

数値波動水路の段波実験への適用

AN APPLICATION OF NUMERICAL WAVE FLUME TO TRANSFORMATION OF BORE

高橋 俊彦¹・藤間 功司²・朝倉 良介³・池谷 毅⁴

Toshihiko Takahashi, Koji Fujima, Ryosuke Asakura, Tsuyoshi Ikeya

¹正会員 理修 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境技術開発室

(〒170-6028 豊島区東池袋 3-1-1 サンシャイン 60 30F)

²正会員 工博 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 環境技術研究部 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

⁴正会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 環境技術研究部 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

Through the rapid progress of computer technology, direct wave simulation techniques using CFD(Computational Fluid Dynamics) have been applied to practical problems in coastal, port and harbor engineering. A numerical wave flume, which is one of the representative direct simulation techniques, has been expected to substitute for hydraulic model tests.

In this paper, wave transformation of bore on a reef, sand spit and lagoon is computed by the numerical wave flume. The applicability of numerical wave flume is examined through comparisons of numerical results with experimental ones.

Key Words : numerical wave flume, wave transformation, wave pressure, standing wave pressure, wave pressure distribution, bore, standing waves

1. はじめに

計算機技術の飛躍的發展に伴って, CFD(数値流体力学)の海岸・港湾工学の実務への適用が試みられてきている。数値波動水路^{1), 2)}はその代表的なもので, 従来水理模型実験に用いられる波動水路とほぼ同じ機能を備えることによって, 実験で現われる水理現象を数値的に再現することを目指す汎用コンピュータ・ソフトウェアである。特に近年では, 自由表面の処理方法, 造波境界の設定方法等が改善されてきており, 非線形性の強い現象への適用も期待されている。

そこで, 本論文では, 非線形性が極めて強く, 波動理論に基づく数値計算では再現が難しい段波の伝播・変形に着目する。数値波動水路を使用し, 水理模型実験を模擬した方法で段波を造波する。そして, 水位変動, 波圧変動等に関し, 数値波動水路による計算結果と水理模型実験結果を比較することによって, 数値波動水路の段波実験への適用性を検討する。

2. 数値波動水路の概要

(1) 基礎方程式

数値波動水路^{1), 2)}は, ポーラスモデル³⁾に基づき, 以下に示す 2 次元非圧縮流体の連続式および Navier-Stokes 方程式を基礎方程式としている。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} \\ = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - R_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \right) \\ \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} \\ = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma_v g - R_z \end{aligned} \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right)$$

ここで, t : 時間, x, z : 水平, 鉛直座標, u, w : 流速の水平, 鉛直成分, ρ : 密度, P : 圧力, ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和, g : 重力加速度, γ_v : 空隙率, γ_x, γ_z : 水平, 鉛直方向面積透過率である。渦動粘性係数は, 標準的な $k-\varepsilon$ モデルで計算する。 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ は C_μ を慣性力係数とすると, 次式で表わされる。

$$\begin{cases} \lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_\mu \\ \lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_\mu \\ \lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_\mu \end{cases} \quad (4)$$

多孔質体からの抵抗力 R_x, R_z は、 C_D を抵抗係数として、以下に示す流速の 2 乗に比例する形でモデル化している。

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2}$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2}$$

(5)

ここで、 $\Delta x, \Delta z$ はそれぞれ水平、鉛直方向の格子間隔である。ただし、本論文の計算ケースでは $C_D = C_M = 0$ である。

(2) 自由表面解析モデル

自由表面解析モデルには、汎用性が高く、複雑な表面形状を取り扱えるVOF (Volume Of Fluid) 法を用いている。VOF法では、各計算セル毎に流体の占める割合を表すVOF関数 F の移流方程式と「流体である、表面である、気体である」というフラグを逐次計算することによって、自由表面の挙動を解析している。VOF関数 F に関する移流方程式は、以下の通りである。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = 0$$

(6)

(3) 造波方法

水理模型実験で水路内に段波を起こす方法としては、主に、「造波板を位置制御して段波を発生させる」、「ゲートなどを急激に取り除いて段波を発生させる（いわゆるダム破壊）」、の 2 通りの方法が取られている。以降は前者を造波板位置制御法、後者をダム破壊法と呼ぶ。本研究では両方の方法の検討を行う。造波板位置制御法は、数値波動水路の任意波形造波機能を利用して模擬することができる。すなわち、目標とする波の水位と流速（流速だけでも良い）を指定境界条件として設定する。これにより、造波境界から孤立波性段波を入射させることができる。ダム破壊法は、階段状の水面を初期条件として与えることにより模擬することができる。

3. 造波板位置制御法

(1) 水理模型実験

図-1 に、造波板位置制御法で段波を発生させた実験(文献4)で用いた地形模型を示す。この実験は、斜面に作用する段波の衝撃波圧を測定するために行われたものである。水路はアクリル製で、長さ 12.0m、幅 0.3m、高さ 0.44m である。造波装置から 11.4m までがリーフ状の浅い一様水深部、11.4~12.0m までが勾配 1:1.53 の斜面である。波高計は岸沖方向に 3 本(造波装置から 5.3m、9.3m、11.4m の位置)、流速計は 1 基(造波装置から 7.3m の位置)を設置した。波圧計(直径 1.0cm、定格容量 9.8kPa)は、水路中央部に、法先から斜面に沿って 1.0cm 間隔に設置してある。造波は、鉛直造波板を一定の速

度で約 1.0m の距離を移動させることにより行っている。波高計 1 の地点での段波は、波高:約 6.5cm、周期:約 2.3 秒である。ただし、段波の周期は水位が波高の 1.0% を越えている時間として定義した。

表-1 は、波条件を示している。一様水深部の水深を変化させた 3 通りのケースについて検討を行ったが、本論文では水深 10cm の結果について述べる。

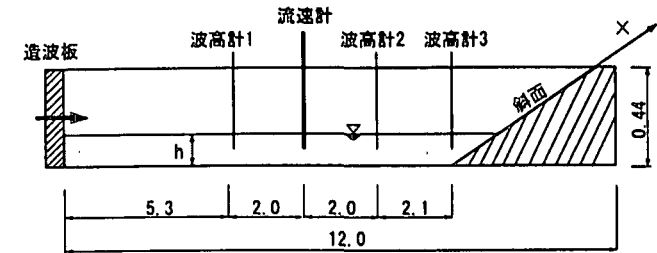


図-1 造波板位置制御法で使用した実験装置(単位: m)

表-1 造波板位置制御法における波条件				
条件	一様水深	波 高	周 期	斜面勾配
1	5cm	6.5cm	2.3 秒	1:1.53
2	10cm			
3	15cm			

(2) 数値解析

図-2 は、数値波動水路の解析モデルを示しており、水平方向 12m、鉛直方向 0.44m を対象としている。格子分割(間隔)は、それぞれ水平方向に 600 分割($\Delta X = 0.02m$)、鉛直方向に 88 分割($\Delta Z = 0.005m$)であり、総格子点数は 52,800 である。解析では、波高計 1 の水位変動が合うように、入射波形を解析モデル左側から造波境界条件として与え、反射波の影響が現れないように 40 秒間をシミュレーション時間とした。また斜面地形に関する境界条件は、実験セットアップを考慮して、スリッパで不透過とした。

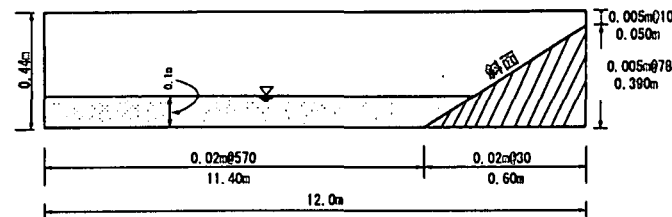


図-2 造波板位置制御法の解析モデル

(3) 実験結果と解析結果の比較

一様水深が 10cm の場合の、造波板から 5.3m 離れた一様水深部(波高計 1)での水位変動の時系列を図-3 に示す。数値波動水路による解析結果は実験結果に比べ、連続して起こる砕波の影響でピーク背後の水面形が大きく波打っている。また実験結果は段波が通過した後水位が負になっているが、解析結果ではゼロになっている。実験では造波板を急激に前へ押し出してそのまま停止しているため、造波板

が孤立波の位置制御からずれているからではないかと考えられる。しかし段波の継続時間や波高などは概ね一致している。さらに伝播した波高計3 (図-4 参照)での水位変動の時系列に関しては、解析結果は斜面からの反射の影響でやや乱れはあるものの、重複波を含んだ波形をよく再現しており、実験結果と似た傾向を示している。したがって、数値波動水路は段波を造波することが可能で、リーフ状の浅瀬や水平床および斜面上の段波の伝播を精度よく再現することが可能と言える。

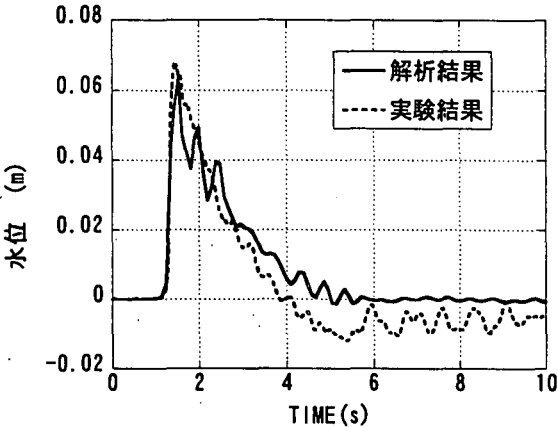


図-3 水位変動時系列 (波高計1)

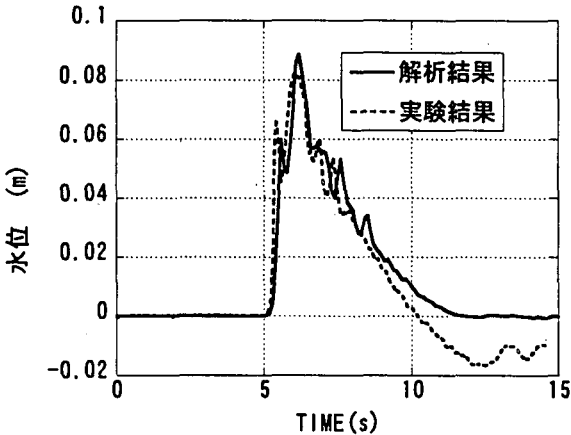


図-4 水位変動時系列 (波高計3)

斜面上、法先から2.0cmの測点での波圧変動の時系列を図-5に示す。水理模型実験結果には、圧力時系列に3つのピークが存在する。水谷・今村⁴⁾は、最初の小さなピークを入射波が斜面に衝突する際に発生する動波圧、次の比較的大きなピークを段波の到達による著しい水位上昇によって生じる持続波圧、そして持続波圧の後の鋭いピークを反射波と入射波の衝突により瞬間的に発生する重複衝突波圧と呼んでいる。数値波動水路による解析結果は、重複衝突波圧までは再現できていないが、波圧変動の時系列や継続時間などの全体的な傾向は良く一致している。

図-6～8に斜面上の水位波形を示す。図-6は斜面を遡上した段波が反射波となって戻ってくる様子である。図-7は重複衝突波圧が発生する直前、図-8は重複衝突波圧が発生する瞬間である。

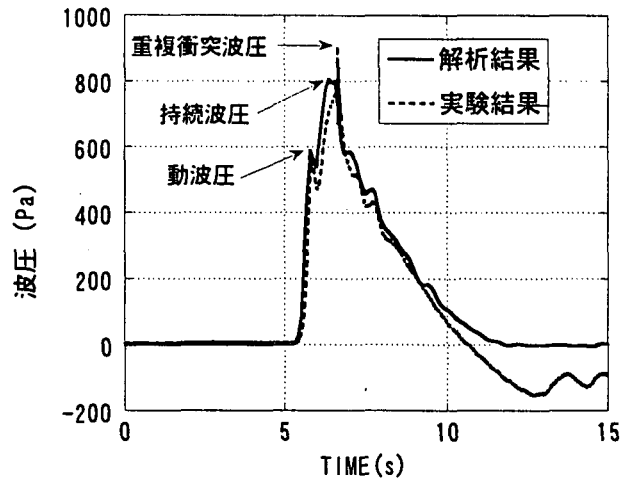


図-5 圧力変動時系列

VOF法では、セル内の水面を水平か鉛直と考えるため、水平格子間隔より小さなスケースの現象を再現することは難しい。また、セルがすべて水で満たされているときのみ圧力緩和計算が行われるため、水流が鉛直格子間隔より薄くなると運動を正確に再現できなくなる。これらの理由により重複衝突波圧をうまく再現できなかったと思われる。

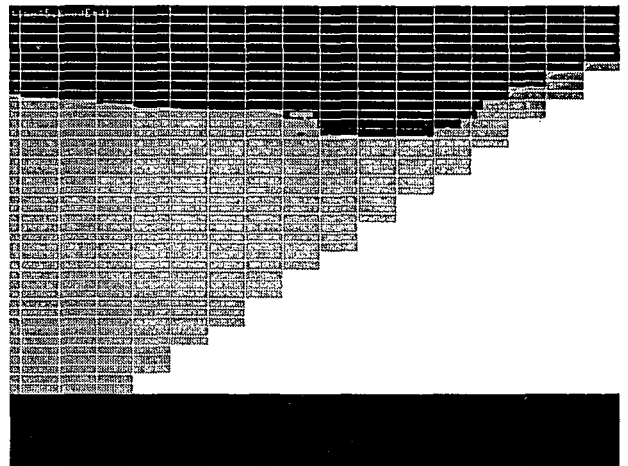


図-6 斜面上の段波波形 (t=6.8s)

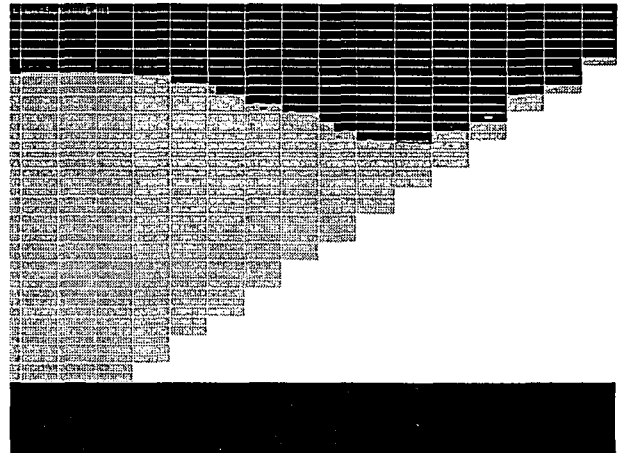


図-7 斜面上の段波波形 (t=6.9s)

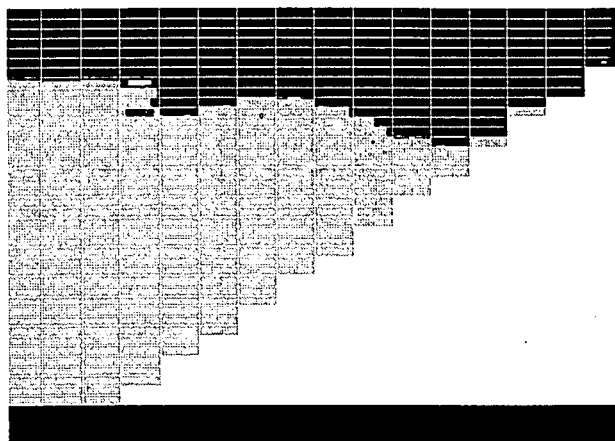


図-8 斜面上の段波波形($t=7.0s$)

図-9は、斜面上の無次元最大波圧分布を示す。無次元最大波圧とは波圧の最大値を入射波高： H_i （波高計3を使用）と水の単位体積重量で除したものである。鉛直方向についても、 H_i で無次元化し静水面がゼロとなるようにした。図中、白抜きのマークは解析結果であり、塗りつぶされているマークは実験結果である。解析結果では重複衝突波圧が再現できていないため、動波圧が発生した時刻以降の最大値を持続波圧として定義した。解析結果と実験結果を比較すると動波圧についてはすべての計測地点で非常に良く一致しており、静水面で最大となった。持続波圧に関しても、全体的には数値計算は実験結果をうまく再現しているが、 $0 < Z/H_i < 0.5$ の範囲では、計算値は実験値に比べて過大評価になっている。この範囲は重複衝突波圧が大きくなる領域と一致しており、今回使用した格子間隔より小さなスケールの現象が発生している可能性がある。しかし、数値波動水路による解析結果は、圧力に関しても実験結果をかなり再現しており、段波の衝突によって構造物に作用する波圧の検討にも数値波動水路が適用可能だと考えられる。

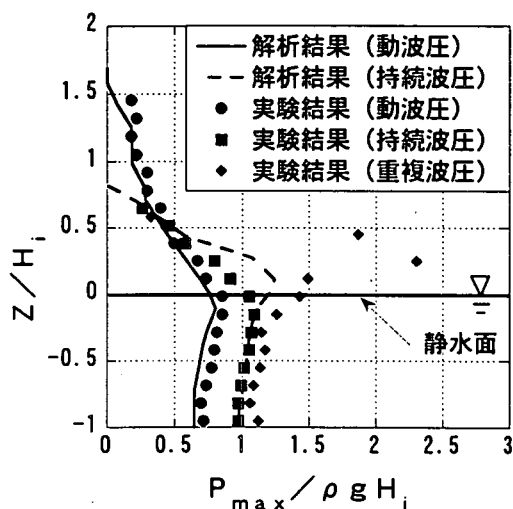


図-9 無次元最大波圧分布

4. ダム破壊法

(1) 水理模型実験

図-10は、ダム破壊法で段波を発生させた実験（文献5）で用いた地形模型を示す。この実験は、砂嘴を越流しラグーンに流入した1998年パプアニューギニア津波の特性を検討するために行われたものである。水路は全長11m、幅0.3mの両面ガラス張り長方形水路で、貯水長が5.0m、一様水深部および一様勾配斜面部(1/40)が2.0m、平坦な陸上部が0.50m、逆方向に傾いた一様勾配斜面部(1/1)が0.02m、一様水深のラグーン部が1.48mである。水路下流端は水深調節のための堰が設置してあり、氾濫流はそこを越流して水路外へ放出される。波高計は平坦陸上部の両端と、ラグーン内(ラグーン部の始まりから堰までの間の約1/3の位置)の計3箇所に設置してある。

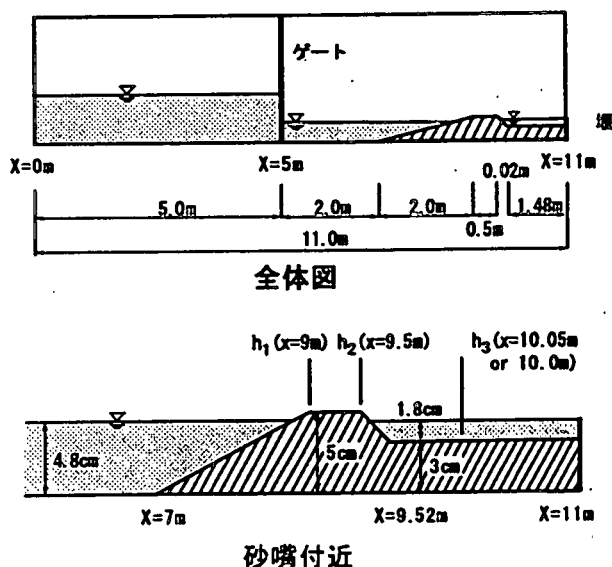


図-10 ダム破壊法で使用した実験装置

表-2は波条件を示している。貯留水深を変化させて3通りのケースに関して検討を行ったが、ここでは貯留水深15cmのケースについて述べる。なお、同一ケースについて実験は2回実施されている。

表-2 ダム破壊法における波条件

条件	貯留水深	水平部水深	地盤高	ラグーン水深
1	10cm	4.8cm	0.2cm	1.8cm
2	13cm			
3	15cm			

(2) 数値解析

図-11は、数値波動水路の解析モデルを示してお

り、水平方向 11.3m、鉛直方向 0.22m を対象としている。格子分割(間隔)は、それぞれ水平方向に 1,130 分割($\Delta X=0.01\text{m}$)、鉛直方向に 110 分割($\Delta Z=0.002\text{m}$)であり、総格子点数は 124,300 である。モデルは実験模型を忠実に模擬しているが、実験装置の右側に 30cm の仮想領域を考えている。そして計算領域の右端では自由流出条件で水を領域外に出している。

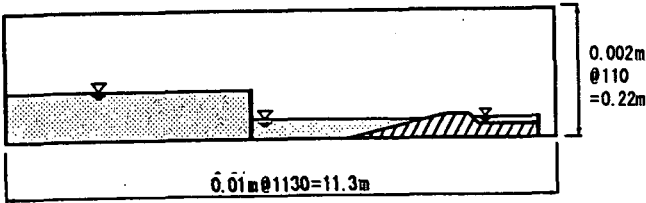


図-11 ダム破壊法の解析モデル

(3) 実験結果と解析結果の比較

図-12, 13は、陸上部両端の越流深の変動時系列を示す。実験では、砂嘴上で常流から射流への遷移が起こり、 h_2 は h_1 に比べて小さくなる。解析結果でもその状況は再現できている。ただし、 h_1 に関し、解析結果はやや過小評価で、逆に h_2 に関してはやや過大になっている。これは、計算の安定性確保のため移流項の差分に中央差分と風上差分の平均を取ったため、数値粘性の影響が現れている可能性もある。しかし、2回行われた実験値間の差を考えれば、数値計算は十分な精度で実験値を再現していると判断できる。

図-14は、ラグーン内の水位変動時系列(1回目の実験では $x=10.05\text{m}$ 、2回目の実験では $x=10\text{m}$ で計測)を表す。実験では1回目と2回目の結果にかなり差が見られる。これは、砂嘴を越流した水流がラグーンに突入し、大きな乱れが発生するからである。さて、図-14には、 $t=4.0\sim 6.0\text{s}$ と $t=12.0\sim 22.0\text{s}$ の二つの大きな山がある。第1の大きな山は、図-15, 16に示すような、砂嘴を越流した水流がラグーンに突入して作り出した右方向に進行する波状跳水である。先端付近で碎波を繰り返すため、数箇所の山と谷が形成され、それらの山と谷を伴いながら全体として右方向に進行している。1998年パプアニューギニア津波では、津波に流された住民から、ラグーン内で空を3回見たという証言が得られている。その住民は、図-15, 16のような現象に巻き込まれたものと思われる。ただし図-15, 16は鉛直方向を5倍に拡大してあり、図の右端が $x=10.4\text{m}$ 付近である。図-14の $t=5.0\text{s}$ 付近で水位の計算結果が実験結果に比べ過小評価になっているが、これは図-15, 図-16に示した移動跳水の中の最も左側の大きな山の右隣にある谷が水位計測点に到達したためである。

この複数の山・谷をもつ移動跳水は右方向に進行

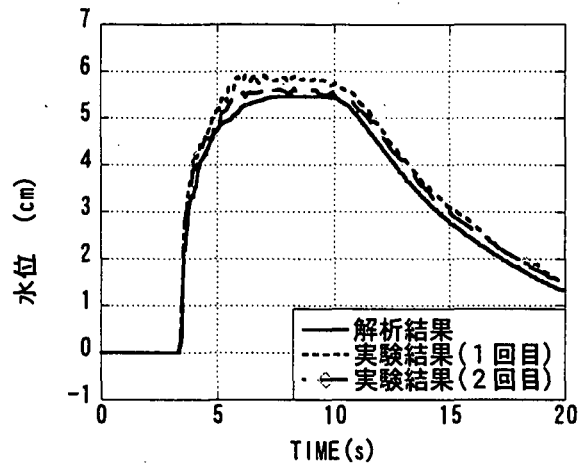


図-12 越流深の変動時系列(h_1)

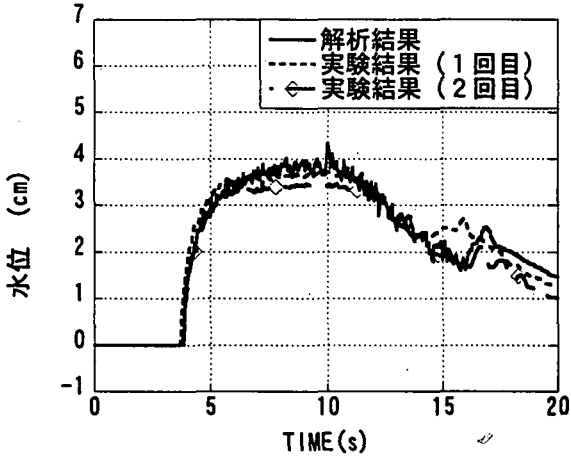


図-13 越流深の変動時系列(h_2)

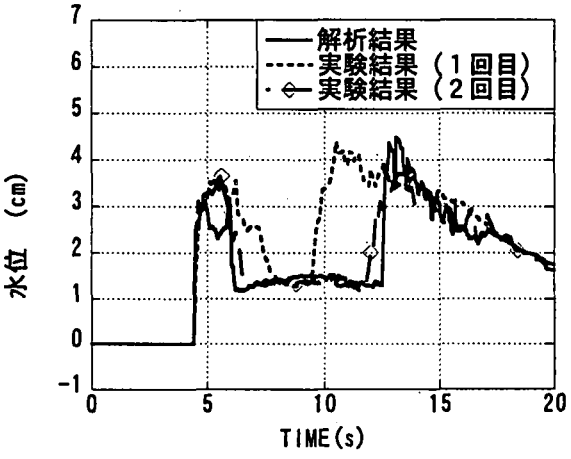


図-14 ラグーン内の変動時系列(h_3)

し、やがて実験装置右端に設けられた堰を越流する。この際、しばらく跳水は定常状態を保つが、堰付近の水位が上昇し、またラグーンに流入してくる流量が少なくなってくると跳水は徐々に左側に移動を始める。これが図-14の $t=12.0\text{s}$ 以降に現れる第2の山である。左側に進行する移動跳水の様子を図-17に示す。

ばらつきを考えれば妥当な結果が得られており、数値実験として使用できると考えられる。

5. まとめ

波動理論を使用した数値計算では再現が難しい段波の伝播に対し、数値波動水路の適用性を調べた。数値波動水路の任意波形造波機能を使用する方法と階段状の初期水位を与える方法を用いたところ、いずれの方法でも段波を発生させることができた。またリーフ状の浅瀬や斜面、砂嘴、ラグーンといった様々な地形のもとで段波の変形、伝播を再現できた。斜面に作用する圧力変動に関しても、計算格子より小さなスケールの現象が影響していると思われるところ以外では、かなりの精度で実験値を再現できた。

以上のように、数値波動水路による解析結果は実験結果と完全に一致しているわけではないが、実験値のばらつきや計算で使った格子間隔を考慮すると、妥当な結果が得られていると言える。したがって、数値波動水路は、段波に関する実験にも適用可能と考えられる。

謝辞：本研究で用いた数値波動水路は、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」（代表：東京大学磯部雅彦教授）で開発、改良されてきているものである。また、研究を進めるにあたり、東北大学大学院工学研究科・今村教授、水谷氏および秋田大学工学資源学部・松富助教授には、それぞれ造波板位置制御法を使用した実験、ダム破壊法を使用した実験のデータを快く提供していただき、さらに有意義な助言をいただきました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 磯部雅彦, 高橋重雄, 余 錫平, 榊山 勉, 藤間功司, 川崎浩二, 蔭 勤, 秋山 実, 大山洋志: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究-V0F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.
- 2) 磯部雅彦, 余 錫平, 梅村幸一郎, 高橋重雄: 数値波動水路の開発に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 36-40, 1999.
- 3) 榊山 勉, 阿部宣行, 鹿島遼一: ポーラスモデルによる透水性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 554-558, 1990.
- 4) 水谷 将, 今村文彦: 構造物に作用する段波波力の実験, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 946-950, 2000.
- 5) 松富英夫, 河田恵昭, 首藤伸夫, 都司嘉宣, 藤間功司, 今村文彦, 松山昌史, 高橋智行, 牧 紀男, 韓世璽: 1998年パプアニューギニア津波の陸上での流勢と被害, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 376-380, 1999.

(2001.4.6 受付)

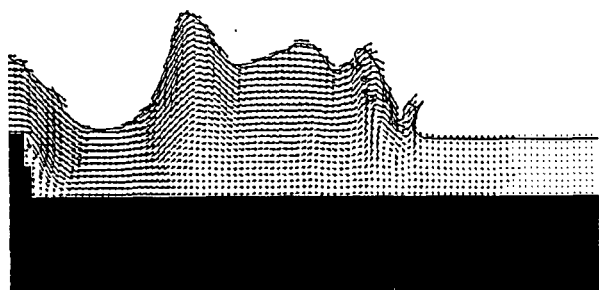


図-15 ラグーン内の流況 ($t=4.5s$)

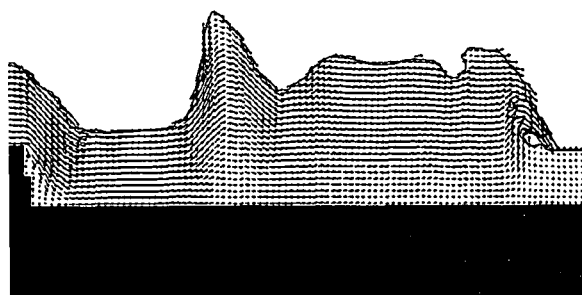


図-16 ラグーン内の流況 ($t=4.75s$)

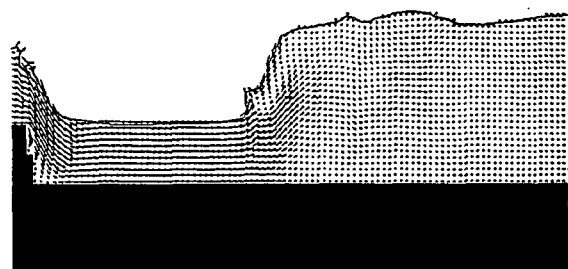


図-17 ラグーン内の流況 ($t=13.75s$)

数値波動水路による解析結果は、このような現象に関しても実験結果（2回目）とよく一致している。

以上のように、数値波動水路の解析結果は、実験結果に比べ多少の差はあるものの、実験そのものの