

水平版に作用する津波による 揚圧力に関する研究

UPLIFT FORCES ON A HORIZONTAL PLATE BY TSUNAMI

松田駒之¹・山本欣司¹・安井章雄²・内山一郎³・清宮 理⁴・下迫健一郎⁵

Komayuki MATSUDA, Kinji YAMAMOTO, Akio YASUI

Ichiro UCHIYAMA, Osamu KIYOMIYA and Ken-ichiro SHIMOSAKO

¹東京都港湾局 離島港湾部 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

²正会員 博(工) 日本海洋コンサルタント株式会社 技術本部 (〒136-0074 東京都江東区東砂7-19-31)

³正会員 日本海洋コンサルタント株式会社 技術本部 (〒136-0074 東京都江東区東砂7-19-31)

⁴フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学術院 建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

⁵正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

In the design of a horizontal plate, uplift forces generated not only by normal waves but also by tsunami must be considered. In this study, we conducted a hydraulic model test and a numerical simulation (CADMAS-SURF) in order to investigate the characteristics of uplift forces by tsunami exerted underneath a deck of horizontal plate. The maximum uplift pressure by tsunami is almost equal to the hydrostatic pressure induced by the rise of water surface, and the uplift force can be reduced by preparing openings to discharge the trapped air under the plate. The calculated results of water surface and uplift pressure by CADMAS-SURF were fairly well in agreement with the experimental results.

Key Words : Uplift forces, horizontal plate, tsunami, CADMAS-SURF

1. はじめに

地震津波による沿岸構造物の被害が報告され, 今後の対策が求められている. 我国においても近い将来, 東海・東南海・南海地震等の巨大地震の発生が予測されており, 地震により引き起こされる津波に対して様々な対策が検討されている. 波浪により水平版に作用する揚圧力については台風による栈橋の被災を契機にこれまでに多くの研究^{1)~8)}が行われ, 伊藤・竹田³⁾が定式化した $p=4w_0H$ が設計で用いられることが多い. しかしながら, 津波のような周期の長い波に対する研究は見当たらない.

本研究では, 津波により水平版に作用する揚圧力を水理模型実験および数値波動水路 (CADMAS-SURF) により求めた. 津波高さと揚圧力の関係を示し, 水平版に開口部を設けた場合の揚圧力低減効果や津波高さによる揚圧力の違いを述べるとともに CADMAS-SURF の適用性について検討した.

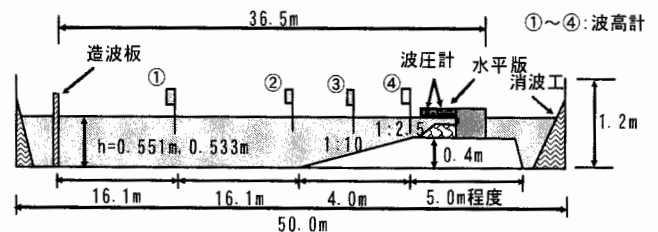
2. 水理模型実験

(1) 実験装置

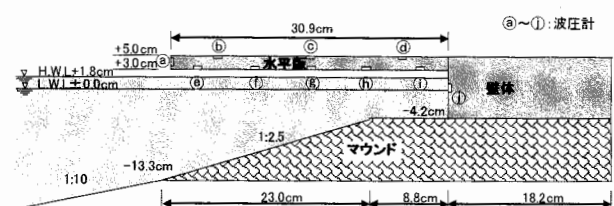
水理模型実験は, 図-1に示す長さ50m, 幅0.6m,

高さ1.2mの二次元造波水路を用いた.

水槽の一端には, ピストン型造波機が設置され, 水槽のほぼ中央に勾配1/10の固定床を設け, 固定床上に図-2に示す1/2.5のマウンド, 壁体, 水平版を一体とした模型を設置した.

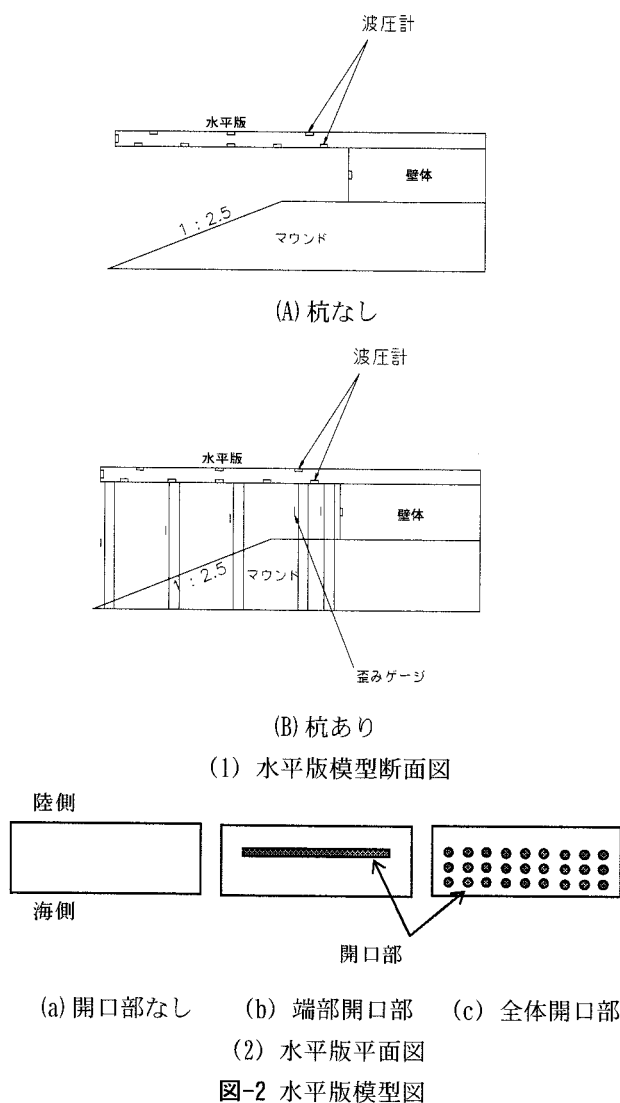


(a) 水槽の全体断面図



(b) 水平版部拡大図

図-1 実験水槽概要図



水平版、壁体、1/2.5マウンドはアクリル板で製作し、勾配1/10の地形に固定した。水平版の長さは30.9cm一定とし、水平版に開口部のないもの(図-2のAとaの組合せ)、水平版岸側端部に開口率7.4%の開口部を設けたもの(図-2のAとbの組合せ)、水平版全面φ34mmの開口部を水槽幅方向に9個、奥行方向に3列と平均開口率13.3%の開口部を設けたもの(図-2のAとcの組合せ)、開口部がなくφ13の杭を水槽幅方向に9本、奥行方向に5列設けたもの(図-2のBとaの組合せ)の4種類を用いた。なお、水平版模型において、リブは設けていない。

(2) 実験方法と実験条件

実験縮尺はフルード則を適用し、1/60を想定して水位変動と水平版に作用する揚圧力を計測した。水深 h は53.3cm(L.W.L時)と55.1cm(H.W.L時)の2種類とし、静水面から水平版下面までのクリアランス s は1.2cmと3.0cmである。波は孤立波とし、津波高さを2cmから8cmまで2cm間隔で変化させた。水位変動は沖側1箇所と1/10勾配のマウンド部3箇所に設置した容量式波高計により計測した。揚圧力は水平版上面

に3箇所、下面に5箇所等分に設置した波圧計により計測した。計測は水位、揚圧力とも500Hzで行った。水平版に作用する揚圧力は、波圧に受圧長さを乗じた後、水平版全体長さで除し、水平版下面と上面との圧力差が最大になる場合について検討を行った。

3. 水平版に作用する揚圧力

図-3 は開口部なし、クリアランス 1.2cm と 3.0cm、津波高さ 8cm 時の水位と水平版上面と下面の版全体の平均波圧の時系列を一例に示している。

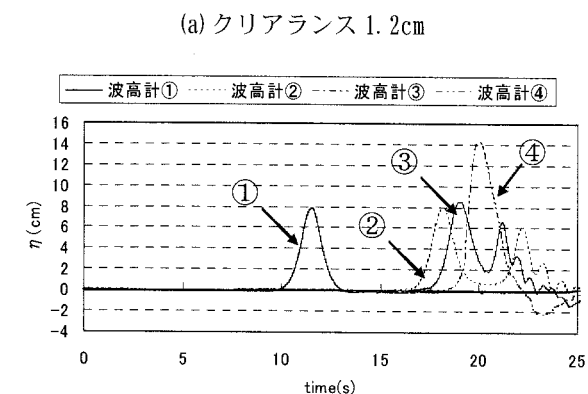
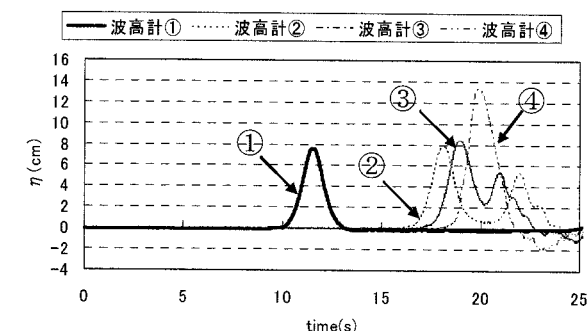


図-3 水位と水平版平均波圧の時系列

観測データはノイズ除去のため 11 個のデータで移動平均したが、観測値を用いてもピーク値は大きくても 30%程度の増大であった。これまで行われている比較的周期の短い波を対象とした研究では、衝撃的に発生する波圧が大きく現れている。孤立波を用いた本研究では、図-3 よりクリアランスが 1.2cm の時には衝撃的な波圧は観測されず、クリアランスが 3.0cm の時に衝撃的な波圧が観測された。しかし、水平版に作用した衝撃力は、それ程大きなものにはなっていない。

図-4 は、水平版下面と上面の波圧の差をネットの揚圧力として、ネットの揚圧力が最大となる下面と上面の波圧を堤前水位 η との関係でクリアランス別に示したものである。図-4 より、クリアランスが 1.2cm の時には水平版下面に作用する波圧は、 η/h に比例して増大するが、開口部を設けることにより作用する波圧は低減する。作用した波圧は実験条件内では最大 $p=1.0w_0\eta$ であり、下面には水面上昇による静水圧に近い波圧が作用したと考えられる。水平版上面に作用する波圧は η/h の増大や開口部を設けることにより大きくなり、波が水平版を乗り越えるか開口部を通して越流したことを示している。クリアランス 3.0cm の場合も同様であるが、下面に作用する波圧はクリアランス 1.2cm に比べて小さい。さらに、上面には開口部の有無に係わらず波圧が作用していない。水平版下面には衝撃力が作用しているにも係わらず静水圧以下の波圧であり、ネットの揚圧力が最大となる波圧は水平版を越流する前に作用する。作用する波圧は下面・上面ともにクリアランス 1.2cm 時が高く、ネットの揚圧力はクリアランス 3.0cm の方が高い。

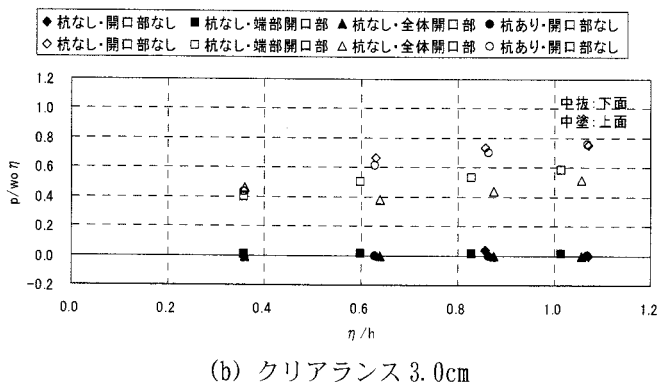
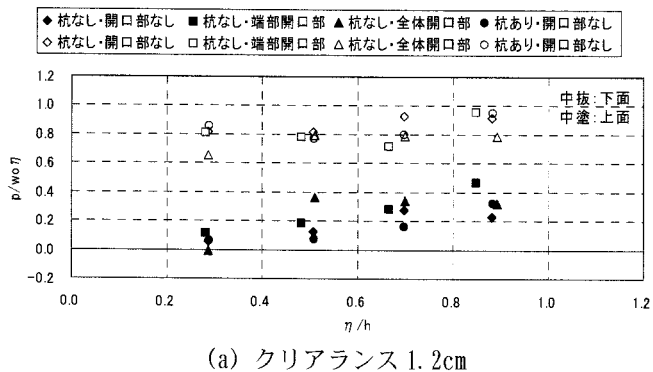


図-4 堤前水位水深比と波圧の関係

図-5 は沖波波高に対する揚圧力を示したものである。本研究の実験条件では下面に作用した揚圧力は高くとも $p=2.1w_0H$ 、ネットの揚圧力は $p=1.8w_0H$ であり、既往の研究で示されている $p=4w_0H$ と比べ、50%程度であった。

図-6 は波圧とクリアランスの関係を示したものである。 s/η あるいは s/H が大きいほど下面、上面ともに $p/w_0\eta$ あるいは p/w_0H も小さくなるのは、波面が水平版に衝突しにくくなるためである。

渡部・木村⁸⁾は波高を 1m~5m、周期が 7~16s (現地スケール) の範囲の水理模型実験を行い、水平版に作用する波圧の空間分布は陸側に近い点の波力が大きい三角形分布であると報告している。本研究で発生させた波は波長の長い波であるため、波長の短い波で発生する場合と波圧の空間分布の違いについて検討した。

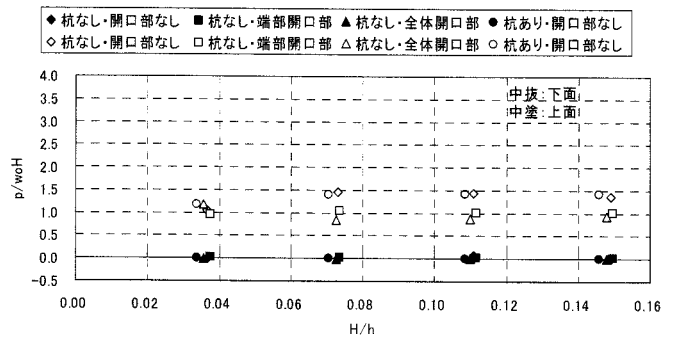
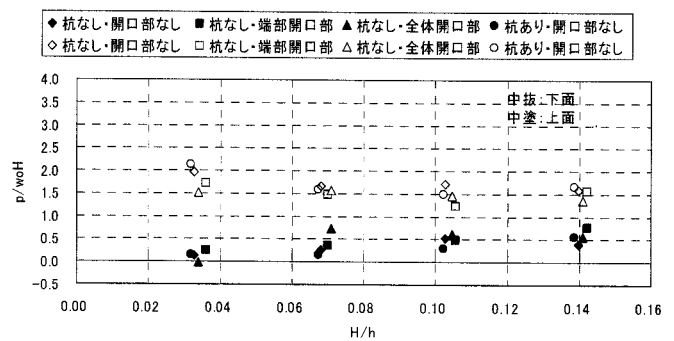


図-5 沖波波高水深比と波圧の関係

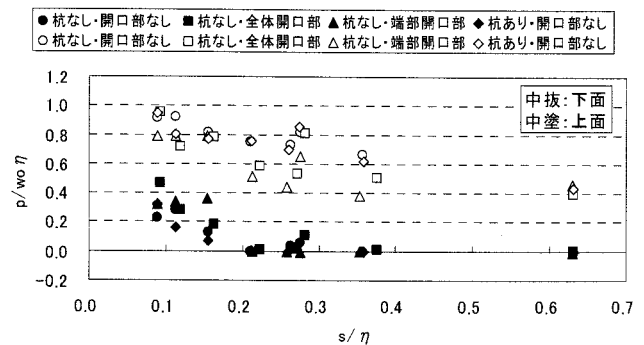


図-6 波圧とクリアランスの関係

図-7 は水平版下面に作用した波圧の空間分布を示したものである。杭あり・開口部なしの波圧空間分布は杭なし・開口部なしとほぼ同様であったため、略した。図-7 よりクリアランスが小さい時と開口部を設けた場合には水平版全体にほぼ一様に分布しており、クリアランスが大きく水位が高く開口部がない場合には陸側に近い点の波力が大きくなっている。総じて、孤立波の場合は波長の短い波と波圧の作用の仕方は異なり、全体の水位が上昇するため、クリアランスが小さい場合は水平版内に空気を閉じ込めにくく衝撃的な波圧が発生しない。クリアランスが大きい場合でも波長も短い波に比べ、空気の圧縮性が小さく衝撃力も小さい。

次に、開口率を設けることによるネットの揚圧力

低減効果について検討する。図-8 は開口部を設けた場合のネットの揚圧力低減率を水位水深比の関係で示したものである。低減率は杭なし・開口部なしの揚圧力との比とした。図-8 に示すように揚圧力低減率は η/h により変動するが、 $\eta/h \geq 0.4$ の場合に低減効果が顕著であった。また、水平版端部に開口部を設けた方が水平版全体に開口部を設けた場合よりも揚圧力の低減効果は高い結果であった。図-7 からわかるとおり、水平版下面に作用する波圧の空間分布と波圧強度は開口部の有無に寄らず、ほぼ一様であるのに対して、上面に作用する波圧は開口部の有無や位置により異なっている。したがって、開口部を設けることによる揚圧力低減効果は、主に水平版上部への浸水量の違いによるものと考えられる。

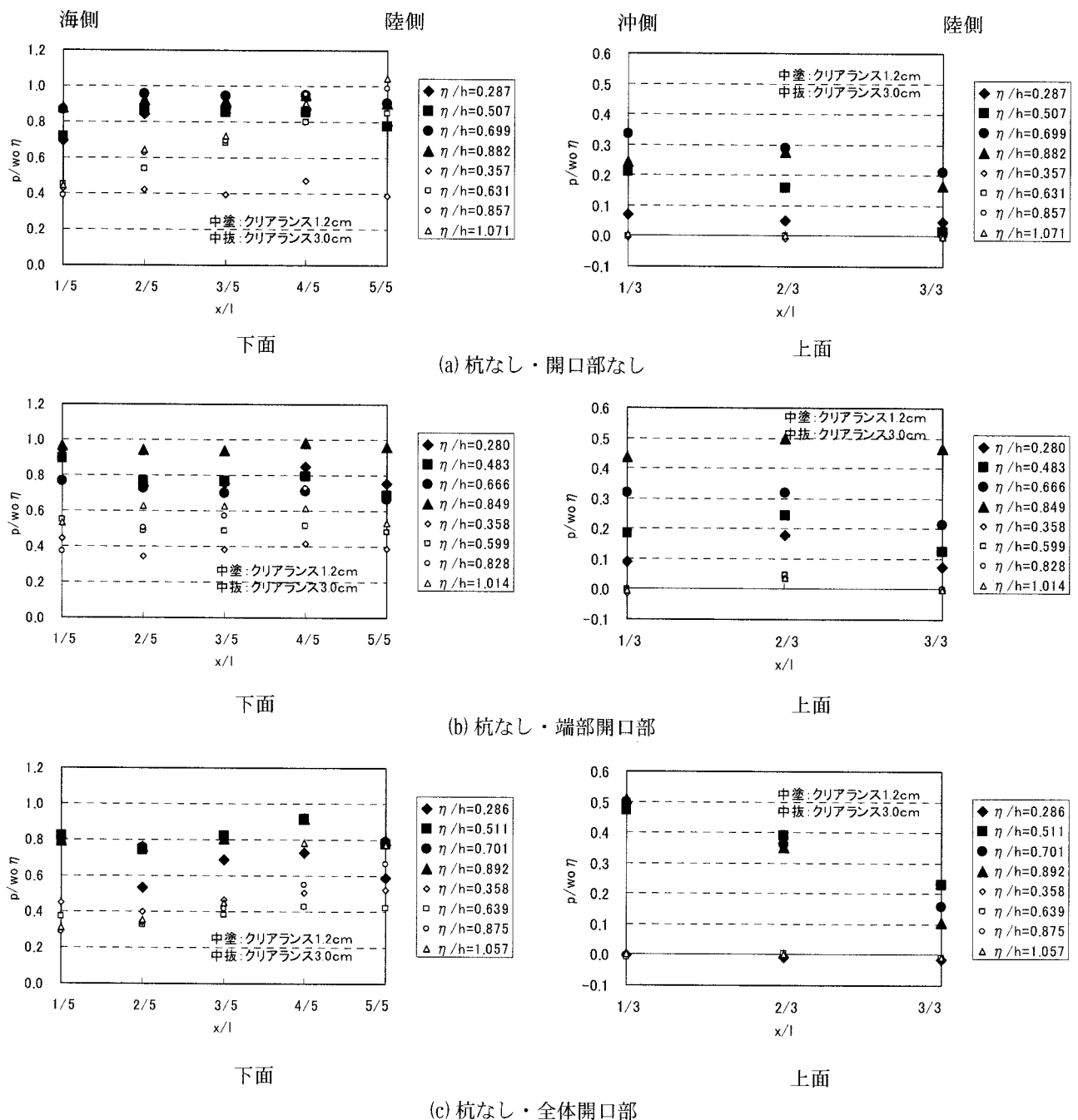


図-7 最大揚圧力作用時の水平版の波圧空間分布

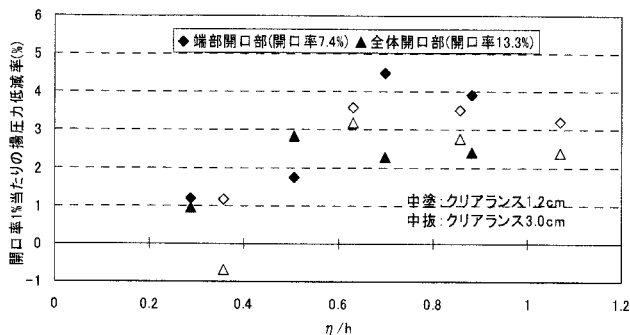


図-8 水位水深比と開口部による揚圧力低減率

4. CADMAS-SURF による波圧計算

CADMAS-SURFは、二次元造波水路の水理模型実験の代用として海域施設の耐波設計に適用^{9)~10)}されている。そこで、水平版に作用する揚圧力に対しての適用性について検討を行った。検討ケースは水理模型実験と同条件で現地縮尺 $S=1/60$ として行った。

表-1に計算ケース、表-2はCADMAS-SURFの計算条件を示す。なお、CADMAS-SURFの水路の諸元は、実際に使用した実験装置と同様とした。

表-1 検討ケース

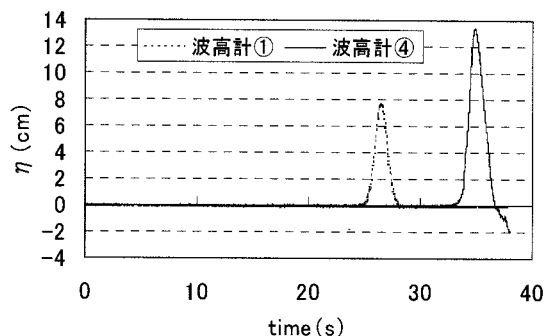
模型	潮位	水深	津波高さ
開口部なし	H. W. L	0.551m	8cm
	L. W. L	0.533m	
端部開口部	H. W. L	0.551m	8cm
	L. W. L	0.533m	

表-2 CADMAS-SURFの主な計算条件

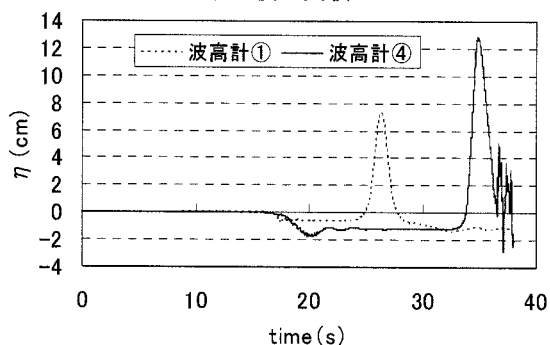
水路の高さ	1.5m
水路の長さ	50m
格子間隔	沖側 $dx=5\text{cm}$, 2.5cm , $dz=2.5\text{cm}$ 模型周辺 $dx=dz=1\text{cm}$
計算時間	40s
計算時間間隔	0.1s~ 10^{-9} sの間で自動計算
造波関数	クノイド波
境界条件	Slip (流速・圧力値), Free (F値)
気泡上昇速度	0.2m/s
流速・圧力のサブグループ	2回

図-9はH. W. L時、開口部なしの場合について水理模型実験とCADMAS-SURFの計算で求めた (a) 水位と (b) 波圧の結果を示したものである。CADMAS-SURFによる波圧の計算では、下面の波圧の変動が大きく発生している。これは気体を計算していないことによる数値計算上の問題と考えられる。水平版下面に閉じ込められた気泡が流体セルになったり、気体セルになったりすることで圧力が急激に変動し、さらに気泡セルが一つではないために、圧力変動が繰り返

して現れたと考えられる。急激な波圧の低減を除去するとピーク値で20%程度低く見積もられ、上面に作用する波圧は多少過大に評価しているものの、水位変動、波圧ともに水理模型実験の結果を概ね再現できているものと考えられる。

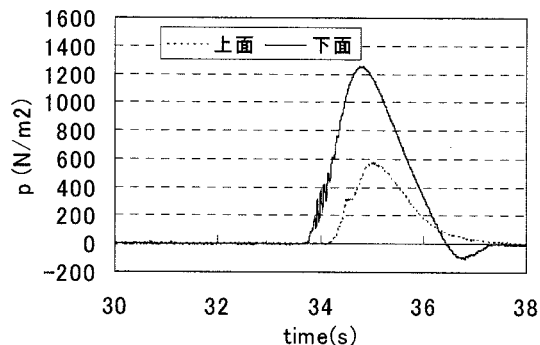


水理模型実験

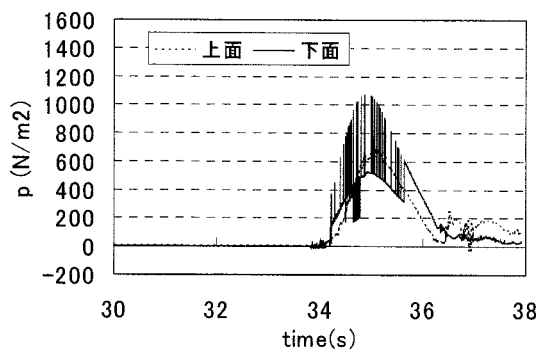


CADMAS-SURF

(a) 水位変動



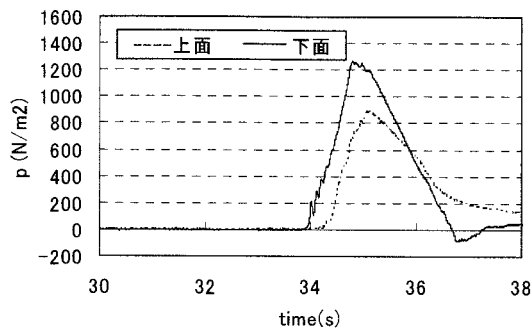
水理模型実験



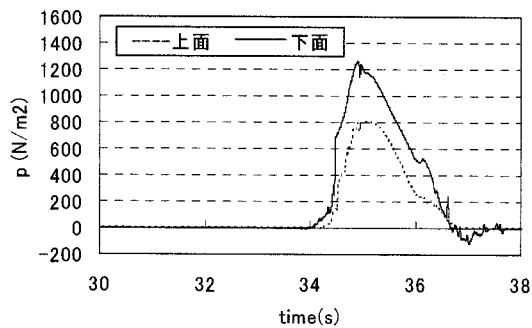
CADMAS-SURF

(b) 波圧

図-9 水理模型実験とCADMAS-SURFの時系列比較
(H. W. L 開口部なし)



(a) 水理模型実験



(b) CADMAS-SURF

図-10 水理模型実験とCADMAS-SURFの波圧時系列比較
(H. W. L 岸側端部開口部 (開口率7.4%))

図-10 は H. W. L 時、端部に開口部を設けた場合について波圧の比較を行ったものである。水位については、図-9 で示した開口部なしの場合と同様に両者はよく合致したので省略した。開口部を設けた場合は、水平版下面に気泡が閉じ込められないため急激な波圧変動は生じず、水位変動、波圧とも水理模型実験をよく再現している。ただし、細かく比較すると CADMAS-SURF の結果は水理模型実験で得られた作用時間の短い振動が表現できておらず、L. W. L 時に発生する衝撃的な波圧も現れない。これは、空気の圧縮性ならびに水面波形の形状に依存するもので、気体の圧縮性を計算しなければならないこと、さらに格子サイズや計算時間間隔を細かくする必要がある、技術的な課題と考える。

5. おわりに

本研究では、水理模型実験とCADMAS-SURFにより、水平版に津波が作用した時に発生する波圧・揚圧力について、開口部がない場合とある場合の検討を行った。主要な結論は以下の通りである。

- 1) 水理模型実験の結果、堤前水位 η と揚圧力 p の関係は、水平版に開口部を設けない場合でも最大で $p=1.0w_0\eta$ であり、ほぼ静水圧に近い波圧が作用する結果であった。入射波高 H で整理すると揚圧力は $p=2.1w_0H$ 、下面と上面の差であるネットの揚圧力は $p=1.8w_0H$ であり、既往の研究で得られている揚圧力の算定式 $p=4w_0H$ に比

べ、50%程度であった。これは、クリアランスによるが、周期が短い波で発生するような大きな衝撃力が作用しないためである。

- 2) 水平版に開口部を設けると作用する揚圧力は低減する。揚圧力低減率は水位水深比 (η/h) で変動するが、 $\eta/h \geq 0.4$ の場合に低減効果が顕著であった。また、水平版岸側端部に開口部を設けた方が水平版全体に開口部を設けた場合よりも揚圧力の高い低減効果が得られた。
- 3) CADMAS-SURF による水位変動と波圧の時系列の結果は、水平版に開口部がある場合は水位、波圧とも水理模型実験をよく再現できた。しかしながら、実験で見られた作用時間の短い波圧変動は表現できなかった。また、水平版に開口部がない場合は、水位の時系列や波圧のピーク値は水理模型実験を概ね再現できたが、波圧は短周期で大きく変動した。これら波圧が再現できていないのは、空気の圧縮性および水面波形の形状に依存するもので、気体を計算しなければならないこと、さらに格子サイズや計算間隔を細かくする必要がある、今後の研究課題と考える。

参考文献

- 1) 永井莊七郎, 久保 直, 時川和夫: 栈橋に働く揚圧力に関する研究(その 1), 第 13 回海岸工学講演会講演集, pp. 112-119, 1966.
- 2) 室田 明, 古土井光昭: 栈橋床版に作用する揚圧力についての実験的研究, 第 13 回海岸工学講演会講演集, pp. 120-125, 1966.
- 3) 伊藤喜行, 竹田英章: 栈橋に働く揚圧力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 6 巻 4 号, pp. 35-65, 1967.
- 4) 堀川清司, 中尾忠彦, 矢島昭弘: 栈橋に働く揚圧力に関する実験的研究, 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp. 148-153, 1967.
- 5) 谷本勝利, 高橋重雄, 和泉田芳和: 水平床版に働く揚圧力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 19 巻 1 号, pp. 3-31, 1980.
- 6) 中村孝幸, 川本浩二, 藤田昌夫: 栈橋に作用する衝撃揚圧力の減勢法に関する研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 324-346, 1983.
- 7) 榎木 亨, 後野正雄: 栈橋床版に作用する揚圧力特性に及ぼす空気層の効果に関する研究, 土木学会論文集, 第 381 号/II-7, pp. 141-149, 1987.
- 8) 渡部 裕, 木村克俊: 栈橋床版に働く揚圧力特性に関する水理模型実験, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集, 第 60 号, pp. 442-445, 2004.
- 9) 磯部雅彦, 高橋重雄, 余 錫平, 榊山 勉, 川崎浩司, 蔣 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.
- 10) (財) 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術研究センターライブラリー No. 12, 296p, 2001.