正会員	○陸田秀実
非会員	新蔵慶昭
非会員	清水 雄
正会員	土井康明
	正会員 非会員 非会員 正会員

1. はじめに

海岸・海洋構造物に波浪衝撃荷重が作用する場合,砕波ジェット水塊による流体力と封入空気によるキャ ビテーション衝撃力によって加振力が作用し,構造物や部材が変形・破壊する.また,加振力の周波数近傍 に固有振動数を持つ構造物については,共振現象にも注意が必要である.このような固体・流体相互作用系 を力学的に取り扱うには,進行波の砕波現象,砕波ジェット水塊による構造物の大変形,その後の構造物の 流力弾性・振動挙動を同時に取り扱うことが可能な「固体・流体強連成解析」が必要となる.そこで本研究 では,砕波を伴う流体現象と,それに伴う構造物の弾性応答・振動挙動を直接的に取り扱う固体流体強連成 シミュレーション法を開発する.次いで,波浪衝撃力と材料特性の異なる構造物のひずみ・応力・変形挙動 との関係について考察し,衝撃砕波圧作用下における構造物の動的応答特性を明らかにする.

2. 数值計算法

本研究では、著者らが開発してきた Euler 型解法 に基づく粒子付界面追跡スキームに、粒子法(SPH 法)による大変形構造解析手法を組み込んだ Lagrange 粒子付 Euler 型スキーム^{1)~5)}をベースに 種々の改良を行う.この方法は、格子サイズ以下の 気液界面情報を保持・修正するために、自由表面粒 子を配置する一方で,構造物は SPH 粒子で構成され る (図-1 参照). このことにより, 格子サイズ以下 の境界面の情報を保持することができるため、固気 液3相の移動境界の高精度追跡が可能となる.流体 は C-CUP 法による自由表面流れ解析を行い,構造物 は SPH 法による大変形解析を行う. また,構造物の 弾性応答・振動を捉えるために, 偏差応力, Jaumann 速度,人工応力項等の導入した動的陽解法を採用し, その精度の向上を図っている.これら固体・流体の 相互作用はKernel 関数に基づき決定し強連成させる.

3. 計算結果

アルミ製弾性薄肉円筒(厚さ3mm,1メッシュ) が水面に突入する際に生じる衝撃圧問題ついて精度 検証を行う.図-2は,水面衝突時に発生する薄肉円 筒下端における周方向のひずみの時系列変化につい て比較したものである.t=0.015s付近の不一致を除



図-1 本数値計算法の概念図(1 格子当たり 4~8 個の Lagrangian 粒子を配置)



図-2 ひずみの時系列変化の比較(左下図:アル ミ製薄肉弾性円筒の水面突入の様子)

けば、概ね実験結果と良い一致を示しているこ とから、水面衝撃圧とそれに伴う弾性変形・振 動挙動を計算できることが示された.また、そ の他の実験条件いついても比較検証し、その有 効性を確認している.

次いで、衝撃砕波波作用下における構造物の 動的応答特性を調べるために、ヤング係数、ポ アソン比、密度の異なる材料(鋼、コンクリー ト、ゴム、剛体)の直立壁に作用する3次元衝 撃砕波圧問題について考察する.図-3は、鋼壁 に作用する大規模砕波のシミュレーション結果 であり、図-4は鋼壁(変形あり)に作用する衝 撃圧の時空間分布を示したものである.また、 図-5 は材料特性の異なる直立壁に作用する衝 撃圧の時間的な変化を比較したものである.砕 波ジェットが直接衝突する高さ(図-5(a))では、 柔らかい材料の直立壁であればあるほど衝撃圧 のピーク値は下がり(約2.5割減)、また、衝撃 圧の立ち上がりとピーク到達時刻にかなりの遅 れが生じていることが分かる.一方、砕波後の



図-3 鋼壁に作用する砕波ジェット水塊の 3D 計算結果(右 側壁: SPH 粒子で構成された鋼壁(変形あり))



図-4 鋼壁に作用する衝撃圧の3次元分布

空気塊が封入される高さ(図-5(b))では、ピーク値到達後、直立壁の弾性変形と封入空気塊の圧縮・膨張運動によって、その圧力振動が著しく異なることが分かる.この衝撃砕波圧作用下におけるゴム壁とコンクリート壁の変形過程の時間的変化を示したものが図-6である.なお、この図は直立壁の波側の表面形状のみを 図示しており、xの負方向から波が進行している.砕波ジェットが衝突する高さy=0.25付近から大きな曲げ 変形が発生し、その後、上端(自由端)へと変形が伝わっていき、打ち上げによる流体力と物体変形による 慣性力が加わって波下側へ大変形し、やがて変形は準定常状態となる.この間、わずか 0.08s 間の現象であ り、衝撃圧のピーク値は既に減衰し、衝突水塊と封入空気、さらには変形した直立壁の力学バランスによっ





図-6 衝撃砕波圧作用下における直立壁の変形過程(波側の表面形状)







図-8 応力 σ_{yy} 及びひずみ ε_{xx} の時系列変化

て、図-5(b)に示す過渡状態の圧力振動になるものと考えられる.この間の水平および鉛直方向の変位の時系列、さらには、応力 σ_{yy} およびひずみ ε_{xx} の時系列変化を図-7および図-8に示しておく.

4. おわりに

本研究では、砕波を伴う流体現象と、それに伴う構造物の弾性応答・振動挙動をダイレクトシミュレーションすることが可能な固体流体強連成シミュレーション技法を開発した. なお、ここでは示していないが、 Antociら^のが行ったベンチマーク問題(水柱崩壊後、ゴム壁に流体力が作用し、ゴム壁が変形して、水塊が 飛び出していく現象)による検証を行い、応力、ひずみ、変位ともに実験結果と非常に良い一致を示し、本 計算手法が、固体・流体強連成シミュレーションに適用可能であることが確認された. 最後に、波浪衝撃力 と材料特性の異なる構造物のひずみ・応力・変形挙動との関係について考察し、衝撃砕波圧作用下における 構造物の動的応答特性を明らかにした.

参考文献

- 1) 陸田秀実・伊澤亮・土井康明: Particle CIP 法による高精度な移動境界面の捕獲, 土木学会論文集, B 編, Vol.62, No.4, pp.376-387, 2006.
- 2) 陸田秀実・土井康明: 砕波による衝撃圧の直接推定と構造物の動的解析, 土木学会論文集, B 編, Vol.62, No.3, pp.224-237, 2006.
- 3) 陸田秀実: Particle CIP 法による水面衝撃問題の数値解析,応用力学論文集, Vol.10, pp.121-130, 2007.
- 4) Hidemi MUTSUDA and O.M.Faltinsen : A Coupled Eulerian-Lagrangian Method for Free Surface Problems, Proc. of International Conference on Violent Flows (VF-2007), pp.227-234, 2007.
- 5) 陸田秀実・伊澤 亮・土井康明: Particle CIP 法による砕波解析, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.21-25, 2007.
- 6) Antoci, C., M. Gallati and S. Sibilla : Numerical simulation of fluid-structure interaction by SPH, Computers and Structures, 85, pp.879-890, 2007.