

CIP 法による衝撃砕波圧の発生機構の解明

広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 正会員 陸田秀実

1 背景と目的

近年、海岸・海洋構造物に作用する衝撃砕波圧を直接数値シミュレーションによって求める試みがなされ、界面大変形問題に対して有力な VOF (Volume of Fluid) 法が適用され始めているが、いずれも Wagner 型衝撃砕波圧（単発型）の場合に限られ、Bagnold 型衝撃砕波圧（減衰振動型）の場合において、その適用性に問題を残している。これは、波が構造物に衝突する際、砕波後の激しい液滴の飛散や空気塊の分裂・合体、さらには波と構造物の間に封入された空気塊の挙動などを精度良く見積もることが難しいためであると考えられる。

本研究は、著者らがこれまでに開発した CIP 法¹⁾に基づく複雑流体解析手法²⁾をリーフ上の直立防波堤に作用する衝撃砕波圧の問題に適用し、その発生機構を直接数値シミュレーションによって明らかにするものである。特に、Bagnold 型衝撃砕波圧の場合に本質的となる圧縮性の封入空気塊の挙動と圧力変動特性について明らかにする。

2 数値計算手法と計算条件

支配方程式は、3 次元圧縮性粘性流体に対する Navier-Stokes 方程式、密度と密度関数の質量保存式、時間発展型の圧力方程式および理想気体の状態方程式である。また、数値計算手法は CIP 法に基づき固気液 3 相を統一的に取り扱っている。さらに、砕波後の複雑な気液混相乱流場に対しては、LES の解自体から動的にモデル定数を算出する Dynamic-LES 乱流モデルを採用した。初期条件として、入射波は定常孤立波、底面形状はリーフとして複合型砕波を発生させた。初期の気相領域の流速はゼロ、圧力は大気圧とした。なお、底面形状（リーフ）を固相領域として取り扱い、気液相間と同様に相界面での煩雑な境界条件の設定を排除した。また、流体の保存性については誤差 3% 以内に留めることにした。

3 直立防波堤に作用する衝撃砕波圧

3.1 Bagnold 型衝撃砕波圧 (減衰振動型)

図-1 は Bagnold 型衝撃砕波圧が作用する場合の波形変化を示したものである。この場合、砕波によって大規模ジェットが構造物に衝突し、それに伴って波と構造物の間に大規模な封入空気塊が取り込まれ、ジェット波面は壁面衝突により大変形していく様子が再現されている。

図-3(a) より、静水面付近 ($Z/h_1 = 0.036$) において大規模ジェットと構造物によって封入された空気塊の圧縮により、減衰振動を伴った Bagnold 型衝撃砕波圧が発生していることが分かる。この時の振動周波数を算出すると約 100~120[Hz] であり、過去の我々の実験結果と同様の結果が得られている。一方、ジェット波面が直接作用する波頂部付近 ($Z/h_1 = 0.372$) においては、ふた山型衝撃圧に相応した波圧波形（図-3(b)）となっている。また、最大波圧 $p_{max}/\rho g H_1$ の鉛直分布は、振動型波圧波形の現れる静水面付近において最も大きくなる傾向にある（図-3(c)）。なお、 Z/h_1 は静水面からの高さを示している。

3.2 Wagner 型衝撃砕波圧 (単発型)

図-2 は、Wagner 型衝撃砕波圧が作用する場合の波形変化を示したものである。この場合、入射波と構造物の間に封入される空気塊は存在せず、構造物側面に沿った鉛直上向き運動量の増加によって波の打ち上げが大きくなり、液滴が構造物上面に飛散している様子が分かる。

図-4 は、波頂部付近および静水面付近における波圧の時系列変化と最大波圧 $p_{max}/\rho g H_1$ の鉛直分布を示したものである。これらの図から、波頂部付近 ($Z/h_1 = 0.45$) でジェットの衝突水塊による Wagner 型衝撃砕波圧が発生し、そのピーク値は静水圧の約 50 倍にも及んでいる。一方、静水面付近 ($Z/h_1 = 0.036$) の波圧波形についても Wagner 型に近いものとなっているが、波圧のピーク値付近の作用時間については波頂部付近のものより長くなっている。さらに、最大波圧の鉛直分布については、波頂部付近 $Z/h_1 \geq 0.4$ ほど大きな衝撃圧が作用しており、封入空気塊を伴う Bagnold 型衝撃砕波圧のそれとは大きく異なっていることが分かる（図-4(c)）。

4 おわりに

本研究では、固気液3相を同時に扱うことが可能なCIP法に基づく数値計算手法を直立防波堤に作用する衝撃砕波圧の問題に適用し、その有効性を示した。特に、Bagnold型衝撃砕波圧に見られる封入空気塊の圧縮性や振動周期の再現計算が可能であることが確認された。今後は、弾性物体と波の非線形相互作用問題について直接数値シミュレーションを行う予定である。

【参考文献】

1. T.Yabe and Pei-Yuan Wang (1991) : Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.60, No.7, pp.2105-2108.
2. 陸田秀実, 河合ひろみ, 安田孝志 (1998) : C-CUP 法による気液界面の直接数値計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.55-59.

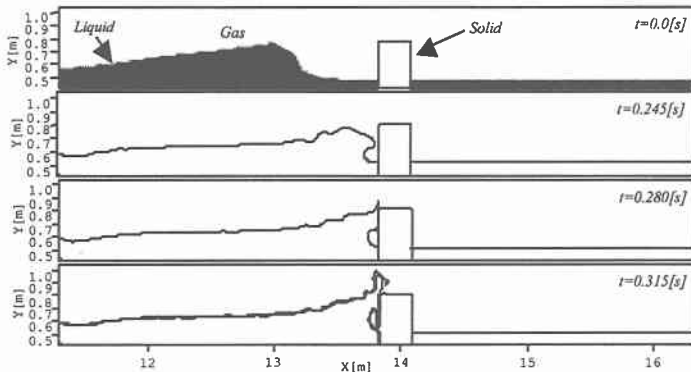


図1 Bagnold型衝撃砕波圧が作用する場合の波形変化

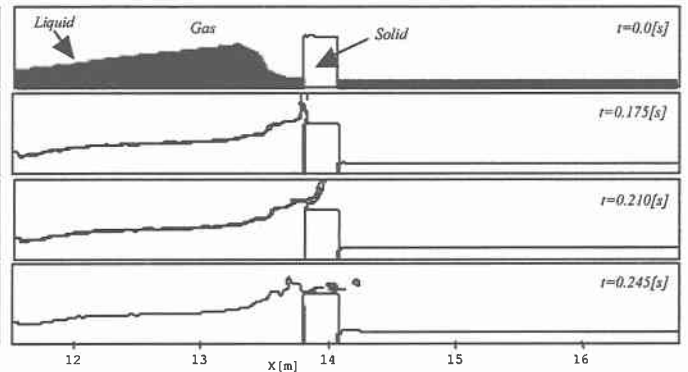
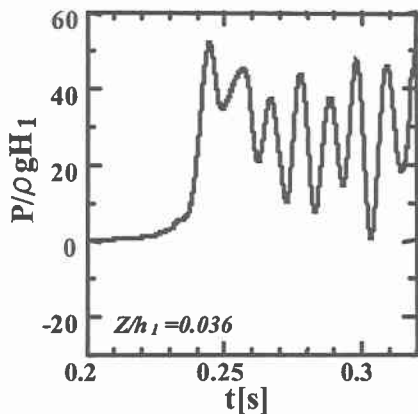
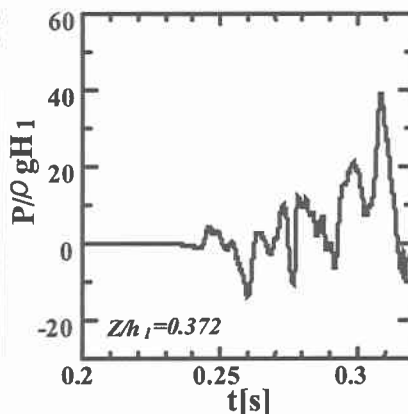


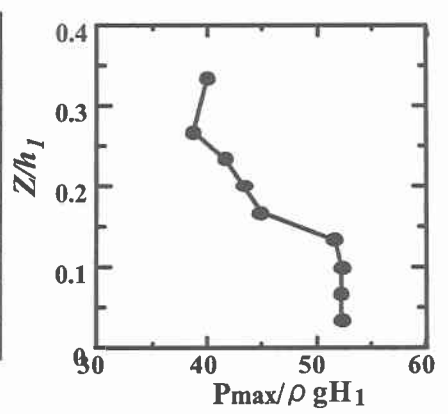
図2 Wagner型衝撃砕波圧が作用する場合の波形変化



(a) 静水面付近の波圧波形

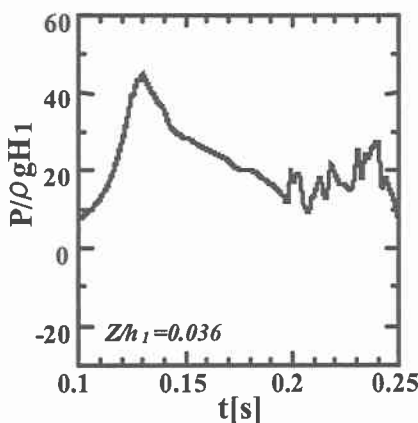


(b) 波頂部付近の波圧波形

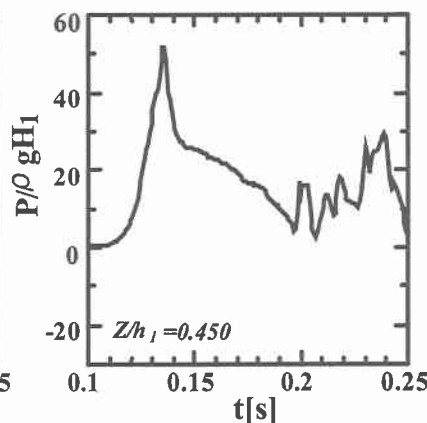


(c) 最大波圧の鉛直分布

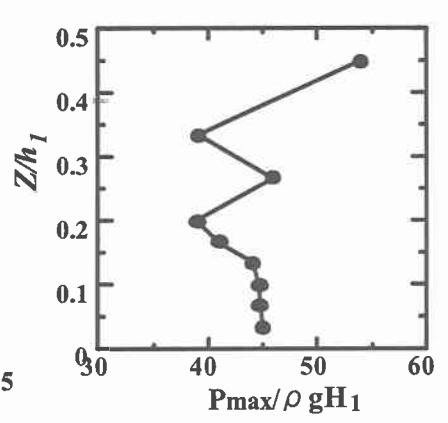
図3 Bagnold型衝撃砕波圧の場合



(a) 静水面付近の波圧波形



(b) 波頂部付近の波圧波形



(c) 最大波圧の鉛直分布

図4 Wagner型衝撃砕波圧の場合