、被覆ブロックに圧力計を設置して圧力を計測する必要があるが、被覆ブロックについても4章で行ったような詳細な計算を行えば、滑動判定をできる可能性がある。ただし、幅7~8cm、高さ2cm程度の被覆ブロックの周辺を計算するには、最も粗くても5mm程度の格子で計算することが必要である。5mmの格子で本研究の計算領域で計算を行う場合、本研究の計算格子数の1000倍の38億格子を必要とするので、計算時間の問題より本研究では行わなかった。これらの検討については今後の課題とする。

6. おわりに

本研究では、実験および数値計算を用いて、湾口防波堤の開口部における安定性の検討を行った。本研究で得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 防波堤開口部周辺の流速、水位については、CS3Dを用いて誤差20%以内で再現できることを確認した。潜堤に設置した計測点における圧力のCS3Dにおける再現計算については、再現できる箇所とできない箇所があった。

これは特に、潜堤の下面の圧力と上面の圧力であり、格子の分割が水深に対して粗くなったときに生じる問題であると考えており、今後計算機が発展し、より細かい格子サイズで計算することが可能となれば、原因を追求すべきである。

(2) CS3Dを用いることで潜堤に作用する水平圧力 f_H を実験値の誤差10%以内の範囲で、揚圧力 f_V を実験値の誤差30%以内の範囲で再現できることがわかった。潜堤の滑動実験結果からCS3Dを用いた滑動安定性の評価の

妥当性を確認できた。

(3) CS3Dを用いて算出した流速およびイスピッシュ定数をCERCの式(1977)に代入し、被災判定を行ったところ、滑動判定された領域で、被覆ブロックの初期移動することがわかった。また、CS3Dで算出した重量比の平均値と実験における被覆ブロックの被災率に相関関係があることもわかった。

(2013年4月26日受付)

謝辞

本実験の実施にあたり、元海洋研究領域耐波研究チームの佐藤昌治、鷺崎誠両研究官の多大な協力を得ている。また、下迫健一郎海洋研究領域長には、実験データの取り扱いのご指導や現象についてのアドバイスをいただいた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 有川太郎・山田文則・秋山 実 (2005) : 3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.46-50.
- 岩崎敏夫・真野 明・中村武弘・堀越伸幸 (1984) : 潜堤マウンド材およびプレパックド堤に作用する定常流体力に関する研究, 海岸工学論文集, 第31巻, pp.527-531.
- 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司 (1988) : 津波防波堤開口部潜堤の安定性に関する実験的研究, 港湾空港技術研究所報告, 第27巻4号, pp.93-121.
- Costal Engineering Research Center (1977) : Shore protection Manual, Vol. II, pp.7-215.

記号表

- A_H : 潜堤模型の水平投影面積
 A_V : 潜堤模型の鉛直投影面積
 C_D : 抗力係数
 C_M : 慣性力係数
 D_x, D_y, D_z : エネルギー減衰帯のための係数
 F_H : 水平力
 f_H : 定常流中に置かれた潜堤模型に作用する水平圧力
 F_V : 鉛直力
 f_V : 定常流中に置かれた潜堤模型に作用する揚圧力
 g : 重力加速度
 M : マウンド被覆材の所要重量
 M_c : 計算重量
 p : 圧力
 p_i : 圧力計で計測した定常状態における圧力の平均値

p_i' : CS3Dで計算した定常状態における圧力の平均値
 R_x, R_y, R_z : 多孔質体からの抵抗力
 S_i : 圧力計の代表面積
 S_i' : CS3Dの計算セルの代表面積
 S_r : マウンド被覆材の比重
 S_p, S_w, S_v, S_w : 造波ソースに関する係数
 $S.F.$: 滑動安全率
 t : 時間
 u, v, w : x, y, z 方向の流速成分
 u_d : 被覆ブロック周辺の流速
 v_{in} : CS3Dの流入境界の流速
 v_{out} : CS3Dの流出境界の流速
 W' : 水中重量
 x, y : 水平方向座標
 y : イスバッシュ定数
 z : 鉛直方向座標
 γ_v : 空隙率
 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$: 面積透過率
 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$: x, y, z 方向の格子間隔
 $\lambda_v, \lambda_u, \lambda_n, \lambda_w$: 慣性力効果を示したパラメータ
 μ : 摩擦係数
 ν_e : 分子粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和
 θ : マウンド傾斜角
 ρ : 基準密度
 ρ^* : 浮力を考慮した密度
 ρ_r : マウンド被覆材の密度

港湾空港技術研究所資料 No.1274

2013.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2013) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています