

陸上構造物に作用する津波に関する 数値波動水槽CADMAS-SURF/3Dの検証

VERIFICATION OF NUMERICAL SIMULATION MODEL CADMAS-SURF/3D FOR TSUNAMI ACTING ON STRUCTURES

榊山 勉

Tsutomu SAKAKIYAMA

正会員 博(工) 電力中央研究所 (〒207-1194千葉県我孫子市我孫子1646)

This paper verified the 3D numerical simulation model CADMAS-SURF/3D for tsunami inundation phenomena. Experiments on 2D flow over a model structure and 3D flow around model structures under non overtopping condition were carried out to obtain the data on the water depth, velocity and pressure acting on structures. The numerical results of time histories and spacious variation of water depth and velocity agree well with those of the experiments in 2D flow over the structure. The experiment showed the complicated flow around the structures in the 3D filed consisting of supercritical flow at the seawall, runup on the wall of the structure and scattering flow around the structure. The numerical results of the 3D flow reproduced well both qualitatively and quantitatively. The difference between the numerical results and the experimental results was caused by the time lag due to the motion of wave front.

Key Words : Tsunami, numerical simulation, inundation depth, pressure, physical model tests

1. 結論

津波氾濫流に対する陸上構造物の健全性を検討するには、氾濫流の予測ならびに構造物に作用する流体力の評価が重要な課題となる。流体力に関しては、松富・大向¹⁾の実験的な研究が先駆的であり、朝倉ら²⁾の成果は実務に取り入れられた。インド洋大津波を契機に陸上構造物やコンテナ対象として津波の圧力に関する研究が活発になった(例えば、チャルレスら³⁾、廉ら⁴⁾)。榊山ら⁵⁾は津波圧力に対する石油タンクの座屈解析を行った。数値計算による研究では3次元計算が行われるようになった。Wu⁶⁾は乱流モデルの影響を考慮して構造物に作用する段波の3次元数値計算を行った。有川ら⁷⁾は津波波力に関して3次元化した解析コード(CADMAS-SURF/3D)の適用性を検討した。榊山・米山⁸⁾は3次元場の多方向不規則波を対象に数値計算を行い、方向スペクトルの比較を行った。さらに有川ら⁹⁾は波浪の碎波変形に対して検証した。今後は、数値計算への依存が高まる傾向にある。現在、数値波動水槽の耐波設計への適用性に関する研究会で様々な条件へ数値解析コードCADMAS-SURF/3Dを適用し、その妥当性を検証中である。しかしながら、これまで津波遡上波に対して3次元数値計算を検証した研究例は少ない。

本研究は、陸上に遡上した津波の構造物周辺の流れを対象に水位分布、流速、圧力など数値計算で得

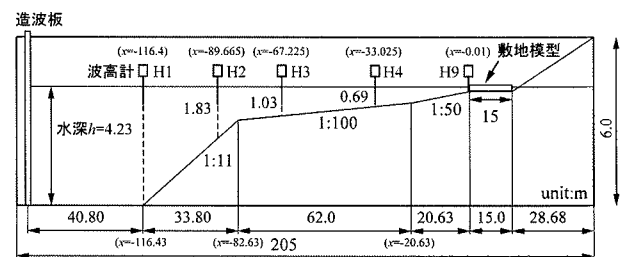


図-1 実験装置(大型造波水路, 長さ205m, 深さ6.0m, 幅3.4m)

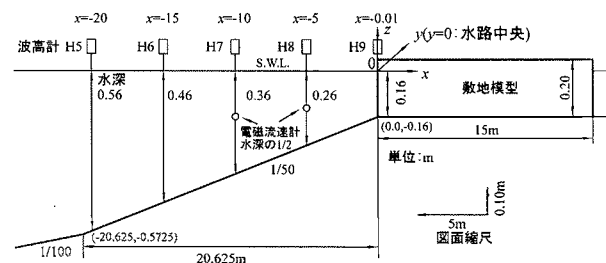


図-2 座標系の定義と護岸前面の波高計の位置

られる諸量を広い範囲で実験データを用いて同解析コードの適用性について検証する。

2. 実験方法

実験は、図-1に示す長さ205m, 深さ6.0m, 幅3.4mの大型造波水路を用いて行った。水路内には図-1に

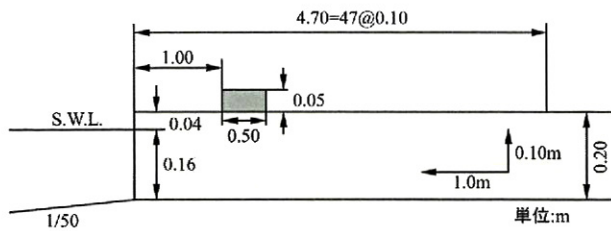


図-3 断面2次元実験の構造物と水位、流速測定範囲

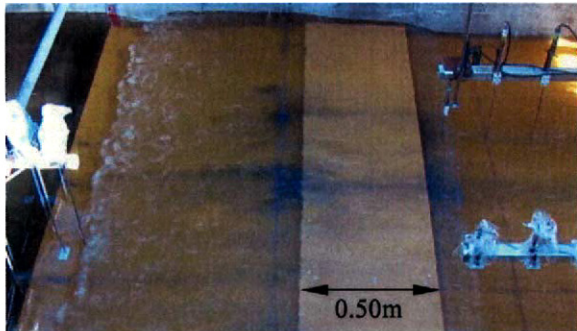


図-4 断面2次元実験(構造物の越流, $t=61s$)

示す波高計H1からH4ならびに図-2に示すH5からH9の波高計を設置し水位変動を測定した。さらに、波高計H7とH8の2地点には電磁流速計を各点の水深の1/2の深さに設置し、流速の水平、鉛直の2成分を測定した。図-2に座標系の定義を示す。

検証データは、断面2次元現象と3次元現象の2種類の実験を対象に取得した。図-3に断面2次元実験の構造物模型を示す。津波遡上波が構造物を越流する現象を対象にした。護岸法線から1.0mの位置に幅0.5m、高さ0.05mの矩形構造物を設置し、護岸法線から4.7mの範囲にわたって0.10m間隔で水位と流速を測定した。測定には超音波水位計と電磁流速計を用いた。図-4にこの断面2次元実験の状況を示す。遡上波が構造物を越流し陸上を遡上する流れと構造物により反射し海域に戻る流れの両者が顕著に発生する条件を設定した。

図-5に3次元現象を対象とした構造物の平面図と配置を示す。構造物は1辺が0.50mの立方体で、非越流の条件を満たす高さとした。水路の両側壁が反射面となり鏡像関係となるように水路の幅方向に2列の構造物を配置した。また、構造物と流れの干渉を調べるために、進行方向にも2個配置し合計4個の構造物を配置した。水位は水路幅方向に0.085m間隔で11カ所、進行方向に0.10m間隔で40カ所の4mにわたって測定した。図中の格子点の交点が測定点を表す。流速は流速計の台数が限られたので、構造物に近い範囲で間隔0.085m、離れた領域で0.17m間隔とした。測定は繰り返し行い、波高計H3の信号を基準に全データを同期させた。

図-6に実験の様子を示す。護岸法線で越流した直後の射流に向かって前側の構造物からの反射波が戻っていく状況が観察できる。また、前側の構造物の背後では水位がきわめて低くなっている。前側の構造物の間を透過した流れが背後の構造物に作用し構造物前面でせき止められている様子がみられる。

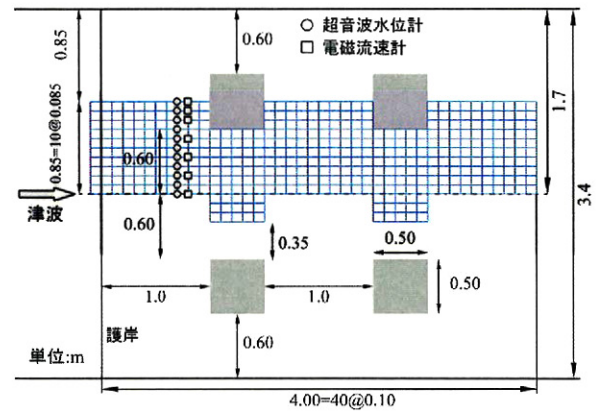


図-5 3次元構造物の配置と水位、流速の測定位置

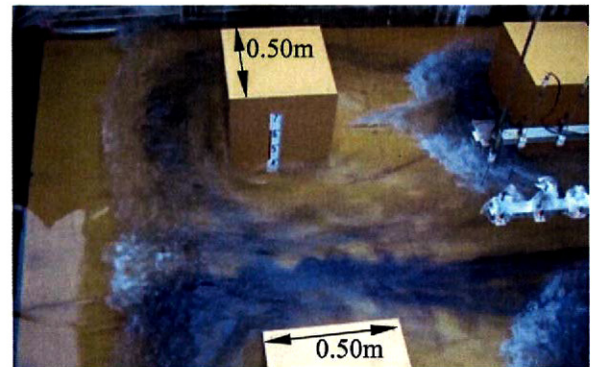


図-6 3次元実験(構造物周囲の水位と圧力測定)

この領域においても、前側の構造物を回り込んだ流れが射流になっている領域に、後側の構造物からの反射波が沖へ戻っていく状況を示している。

3. 計算方法

計算に使用した3次元数値解析コードCADMAS-SURF/3Dの詳細は、有川ら^{7),9)}に記述されているのでここでは省略する。

計算領域は、図-2の波高計H7の位置($x=-10m$)から敷地模型の端から3m($x=18m$)までとした。数値計算の入射境界条件には、十分な計算領域を設定するか、造波ソースと沖側のエネルギー吸収帯を設置して、通常進行波成分のみの造波信号を与えて行う。今回の実験では、 $x=-10m$ の水位と流速には入射波と反射波成分が含まれる。これらを入射境界で与えることにより、造波ソースと沖側の計算領域を設定することなしに反射波を透過させることができる。これにより計算領域を大幅に縮小できた。陸上地形の底面や構造物の壁面の境界条件はフリースリップとした。

数値計算の水平格子サイズは、陸上の構造物を含む $x=0m$ から5mまでを $\Delta x=0.01m$ (一定)とし、その前後の $x=-5m$ から0mと $x=5m$ から10mを可変とし、 $\Delta x=0.01m$ から0.05mの等比級数で変化させた(比 $r=1.02$)。さらに、 $x=-10m$ から-5mと $x=10m$ から15mは $\Delta x=0.05m$ (一定)とした。また、鉛直格子サイズは $\Delta z=0.005m$ (一定)とした。3次元計算での Δy は構造物周辺を0.01m(一定)とし、その両脇の側方境界までの範囲を等比級数(比 $r=1.01$)で可変とした(最大

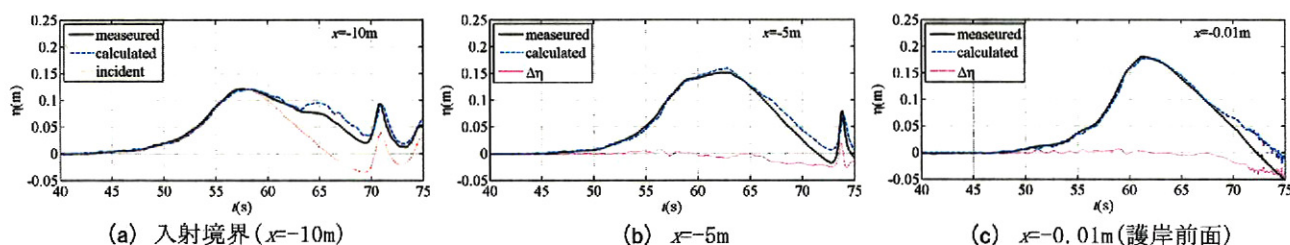


図-7 陸上構造物がない状態での水位の実験結果と計算結果との比較

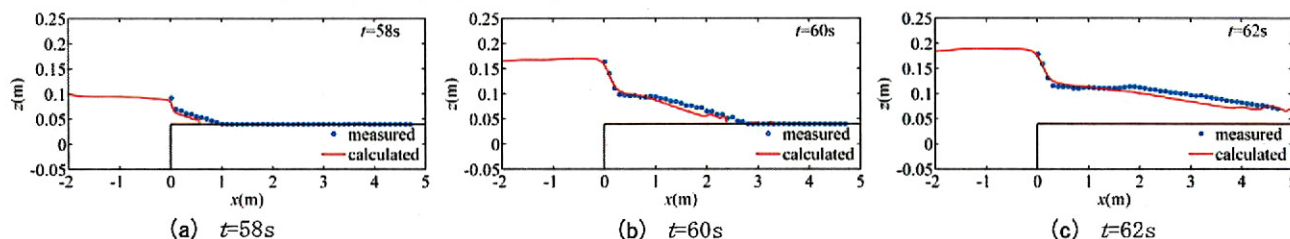


図-8 陸上構造物がない状態での水位の空間分布の実験結果と計算結果との比較

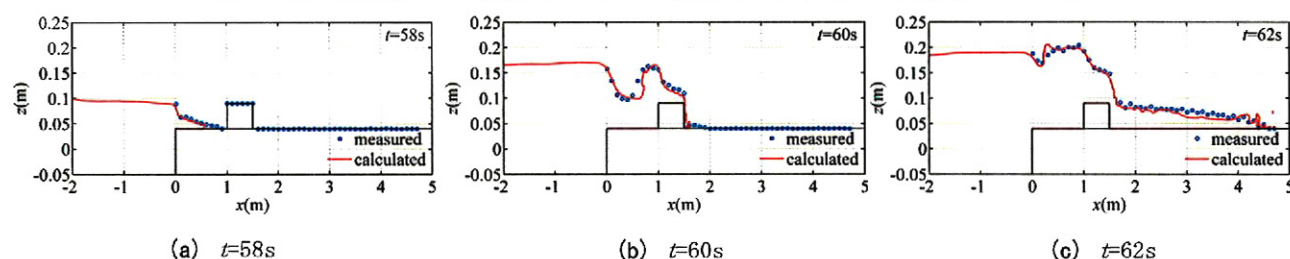


図-9 陸上構造物を越流する場合の水位の空間分布の実験結果と計算結果との比較

で $\Delta y=0.0151$ m). 計算格子数は、 x 方向に1144格子、 z 方向に120格子、 y 方向に146格子である。

図-7に陸上に構造物がない場合について、(a)入射境界($x=-10$ m)、(b)伝播途中($x=-5$ m)、(c)護岸前面($x=-0.01$ m)での水位変動 η の実験結果と計算結果の比較を示す。横軸の時間 t は実験での造波開始時刻を $t=0$ としたもので、計算は $t=40$ s から開始した。ここでは、実験結果との比較のため実験の時刻に合わせて表示する。図-7(a)には水口ら¹⁰⁾の方法で入・反射波を分離した、入射波成分の水位変動も示した。今回設定した入射境界である護岸から10 mの位置では($x=-10$ m)、ほぼ最大水位になる位相で既に反射波が到達している。入射境界($x=-10$ m)での設定水位と計算結果は $t=63$ s までよく一致している。図-7(b)と図-7(c)の時系列から最大水位を超えるまでは実験結果と計算結果は良好に一致していることが確認される。それ以降の差は、陸上での引き波の再現性に課題があることを示唆している。

3次元実験では前後の2つの構造物のそれぞれ前面と背面に作用する圧力を、水平方向に構造物の端部から中心までの範囲($y=0.61$ mから 0.85 m)を 0.05 m間隔で、鉛直方向に 0.01 m間隔で測定した。

4. 検証結果

(1) 断面2次元構造物の越流

図-8と図-9は、それぞれ陸上構造物がない場合とある場合の水位の空間分布について実験結果と計算結果を比較したものである。図-8と図-9とも全体を

通じて $x=0$ の護岸法線位置で水面勾配が大きくなっている。ここは射流になっている。この $x=0.0$ mから 0.2 mの範囲では超音波水位計で測定はできなかったため、模型の床に水を貯えるための溝を設け容量式波高計を用いて測定した。

構造物がない条件での遡上波の先端速度は、 $t=58$ sから 60 sでは約 1 m/s、 $t=60$ sから 62 sではそれ以上になっている。陸上構造物がある場合、図-9(a) $t=58$ sでは遡上波はまだ構造物に達していないので、図-8(a)と同じ状態にある。 $t=58$ sで実験結果の遡上波の先端は $x=0.8$ mから 0.9 mにあるのに対して、計算結果は両者とも $x=0.5$ mである。図-8(a)と(b)に見られるように、計算結果は遡上波の先端が切り立った水面形になる傾向にある。これは計算では先端が水面セルとなり、水面の境界条件の設定に依存しやすいことによるものと考えられる。全体的な空間波形は実験結果と良好に一致している。水面波形だけでは理解しにくい、先に述べたように $x=0$ mの護岸法線の近傍では図-8、図-9に示す時間の範囲では射流になっている。図-8と図-9のそれぞれ(b)、(c)との比較から、図-4に実験の写真に示したように反射波が段波となって護岸法線位置にもどる様子を概ね再現できているものと考えられる。さらに、図-9(c)にみられるように構造物を越流した遡上波は、段落ち流れ後の流れであり、実験結果の水面の空間波形にみられるように図-8(c)に比べると変動していることがわかる。

図-10と図-11に代表点3点における水位 η ならびに流速の水平成分 u の時系列について、実験結果(実

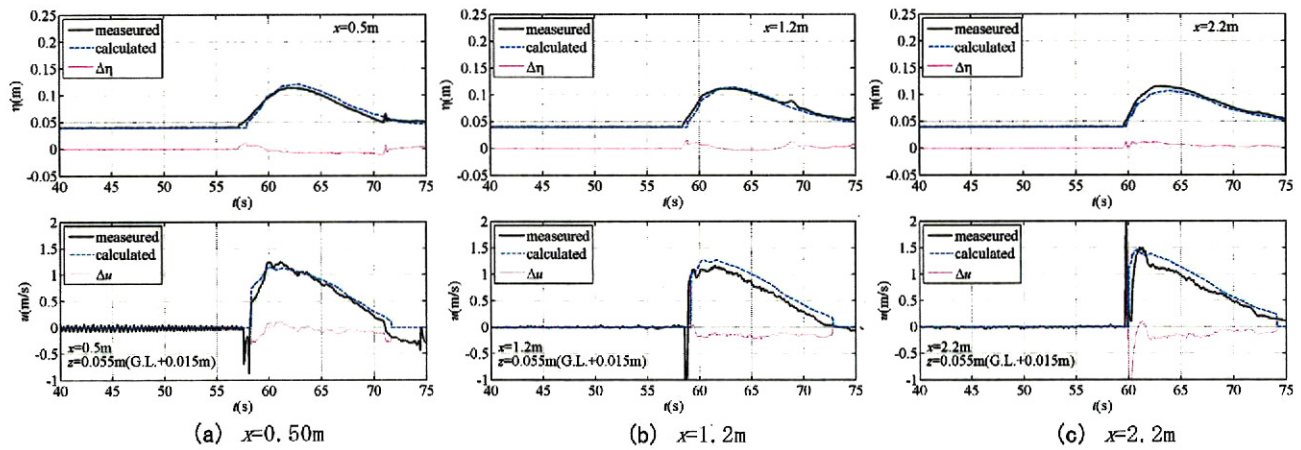


図-10 陸上構造物がない状態での水位(上段)と水平流速成分(下段)の時系列の実験結果と計算結果との比較

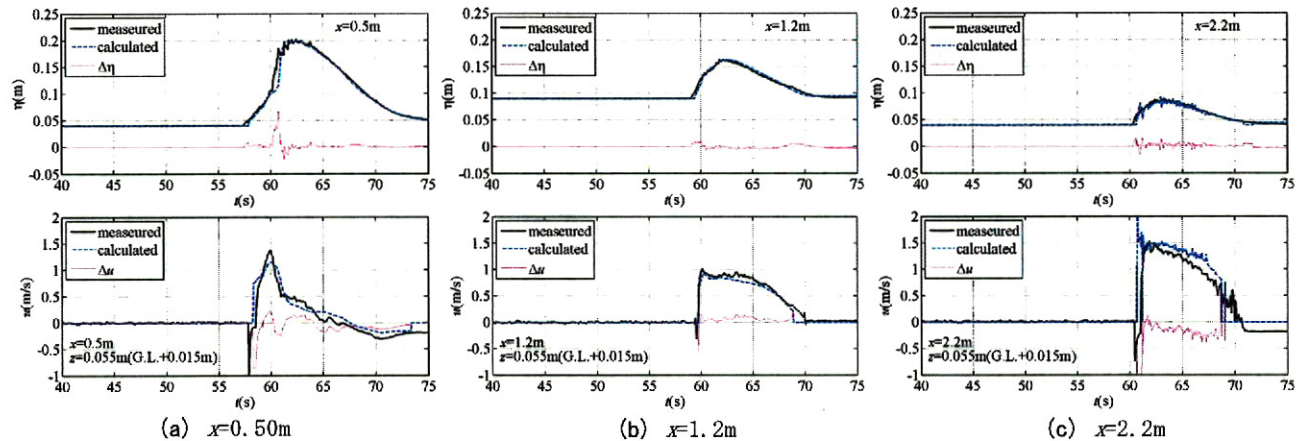


図-11 陸上構造物を越流する場合の水位(上段)と水平流速成分(下段)の時系列の実験結果と計算結果との比較

線)と計算結果(破線)との比較を示した。流速 u は模型の床面上0.015mの点で測定した。計算結果も同じ点の結果を示した。ただし、計算結果の流速 u の鉛直分布については検討していない。実験結果と計算結果の差も同時に細線で示した。流速は電磁流速計で測定した。陸上部で測定する場合、空中に設置してある電磁流速計が水中に没した瞬間にノイズが発生することがある。また、空中に放置しておくと電磁流速計のセンサーが劣化する。今回の測定で水中に没した瞬間の流速波形に計算結果と差が大きいのは、実験値に上記の問題があるためである。

水位の変化を詳細にみると、図-11(a) $x=0.5\text{m}$ では、 $t=60\text{s}$ で陸上構造物からの反射波がこの地点に到達したために、水位が急激に増加すると同時に流速が急激に減少している。図-11(b) $x=1.2\text{m}$ は、陸上構造物上に位置するため、水位の初期値が 0.09m になっている。水位と流速とも実験結果と計算結果は良好に一致している。図-11(c) $x=2.2\text{m}$ は、構造物を越流した後の流れであり、水位と流速に擾乱がみられる。この他の地点を含めて、全体的に水位、流速とも、実験結果と計算結果は良好に一致した。

(2) 3次元構造物周りの水位分布と圧力

図-12に構造物周辺の水位分布の実験結果と計算結果との比較を示す。実験は水路の幅方向に1/4の

範囲で測定した。計算は水路幅1/2の範囲で計算したが、実験結果に合わせて1/4の範囲を図示した。

図-12(a) $t=59\text{s}$ にみられるように、左段の実験結果は遡上波の先端が構造物の中間位置($x=2.5\text{m}$)まで達しているのに対して、計算結果の遡上波の先端は前側の構造物を通過していない。図-12(b) $t=61\text{s}$ では実験結果は前側の構造物前面のみならず背後の構造物の前面においても水位が高くなっているのに対して、計算結果では水位の上昇はみられるものの水塊の量は少ない。図-12(c) $t=63\text{s}$ で、計算結果にも後側の構造物の前面にもせき止められた水塊が認められる。以上のように、図-6に示した実験にみられるように、前側の構造物に遮蔽され水路幅方向全体に水位が高くなっていること、後側の構造物から斜め下流方向に散乱波の波面が形成されていること、構造物背後の後流域で水深が小さくなっているなど全体的な傾向が計算で再現されている。ただし、護岸前面 $x=0$ 付近での引き波の大きさに違いが見られる。波面の発生に位相差がみられる。これは、2次元計算結果でもみられたように計算では遡上波の先端が切り立ち実験結果に比べて伝播が遅れるためである。図-13に前側の構造物について、 $t=61\text{s}$ における構造物前後の位置における水位の y 方向の断面分布の比較を示した。実験での測定は水路幅の1/4の範囲を測定した。一方、計算は水路幅の1/2の範囲を計算している。構造物は、 $y=0.60\text{m}$ から 1.10m の範囲に

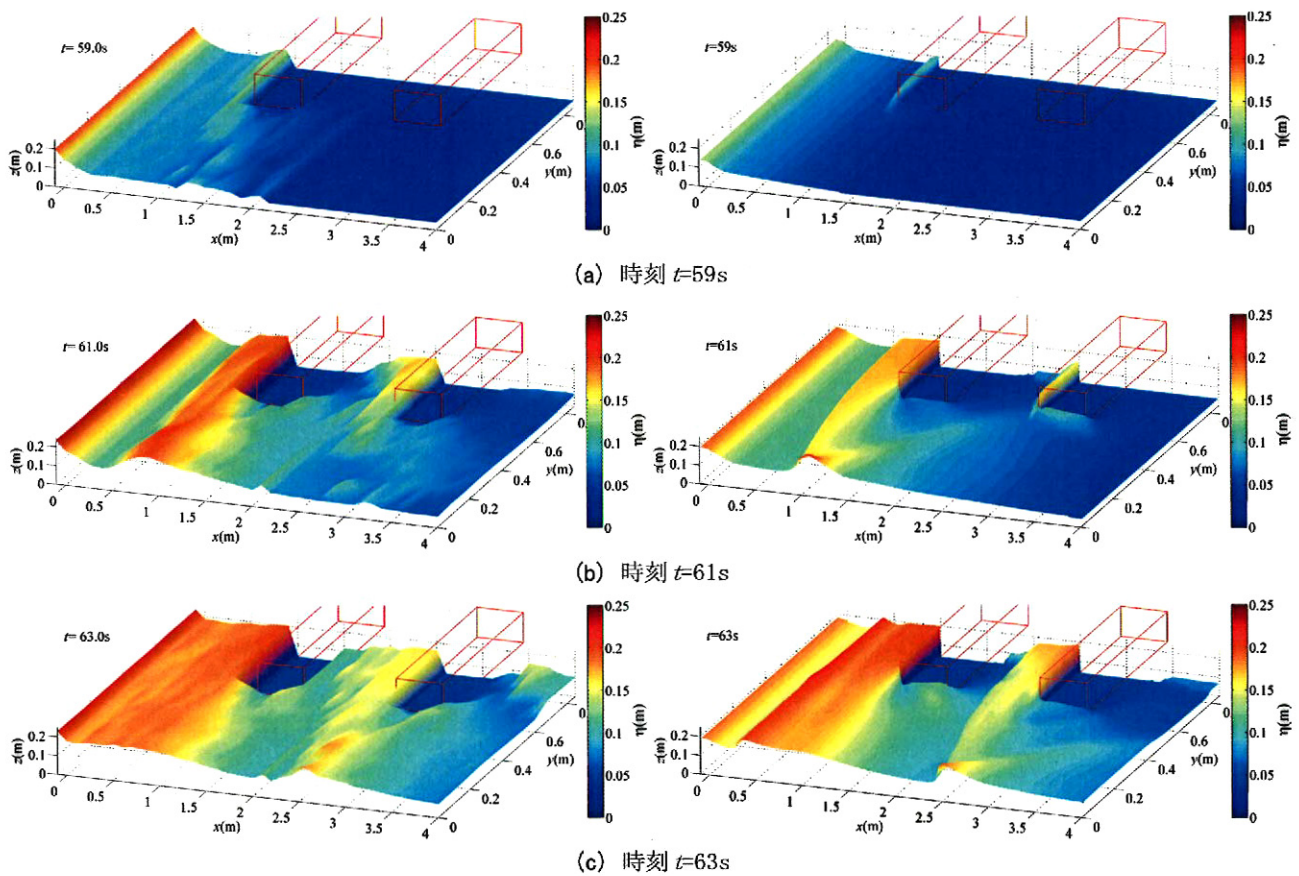


図-12 水位分布の実験結果(左段)と計算結果(右段)との比較

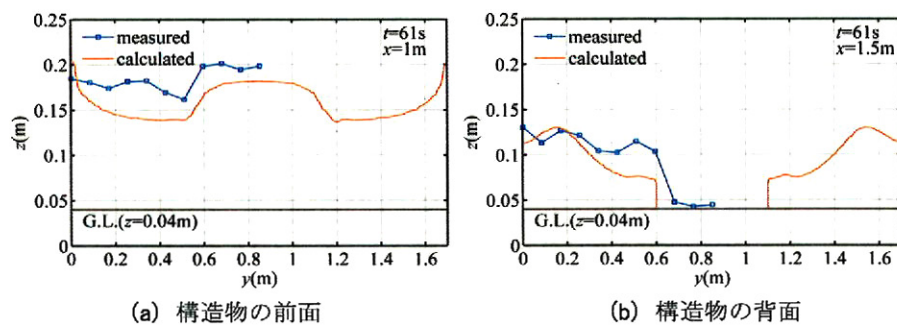


図-13 前側の構造物の水位分布の実験結果と計算結果との比較

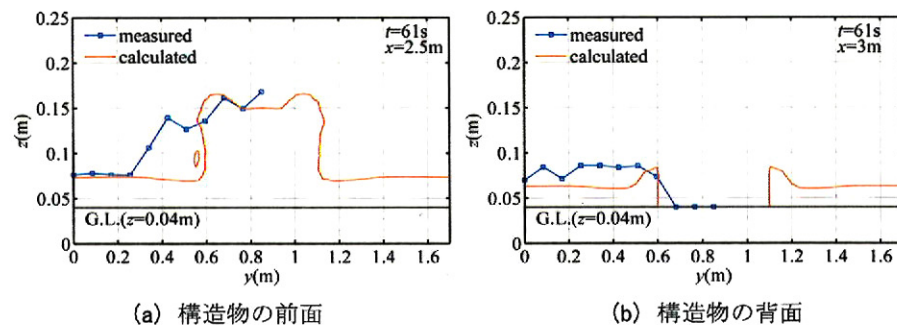


図-14 後側の構造物の水位分布の実験結果と計算結果との比較 ($t=61s$)

位置する。図-13(a)では実験結果の水位が構造物の範囲で高くなっているのに対して、計算結果は、構造物の範囲と $y=0$ 近傍で高くなっている。これは、水位の鳥瞰図を示した図-12(b)にみられるように構造物でせき止められた水塊が構造物の間を流れる状況の計算による再現には時間差があることを示している。横断面の水位は示さないが、時間の経過と

ともに計算結果でも横断方向に水位が一様に近づくことを確認している。図-13(b)の背後の水位分布の比較では計算結果では背後にまで流れが達していない。図-14は後側の構造物について同様に水位の横断分布を比較したものであり、前背面とも計算結果と実験結果との差がある。これは流れが構造物の背後に回り込むのに時間差があることに起因している。

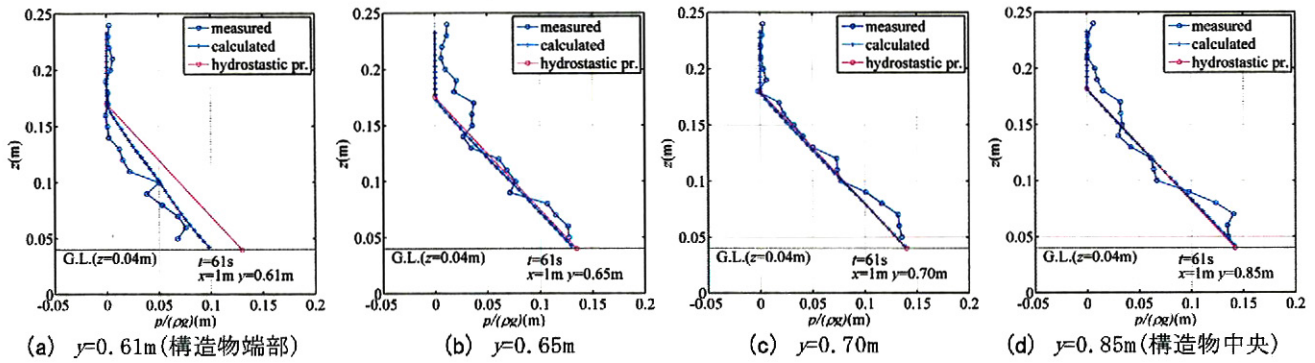


図-15 前側の構造物の前面における圧力の鉛直分布の比較

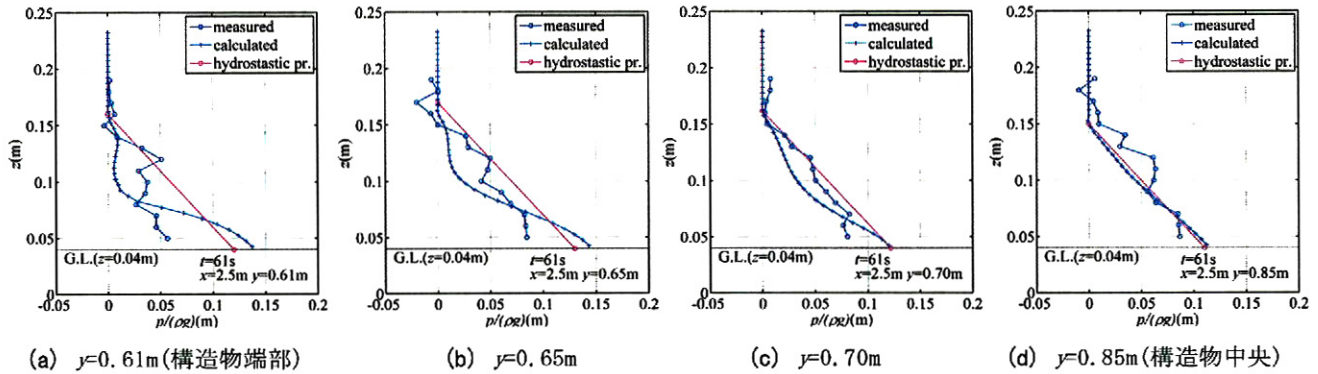


図-16 後側の構造物の前面における圧力の鉛直分布の比較

図-15と図-16は、構造物の前面(護岸側)に作用する圧力の鉛直分布を構造物端部($y=0.61\text{m}$)から中心($y=0.85\text{m}$)について比較したものである。図-15の前側の構造物では、端部から中心に向かって圧力が大きくなる傾向が実験と計算で一致している。図中には計算結果で圧力が0になる高さを浸水深とし静水圧分布を示した。構造物の端部を除き、計算結果の圧力の鉛直分布は静水圧分布に近い。構造物の端部では前面と側面の水位差が大きくなるだけでなく、図-13(a)に示したように水面形が上に凸になるため遠心力が作用し、圧力は静水圧より小さくなる。数値計算はこの傾向を示している。これに対して、後側の構造物に関してはいずれの位置においても実験結果と計算結果は前側の構造物の結果に比べて一致していない。計算結果は図-16(d)の構造物中心($y=0.85\text{m}$)だけが静水圧分布に近く、横断方向の変化が顕著になっている。

5. 結論

津波の陸上遡上の挙動に関するCADMAS-SURF/3Dの再現性は、遡上波の先端部を除けば概ね良好であることを確認した。具体的には、断面2次元計算により、陸上遡上波の水位、流速水平成分の時空間分布が実験結果と良好に一致した。また、3次元計算により構造物周辺の水位分布、構造物に作用する圧力分布を比較した結果、遡上した津波が直接構造物に作用する場合の最大圧力の評価には適用できるが、背後の構造物に作用する圧力の評価や津波の先端部が構造物に作用した瞬間の衝撃的な圧力の評価に関

してはさらに今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 松富英夫, 大向達也: 津波氾濫流の流体力に関する実験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.336-340, 1999.
- 2) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.911-915, 2000.
- 3) チャルレスシマモラ, 鳴原良典, 藤間功司: 建物群に作用する津波波力に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.831-835, 2007.
- 4) 康 慶善, 水谷 法美, 白石 和睦, 宇佐美 敦浩, 宮島 正悟, 富田 孝史: 陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.851-855, 2007.
- 5) 榊山 勉, 松山昌史, 松浦真一, 河島宏治, 佐野正和: 石油タンクに作用する津波波力と津波波圧に対する座屈解析, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.836-840, 2007.
- 6) Wu, T.R.: *A numerical study of three-dimensional breaking wave and turbulence effects*, Doctoral thesis, Cornell University, 265p, 2004.
- 7) 有川太郎, 山田文則, 秋山 実: 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, 2005.
- 8) 榊山 勉, 米山 望: 数値波動水槽による多方向不規則波の3次元計算の検証と課題, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.183-188, 2007.
- 9) 有川太郎, 山野貴司, 秋山 実: 数値波動水槽における碎波変形計算の高精度化, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.71-75, 2007.
- 10) 水口優: 浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.31-35, 1999.