

傾斜堤上部工波力算定における 抵抗力計算手法について

RESISTANCE CALCULATION METHOD FOR WAVE FORCE ACTING ON SUPERSTRUCTURE OF SLOPING BREAKWATER

琴浦毅¹・佐藤弘²・藤井直樹³・小竹康夫⁴・森屋陽一⁵

Tsuyoshi KOTOURA, Hiroshi SATOU, Naoki FUJII, Yasuo KOTAKE and Yoichi MORIYA

¹正会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²三井共同建設コンサルタント 中部支社 (〒464-0850 愛知県名古屋市千種区今池5-24-32)

³正会員 東電設計(株) 社会基盤推進部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

⁴正会員 博(工) 東洋建設(株) 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

⁵正会員 博(工) (財)沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

Estimation of wave force action on coastal structure is very important engineering problem. CADMAS-SURF is one of the effective calculation methods for wave force on the coastal structure. However, some problems are pointed out to the numerical modeling of sloping breakwater by CADMAS-SURF. For example, it is difficult to determine the reasonable drag coefficient, and grid dependency of resistance is remarkable.

The purpose of this study is the definition of the practical resistance calculation method for wave force acting on superstructure of sloping breakwater. First, we clarified grid dependency of resistance using conventional resistance calculation method and examined influence of value of drag coefficient. Next, Dupuit-Forchheimer method is introduced on resistance calculation, comparison between experimental result and calculation result is conducted. As a result, we confirmed that practical calculation result was obtained.

Key Words : CADMAS-SURF, Dupuit-Forchheimer, numerical wave method, drag coefficient, rubble mound breakwater

1. はじめに

海岸保全施設の中でも、傾斜堤は海岸保全施設の重要な構造物として施工実績は多い。しかし、既往最大波高が更新されることが多い近年の波浪状況では、施工から年月が流れた構造物の被災が懸念され、被災復旧が増加することが予想される。また、近年では精度の高い数値計算手法が開発され、設計などに用いられる機会が多くなってきており、今後さらに実務への適用が増加することが予測される。数値波動水路CADMAS-SURF¹⁾を各種構造物形式に適用して検討も行われているが、捨石傾斜堤の上部工作用波力の適用性を検討した例は中野ら²⁾が行っている程度で適用例はまだ少ない。また、合田・松本³⁾は捨石傾斜堤に適用した結果から、一般的に使用されるパラメタでは透過波の再現性が良くないことを示している。鈴木らは、CADMAS-SURFの抵抗力計算において、捨石粒径と抵抗係数の関係が不明であることや格子依存性があることなどの問題点を指摘し、抵抗力計算にDupuit-Forchheimer式(以下、D-F式と記述)を用いることで捨石傾斜堤の透過波の計算精

度が向上することを示している⁴⁾。

そこで、本研究では、①抵抗係数を変化させたケース、②D-F式を用いたケース、を抵抗力計算に用いたCADMAS-SURFを捨石傾斜堤に適用し、上部工作用波圧の計算精度について検討した。その結果から、捨石傾斜堤上部工作用波力算定における有効な抵抗力計算手法を検討した。

2. CADMAS-SURF の概要

(1) ポーラスモデルによる抵抗力計算

数値計算では透過性消波構造物など複雑な構造の特性を適切に再現することが重要である。CADMAS-SURFは2次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式(式(1))とNavier-stokes方程式をポーラスモデルに基づいて拡張された運動方程式(式(2)、式(3))で構成されている。

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

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_v u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_v w u}{\partial z} = -\frac{\gamma}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - R_x$$

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

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_v u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_v w w}{\partial z} = - \frac{\gamma}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma g - R_z$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) \quad (3)$$

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 ：空隙率、 γ_x, γ_z ：水平、鉛直方向の面積透過率である。 R_x, R_z は多孔質体（ポーラスメディア）からの抵抗力であり、式(4)、(5)のように流速の2乗に比例するように計算される。

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{dx} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (4)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{dz} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (5)$$

ここで、 C_D ：抵抗係数、 dx, dz ：水平、鉛直方向の格子間隔である。

(2) Dupuit-Forchheimer 式による抵抗力計算

鈴木らは D-F 式を CADMAS-SURF に導入し、 R_x, R_z を流速の1乗に比例する項が含まれる式(6)～(9)で計算した。

$$R_x = \gamma_x u \left(\alpha + \beta \sqrt{u^2 + w^2} \right) \quad (6)$$

$$R_z = \gamma_z w \left(\alpha + \beta \sqrt{u^2 + w^2} \right) \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1 - \gamma)^3}{\gamma^2} \frac{\nu}{d^2} \quad (8)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{(1 - \gamma)}{\gamma^3} \frac{1}{d} \quad (9)$$

ここで、 α_0, β_0 ：材料による係数、 γ ：空隙率、 ν ：流体の動粘性係数、 d ：石の代表径である。

計算式に粒径の項が含まれることから、D-F 式は粒径の違いを評価でき、格子間隔のパラメタが含まないため、格子依存性が無い抵抗力計算手法である。

3. 検討概要

(1) 検討対象実験の概要

CADMAS-SURF の精度検証に用いる検討対象実験は谷本・小島が行った傾斜堤上部工への波力実験とした⁶⁾。谷本・小島は波高 H 、周期 T 、上部工の基面水深 h' 、消波ブロックをパラメタとした規則波による断面水理模型実験（模型縮尺 1/20）を行い、傾斜堤上部工（図-1）に働く波圧時系列と同時波圧分布を計測した。ここで、 h' は上部工基面が水面下にある場合を正としている。

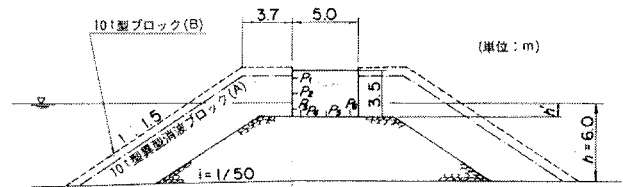


図-1 実験傾斜堤断面図（現地スケール）

(2) 計算条件

CADMAS-SURF における傾斜堤は、図-1 に準拠してモデル化し（図-2）、表-1 の条件で実験と同じ規則波を対象として計算を行った。波高は実験と同様に、堤体設置位置とその地点から沖合に向かって $L/6$ ずつの間隔で $4L/6$ までの5地点で計測し、この5点の平均的な値が $H=21.0\text{cm}$ となるように、波高検定から入射波高を決定した。なお、スパイクノイズ対策にサブグループ⁷⁾を2回使用した。

表-1 計算条件

消波工タイプ	消波工なし
波浪諸元	$H=21.0\text{cm}, T=2.24\text{s}$
上部工基面水深	$h'=+5\text{cm}, 0\text{cm}, -5\text{cm}$

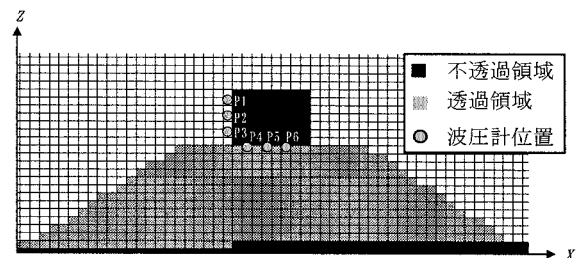


図-2 傾斜堤モデル図（消波工なし）

(3) 格子依存性の検討条件

格子依存性を検討するために、case1 として表-2 の条件で計算を行った。なお、case1-2 の格子間隔は構造物付近のみであり、それ以外の箇所は case1-1 と同じ格子を使用した。 C_D は推奨値として一般的に用いられる、榊山・鈴木⁷⁾が放水口ケーソンマウンドに対して提案した値とした。

表-2 格子依存性検討条件(case1)

パラメタ		case1-1	case1-2
格子間隔	dx	3.0 (cm)	1.0 (cm)
	dz	2.5 (cm)	1.0 (cm)
C_D		1.0	

(4) 抵抗力計算手法による検討条件

a) ポーラスモデルでの抵抗係数の検討

合田・松本は、 $C_D = 5.0$ とした計算で、捨石傾斜堤の実験で観測された透過波高を再現した。そこで、捨石傾斜堤の計算における C_D の影響を検討するために、case2 として表-3 の条件で計算を行った。

表-3 抵抗係数検討条件(case2)

パラメタ		case2-1	case2-2	case2-3
格子間隔	dx	3.0 (cm)		
	dz	2.5 (cm)		
C_D		2.0	5.0	10.0

b) Dupuit-Forchheimer 式を用いた検討

D-F 式を用いた場合の傾斜堤上部工波圧への計算精度を検討するために、case3 として表-4 の条件で計算を行った。なお、パラメタは近藤が実験結果をもとに導いた値を用いた⁸⁾。

表-4 Dupuit-Forchheimer式検討条件(case3)

パラメタ		case3
格子間隔	dx	3.0 (cm)
	dz	2.5 (cm)
α_0		1500
β_0		3.6
d		0.02

4. 計算結果と実験の比較

数値波動水路の精度検証は、谷本・小島の実験で得られた結果を対象とする。なお、波圧時系列の $P_1 \sim P_3$ は前面波圧、 $P_4 \sim P_6$ は揚圧力であり、実験結果と計算結果の波圧ピークの出現時間を一致させるようにプロットした。

(1) 前面波圧 ($h' = -5\text{cm}$: 上部工基面が水面上)

前面波圧の例として $h' = -5\text{cm}$ の結果を図-3 に示す。格子サイズの影響(case1)は、 P_1, P_2 のピークの立ち上がり、ピーク値に相違が確認できる。 C_D の違いによる影響(case2)は確認できないが、いずれの C_D でも P_1 のピーク値を過大評価している。case3 は P_1, P_3 でピーク値を多少過大評価しているが、波圧の立ち上がり、ピーク後の波圧減少などは実験結果と概ね一致している。

図-4 は波圧作用時の状況図である。捨石マウンド内外の流速の比較から、流速が大きい捨石マウンド上部を遡上する波が前面波圧に支配的に作用すると考えられる。しかし、波圧作用時における捨石マウンド内の case1-1 と case3 の流況に相違が確認できる。この相違が P_1 の精度に影響したと推察できることから、抵抗力計算手法は前面波圧に影響あると考えることができる。

(2) 揚圧力 ($h' = +5\text{cm}$: 上部工基面が水面下)

図-5 に $h' = +5\text{cm}$ の揚圧力の結果を示す。いずれのケースもピーク値は過大評価し、時刻 1 秒付近に実験で観測されなかった 2 回目のピークが計算された。ピークの立ち上がり、ピーク後の波圧形状はいずれのケースも実験と対応しており、ケース間の

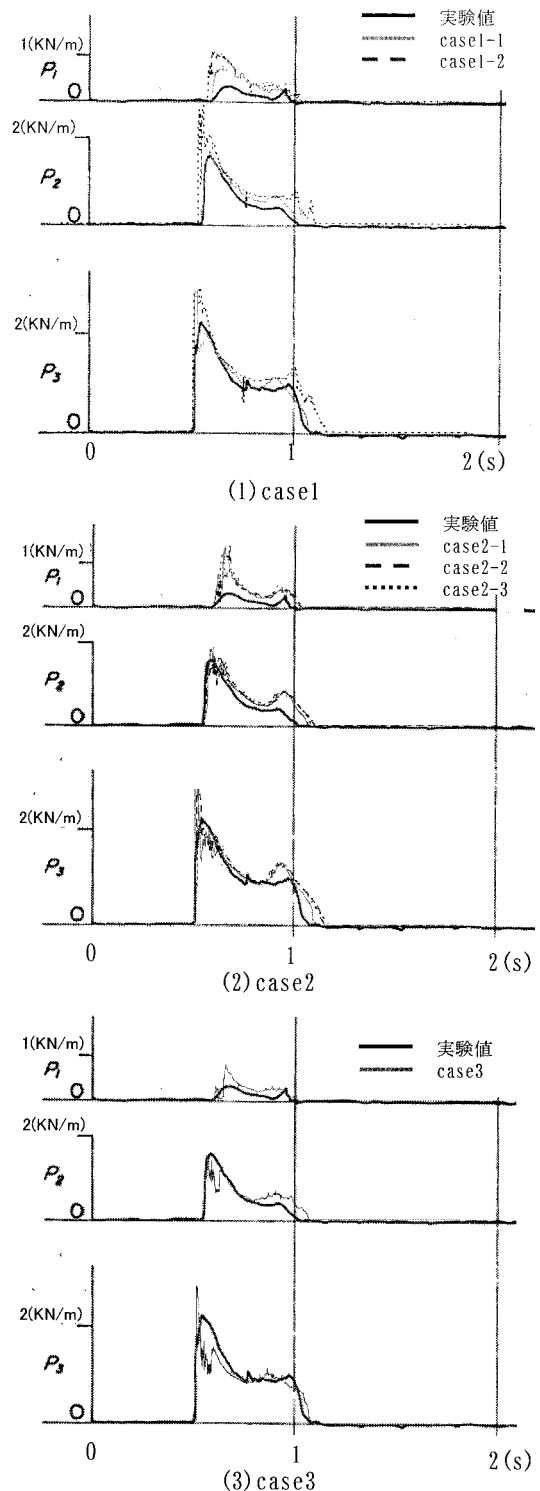


図-3 前面波圧時系列 ($h' = -5\text{cm}$: 上部工基面が水面上)

相違は小さい。

計算結果を確認したところ、2 回目のピークは越波水の打ち込みの水位変動に同期した圧力であった。数値波動水路においては越波について検討されており^{10), 11)}、実験や現地などとの比較から計算精度は確認されていることから、越波の計算は大きな問題は無いと考えられる。しかし、今回の結果から、越波の打ち込み圧に関しては計算結果の取り扱いに注意が必要であることがわかった。

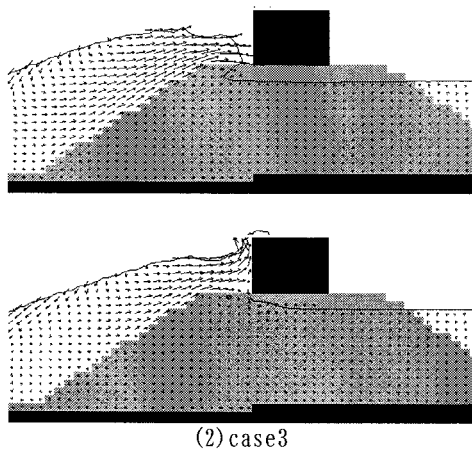
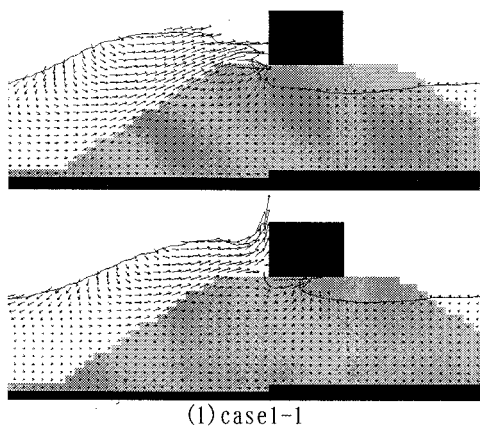


図-4 波浪作用状況 ($h' = -5\text{cm}$: 上部工基面が水面上)

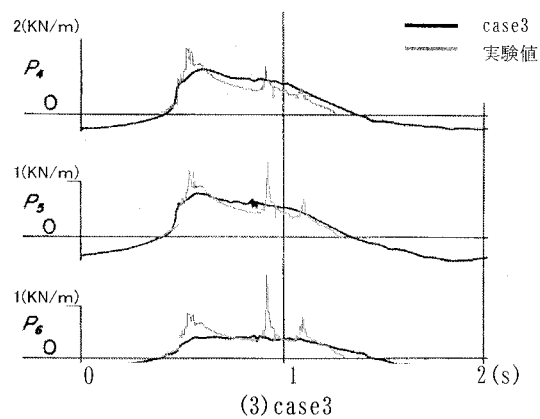
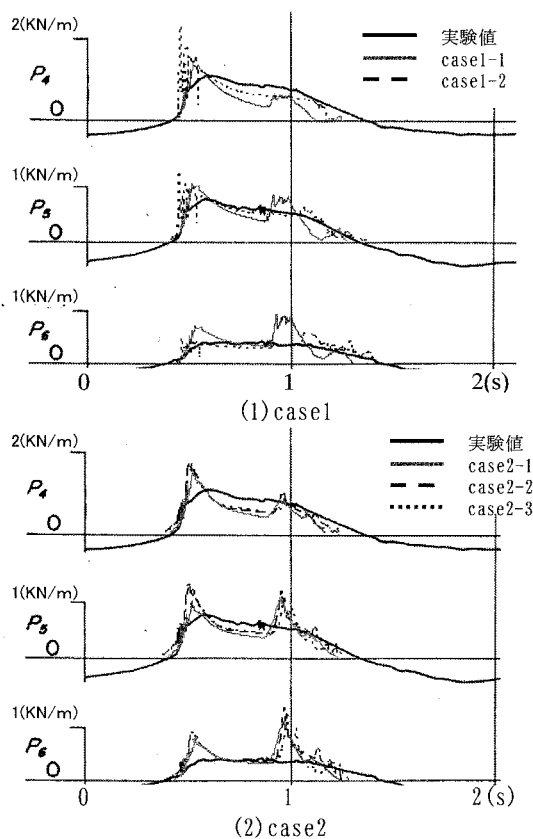


図-5 揚圧力時系列 ($h' = +5\text{cm}$: 上部工基面が水面下)

(3) 揚圧力 ($h' = 0\text{cm}$: 上部工基面が水面と一致)

図-6 に $h' = 0\text{cm}$ の揚圧力の結果を示す. この条件では case2, case3 でノイズが継続的に発生した.

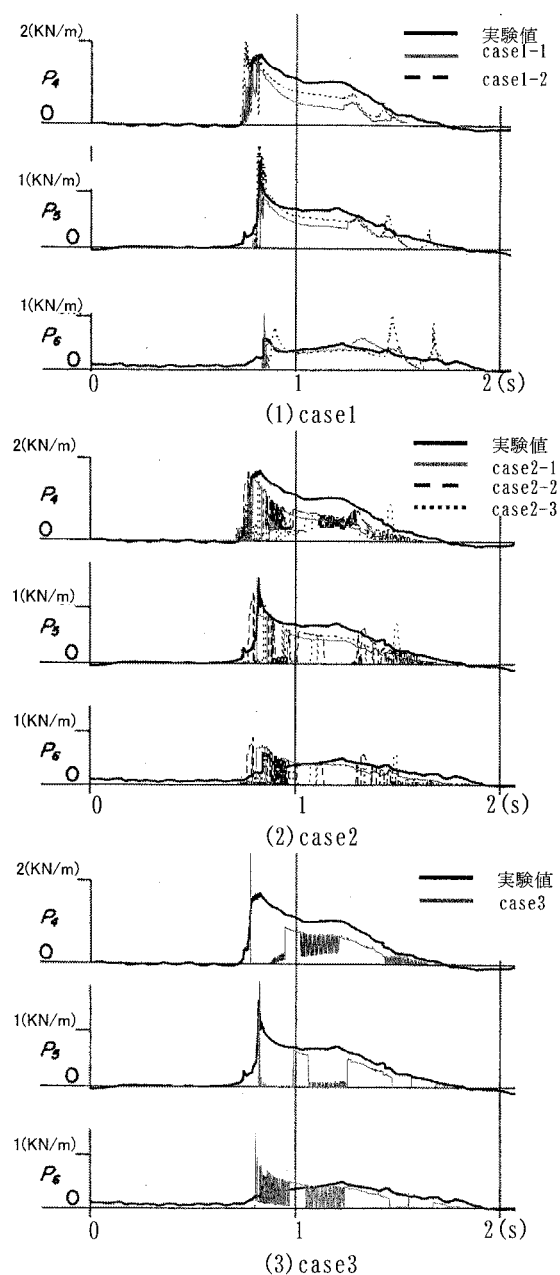


図-6 揚圧力時系列 ($h' = 0\text{cm}$: 上部工基面が水面と一致)

波浪作用状況(図-7)から、波浪作用時に上部工下部に空気層が介入していることが確認できる。CADMAS-SURFは流体のみが計算対象であり、水面と上部工で密閉された空気の圧縮性が考慮できないためノイズが発生したと考えられるが、このノイズに対する有効な対策は現時点では無い。そこで、ノイズの多い case2, case3 の波圧時系列には、例えば図-8のように圧力変動に包絡線を描くことで、波圧の時系列を把握する方法などが考えられる。包絡線を描画して実験結果と比較すると、いずれのケースも P4 のピーク後の波圧を過小評価している。case1, case2 は P5, P6 の波圧立ち上がりからピーク後まで実験と対応した波圧を示している。case3 はピーク値を過大評価しているが、ピーク後の波圧減少については case1, case2 と大きな差は無い。

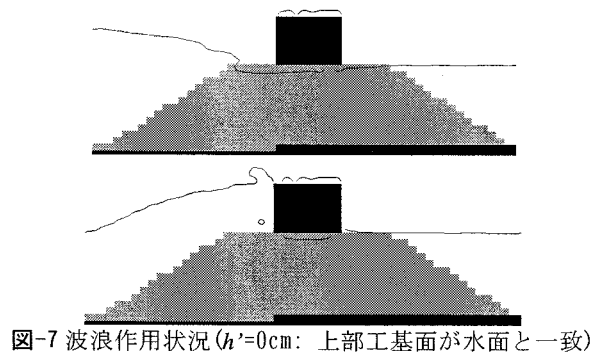


図-7 波浪作用状況 ($h'=0\text{cm}$: 上部工基面が水面と一致)

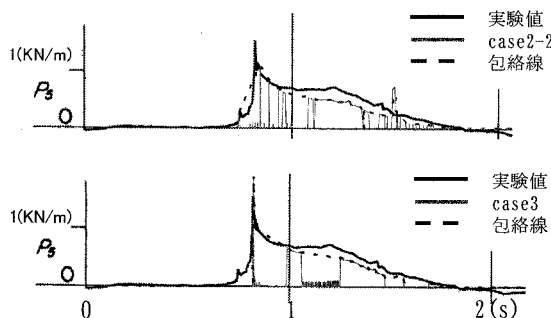


図-8 圧力変動の包絡線例

(4) 揚圧力 ($h'=-5\text{cm}$: 上部工基面が水面上)

図-9に $h'=-5\text{cm}$ の揚圧力の結果を示す。case1は、P5で立ち上がり直後にピークが出現し、P6に大きな波圧が観測されるなど、実験結果とは異なる結果となった。また、格子サイズの影響(case1)はこの基面水深では顕著である。 C_D の影響(case2)も顕著であり、case2-1はP5, P6における波圧の立ち上がりからピークまでの波圧を過大評価しているものの、case2-2, case2-3では大きなピークが出現せず、緩やかに波圧が変動している点が実験と対応している。しかし、P4は全体的に過小評価している。D-F式の影響(case3)は図-4(2)の前面波圧作用時の流況図の比較から明らかである。case1-1(図-4(1))は上部工下面に水面が達しているのに対し、case3は捨石マウンド内の流速も小さく、水面が上部工下面まで達していない。波圧時系列はP4を全

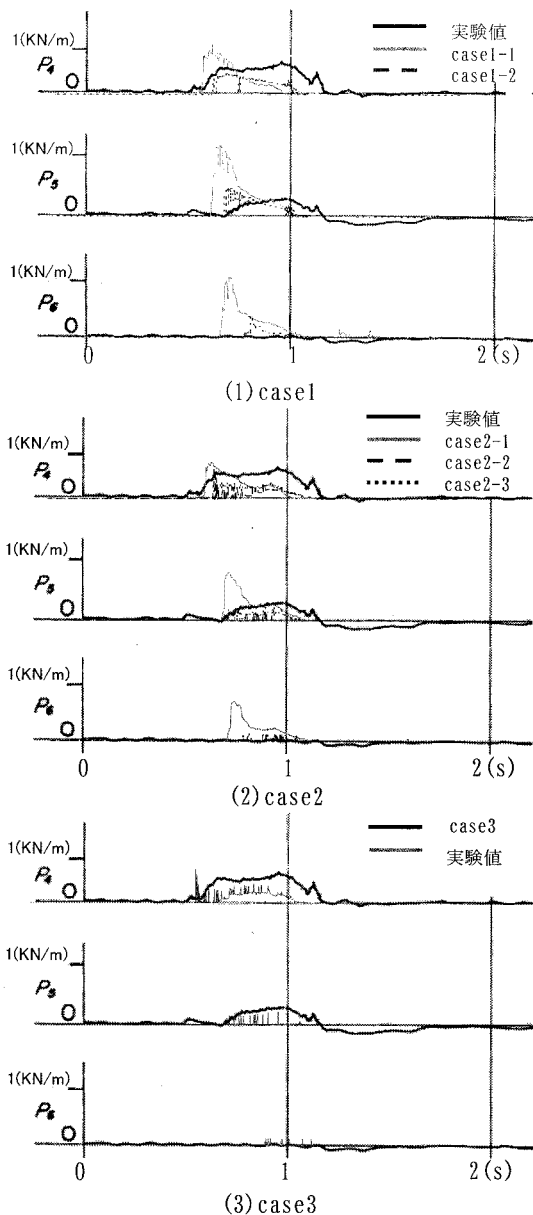


図-9 揚圧力時系列 ($h'=-5\text{cm}$: 上部工基面が水面上)

体的に過小評価しているものの、P5の圧力変動の包絡線が緩やかな圧力変動となっている点や、P6の揚圧力がほとんど計算されない点などは実験結果と対応している。

(5) 同時波圧分布 ($h'=-5\text{cm}$: 上部工基面が水面上)

図-10は $h'=-5\text{cm}$ の水平力最大時における同時波圧分布である。case1-1は上部工前面波力の上側と揚圧力で過大評価しているが、これは(1)前面波圧、(4)揚圧力の波圧時系列でも過大評価しているため、当然の結果であると考えられる。case2-2は波圧時系列の結果と同様に、前面波圧の上部を過大評価しているが、波形時系列の精度が良かった揚圧力の結果は実験と対応している。case3は波圧時系列の前面波力、揚圧力とも計算精度が良かったため、上部工基面で最大となる三角形波圧分布を示すなど、同時波圧分布でも実験と良く対応している。

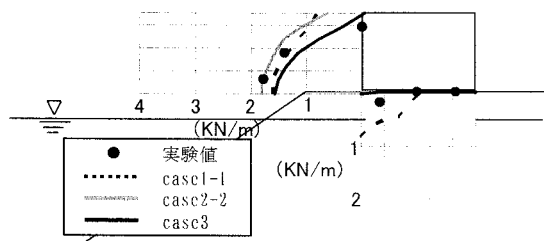


図-10 同時波圧分布図 ($h'=-5\text{cm}$: 上部工基面が水面上)

5. 考察

上部工基面が水面に一致する条件 ($h'=0\text{cm}$)、水面下にある条件 ($h'=+5\text{cm}$) ではケース間に大きな差は出なかった。この条件では捨石マウンド内に水が満たされ、マウンド内の流速が大きいため、抵抗計算式にかかわらず適切な抵抗力が計算できたと考えられる。また、捨石マウンドが水没しているという点で、榊山・鈴木が行った放水口ケーソンマウンドの実験条件に近く、その実験で提案された推奨値を用いた計算精度が良いことは納得できる。

上部工基面が水面上に出ている条件 ($h'=-5\text{cm}$) ではケース間に顕著な差が出た。この条件では、気中にある捨石部の計算が必要になる。気中にある捨石内に水が流入する場合、流速が小さいため、流速の2乗に比例するポーラスモデルの抵抗力計算では抵抗力を過小に評価することが考えられる。 C_D を変化させて抵抗力を適切にすることも可能であるが、格子依存性があるため、ポーラスモデルでの抵抗力計算には課題があることが分かった。水谷ら¹²⁾は流速が遅くなる透過構造物内部では線形抵抗項が重要であることを示している。つまり、線形項があるD-F式は、流速が遅くなった条件でも抵抗力を適切に評価できた結果、計算精度が良くなったと考えられる。

6. まとめ

捨石傾斜堤を対象に数値波動水路 (CADMAS-SURF, 2001) を適用して、上部工波力の計算精度を検討した結果から得られた成果を以下に示す。

- ① 上部工前面波圧は捨石マウンド上部を遡上する波が支配的に作用するものの、捨石マウンドの影響もあると考えられる。
- ② 捨石マウンドが没水している場合、抵抗力計算方法にかかわらず計算精度は良い。
- ③ ポーラスモデルでは格子依存性が確認され、特に、空気層が存在する捨石マウンド内を水面が変動する場合に顕著である。
- ④ 捨石マウンド内で水面が変動する場合、水没した捨石マウンドに対して算出された推奨値を用いたポーラスモデルでは計算精度が良くない。今回の格

子寸法では $C_D = 5.0$ で計算精度は向上したが、格子依存性の問題から、他の格子寸法への適用は不明である。

⑤ D-F式は $h'=0\text{cm}$ の揚圧力でピークを過大評価したが、全般的には波圧時系列、同時波圧分布で実験と良く対応した。格子寸法にかかわらず、同じパラメタを用いることが出来るD-F式は、波が水面上の捨石マウンドを通過する計算で特に有効である。

⑥ $C_D = 5.0, 10.0$ を用いたポーラスモデルの計算、D-F式を用いた計算では、揚圧力にノイズが出るケースがあった。ノイズのために波圧のピーク値が計算されない場合、包絡線の描写、同時波圧分布の評価が困難になることが考えられるため、ノイズの除去については今後の課題である。

謝辞：本研究は「数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会」における研究成果であり、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発, 296P, 沿岸開発技術ライブラリー, No.12, 2001.
- 2) 中野修, 興野俊也, 安田勝則, 藤井直樹：規則波・不規則波による傾斜堤の波力・越波伝達波への数値波動水路の適用性について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.726~730, 2002.
- 3) 合田良美, 松本朗：捨石防波堤全体に作用する波力ならびに堤体内部への波圧伝播の数値計算, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.529~534, 2003.
- 4) 高橋重雄, 鈴木高二朗：共振効果による長周期波の消波システムの原理と基本特性, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.696~700, 2005.
- 5) 鈴木高二朗, 大寄菜々子, 山本泰司：防波堤基礎での洗掘量の推定について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.886~890, 2003.
- 6) 谷本勝利, 小島朗史：傾斜堤上部工およびブロック式混成堤に働く波力, 港湾技研資料, No.450, 1983.
- 7) 有川太郎, 磯部雅彦, 高橋重雄：VOF法を用いた衝撃砕波圧の計算と適用性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.831~835, 2001.
- 8) 榊山勉, 鈴木一広：数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸出し評価, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.566~570, 1998.
- 9) 近藤一郎, 竹田英章：消波構造物, 275p, 森北出版, 1983.
- 10) 佐貫宏, 藤田龍, 関本恒浩, 清水琢三：数値モデルによる越波量の評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.736~740, 1998.
- 11) 川崎浩司, 菊雅美, 眞栄里和也, 米須俊彦, 嶋田宏, 五味久昭, 柴多哲郎, 板橋直樹：数値波動水路を用いた海岸護岸周辺の越波対策工法の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.951~955, 2007.
- 12) 水谷法美, 前田健一郎, Ayman M. Mostafa, William G. McDougal：透水性構造物の抵抗係数の評価と波・潜水透水性構造物の非線形相互作用の数値解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.131~135, 1996.