

数値波動水路CADMAS-SURFの 幅広フーチングケーソンへの適用

AN APLICATION OF CADMAS-SURF TO LONG-FOOTING CAISSONS

渡邊和重¹・山本悟²・梅崎康浩³・村上真彦⁴・山谷弘幸⁵・滑川伸孝⁶

Kazushige WATANABE, Satoru YAMAMOTO, Yasuhiro UMEZAKI, Masahiko MURAKAMI,
Hiroyuki YAMAYA and Nobutaka NAMERIKAWA

¹正会員 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-8504 下関市竹崎町4-6-1)

²国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-8504 下関市竹崎町4-6-1)

³正会員 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-8504 下関市竹崎町4-6-1)

⁴国土交通省九州地方整備局博多港湾・空港整備事務所 (〒810-0074福岡市中央区大手門2-5-33)

⁵(財)沿岸開発技術研究センター調査部 (〒102-0092東京都千代田区隼町3-16)

(現 中部国際空港(株)建設部) (〒450-0001名古屋市中村区那古野1-4-1)

⁶正会員 工博(株)日本港湾コンサルタント技術本部技術開発部 (〒141-0031品川区西五反田8-3-6)

This study concerns the verification of the applicability of a Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure (CADMAS-SURF) to specially designed long-footing caissons in an area of standing wave phenomenon through a comparison of the results of the CADMAS-SURF analysis performed for the long-footing caissons with the outcome of previous experiments. In the study, a limited amount of existing hydraulic model test data was supplemented with the calculations made with the CADMAS-SURF and the scope of application of the wave pressure formula based on the finite amplitude standing wave theory to the long-footing caissons was expanded in respect of the depth-wave length ratio and the footing length-wave length ratio.

Key Words : CADMAS-SURF, long-footing caissons, finite amplitude standing wave theory

1. はじめに

大水深で比較的静穏な海域においては、堤体下部のフーチングを長くしたロングフーチングケーソン(以後、幅広フーチングケーソン)が経済的に有利になる。

酒井ら(1998)は、大水深重複波領域の幅広フーチングケーソンを対象として有限振幅波理論による波力算定式を提案し、二次元水理模型実験により検証を行っているが、実験条件の水深波長比は0.286~0.750、フーチング波長比は0.134以下の範囲である。本研究は、上述の波力算定式の適用範囲を広げて幅広フーチングケーソンの設計に資することを目的としている。水理実験の模型が撤去されてしまっていることから、模型を再製して行う追加実験とは別の波力算定式の検証方法として、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」の研究成果である数値波動水路CADMAS-SURFに着目した。

2. 数値波動水路による水理模型実験の再現

(1) 数値波動水路のシステム構成と解析方法

数値波動水路のシステム構成の概要は図-1に示すとおりである。

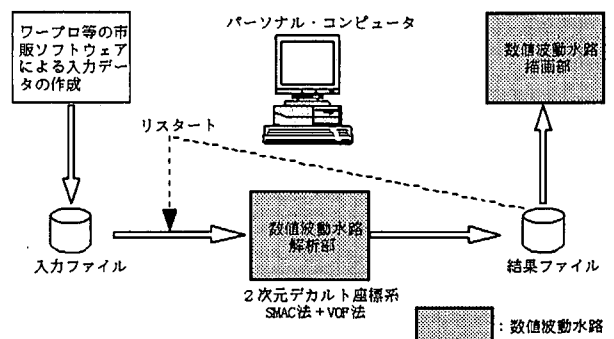


図-1 数値波動水路のシステム構成の概要

図-1の数値波動水路解析部では基礎方程式として2次元非圧縮性流体の連続の式とナビアストークス方程式を用い、自由表面解析モデルには、複雑な表面形状を解析できるVOF法を用いている。時間積分法には、オイラー法に基づくSMAC法を、空間方向の離散化にはスタッガード・メッシュを用いた差分法を用いている。数値波動水路解析部、描画部のソフト(ロードモジュールプログラム)は、前述の研究成果として公開されており、本解析に用いている。

(2) 数値波動水路の解析条件

酒井ら(1998)の幅広フーチングケーソンの水理実験断面を図-2に示す。フーチング長(b)は10cmと18.8cmの2ケースである。数値波動水路において実験条件と同じ断面の解析モデルを作成し図-3に示す。

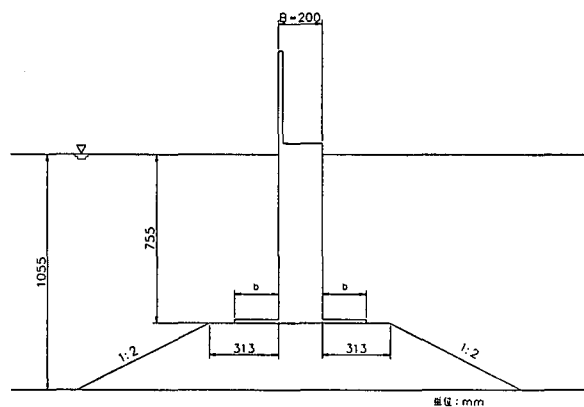


図-2 解析の対象とする実験断面

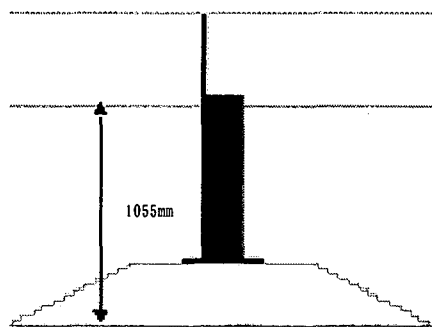


図-3 数値波動水路の解析モデル

数値波動水路の模型前面からの長さは、模型による反射波の造波境界での再反射波の影響が生じないように設定する必要があり、ここでは約5.5波長(L)とした。図-4に数値波動水路の解析体系例を示す。

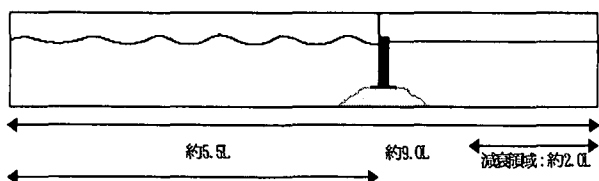


図-4 数値波動水路の解析体系例

解析モデルに用いる計算定数等の解析条件は表-1に示すとおりである。

表-1 数値波動水路の解析条件

時間刻み幅	クラン条件による制限の0.2倍			
空間離散化	スタッガード・メッシュを用いた差分法			
移流項の差分スキーム	<ul style="list-style-type: none"> VOF関数F: ドナー・アクセプタ法 その他: 1次精度風上差分×0.2 + 2次精度中心差分×0.8 			
境界条件	<ul style="list-style-type: none"> 解析領域左端: 造波境界 (ストークス波第5次近似解) 解析領域右端: Sommerfeldの放射境界 (微小振幅波の波速を使用) 海底およびケーソン: スリップ 			
エネルギー減衰帯	解析領域右側の約2波長分			
マウンド	<ul style="list-style-type: none"> 空隙率 = 0.5 (0.45) 慣性力係数 = 1.5 (1.2) 抵抗係数 = 0.9 (1.0) 注) 括弧内の値と比較して計算結果に影響がないことを確認			
格子数	波高 (cm)	周期 (s)	水平方向	鉛直方向
	7.5	0.95	830	96
	12.6	1.58	829	96
	35.1	2.47	1409	125

(3) 数値波動水路の通過波検定

数値波動水路では、数値計算特有の数値粘性(拡散)により、波の伝播とともに波が減衰するという問題があり、入射波高をパラメータとして、対象とする堤体付近で所定の波高が得られるように、通過波検定を行う。図-5は、ケーソン近傍で水理実験に用いられた波高7.5cmの波を発生させるために行った通過波検定の1例であり、波高7.5cmの場合は入射波高を7.9cmとすることで、ほぼ所定の波高が得られることが分かる。通過波検定により、波高12.6cm、周期1.58sのケースでは入射波高を12.9cmとし、波高35.1cm、周期2.47sのケースでは入射波高35.1cmをそのまま用いることにした。

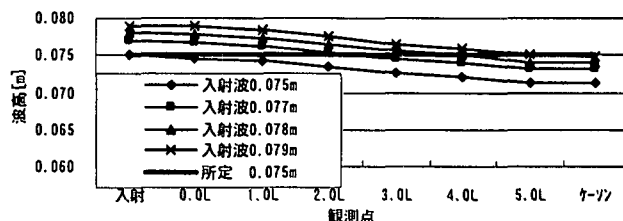


図-5 通過波検定例

(4) 数値波動水路の計算結果と実験結果の比較

局内の設計波力の検証については、いままで水理模型実験を用いてきている。また、大水深海域にフーチングを極端に長くした構造物の波圧を計算した数値波動水路の解析事例がみられないことから、既往の水理実験と同程度の精度を有する計算結果が得られることの確認を深海波と浅海波について行った。

a) 深海波域領域の比較

フーチング長b=10cmの幅広フーチングケーソンに

水深波長比 $h/L=0.75$, 波高 $H=7.5\text{cm}$, 周期 $T=0.95\text{s}$ の波を作用させたときの水位, 波圧, 波力の計算結果と酒井ら(1998)の水理実験結果との比較を行う. 水理実験における波圧の測点を図-6に示す.

水理実験結果については, 実験において安定状態とみなして記録が残っている1周期分の波形データから読み取った.

数値波動水路の計算結果は, 安定状態に近づいた16周期から21周期の5周期分を対象とする.

図-7にケーソン前壁の水位の計算結果を曲線で示し, 同図に実験結果をプロットした. 両者の値は良好な一致を示している.

図-8にケーソン前壁中央部の測点PH3における水平波圧の計算結果と実験結果を示す. 実験結果に見られた深海波領域の重複波の特徴である双峰性のピーク波圧が計算結果にも出現しており, 両者の傾向と値は類似している.

沖側のフーチング先端部上側の鉛直波圧を図-9に, 下側の揚圧力を図-10に示す. 水平波圧にみられた双峰性のピーク波圧が顕在化し, それぞれ倍周波数(半周期)成分のピーク波圧に変化している.

数値波動水路の計算で得られた各測点の波圧を合成して全水平波力と全鉛直波力を算出した.

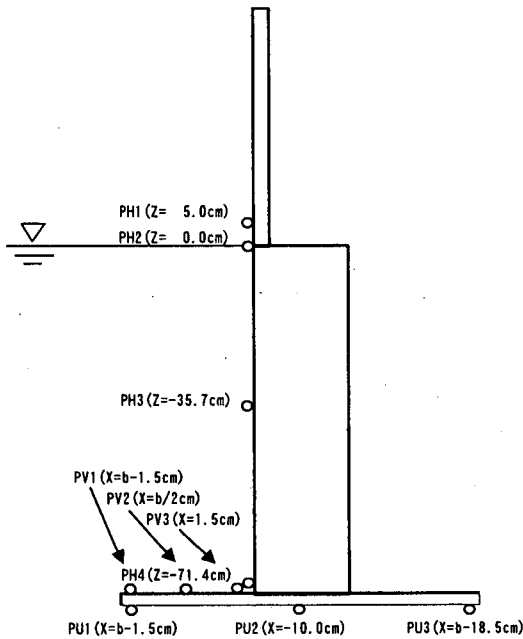


図-6 実験における波圧の測点

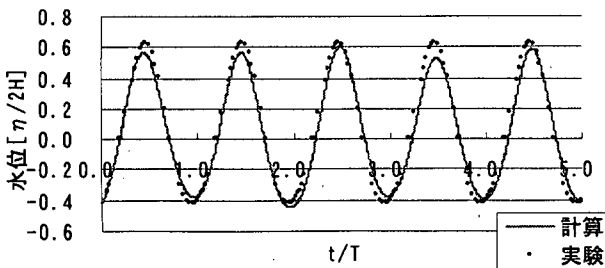


図-7 水位の実験結果との比較
($H=7.5\text{cm}$, $T=0.95\text{s}$, $h/L=0.75$, $b=10.0\text{cm}$)

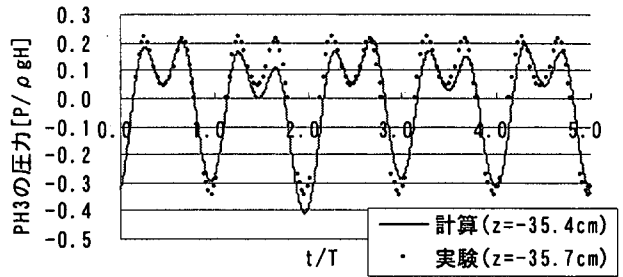


図-8 前壁PH3の水平波圧の実験結果との比較
($H=7.5\text{cm}$, $T=0.95\text{s}$, $h/L=0.75$, $b=10.0\text{cm}$)

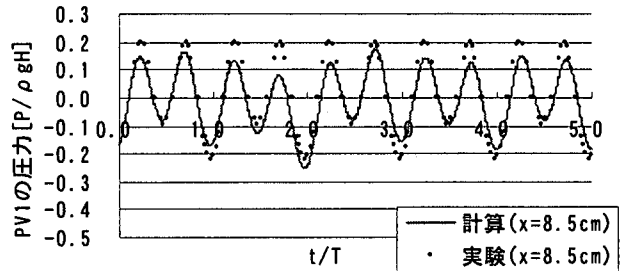


図-9 フーチング上側PV1の鉛直波圧の実験結果との比較
($H=7.5\text{cm}$, $T=0.95\text{s}$, $h/L=0.75$, $b=10.0\text{cm}$)

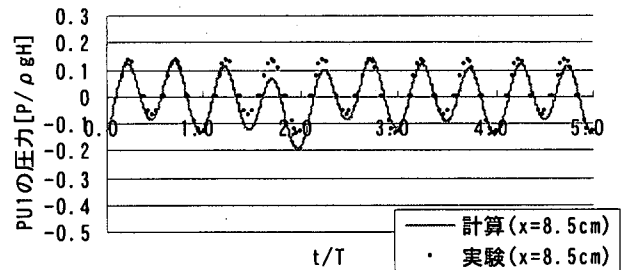


図-10 フーチング下側PU1の揚圧力の実験結果との比較
($H=7.5\text{cm}$, $T=0.95\text{s}$, $h/L=0.75$, $b=10.0\text{cm}$)

図-11の全水平波力には双峰性の波力ピーク, 図-12の全鉛直波力には倍周波数成分が, 実験結果と同様に顕著に出現している. また, 計算値の値は実験値と同程度である. 以上から, 数値波動水路の計算により, 深海波領域の重複波圧と波力を再現できることを確認した.

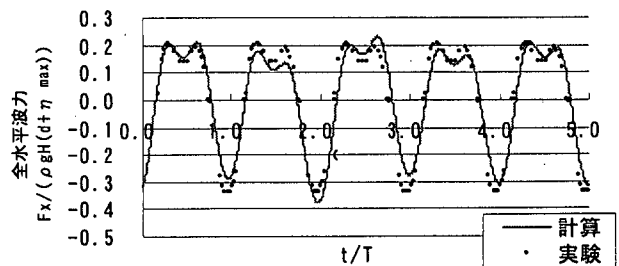


図-11 全水平波力の実験結果との比較
($H=7.5\text{cm}$, $T=0.95\text{s}$, $h/L=0.75$, $b=10.0\text{cm}$)

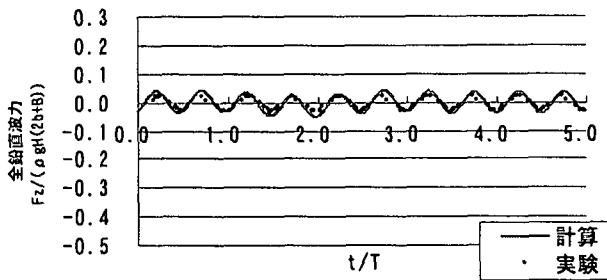


図-12 全鉛直波力の実験結果との比較
($H=7.5\text{cm}$, $T=0.95\text{s}$, $h/L=0.75$, $b=10.0\text{cm}$)

b) 浅海波領域の比較

海底地形の影響を受ける浅海波については波高 $H=12.6\text{cm}$, 周期 $T=1.58\text{s}$, $h/L=0.286$ のケースの実験結果と数値波動水路の計算結果を比較する。

なお,ここでは波浪条件による変化をみるために,模型は同じものを用いる。数値波動水路の16周期から21周期の5周期分の水位の時間変化を図-13に示し,全水平波力を図-14に,全鉛直波力を図-15に曲線で示す。同図にプロットした実験値との対応は良好であり,数値波動水路の計算結果は水理模型実験の水位,全水平波力,全鉛直波力を再現している。なお浅海波領域では双峰性の波圧ピークの出現はみられなくなり,計算結果も実験結果も単峰性の波圧ピークに変化している。

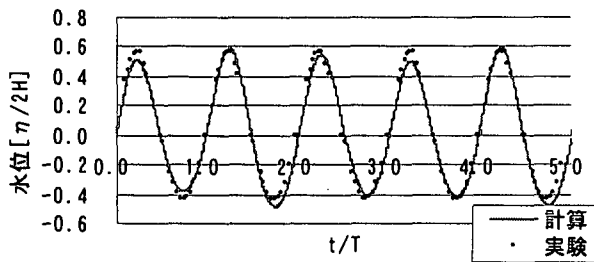


図-13 水位の実験結果との比較
($H=12.6\text{cm}$, $T=1.58\text{s}$, $h/L=0.286$, $b=10.0\text{cm}$)

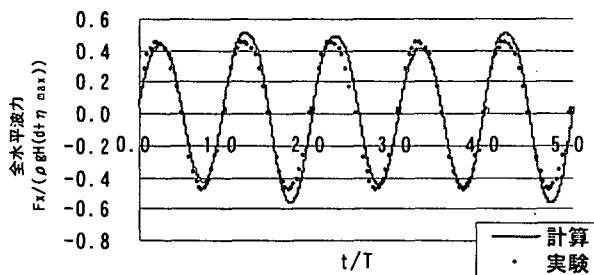


図-14 全水平波力の実験結果との比較
($H=12.6\text{cm}$, $T=1.58\text{s}$, $h/L=0.286$, $b=10.0\text{cm}$)

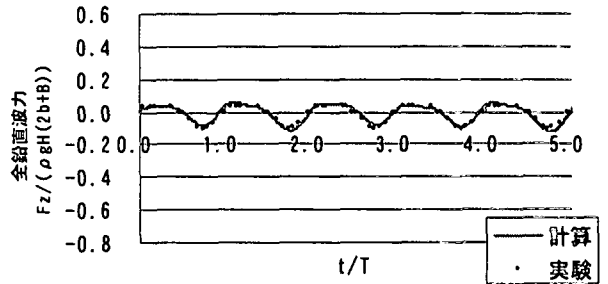


図-15 全鉛直波力の実験結果との比較
($H=12.6\text{cm}$, $T=1.58\text{s}$, $h/L=0.286$, $b=10.0\text{cm}$)

図-16に数値波動水路の水平波力最大時と最小時の波圧分布図を示す。同図に実験値をプロットしたが,計算値との対応は良好である。

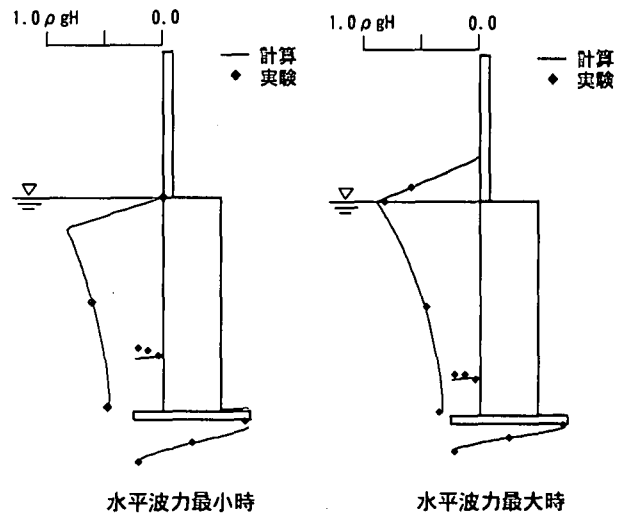


図-16 波圧分布の実験との比較

3. 数値波動水路による水理模型実験の補完

(1) 幅広フーチングケーソンの水平波力

酒井ら(1998)の水理実験条件は, $h/L \geq 0.286$ の範囲に水深波長比が限定されているので,水深波長比 $h/L=0.15$, 波高 $H=35.1\text{cm}$, 周期 $T=2.47\text{s}$ の全水平波力の値を数値波動水路により補完した。

図-17が数値波動水路で安定状態に近くなった13.4周期から14.4周期までの全水平波力と全鉛直波力の時間変化であり, $FX-MAX1$ が全水平波力最大値, $FX-MIN$ が全水平波力の最小値である。

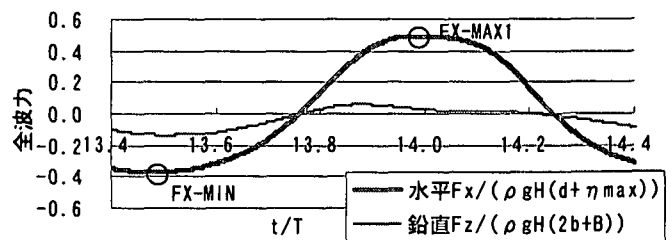


図-17 全波力の時間変化
($H=35.1\text{cm}$, $T=2.47\text{s}$, $h/L=0.15$, $b=18.8\text{cm}$)

図-18は横軸を水深波長比(h/L), 縦軸を幅広フーチングケーソンに作用する全水平波力として, 「合田式」と「波の谷時の波力式」で算出した現行設計法の水平波力を実線で, 有限振幅波理論の水平波力を破線で示し, 酒井ら(1998)の実験値をプロットした図である. 同図に今回得られた水深波長比 $h/L=0.15$ の条件の水平波力の最大値と最小値のプロットを追加した.

水深波長比 h/L が0.286以下の範囲における図-18の実験値と数値波動水路の水平波力は, いずれも有限振幅重複波理論値に対応している. $h/L=0.15$ の数値波動水路の水平波力も押波時の値は同理論値に対応している. 引波時の値は理論値と差がみられるが, 現行設計法の値より理論値の値に近いことから $h/L \geq 0.15$ の範囲内において有限振幅重複波理論を用いても良いと考えられる.

幅広フーチングケーソンの水平波力における有限振幅重複波理論の適用範囲は, 実験値の検証範囲から $h/L \geq 0.25$ としてきたが, 計算結果より $h/L \geq 0.15$ の範囲に拡張する.

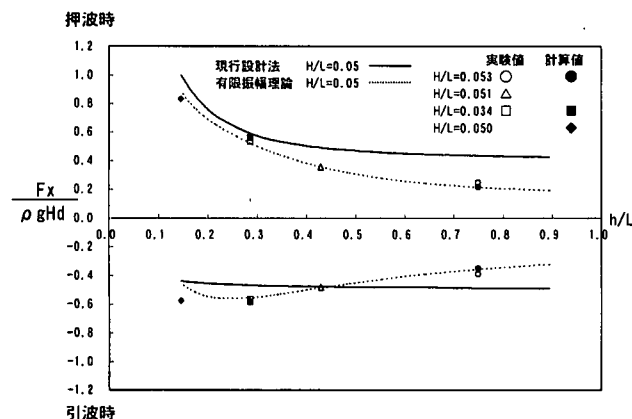


図-18 数値波動水路と波力式のフーチング上面の波力 ($h/L=0.75, H=7.5\text{cm}, T=0.95\text{s}$)

(2) 幅広フーチングケーソンの鉛直波力

酒井ら(1998)が提案した幅広フーチングケーソンの鉛直波力式は, フーチング基部の波圧を有限振幅重複波理論値で与え, フーチング基部とフーチング港外側端部の波圧の位相差を波数 k とフーチング長 b を用いて第一次近似値 $\cos kb$ で与えている.

酒井ら(1998)の水利実験では, フーチングの長さ(b)は模型長で10.0cm, 18.8cmの2ケースである. 酒井らは深海波の実験波($h/L=0.75, H=7.5\text{cm}, T=0.95\text{s}$)の波長に対するフーチング波長比(b/L)0.134の範囲内において, 波力式を実験により検証している.

波力式の適用範囲を広げるためにフーチングの模型長を $b=28.1\text{cm}$ にしたケースを追加した数値波動水路の計算を行った. このときのフーチング波長比は $b/L=0.20$ である.

横軸をフーチング長(b/L)にして, 縦軸に数値波動水路で得られたフーチング上面の波力($F_z / \rho g H$)の計算値をプロットしたものが図-19である. 同図に波力式の値を付した. フーチング長 $b/L=0.20$ の押波時

の計算値と波力式の値は同程度であるが, 引波時の計算値は波力式の値より絶対値で50%程度大きく, 滑動に対して危険側になっている.

図-20は, 横軸をフーチング長(b/L)にして, 縦軸に揚圧力($U / \rho g H$)の計算値と波力式の値をプロットしたものである.

フーチング長 $b/L=0.20$ の揚圧力の計算値と波力式の値は, フーチング上面の波力と同じ傾向を示し, 押波時の両者の値は同程度であり, 引波時では計算値が波力式の値より絶対値が大きく, 2倍強になっている. 引波時の揚圧力は, 底版の下向き方向になることから滑動に対して安全側になる. なお, このような傾向が出現するのは, 深海波の倍周波数(半周期)成分が卓越し, 位相差が $\cos kb$ と異なってくるためであり, 引波時の波圧が押波時に比較して大きいことから, 引波時のときにこの傾向が顕著になる.

揚圧力(U)とフーチング上面に作用する波力(F_z)の合力を押波時と引波時について示したものが図-21である. ここで鉛直合力の方向は, 下から上向きを正と定義している. 同図によれば, 数値波動水路の鉛直波力合力はフーチング長 $b/L=0.20$ の引波時においてフーチング上面の波力と揚圧力の鉛直合力が相殺してほぼゼロになっているのに比し, 波力式の鉛直波力合力の値が大きく, 波力式は滑動に対して安全側になっている.

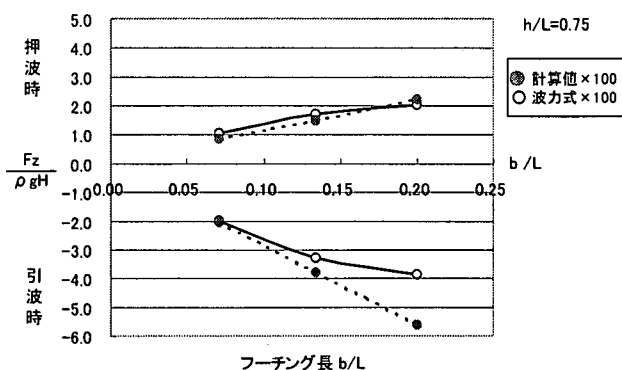


図-19 数値波動水路と波力式のフーチング上面の波力 ($h/L=0.75, H=7.5\text{cm}, T=0.95\text{s}$)

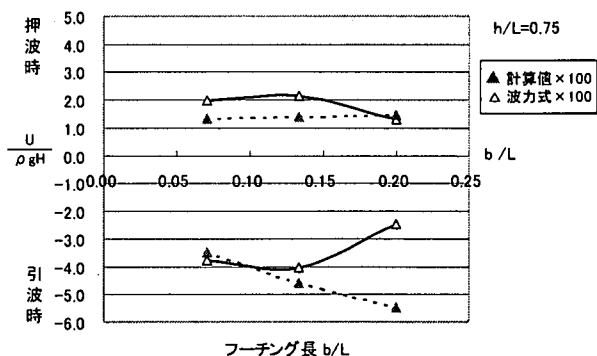


図-20 数値波動水路と波力式の揚圧力 ($h/L=0.75, H=7.5\text{cm}, T=0.95\text{s}$)

4. まとめ

(1) 大水深重複領域における幅広フーチングケーソンの数値波動水路による水位、波圧、全水平波力、全鉛直波力の計算値は水理模型実験結果と良好な一致を示した。深海波の特徴である双峰性のピーク波圧、浅海波の特徴である単峰性のピーク波圧も再現しており、数値波動水路の大水深重複波の深海波領域および浅海波領域への適用性と幅広フーチングケーソンへの適用性を確認できた。

(2) 水深波長比 $h/L=0.15$ の数値波動水路の水平波力は、押波時の波力が引波時の波力より大きくなる。この傾向は現行設計法の波力式、有限重複波理論式も同じである。設計上問題になる押波時の水平波力の値は、数値波動水路の計算値と幅広フーチングケーソンの波力式に用いている有限振幅重複波理論値とほぼ一致した。幅広フーチングケーソンの波力式は、実験データの制約より水深波長比 $h/L \geq 0.25$ を適用範囲としてきたが、上述の数値波動水路の計算結果から適用範囲を $h/L \geq 0.15$ に拡張できる。

(3) 深海波においては倍周波数成分が卓越するため、フーチングが長くなると、フーチング先端と基部の位相差による波圧の低減が、幅広フーチングケーソンの波力式に用いている近似値 $\cos kb$ の値に比較して少なくなる。このため数値波動水路による引波時のフーチングと底版に作用する鉛直波圧の絶対値は、フーチングの波長比が $b/L=0.20$ に伸びると波力式に比較して大きくなる。しかしフーチング上面の波力と揚圧力の相殺効果から、鉛直合力としての両者の差が小さくなり、かつ波力式のほうが安全側になる。以上から、いままで幅広フーチングケーソンの波力式に用いてきた $b/L \leq 0.134$ のフーチング長の適用条件を $b/L \leq 0.20$ に拡張しても問題ないと考えられる。

謝辞

本研究にあたっては、(独)港湾空港技術研究所高橋重雄統括研究官、下迫健一郎耐波研究室長、鈴木高二朗主任研究官より貴重なご意見とご指導をいただきました。計算にあたっては、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」事務局(株)富士総合研究所秋山実主事研究員から数値波動水路の理論とソフトの使用について丁寧なご説明をいただいています。ここに記して、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 合田良美・柿崎秀作：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究，港研報告，第5巻10号，1966
- 2) 酒井浩二・井福周介・大釜達夫・山崎耕嗣：大水深における重複波を考慮した設計波力算定法，海岸工学論文集，第45巻，pp. 746-750，1998
- 3) 財団法人 沿岸開発技術研究センター：沿岸開発技術開発ライブラリーNo.12 数値波動水路の研究・開発，2001

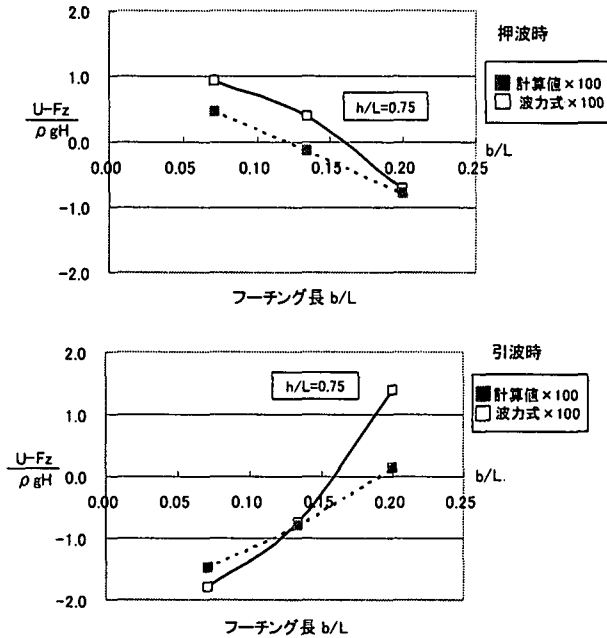


図-21 数値波動水路と波力式の鉛直波力合力
($h/L=0.75, H=7.5\text{cm}, T=0.95\text{s}$)

(3) 滑動限界重量による波力式の評価

波力式の鉛直波力が滑動に対して安全側になっていることから、滑動限界重量により波力式を評価する。

無次元化した滑動限界重量 Wc を式(1)で定義する。

$$Wc = (Fx / (\rho g H)) / \mu + (U - Fz) / (\rho g H) \cdots (1)$$

ここで μ ：摩擦係数(0.6)

有限重複波理論の波力式による滑動限界重量といままでの数値波動水路の計算による滑動限界重量を表-2に示す。両者の値は、押波時と引波時、フーチング長による変化についても同様な傾向を示している。

全ケースにおいて波力式による滑動限界重量が数値波動水路による値より大きいことから、波力式は安全側の値を示すことを確認できる。

また、数値波動水路の滑動限界重量を基準にした波力式の滑動限界重量1.01~1.06であり、過大に安全側になっているわけではなく妥当な範囲におさまっていることがわかる。

表-2 数値波動水路と波力式による滑動限界重量 Wc

波高H(m)	周期(s)	滑動限界の位相	滑動限界重量算定手法	フーチング長 b/L		
				0.071	0.134	0.20
0.075	0.95	引波時	波力式	0.439	0.449	0.471
			数値波動水路	0.430	0.437	0.446
		押波時	波力式	0.291	0.286	0.275
			数値波動水路	0.291	0.285	0.278