

水平版に働く揚圧力における数値解析の適用性に関する研究

A study on the Applicability of Numerical Calculation for uplift forces on horizontal platform

都市人間環境学専攻 岡本 大史
Department of Civil and Environmental Engineering/Daishi OKAMOTO

Key Words : uplift force, wave impact, horizontal platform, air vents, progressive wave, standing wave

1. はじめに

古くから水面付近の水平版に働く揚圧力に関する研究は多くされている。特に谷本ら¹⁾は、ドルフィン上部工と横棧橋を対象とした水理模型実験を行い、進行波および重複波によって生じる水平版下面に働く揚圧力の算定方法を提案した。しかし、波面の衝突によって生じる衝撃圧は、波面の乱れなどによる微小な条件の違いによって著しく変化するため、ばらつきが大きいとされている²⁾。また、谷本ら³⁾は、穴を設けることによる揚圧力低減効果の実験的検討を直立消波ケーソンの上床版を対象に行い、開口率による揚圧力低減効果を示した。近年では、小俣ら⁴⁾がエアバックを水平版の下部に設置することによる空気圧縮効果を利用した揚圧力の低減効果の実験的検討によりエアバック有の場合では30%から50%の低減効果があることが示された。数値解析では、二次元流体解析を用いた進行波による揚圧力の再現計算や低減効果に関する検討は行われている⁵⁾が、重複波による揚圧力の解析や床版に穴を設けることによる圧力低減効果に関する数値解析の検討は、三次元的検討が求められることに加えて、波面の衝突によって生じる揚圧力は、空気を交えることによって著しく衝撃性を帯びたものである点から研究事例は少ない。本研究では、気液二相数値波動水槽⁶⁾を用いて進行波と重複波によって水平版に働く揚圧力の解析及び水平版に開口を設けることによる圧力低減効果の検討を目的とし、数値解析の設計実務への適用性に関する検証を行う。

2. 使用モデルの概要

本研究では複雑な界面の変形を取り扱うことができ

る有川・山野⁷⁾の開発した非圧縮性粘性流体を対象としNavier-Stokes方程式を基にした気液二相三次元数値シミュレーション(CADMAS-SURF/3D-2F, 以後CS3D-2F)を使用する。このモデルでは、基礎方程式の離散化のために、時間方向にオイラー法とSMAC法が、空間方向には一次精度風上差分と二次精度中心差分が採用されている。また、気相側領域の安定性と液相領域の精度を確保するため気液混合領域には各要素に占める水の体積率 F (VOF関数 F 値)に応じた差分スキーム、気相領域には風上差分、液相領域には元のハイブリッドスキームとなるようなアルゴリズムを加えた⁸⁾。

3. 解析モデル

(1) 水平版解析モデル

本研究では、図-1に示すように簡易的な水平版モデル(長さ1.0m)を長さ14.0m×幅0.3m×高さ0.5mの断面水槽を想定した計算領域内において造波境界から8.0mの位置に設置した。進行波の場合では反射波を防ぐために水平版後方に5mの領域と最大波長の約3倍である3mのエネルギー減衰帯を設けている。重複波の解析の場合は谷本ら¹⁾の実験同様、水平版の岸側に不透波の直立壁を設けることで進行波と重複波を区別する。波圧の計測点はPG1~PG11の11点、波高の計測点はWG1~WG3の合計3

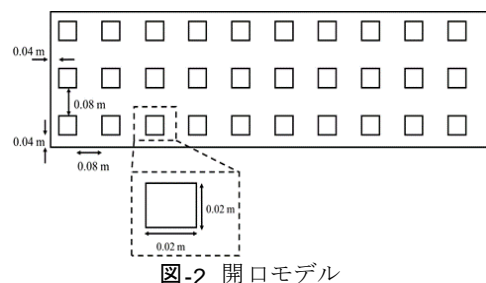


図-2 開口モデル

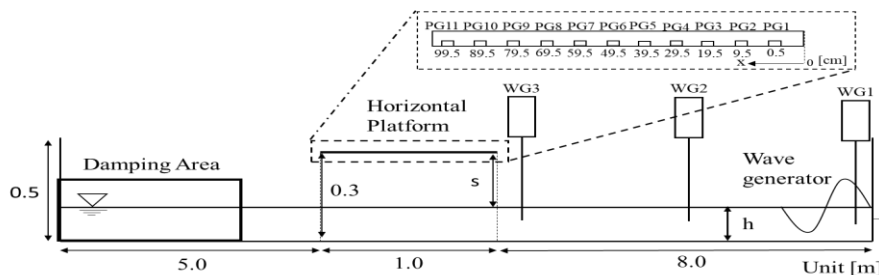


図-1 水平版解析モデル設置概要図

点で検討した。図-2は水平版に開口率4%の穴を設けた時のモデルの平面図である。設けた穴の数は30個であり、全て等間隔に設置し、波圧の計測点は穴を設けないモデルと同じ位置に設置している。開口率は水平版面積に対して2%,4%,6%と設定し、X軸方向の開口の大きさを変えることで調整している。

(2) 計算波に関して

計算波の範囲は、水深 $h=0.26\text{ m}$, 0.28 m , 入射波高 $H=0.04\text{ m}$, 0.06 m , 0.07 m , 0.08 m , 0.10 m , 波長 $L=1.318\text{ m}\sim 1.36\text{ m}$, 沖波の波形勾配 $H/L=0.029\sim 0.075$ であり、全ての範囲において沖波の周期 $T=1.0\text{ s}$ で入射している。

(3) 計算条件

格子サイズに関して造波境界から水平版にかけてはX軸方向Y軸方向は 1 cm とした。Z軸は $0.27\text{ m}\sim 0.31\text{ m}$ は 5 mm とし、それ以外は 1 cm に設定している。水平版後方の領域に関してのX軸方向格子サイズは最小間隔 1 cm から最大間隔 50 cm で設定した。また、移流項の差分スキームにおける数値粘性項の初期の重みパラメータ λ を 0.2 , 0.3 , 0.5 で設定し、スキーム値における風上差分と中心差分の割合による変化させた。以下、重みパラメータをVP-DONORと呼ぶ。総格子数は進行波の時は約167万格子、重複波の場合は148万格子である。

4. 解析結果 (開口なし)

(1) 波の作用状況 (圧力分布図)

a) 進行波

図-3(a)-(d)に示すのは、水深 $h=0.28\text{ m}$ (クリアランス $s=0.02\text{ m}$)、入射波高 $H=0.08\text{ m}$ の条件による進行波の場合の波によって生じる圧力の作用状況のスナップショットである。XZ断面の圧力に関する空間分布図から、(a)13.451sで乱れた波面が水平版中間地点で衝突し、その波面が完全に落下しないうちに次の波の作用が始まっており、(b)13.513sに次の波が水平版に衝突し、前後の波と水平版によってかなり大きな空気の塊が閉じ込

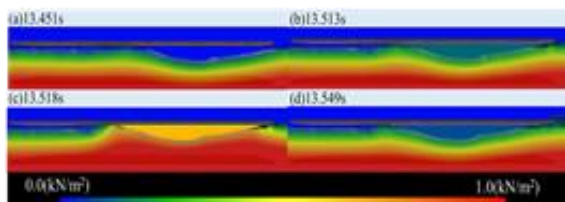


図-3 波の作用状況 (進行波, $s/H=0.25$)

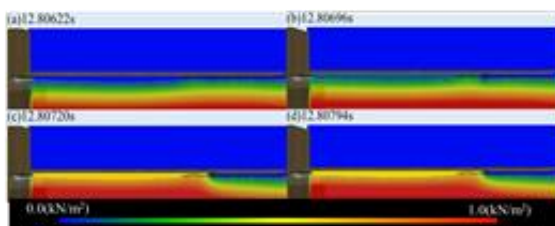


図-4 波の作用状況 (重複波, $s/H=0.5$)

められ、(c)13.518sには水平版の沖側付近で同時に衝撃圧が生じていることが分かる。

b) 重複波

図-4に、水平版岸側に直立壁 (図左側の茶色の矩形) を設けた重複波条件による波の作用状況 (水深 $h=0.28\text{ m}$ (クリアランス 0.02 m)、入射波高 $H=0.04\text{ m}$) のスナップショットを示す。(a)12.80622sにおいて進行している波面が水平版に衝突しようとしており、(b)12.80696sで波面は水平版に衝突するが、直立壁と水平版、波面によって閉じ込められた空気層によって衝撃波面は進行せず、波面が直接水平版に衝突せずとも(c)12.80720sで水平版全体に圧力が作用している様子が見える。既往の研究でもあるように空気が与える圧力値への影響は大きく、空気の影響による圧力が穴を設けたときどのような変化をするのかについて5章にて検討をする。

(2) 時系列波圧記録

a) 進行波

図-5は、図-3で示した進行波の水平版に衝突する前後の時刻の沖側の計測点(PG1: $x=0.5\text{ cm}$)における時系列波圧の記録である。図で現れているように、初期の急激な立ち上がりに伴う衝撃圧の部分とそれに続く緩やかな変化の静的圧力の部分から成っている。これは、図-4の(c)13.518sで波が水平版に衝突したときの衝撃圧と、波面と水平版によって囲まれた空気によるものと考えられる。

b) 重複波

図-6は、図-4で示した重複波の水平版に衝突する前後時

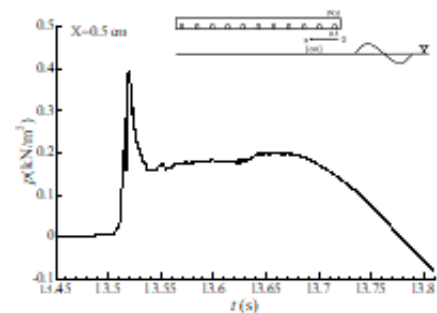


図-5 波圧記録 (進行波, $s/H=0.25$, PG1)

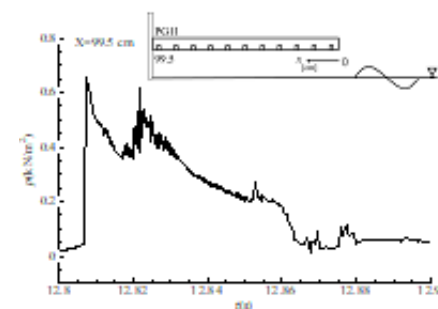


図-6 波圧記録 (重複波, $s/H=0.5$, PG11)

刻の岸側の計測点(PG11: $x=995\text{cm}$)における時系列波圧の記録である。PG11では進行波の場合と同様に衝撃的な部分と静的圧力の部分から成っているが、直立壁と水平版、波面によって閉じ込められた空気の影響によるものと思われるふたやま型の波圧が確認された。

(3) 最大揚圧力強度

本検討での結果を、横軸に sH をとり、縦軸に揚圧力を w_0H で無次元化した揚圧力強度として既往の研究と比較検討した。なお、 H は入射波の波高であり、各ケースで異なる。 w_0 は流体の単位体積重量であり $w_0=98\text{kN/m}^3$ とした。 p_1 は各測点における1波1波の局所的衝撃圧のピーク値の最大値と定義している。

a) 進行波

図-7より、数値計算の結果における局所的衝撃圧 p_1 の最大値は $1.7w_0H$ 程度となっている。伊藤・竹田⁹がデ・タッチドピアーに対する揚圧力の測定により求めた等価静荷重の上限が $p=2.0w_0H$ であり、さらに谷本¹⁰の行った水平版に働く揚圧力の実験でも進行波において $0.1w_0H$ から $3.0w_0H$ の範囲であったことから構造条件や造波条件と異なるが最大揚圧力強度を見れば妥当な結果であると考えられる。

b) 重複波

図-8より、数値計算の結果における局所的衝撃圧 p_1 の最大値は、 $20w_0H$ 程度となっており、ほとんどは $15w_0H$ 以下であるのに対して谷本¹⁰の実験では重複波での衝

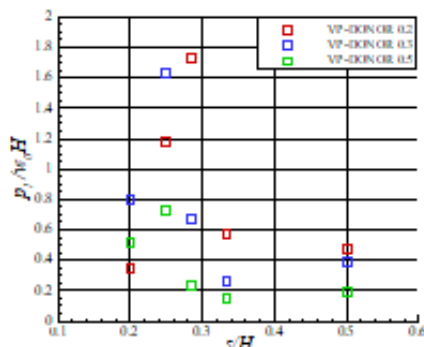


図-7 最大揚圧力強度 (進行波)

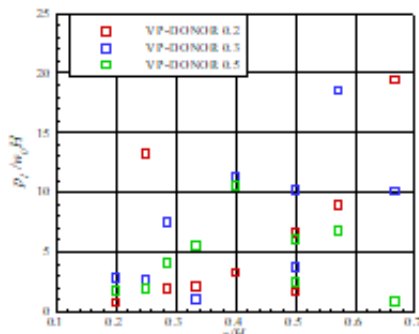


図-8 最大揚圧力強度 (重複波)

撃圧のピーク値の最大値の範囲は、 $2w_0H$ から $10w_0H$ 程となっている。また、進行波と重複波の両方においてVP-DONORを0.2にすることで鋭いピーク値が出やすいが、重複波といった波面が複雑になる計算においては不安定になりやすく、一方、0.5にするとピーク値は0.2や0.3に比べて鈍って出るが計算は安定しやすいということが確認された。

5. 解析結果 (開口あり)

(1) 波の作用状況 (圧力分布図)

図-9 (I)~(IV)に示すのは、水深 $h=0.28\text{m}$ (クリアランス 0.02m)、入射波高 $H=0.04\text{m}$ の条件による重複波によって生じる圧力の作用状況について(I)は開口なし、(II)~(IV)は開口率2%~6%で比較をしたスナップショットである。なお、図-9での計算では開口を設けることによって開口付近の流速が大きくなり、計算が不安定になりやすいことからVP-DONORを0.5に設定して開口の有無についての解析を行った。数値粘性項の初期の重みパラメータを大きくし、スキーム値における風上差分の割合を大きくすると計算の安定性は増すが、急な立ち上がりを伴う衝撃的な圧力に対しての精度は低下してしまう。本検討では開口の有無による圧力の低減効果について焦点を当てているためVP-DONORを0.5として比較検討した。図より、(I)では、(a)19.020sに波面と水平版、直立壁によって閉じ込められた空気の影響により水平版の岸側にかけてほぼ同時に圧力が生じている。一方 (II)~(IV)では開口を設けることによって空気が流れ出し(I)

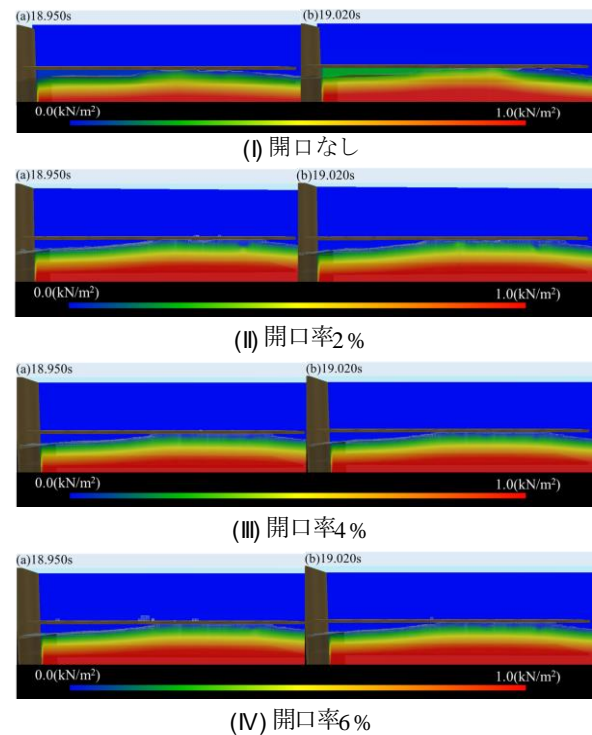


図-9 波の作用状況 (進行波, $sH=0.5$)

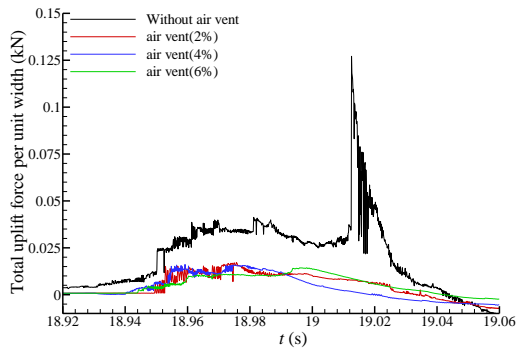


図-10 時系列波力記録 ($s/H=0.500$)

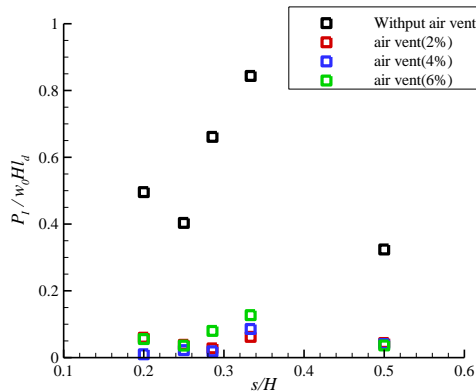


図-11 開口率による最大揚圧力強度 (重複波)

とほぼ同時刻に見られるような圧力が発生していないことが分かる。また、(IV)開口率6%では開口部において波面が水平版に衝突することによって水塊が飛び出してしまっていることが見受けられた。

図-10は、図-9と同条件における時系列波力記録である。ただし、時系列については開口ありと無しでは圧力の生じる時間に約0.05 sの位相差があったため調整をし、波力は、同時波圧より算出した。時系列波力から、開口を設けることで全体的に波力が減少し、さらに19.01 s～19.02 sで生じている急な立ち上がりを有するピーク値を抑えられていることが分かる。

(2) 空気孔による最大揚圧力強度と低減効果

前出の図-9及び図-10で認められるように開口を設けることによって圧力は減少していく。図-11は横軸に s/H をとり、縦軸に開口なしと開口率の最大波力を $w_0 H L_d$ で無次元化した揚圧力強度を示したものである。なお、最大波力は s/H ごとに1～5波分のピーク値の最大値とした。Bozorgniaら⁹⁾は相対クリアランス s/H と1%の開口を設けた時の揚圧力について検討し、1%の開口率でも揚圧力が53%から71%低減することを示しており、本検討で用いた開口率2%、4%、6%でも開口を設けていないときに生じている波力を全体的に低減させていることが分かる。その中でも開口率4%の s/H によるばらつきは大きい最大揚圧力強度だけをみると83%程の低減効果が

あった。

6. まとめ

本研究では、CS3D-2Fを用いて進行波と重複波によって水平版に働く揚圧力の解析を数値粘性項の重みパラメータを変化させて行った。以下に本研究によって得られた結論を列挙する。

1. 進行波と重複波では波の作用の仕方に相違はあるものの、閉じ込められた空気層による圧力への影響は大きいことを数値解析によって示し、既往の研究結果からその妥当性を示すことができた。
2. 開口を設けることによって空気の流出が可能となり、波面と水平版、直立壁に空気が囲まれる現象が無くなり、水平版全体に働く波力は低減することが分かった。開口率2%から6%の間ではそれほど低減率の違いは見られなく、その場合、低減率は83%程であることが示された。

参考文献

- 1) 谷本勝利, 高橋重雄, 和泉田芳和: 水平版に働く揚圧力に関する研究, 港湾技術研究所報告資料, VOL.17, NO.2, June 1978.
- 2) 榎木亨, 後野正雄: 棧橋床版に作用する揚圧力特性に及ぼす気層の効果に関する研究, 土木学会論文集, 第381号, pp.141-149, 1987.
- 3) 谷本勝利, 高橋重雄: 直立消波ケーソンの上床版に働く空気圧縮揚圧力, 第27回海岸工学講演会論文集, pp.315-319, 1980.
- 4) 小俣哲平, 伊藤一教, 橋本敦史: エアバックによる衝撃揚圧力の低減効果に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.75, No.2, p.1_895-1_900, 2019.
- 5) Bozorgnia, M., Jjin-Jen Lee., Frederic Raichlen. Wave Structure Interaction; Role Of Entrapped Air On Wave Impact And Uplift Forces., *Coastal Engineering Proceedings*, 2011.
- 6) Zhe Ma, Ting Zhou., Nianxin Ren., Gangjun Zhai: A Comprehensive Study of the Wave Impact Loads on an Inclined Plate, *Marine Science and Engineering*, 7(4), 2019.
- 7) 有川太郎, 山野貴司: スパイクノイズ処理を有する数値波動水槽による衝撃砕波圧の計算, 港湾空漕技術研究所報告書, No.1175, 2009.
- 8) 有川太郎, 五十嵐宏夢: 直立壁に作用する衝撃波力を対象とした気液二相流体シミュレーションの精度と計算効率に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, p.1_1039-1_1044, 2018.
- 9) 伊藤喜行・竹田英章: 棧橋に作用する波の揚圧力, 港湾技術研究所報告書, Vol.6, No.4, pp.37-68, 1967.