

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

有川太郎*・山田文則**・秋山 実***

2 次元数値波動水路 (CADMAS-SURF) の計算手法を基に, 3 次元数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) の開発を行い, 砕波や段波のような衝撃的な圧力を伴う波力現象を設計に耐えうる精度で計算できる実用的なモデル構築を目標とした。本計算では, 同時に並列化システムを導入した。モデルの妥当性を確認するため, 護岸に作用する段波波圧および陸上遡上する津波段波波圧の計算を行ったところ, 実験と整合した値が得られ, モデルの妥当性を確認した。また, 並列化システムによる計算効率を調べたところ, 8CPU を用いた場合, 約 60% の計算時間短縮となり, さらに, 約 6 倍近い計算領域がとれることを確認した。

1. はじめに

CIP-CUP 法を用いた気液界面数値モデル (睦田ら, 1998), CIP 法を用いた 3 次元固気液多相流数値モデル (川崎・中辻, 2002), MPS 法を用いた気液二相流モデル (五十里ら, 2004), MARS 法を用いた数値波動水槽 (永瀬・島田, 2000) など, 3 次元において砕波や越波, また固体との相互作用 (睦田ら, 2004) 等を扱えるようになったモデルは多いが, 砕波や段波による作用波力を精度良く計算できる 3 次元モデルは未だ開発途上にあり, そういった波力について現在までのところ, 3 次元で実験との比較を含めてその精度について論じられた研究はない。

一方で 2 次元計算においては, 数値波動水路— CADMAS-SURF— (数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会, 2002) により, 衝撃波力を高い精度で計算できることが示されている。

そこで, 2 次元数値波動水路の計算手法を基にし, 3 次元数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) の開発を行うことで, 砕波や段波のような衝撃的な圧力を伴う波力現象を精度良く計算できる 3 次元モデルの構築を目標とした。

モデルの妥当性を確認するために護岸に作用する段波津波波力の実験結果との比較を行った。そして, 遡上域が下り勾配となるような地形において実験との比較を行うとともに, 平坦な場合との比較を行い, 下り勾配が及ぼす影響について検討を行った。

2. 基礎方程式と数値計算手法

3 次元数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) は, 2 次元数値波動水路 (CADMAS-SURF) の計算手法を基にしたものであり, 自由表面解析モデルに VOF 法を採

用したものである。

(1) 基礎方程式

CADMAS-SURF/3D の基礎方程式は 3 次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式および Navier-Stokes 方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した式 (1) から (4) である。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_p \dots \dots \dots (1)$$

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

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u v}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v v}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w v}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_v D_y - R_y + \gamma_v S_v \dots \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_v D_z - R_z + \gamma_v S_w - \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

* 正 会 員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 特任研究官
** 学生会員 工 修 長岡技術科学大学大学院
*** みずほ情報総研株式会社

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 は規準密度、 ρ^* は浮力を考慮する密度、 p は圧力、 ν_e は分子動粘性係数 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、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 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_o, S_u, S_v, S_w は造波ソースに関する係数である。 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 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式(5)のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_y &= \gamma_y + (1 - \gamma_y) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 C_M は慣性力係数である。多孔質体からの抵抗 R_x, R_y, R_z は、式(6)のように計算される。

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta_x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_y &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta_y} (1 - \gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta_z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 C_D は抵抗係数、 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ は各方向の格子間隔である。

時間方向の離散化は Euler 法で行い、運動方程式と連続式の連成には SMAC 法で行う。SMAC 法では、連立 1 次元方程式の解法が全計算時間の多く 7 割から 9 割以上を占め、連続式の精度を通じてスカラー量の保存を大きく左右する。そのため、非対称の連立 1 次元方程式の解法として収束および安定性の高い前処理付き BCGSTAB 法を用いた。

(2) 数値解析手法および境界条件

a) 自由表面

自由表面解析モデルは、汎用性が高く、複雑な表面形状を解析可能である VOF 法を用いて計算を行う。VOF 法では、本来ステップ関数となる「流体である・ない」を表す関数を計算セル毎に平均化した VOF 関数 F の移流方程式と、表面の向きを逐次的に計算することにより、自由表面の挙動を解析する。ボラスモデルに基づく VOF 関数 F の移流方程式を式(7)に示す。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v F}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = \gamma_v S_F \dots\dots (7)$$

ここで、 S_F は造波に関する係数である。

b) 造波モデル

計算モデルでは、規則波の水位や流速の計算方法として、ストークス波第 5 次近似解、クノイド波第 3 次近似

解および流れ関数法 B による数値解の 3 つを用いている。ここでの Dean の流れ関数法 B の適用においては、波速の第 2 定義に基づいて導かれたストークス波やクノイド波の摂動解と同様に、波速の第 2 定義に基づく物理量（水位変動、流速、圧力、波速）を与えるものとする。不規則波の生成は、任意の水位と流速のデータ（マトリクスデータ）を作成して入力データとすることで、時間方向および空間方向に補間しながら計算を行う。また、この造波は斜め入射も可能である。

c) 時間刻み幅の計算

数値計算上の時間刻み幅は、式(8)および(9)に示すような CFL 条件または粘性項の安定条件を満足するように計算を行う。

$$\Delta t \leq \min \left(\frac{\Delta x}{u}, \frac{\Delta y}{v}, \frac{\Delta z}{w} \right) = \Delta t_c \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta t \leq \min \frac{1}{2} \frac{1}{v \left[\left(\frac{1}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z} \right)^2 \right]} = \Delta t_v \dots\dots (9)$$

実際の計算では、安全係数 α を用いて時間幅を式(10)で求める。

$$\Delta t \leq \alpha \min(\Delta t_c, \Delta t_v) \dots\dots\dots (10)$$

$$(0.0 < \alpha < 1.0)$$

d) 並列化システムの構築

本プログラムを並列化するにあたり、同一のプログラムが複数ノードで稼働する SPMD (Single Program Multiple Data) モデルを用いた。また、データの取り扱いには、大規模計算に適した領域分割法を採用した。

対象とする並列計算機は、複数の PC をネットワーク接続した PC クラスタを対象とした。よって、並列計算機の種類としては、分散メモリー型である。ただし、共有メモリー型にすることも可能である。OS は UNIX 準拠、メッセージ交換ライブラリーは、MPI (Message Passing Interface) とした。また、コンパイラは、Intel Fortran 8.0 である。本研究では 9 台（1 台は管理マシン）の廉価マシンを用いて並列システムを構築した。

その結果、8CPU で計算することにより約 60% の計算時間短縮が行われ、かつ約 6 倍の計算領域をとることが可能となった。また、1CPU モデルと同じ結果が得られることを確認した。

3. 計算および境界条件

(1) 陸上遡上の計算

計算は図-1(a) のような長さ 67 m × 幅 0.04 m × 高さ 2.08 m の 3 次元数値水槽で行った。図の左側より 1/50 の一定勾配が汀線まで設置してあり、点線部分が遡上域

表-1 計算条件

計算ケース	方向	汀線からの距離	格子数	格子間隔		方向	距離	格子数	格子間隔		方向	距離	格子数	格子間隔	
		m	個	m	種類		m	個	m	種類		m(水深方向-)	個	m	種類
陸上遡上 水路全体	x 方向	60.0~10.0	500	0.10	等間隔	y 方向	0.00~0.04	2	0.02	等間隔	z 方向	-1.00~0.00	36	0.04~0.02	不等間隔
		10.0~0.0	150	0.10~0.02	不等間隔							0.00~1.08	54	0.02	等間隔
		0.0~-7.0	350	0.02	等間隔										
		合計	1000				合計	2				合計	100		
護岸計算 水路全体	x 方向	74.00~50.00	240	0.10	等間隔	y 方向	0.06	3	0.02	等間隔	z 方向	-1.00~-0.50	13	0.04~0.02	不等間隔
		50.00~25.00	346	0.10~0.05	不等間隔							-0.50~0.00	34	0.02~0.01	不等間隔
		25.00~15.00	305	0.05~0.02	不等間隔							0.00~0.50	50	0.01	等間隔
		15.00~-0.50	775	0.02	等間隔							0.50~1.00	34	0.01~0.02	不等間隔
		合計	1666				合計	3				1.00~1.25	16	0.02	等間隔
護岸25 m から計算	x 方向	25.00~20.00	125	0.04	等間隔	y 方向	0.3	15	0.02	等間隔	z 方向	-0.50~0.00	34	0.02~0.01	不等間隔
		20.00~15.00	172	0.04~0.02	不等間隔							0.00~0.50	50	0.01	等間隔
		15.00~-0.10	755	0.02	等間隔							0.50~1.00	34	0.01~0.02	不等間隔
		合計	1052				合計	15				合計	118		

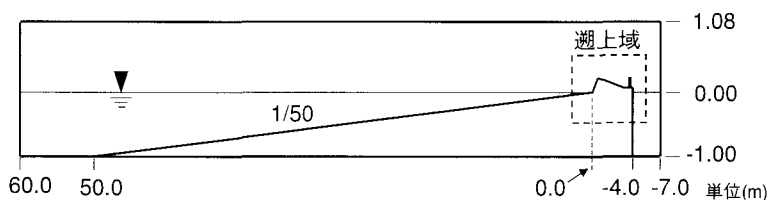


図-1(a) 水路全体

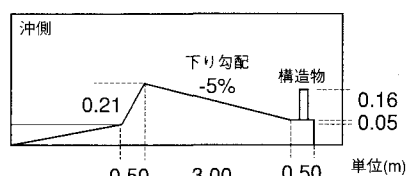


図-1(b) 遡上域

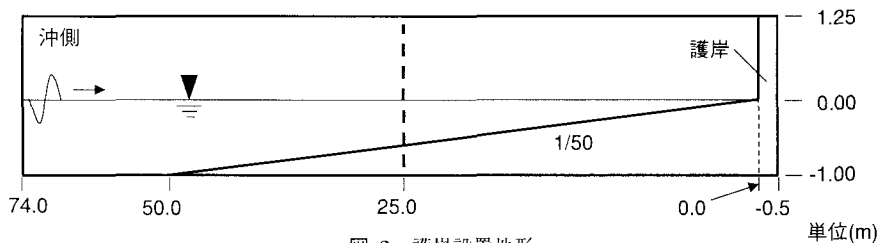


図-2 護岸設置地形

となる。図-1(b) は遡上域の地形を拡大したものであり、遡上域は汀線から0.5 mまで上がり勾配となり、その背後に-5%程度の下り勾配が続いているような地形である。汀線から3.75 mの地点に長さ0.12 m×幅0.04 m×高さ0.15 mの構造物を設置し、この構造物に作用する圧力の計算を行った。造波条件は、汀線から沖側へ60 mの位置より、波高0.16 m、周期20 sの押し波津波を与えた。境界条件は水槽の側面を不透過とし、陸側の境界面を透過境界として計算を行った。水深は造波位置で1.00 mとした。

(2) 護岸に作用する津波段波波力の計算

地形は、図-2のような沖側50 m地点から汀線まで1/50勾配であり、汀線付近に護岸を設置した。平面地形の計算と同様に、Y方向格子の少ない数値水槽全体の計算を行い、汀線から25 mの位置での造波データを作成し、それを用いて護岸前面の詳細な計算を行った。水槽全体の計算領域は図-2のような長さ74.50 m×幅0.06 m×高さ2.25 mの空間であり、沖側74.00 mの位

置で波高0.27 m、周期20 sを与えた。

護岸前面の計算領域は長さ25.10 m×幅0.30 m×高さ1.5 mの3次元数値水槽で計算を行った。造波データは、水路全体の計算結果から図の中央に位置する25 mの位置において作成した。各計算条件をまとめたものを表-1に示す。

4. 計算結果および考察

(1) 陸上遡上の計算

図-3は、下り勾配における津波の遡上高を示した時系列分布である。図の実線は、計算地形と同様の模型を用いた実験結果である。図の点線に示す計算結果は、実験における津波の遡上高とよく表現できていることがわかる。ただし、実験では水路幅3.50 m (y方向)であるが、計算では計算時間の短縮のためにy方向を0.04 mとして計算を行っている。

図-4は下り勾配地形の影響を検討するために、下り勾配部が平坦な場合の計算結果との比較した結果である。

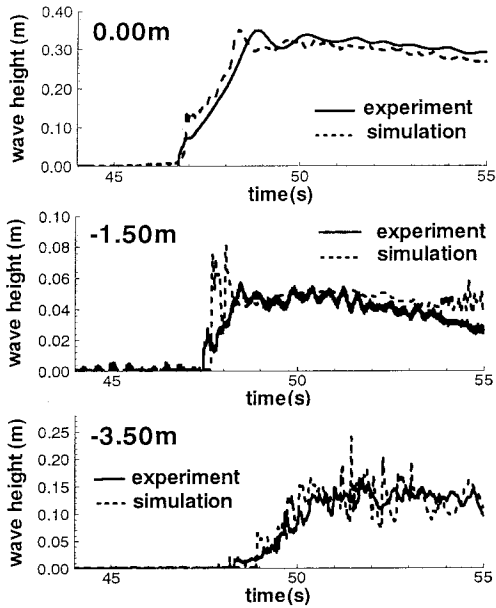


図-3 波高の時系列分布

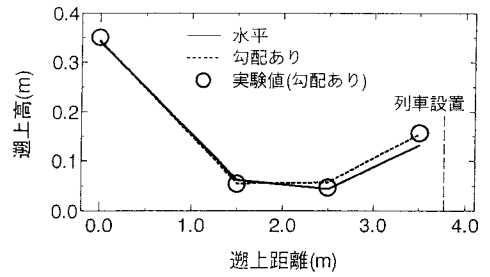


図-4 遡上高の比較

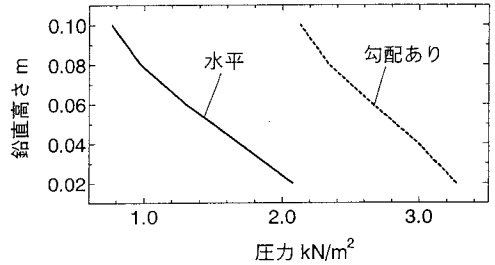


図-5 構造物に作用する圧力

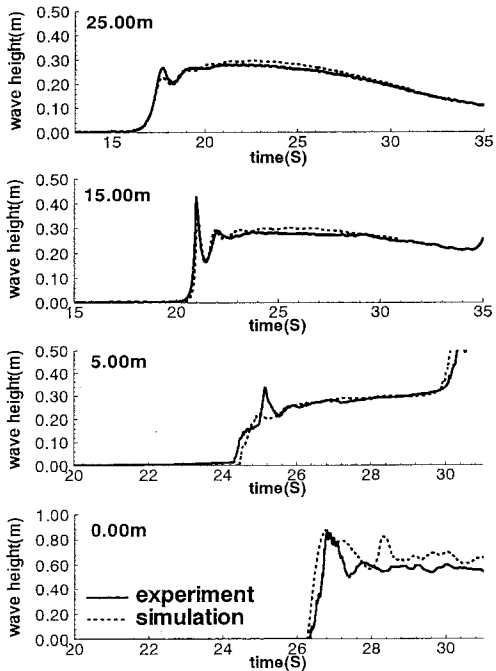


図-6 波高の時系列分布

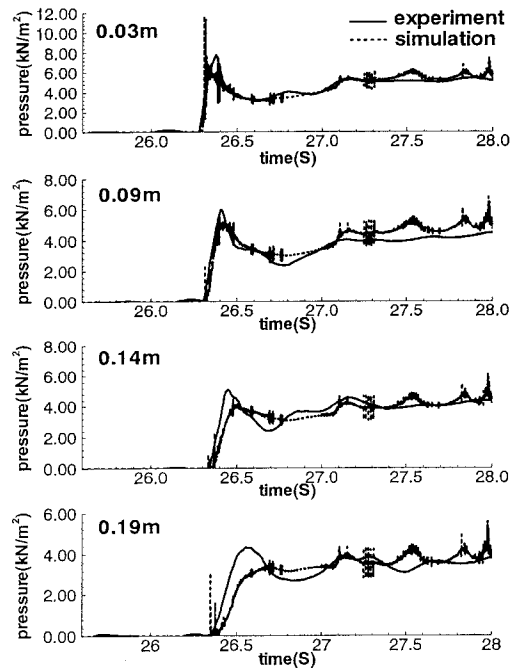


図-7 護岸に作用する圧力

この図は遡上域に侵入する津波の遡上高さを比較したものである。図に示す通り、いずれの結果もほぼ同様の値を示しており、今回のような地形では遡上高に与える下り勾配の影響は小さかった。図-5は列車に作用する津波圧力の計算結果を比較したものである。図に示すように、2つの地形では列車に作用する波力は1.5～2.0倍程

度の差が見られる。これは下り勾配により津波の位置エネルギーが運動エネルギーに変換され、波力に差が生じたものと考えられる。この結果より、今回、列車事故のあったスリランカのように地形が下り勾配となっている場所では、平坦な場所よりも構造物に作用する波力が大きくなっていたのではないかと考えられる。

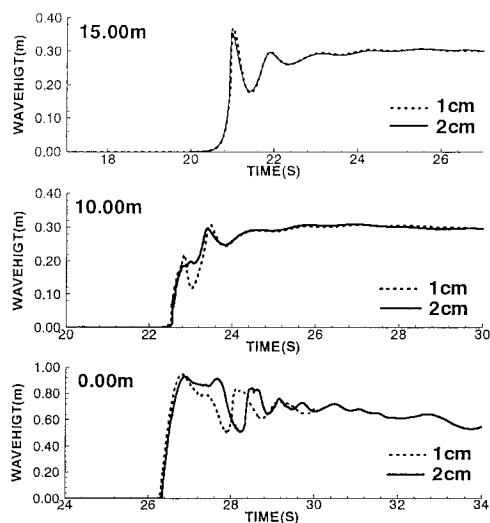


図-8 格子間隔の影響

(2) 護岸に作用する津波段波波力の計算

図-6は津波における波高の時系列分布を表したものである。図の実線は図-2と同様の断面で実験を行った場合の結果である。ただし、実験の水路幅は3.5mであり、今回の造波条件では、汀線から12m程度の位置で碎波点が見られた。図に示すとおり、計算結果は段波状の波が護岸に作用する場合の実験結果を精度よく計算できている。この結果より、このような碎波後および波が護岸に衝突するような非常に非線形の強い流体現象を精度よく計算できることがわかった。しかしながら、今回のケースでは、碎波後の波に若干のばらつきが見られる。これは、計算に用いた格子間隔の影響によるものであると考えられる。図-8は、水面付近の鉛直方向の格子間隔を変化させた場合の計算結果の比較である。図の実験が水面付近の鉛直格子間隔が2cmであり、点線が1cmで計算を行ったものである。図より、碎波後10.0mおよび0mの位置ではばらつきが見られる。そのため、今後、より精度の高い計算結果を行うために、格子間隔に関して詳細に調べていく必要があると考えられる。

図-7は護岸に作用した圧力の時系列分布を表したものである。図の結果は、波の衝突時における護岸に作用する圧力であり、図の左上の数字は圧力計の静水面からの位置である。図より、波の衝突時に護岸に作用する衝撃的な津波波力を精度よく計算できることが確認された。図-9は波の衝突時に護岸に作用する津波波力の最大値を示した鉛直分布である。図に示すとおり、計算結果に少しばらつきが見られるが、護岸全体の作用波圧はよく計算できている。

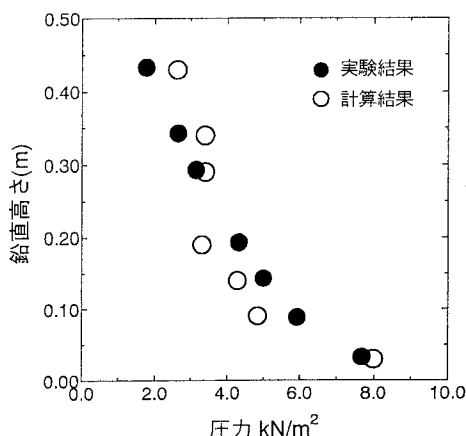


図-9 圧力の鉛直分布

5. ま と め

2次元計算において実用化されてきている数値波動水路 (CADMAS-SURF) を基に、3次元数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) の開発を行った。また、効果的な並列化システムの構築も行うことができた。

それを用いて、陸上週上した津波の構造物に作用する段波波圧の計算ならびに護岸に作用する津波段波波圧の計算を行ったところ、実験と整合する結果が得られ、本計算手法の妥当性が確認された。これにより段波波圧のような碎波を伴う複雑な現象による波圧に対しても本計算手法が有効であることがわかる。

今後は、接続境界等を検討し、広領域を効率よく、かつ実用に耐える精度で計算できる数値波動水槽を開発していく予定である。

参 考 文 献

- 五十里洋行・後藤仁志・酒井哲郎(2004)：気液二相流型粒子法による碎波過程の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第51巻，pp. 111-116.
- 川崎浩司・中辻啓二(2002)：3次元気液多相流数値モデルの構築とその検証，海岸工学論文集，第49巻，pp. 56-60.
- 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会(2002)：海域施設の耐波設計に適用できる数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発と将来展望，土木学会論文集，No. 705/II-59，pp. 1-17.
- 永瀬恭一・島田昌也(2000)：MARS法を用いた数値波動水槽に関する研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 46-50.
- 睦田秀実・河合ひろみ・安田孝志(1998)：C-CUP法による気液界面の直接数値計算，海岸工学論文集，第45巻，pp. 56-60.
- 睦田秀実・清水研一・土井康明・福田和宏(2004)：CIP-EDEM法による自由液面と弾性体運動連成解析，海岸工学論文集，第51巻，pp. 41-45.