

2D/3Dハイブリッドモデルによる 構造物に作用する流体力の検討

EXAMINATIONS OF FLUID FORCES
ON THE STRUCTURE BY USING 2D/3D HYBRID MODEL

正村憲史¹・藤間功司²・後藤智明³・重村利幸⁴

Kenji MASAMURA, Koji FUJIMA, Chiaki GOTO and Toshiyuki SHIGEMURA

¹正会員 修(工) 防衛大学校助手 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

²正会員 工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1207 神奈川県平塚市北金目1117)

⁴正会員 Dr. Eng 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

The fluid forces acting on the structures are examined by using 2D/3D hybrid model in which the conventional 2D model is adopted for the calculation in the wide region located far from the structures. The 3D non-hydrostatic pressure numerical model is used in the limited region adjacent to the coastal structures where the three-dimensional motion could not be neglected anymore. The results of the model tests are compared with the numerical results obtained by both the present hybrid model and the conventional 2D model, to examine the validity of the present model. As a result, it is verified that the present hybrid model reduces a calculation load significantly comparing to the calculation load by using 3D model for the whole domain. Though this model reproduces the characteristics of the three-dimensional complicated flow around the opening of breakwater that cannot be reproduced by the conventional 2D model. The usual method cannot give sufficiently accurate results for a flow around structures.

Key Words : Numerical simulation, 2D/3D hybrid numerical model, Breakwater, Fluid forces

1. はじめに

現在, 津波対策として各地で津波防波堤が建設されている。津波防波堤は, 通常の波浪とともに津波から湾内を防護することを目的としており, 防波堤により湾口部を締め切ることによって, 湾内への津波の流入を軽減させている。さらに開口部に潜堤を設置することにより締め切り効果を高めている。しかし, 津波の来襲時においてその開口部は著しい狭窄部となり, 昭和8年の三陸津波と同程度の津波では8m/sの強い流れの発生が予想され¹⁾, 通常の波浪よりもはるかに大きな流体力がかかる。よって防波堤建設の際にはマウンド捨石や開口部潜堤の流れに対する安定性などを検討する必要がある。そのためには防波堤周辺の複雑な流況を把握しなければならない。従来から用いられている津波の数値計算モデルは平面2次元モデルであり, 圧力分布が静水圧に近く, 水平流速が鉛直方向にはほぼ一様であるとの仮定のもとで誘導された支配方程式を用いている。したがって, 構造物周辺など,

その近似が成立しない場所への適用性に問題があり, 開口部周辺のような3次元的な複雑な流況を計算できない。そこで, 著者らは圧力の静水圧分布を仮定せずに運動方程式をそのまま用いる津波の3次元数値計算手法を開発した²⁾。この計算手法では微分の階数を増やさず, 強非線形性・強分散性を考慮できる。しかし, 3次元解析法では, 計算時間及び計算容量が平面計算と比較して莫大なものとなることから, 実用化する上での問題点であった。この問題を解消するため, 3次元計算は構造物周辺など3次元性が問題になる領域だけに限定し, その外側の部分は静水圧近似を用いた平面計算を行う, 実用的な3次元と2次元の混合計算法(2D/3Dハイブリッドモデル)を用いる。この計算より流れの3次元性を考慮し, 防波堤に作用する流体力の影響や防波堤の効果について調べる。また, 本計算法の適用性を検討するため, 防波堤周辺における津波の挙動に関する水理模型実験を実施し, 水理実験の結果と本計算手法による結果, および従来よく使用されている解析法である非線形長波理論を用いた解析結果とを比較検討する。

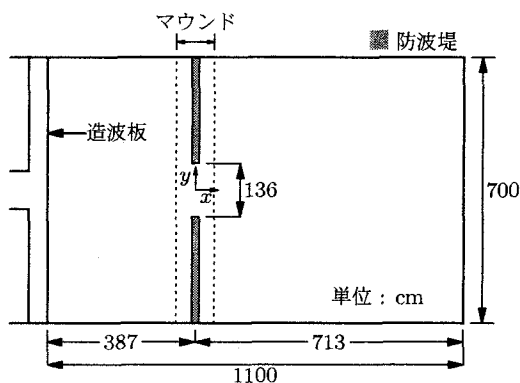


図-1 実験水槽

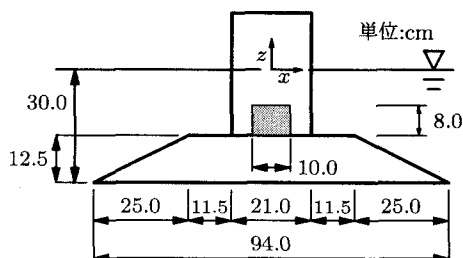


図-2 防波堤模型断面（潜堤あり）

2. 水理模型実験

まず、ハイブリッドモデルの適用性を検討するために行われた水理実験の概要について説明する。

水理模型実験は、図-1に示す防衛大学の7m×11mの平面水槽を用いて行った。水槽の左端にはピストン型の造波装置が設置してある。水槽の造波板境界以外の3方は直立壁である。水槽には中央に開口部を持つ津波防波堤の模型を設置した。また、開口部に潜堤を設置した場合と設置しない場合の2通りの実験を実施した。模型断面（潜堤あり）を図-2に示す。この防波堤模型は、幅94cm、高さ12.5cmの台形のマウンド上に幅21cmの箱形ケーソンを設置したものである。

実験および計算にあたり、防波堤開口部中央での静水面をデカルト座標系の原点とし、 x 軸は波の進行方向に、 z 軸は鉛直上向きにとる。また、 x 軸の負の方向（防波堤より造波板側）を沖側、正の方向を港側と呼ぶ。静水深は30cmである。入射波は波高約2cm、周期15sの正弦波である。模型縮尺1/200とし、フルードの相似則を使うと、これらの値は現地周期が3分30秒、現地波高が4.0mに相当する。

実験では静穏な状態から造波し始め、造波開始より入射波の2周期分である30秒間を測定時間間隔0.05秒で計測を行った。防波堤開口部周辺における水位を容量式波高計、また流速を電磁流速計にて測定している。水位の

計測範囲は、 x 方向に原点より ± 0.8 m、 y 方向は原点から防波堤端部までの範囲で、5cm間隔の格子点上で測定した。また、 $y=0, -20, -40, -65$ cmの x - z 断面において、 x 方向に原点より ± 0.8 m、鉛直方向に静水面下2.5cmから底面までの範囲で5cmの格子点上において流速(u, w)を計測した。流速・水位を計測すると同時に造波板位置を記録することにより、各データの時間を同期した。

また、流速・水位ともに同一点において、それぞれ5回から20回の計測を行った。実験データは0.5秒間で移動平均し、さらに同一点での計測の平均値をとり、実験値とした。

3. 計算方法

(1) 3次元領域

本計算方法では計算領域を直方体の格子に細かく分割し、それぞれの格子において、流速(u, v, w)を格子の境界面に、圧力 p を格子の中央に定義する。

地形を表す方法として、樺山ら³⁾、磯部ら⁴⁾が用いたポーラスメディア法を使用する。本来、ポーラスメディア法では透水層とセル内の斜面勾配を計算に取り入れることが可能である。ここでは、透水層は考えないが、セルの中での斜面勾配を考慮する。

すなわち、3次元計算領域では以下の支配方程式を使用する。

$$\gamma_v \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p \delta_{ij}}{\partial x_j} + g_i + \frac{\partial \gamma_j \nu_i e_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \gamma_i u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ただし、 x_i は座標 x, y, z を、 u_i は各方向流速 u, v, w を表す。 ρ は密度、 p は圧力、 g_i は重力加速度の各方向

成分、 e_{ij} は変形速度 $e_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ 、 ν_i は渦動粘性係数、である。 γ_i, γ_v は海底地形や構造物の形状を表現するために導入する透過率・空隙率である。 γ_i は、セルの四辺における不透過部分の位置から各直方体セルの壁面において流体が通過できる面積の割合(透過率)を計算して与える。例えば、 γ_x は、

$$\gamma_x = \frac{\text{流体が通過できる面積}}{\Delta y \times \Delta z} \quad (3)$$

とする。 γ_v は、各セルにおいて流体が入り込める体積の割合(空隙率)を与える。すなわち、

$$\gamma_v = \frac{\text{流体が入り込める体積}}{\Delta x \times \Delta y \times \Delta z} \quad (4)$$

である。 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は各方向の格子間隔である。

乱流モデルとしては様々なモデルが提案されており、工学的手法として k - ε モデルがよく使われる。しかし、津波の数値計算において k - ε モデルの乱流計算に必要な

な細かな計算格子を使うことは事実上不可能であり、ゼロ方程式モデルを使わざるを得ない。

一方、格子平均モデル(LES)は本来 $k-\varepsilon$ モデルよりさらに細かな格子を使うべきモデルであるが、LESで用いられるSGS渦動粘性モデルを大格子の計算に適用しても、かなり妥当な計算結果が得られると報告されている⁵⁾。そこで、ここでは便宜的にSGS渦動粘性モデルを適用し、渦動粘性係数を次式で表す。

$$\nu_t = (c\Delta)^2 \sqrt{e_{ij}e_{ij}} \quad (5)$$

$$\Delta = (\Delta x \times \Delta y \times \Delta z)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

ここで c は定数であり、およそ 0.2 程度と言われている。本計算においても、 $c=0.2$ を用いる。ただし、大きな格子でSGSモデルを使えるという物理的根拠は無いから、本計算はLESではなく、渦動粘性係数が計算格子の大きさに関係づけられた単なるゼロ方程式モデルと解釈すべきである。

水表面位置の計算には、式(2)を水表面から底面まで積分した連続の式を使用する。また、運動方程式によって流速を求める際、圧力項は2次精度の中央差分により近似する。移流項の近似では安定した計算を行うため2次精度の風上差分を用いる。ただし、境界および障害物に隣接し、2次精度の差分に必要な流速を得られない場合は1次精度とする。時間発展に関しても差分を2次精度とするため、Crank Nicholson 法を用いる。

(2) 2次元領域

2次元計算領域では以下の非線形長波理論を用いる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta_{xx} \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta_{xy} \frac{MN}{D} \right) \\ + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f}{D^2} MQ = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta_{xy} \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta_{yy} \frac{N^2}{D} \right) \\ + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{f}{D^2} NQ = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 η は水位変動、 h は静水深、 D は $D=h-\eta$ で表される全水深、 f は運動量損失係数、 M, N は x, y 方向の流量フラックスである。運動量損失係数としては、通常、海底摩擦による損失を考える。マニング則を使うと、

$$f = f_B = \frac{gn^2}{D^{1/3}} \quad (10)$$

である。ただし n はマニングの粗度係数で、本計算においては $n=0.015\text{m}^{-1/3}\text{s}$ (コンクリート) とする。なお、

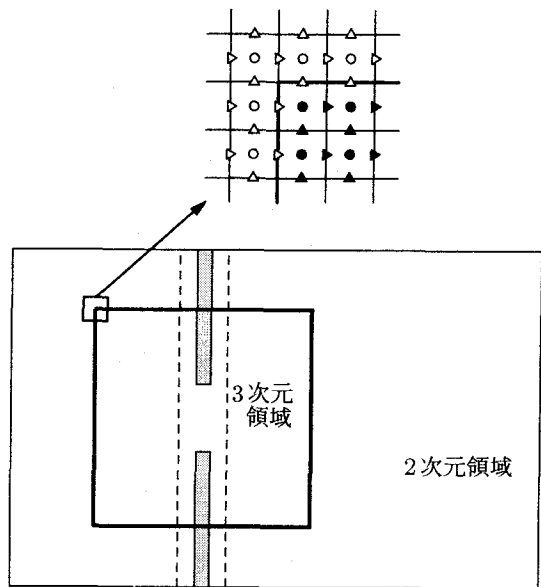


図-3 2次元計算領域と3次元計算領域の配置

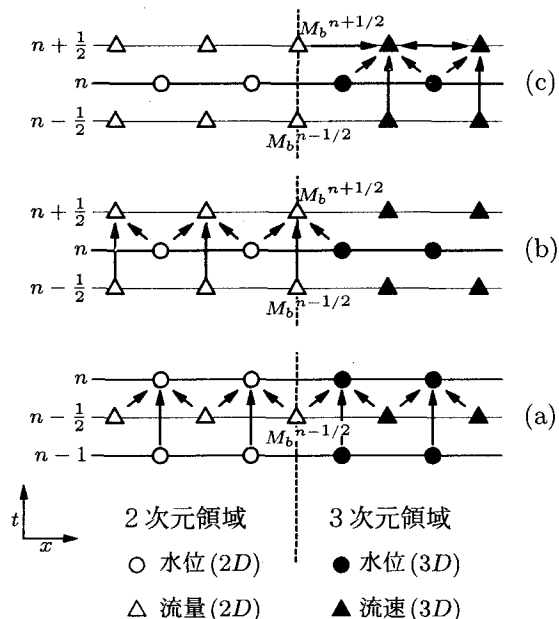


図-4 領域接続部分の計算手順

マニング則は2次元領域だけでなく3次元領域においても最下層の底面に面する格子だけに適用させる。また β は運動量補正係数であり、水平渦による余剰運動量輸送の影響を2次元領域においても考慮するための断面平均流速とのずれを示すパラメーターである。

$$\beta_{xx} = 1 + \frac{D}{M^2} \int_{-h}^{\eta} u'^2 dz \quad (11)$$

ただし、 $u = \bar{u} + u'$ で、 $\bar{u}$ が断面平均流速、 u' が平均流速からのずれを表す。 $\beta=1$ が鉛直方向に流速分布が一様

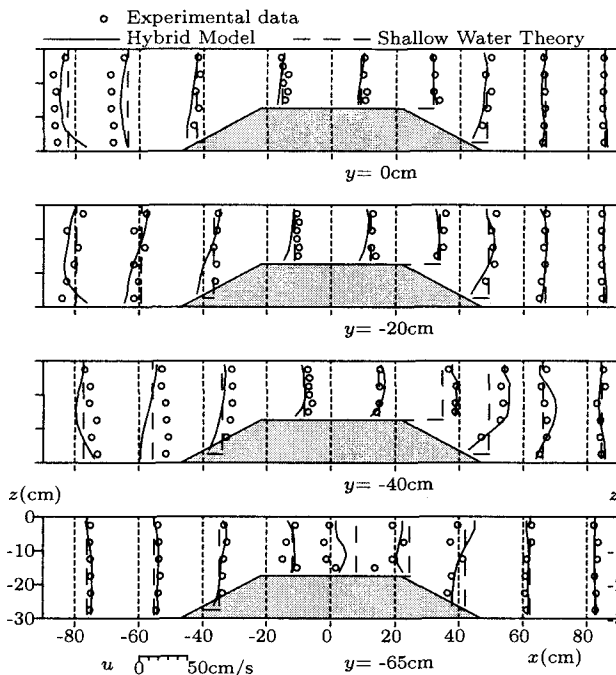


図-5 水平方向断面流速の比較（潜堤なし）

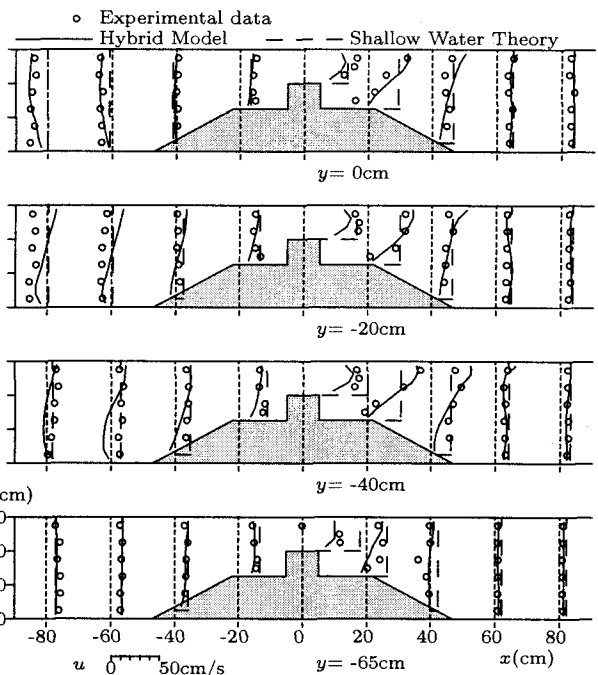


図-6 水平方向断面流速の比較（潜堤あり）

な状態であり、 $\beta > 1$ は鉛直方向に流速が分布を持つことを示す。すなわち、1以上の β を2次元領域で与えることは、3次元領域から水平渦の影響を引き継いでいることになる。

(3) 計算条件

計算時間間隔は0.01sである。格子間隔は、 $\Delta x = \Delta y = 5\text{cm}$ 、 $\Delta z = 2.5\text{cm}$ とし、2次元計算領域の格子数は 220×140 であり、その中に3次元計算領域、格子数 $90 \times 90 \times 14$ の領域を図-3のように組み込む。2次元領域と3次元領域の境界面上の流量は2次元領域に属するものとする。図中の丸印は水位、三角は流量（流速）を示し、白抜きマークは2次元領域において計算する値、黒塗りマークは3次元計算値である。なお、ここでは便宜上、 y 軸に平行な境界面での接続方法について説明する。 x 軸に平行な境界面でも同様の方法を用いる。

接続部における水位・流速の共有および計算手順を以下に示す。ただし、境界面上での流量を M_b と記す。図-4は、以下の手順を模式的に表したものである。

- n ステップの水位を求める（2次元、3次元とも）。その際、3次元領域の端点では $M_b^{n-1/2}$ （2次元領域に属する）を参照する。
- 2次元領域において流量を求める。 $M_b^{n+1/2}$ を計算する際、3次元領域の水位・流量を参照する。
- 3次元領域において流速を求める。その際、 $M_b^{n+1/2}$ を境界条件として使う。

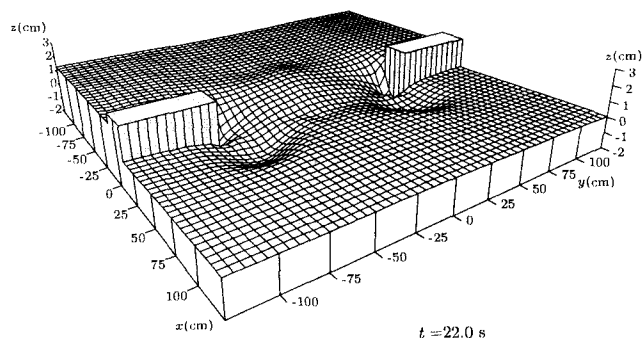
さて、上記(c)で3次元領域での流速を計算する際には、境界における流量だけでなく、流速分布が必要である。しかし、本来、2次元計算では流速鉛直分布に関す

る情報を与えない。したがって、2次元領域と3次元領域の接続部で、水平方向流速(u, v)が鉛直方向に分布を持たなくなるまで3次元領域を十分広く取り、境界条件として鉛直方向に様な流速分布を与えることが最も望ましい。

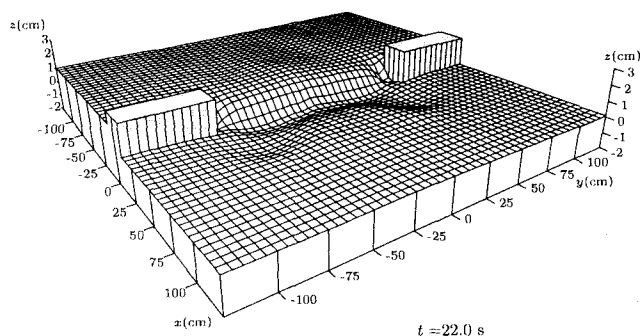
6. 計算結果

図-5、6は、開口部中央から防波堤端部までの4箇所の断面での水平方向流速分布を示す。この図では、本ハイブリッドモデルによる計算結果、平面2次元モデルによる計算結果、および実験結果とを比較している。図-5は潜堤を設置しない場合、図-6は潜堤を設置した場合である。潜堤の有無に関わらず水平方向流速が鉛直方向に分布を持っていることが実験から示された。特に図-6では、潜堤による縮流の効果により開口部の流速が早くなるのと同時に、 $x=20\text{cm}$ において潜堤頂部より発生した剥離渦がマウンドにかかり、流速の向きが水表面と底面では逆になる現象も現れている。平面2次元モデルでは、このような3次元性を評価できないが、本モデルではかなりうまく再現できている。

図-7は、水表面形の鳥瞰図であり、湾内側上空から湾口側を望んだ図である。潜堤が無い場合、防波堤端部近くでは流れが速く水位が低下する。また防波堤端部から発生した鉛直方向に軸を持つ渦（図中では周囲より水位が下がり凹部となっているところ）が現れている様子がわかる。一方、潜堤を設置した場合、潜堤上で堰を越える流れのようになっており、鉛直方向に軸を持つ渦の中心と周囲との水位差は潜堤がない場合のものより小さ



(a) 潜堤を設置しない場合



(b) 潜堤を設置した場合

図-7 水表面形の鳥瞰図

くなっている。その代わりに図-6にも現れていたような潜堤頂部より発生している剥離による渦が発達している。

図-8は、防波堤開口部を通過する流量の防波堤の有無、潜堤の有無による比較である。防波堤や潜堤による津波のピークカット効果が確認された。しかしながら、潜堤の有無によるピーク流量比は開口部面積比より小さく一致しない。これは、潜堤を設置したことにより流速が増加したことを意味する。ただし、図には示さないが湾内への流入流量は従来の平面2次元モデルでもほぼ正確に計算できる。

図-9, 10は、底面にかかるせん断力 τ の最大値の分布を示す。海底せん断力は、潜堤の有無の違いによって大きく異なる。潜堤の無い場合は開口部を中心する広範囲にせん断力の強い場所が分布する。しかし、潜堤がある場合、潜堤頂部のせん断力は大きい、全体としてせん断力は小さくなる。しかし潜堤頂部にかかる摩擦抵抗は周辺と比較し大きい。開口部を除く3次元領域内全体

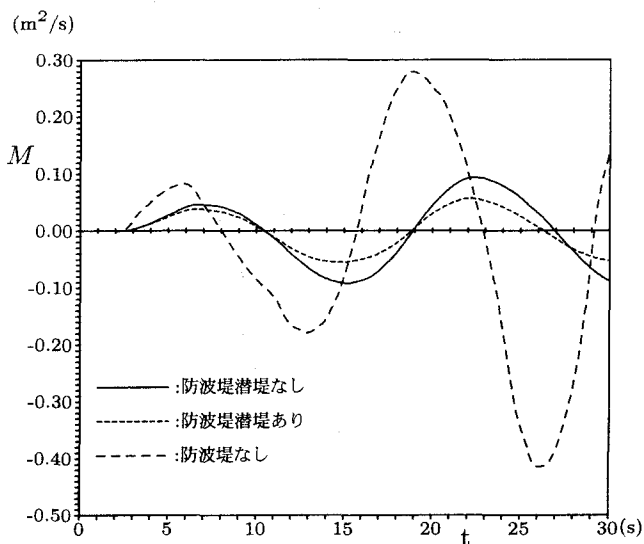


図-8 防波堤開口部を通過する流量

における底面せん断力の最大値の平均は、潜堤がない場合に比べ、約40%となる。すなわち、開口部を潜堤構造にすることは、津波のピークカットやマウンド捨石の安定性向上に効果があると言える。ただし、潜堤がある場合、潜堤による縮流効果のため水表面付近の流速はむしろ大きくなる。水面流速が大きくなることは、港内の操船をより困難にし、漂流物が防波堤に衝突したときの波力を増大させるため注意が必要である。2次元モデルでは、底面流速と比較し断面平均流速は大きく、すなわち底面せん断力を過大評価し、逆に水表面付近では流速を過小評価してしまう。

図-11は防波堤潜堤にかかる圧力の時間変化を示す。ここで、潜堤前面とは潜堤の沖側の断面であり、後面とは湾内側の断面である。この図は静水状態の圧力をゼロとし、圧力の変動を示したものである。よって平面2次元モデル、ここでは非線形長波理論による計算は水位変動による静水圧の変化を示していることとなる。なお、平面2次元モデルとハイブリッドモデルによる計算結果では水位変動にそれほどの差は見られないから、図-11での値の差は動圧を示している。t=14秒付近の後面、22秒付近の前面は流れの正面にあたり、かつ流速も極大近くとなり動圧が大きくなる。よって水平方向流速が鉛直方向に分布を持つような長波近似が成り立たない場所で構造物に掛かる圧力を検討する場合、断面平均流速との差が大きくなり動圧が無視できない。水位変動による静水圧だけでなく動圧も考慮しなければならない。数値計算により潜堤の安定性や防波堤ケーソンにかかる圧力を論じる場合、平面2次元モデルでは不十分であり、動圧を考慮できる3次元モデルを使用する必要がある。図-7の潜堤がある場合において、潜堤頂部において水面勾配は最も急になる。すなわち潜堤の前後面との水位差が大きく、静水圧の差が激しくなる。このことは図-11の14秒付近の様子にも現れている。

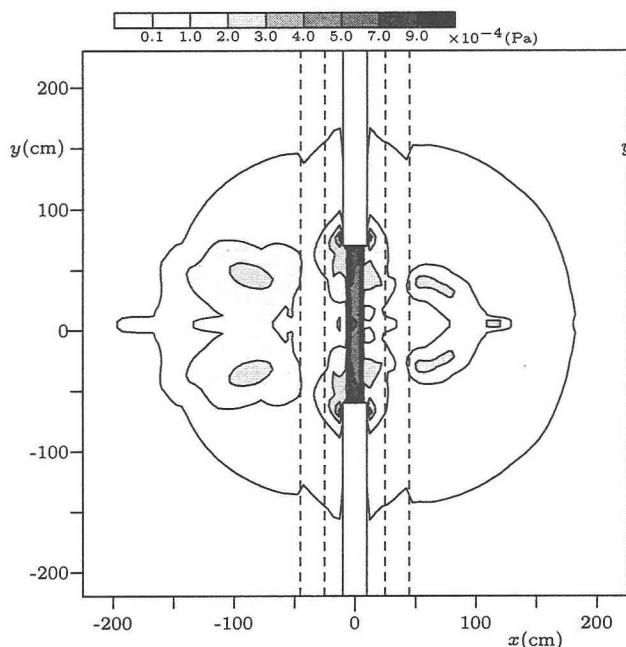


図-9 底面にかかる τ の最大値の分布
(潜堤あり)

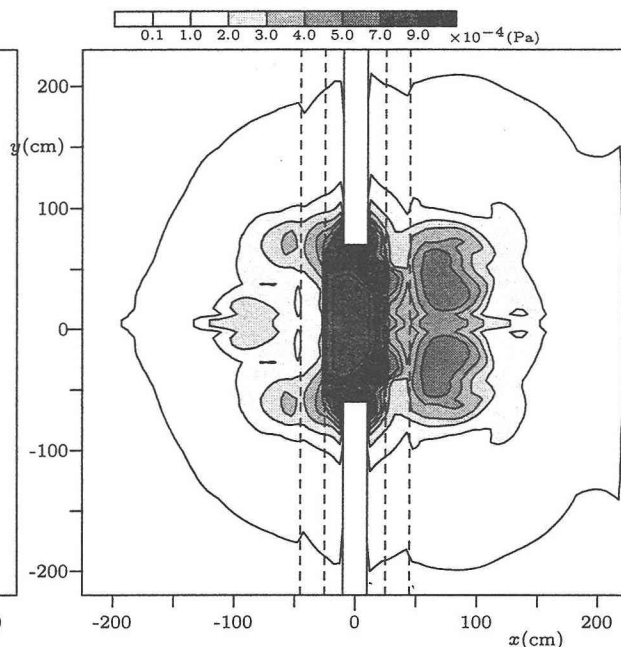


図-10 底面にかかる τ の最大値の分布
(潜堤なし)

7. 結論

本研究は、従来の計算方法である2次元モデルと、圧力の静水圧分布を仮定しない3次元モデルを組み合わせたハイブリッドモデルを用いて防波堤周辺の流況を再現し、構造物（マウンド及び潜堤）にかかる流体力に関し検討した。防波堤近傍のような3次的に複雑な流況を検討するには、静水圧近似であり断面平均流速を用いる平面2次元モデルは不十分であり、3次元モデルを用いる必要があることがわかる。また、ハイブリッドモデルを用いることにより、効率的な再現計算が可能である。

このモデルを用いて防波堤周辺の流況の再現計算を行った。その結果、潜堤による締め切りによるピークカット効果が確認された。またマウンドの洗掘や捨て石の安定性に影響を持つ底面せん断力は潜堤の有無により大きな違いがあり、潜堤の設置によりせん断力は軽減され有効に機能していることがわかる。しかしながら、潜堤頂部の流速は増し潜堤にかかる流体力は大きい。

また、潜堤の前後面にかかる圧力差すなわち形状抵抗が計算され、この値は、底面せん断力である摩擦抵抗よりもはるかに大きい。

参考文献

- 1) 谷本勝利, 木村克俊, 宮崎啓司: 津波防波堤開口部の安定性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第4号, pp. 93-121, 1988.
- 2) 正村憲史, 藤間功司, 後藤智明, 重村利幸: 非静水圧3次元津波数値計算モデルの開発, 海岸論文集,

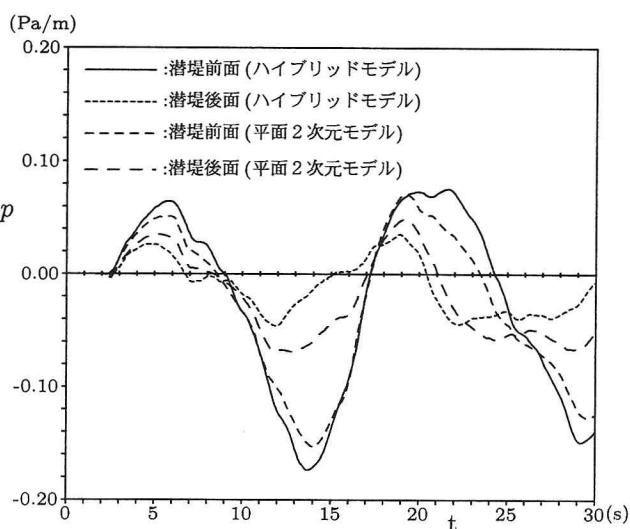


図-11 防波堤潜堤にかかる圧力の時間変化

第43巻, pp. 296-300, 1996.

- 3) 榊山勉, 香山真裕: 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション, 海岸論文集, 第43巻, pp. 696-700, 1997.
- 4) 磯部雅彦ら: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 321-326, 1999.
- 5) 中辻啓二, 狩野晋一, 栗田秀明: SGS渦動粘性係数を用いた大阪湾潮流の有限要素解析, 水工学論文集, 第36巻, pp. 693-696, 1992.

(2000. 10. 2 受付)