

SPH法を用いた波力低減型海域制御構造物 に関する数値実験

NUMERICAL EXPERIMENTS ON A PERMEABLE BREAKWATER BY USING SPH METHOD

古牧大樹¹・安野浩一朗²・西畑剛³
Daiki FURUMAKI, Koichirou ANNO, Takeshi NISHIHATA

¹五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2756 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2756 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 博(工) 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2756 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

In recent years, particle numerical methods which can simulate wave pressure on coastal structures have been developed. Especially, WCSPH method is excellent in repression ability of numerical pressure fluctuation and its light computational load, because the basic equations of WCSPH consider weakly compressible fluid and need not to solve Poisson's equation which generally uses in other particle numerical methods. However, less computation using WCSPH method for coastal structures has been reported and further inspection is required.

In this study, we compared the results computed by WCSPH method to those of experiments for the permeable detached breakwater which has some slits and sloping top. We confirm that the wave pressure and the surface water elevation simulated by WCSPH method well agree with the experimental results. It turns out that the computing particle size needs less than 1/7.2 for the slit size of the structure to realize accurate calculation.

Key Words : SPH, Permeable, Wave Pressure, Particle size

1. はじめに

近年、粒子法は最大の弱点であった圧力擾乱が減少しつつある。陰解法型のMPS法(Moving Particle Hydrodynamics)では、五十里ら¹⁾が擬似圧縮性、後藤ら²⁾が高次Laplacianモデルの導入による改良を試み、圧力擾乱の克服に成功した。陽解法型のSPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics)では、Guilcherら³⁾が、WCSPH法(Weakly Compressible SPH)(Monaghan⁴⁾, Gomez-Gesteriaら⁵⁾)でリーマン問題を考慮した空間差分スキームを使用する方法を提案した。特にWCSPH法は、元来圧縮性粒子として計算を行うため、圧力擾乱がより少ない。またポアソン方程式を使用せずに計算できるため他の粒子法より計算時間が短縮できる等、より実務への利用に適した解析方法である。

圧力擾乱が減少したことで、単純な構造物に対しては、WCSPH法を用いた波力算定への適用性について研究が進められている。例えばBenedictら⁶⁾は、矩形ケーソンの滑動解析を行い、波力、滑動量共に実験と比較してWCSPH法の妥当性を検証した。しかしながら、波力算定の適用性を検証した事例はまだ少なく、実用化を図るためには、更なる検証が必要と考えられる。

本研究では、複雑な形状のスリットを有する波力低減型海域制御構造物を対象に、2次元WCSPH法による再現計算を行い、波力特性に関して西畑ら⁷⁾の実験結果と比較することで、その適用性について検証した。

2. 数値計算法

(1) SPPhysics概要

計算はSPPhysics2D.ver.2.0⁵⁾を用いて行った。SPPhysics2Dにおける、リーマン問題を考慮した保存型支配方程式は式(1)、(2)の通りであり、式(1)は質量保存方程式、式(2)は運動方程式を示している。

$$\frac{d}{dt} (\omega_i \rho_i) + \omega_i \sum_{j \in P} \omega_j 2 \rho_a (v_{a,ij} - v^0(x_{ij}, t)) \cdot \nabla_i W_{ij} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} (\omega_i \rho_i v_i) + \omega_i \sum_{j \in P} \omega_j [2P_a + \rho_a v_{a,ij} \otimes (v_{a,ij} - v^0(x_{ij}, t))] \cdot \nabla_i W_{ij} = \omega_i S_i \quad (2)$$

ここで、 ω : 体積、 ρ : 密度、 v : 速度、 W : カーネル関数、 S : 外力、 a : 近似リーマン解、 P : 圧力、 0 :

オイラー座標系, ij : 粒子 i, j , \otimes : テンソル積を示している. これらの計算方法の詳細については, Vila⁸⁾を参照されたい.

カーネル関数定義方法の内, Quintic型(Wendland⁹⁾)を式(3)に示す.

$$W(r, h) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (3)$$

ここで, $\alpha_D: 7/(4\pi h^2)$, $q: r/h$, r : 粒子間距離, h : スムージング長である.

(2) 水理模型実験の概要

西畑ら⁷⁾は, 長さ50m×幅0.6m×高さ1.2mの2次元造波水路を使用し, 波力低減型海域制御構造物の実験を実施した. 実験はMMZ計画による透過式離岸堤が建設されている海岸を参考にして条件が決定されている. 実験模型縮尺は1/25とし, 模型堤前には $i=1/10$ の海底勾配を設けた. 対象とする波は規則波とし, 模型設置位置で20波以上のデータを取得できるまで計測を行った. 図-1に実験の概要を示す. 模型を設置しない状態で波高検定を行い, 模型位置に設置した容量式波高計により20Hzで計測された水位時刻暦データから入射波高を決定した. 実験では模型天端に2成分分力計を設置し, 水平波力と揚圧力を500Hzで計測した. また, 各部材に配置した合計22個の波圧計から部材波圧を500Hzで計測した.

(3) 再現計算の概要

a) 計算方法・条件

表-1に計算方法を示す. 圧力は, 式(1)で得られた密度増加から, Tait's 方程式で算出した. 時間ステップは, CFL条件によって決定される可変ステップを用いた. 境界条件は粒子間距離(r)等に応じて固体粒子から反力を与えるRepulsive boundary conditionsとした. これらの計算方法の詳細は, Gomez-Gesteriaら²⁾を参照されたい.

表-2に計算条件を示す. 計算は水理模型実験と同じケース・条件で行った. 波高検定においては, 堤前位置の波高を実験と合わせた. なお, 表-2中のCASE1は非砕波, CASE2は砕波条件である. CASE1では, 粒子サイズを変化させた条件について計算結果の比較を行った. 計算領域は, 計算時間短縮のため実験時よりも縮小させた(図-2). 構造物背後には, 式(4)に示す簡易的なエネルギー減衰帯を設け, 水槽端部からの反射波が発生しないようにした.

$$\text{if } x_i > x_0 \quad v_{new} = v - C\Delta t \left(\frac{x_i - x_0}{L}\right)^2 \quad (4)$$

ここで, x_0 : 減衰帯の開始位置, x_i : 粒子位置, L : 減衰帯長(4.0m), C : 係数である. 本検討においては, 減衰帯内での反射が発生しない範囲となるように, $C=10$ として設定した.

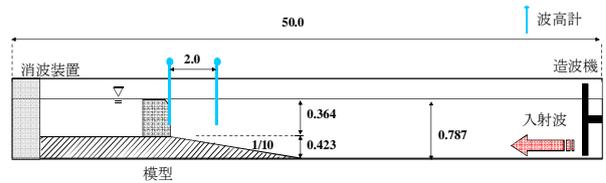


図-1 実験概要図 (単位: m)

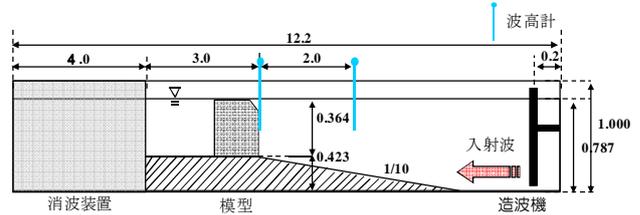


図-2 計算概要図 (単位: m)

表-1 計算方法

Equation of state	Tait's equation
Space Scheme	MUSCL(Riemann solver)
Time stepping scheme	Symplectic scheme
Time-step control	Variable (CFL number 0.4)
Boundary conditions	Repulsive boundary conditions

表-2 計算条件

対象波	CASE1:h=0.787(m),H=0.18(m),T=1.8(s) CASE2:h=0.787(m),H=0.35(m),T=2.8(s)		
入射波	規則波		
造波方法	ピストン式, $A\sin(\sigma t)$		
計算領域	12.2(m)×1.0(m)		
解析時間	15(s)		
粒子サイズ	CASE1:5mm,8mm,12mm CASE2:5mm		
	5mm	8mm	12mm
総粒子数	約22万	約9万	約2万
時間刻み	約 5.7×10^{-5}	約 9.0×10^{-5}	約 1.4×10^{-4}
計算所有時間	約 8.3 日	約 1.8 日	約 12 時間

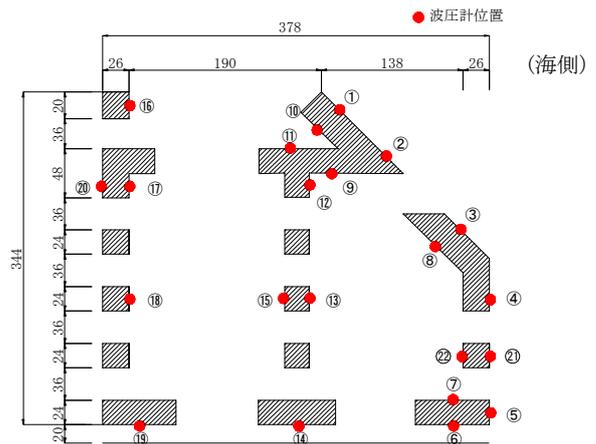


図-3 波圧計設置位置 (単位: mm)

b) 波力・波圧計算方法

本計算で使用する境界条件は, 固体の圧力を計算しないため, 水平力, 揚圧力は構造物を構成する全固体粒子の2成分反力の合計として計算した. 部材波圧は実験時に波圧計を設置した, 図-3に示す箇

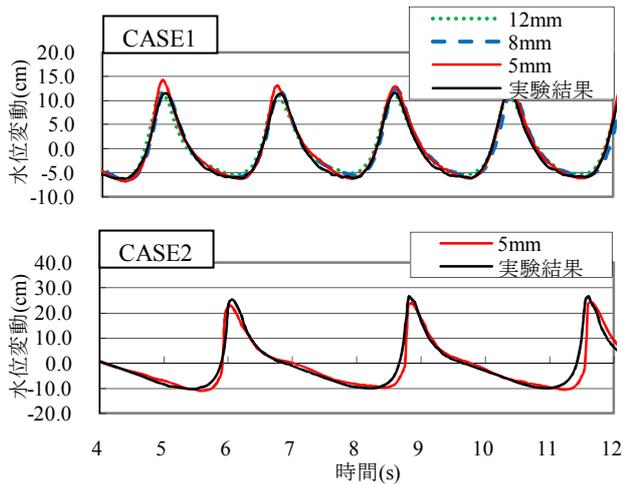


図-4 波高検定水位時系列（堤前位置）

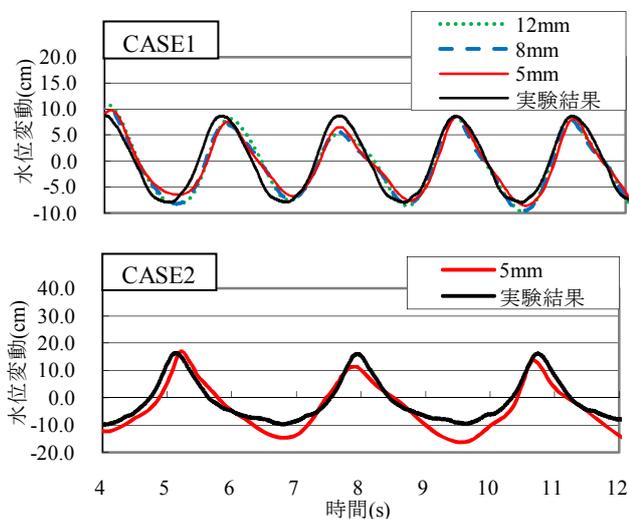


図-5 水位時系列（堤前位置より2m沖側）

所について、近傍固体粒子の合力平均値から固体粒子間距離(r)を除いた値とした。なお、本境界条件の性質上、構造物を構成する各端部粒子の反力は過大に評価される傾向があるため、合力より除外している。測定間隔は200Hzとした。

計算環境はCore i7の3.33GHz, RAMメモリー12.0GB, 64ビットシステムのWindows PCで行った。

3. 波力低減型海域制御構造物への適用性

(1) 水位変動の比較

以下に示す時系列図においては、実験結果の位相を計算結果の位相に一致させて表示している。

図-4は波高検定における堤体位置の水位変動を実験と比較した図である。CASE1では粒子サイズに関わらず、水位変動は実験とほぼ一致している。CASE2でも同様に砕波を伴う非線形性の強い波の条件においても実験をほぼ再現できている。

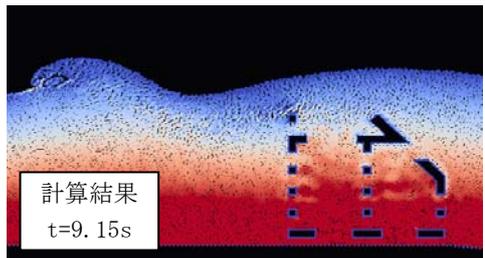
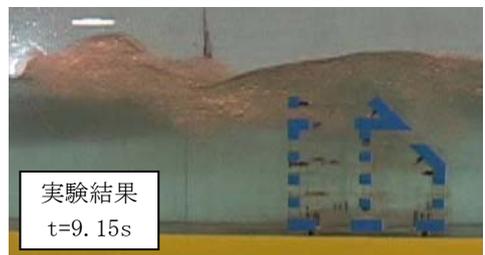
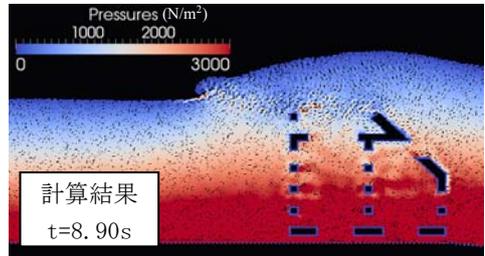
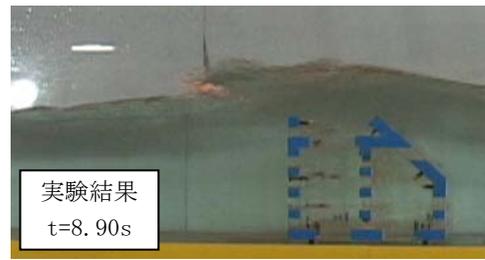


図-6 押波作用時の静止面比較(CASE2)

図-5は、構造物を設置したケースにおける堤体位置前面2mでの水位変動を実験と比較した図である。CASE1では、水位変動が粒子サイズに関わらず実験と概ね一致している。CASE2では、押波時の水位変動が小さく、引波時の水位変動が大きい傾向がある。これは、高波浪により構造物前面の粒子が越波し、構造物背面に移動することで、前面の粒子数が減少し、平均水位が低下したことが原因であると考えられる。平均水位の減少を抑えることは今後の課題となるが、短時間の計算においては概ね実験を再現することができている。

図-6は、CASE2における構造物周辺の波形を静止面で比較した図である。飛沫等の詳細な現象は再現できていないものの、構造物背面で波が砕波する様子が精度良く捉えられており、砕波等の複雑な現象を伴う波形の再現性も良いといえる。

以上より、水位変動についてはWCSPPH法により精度良く再現することができる。

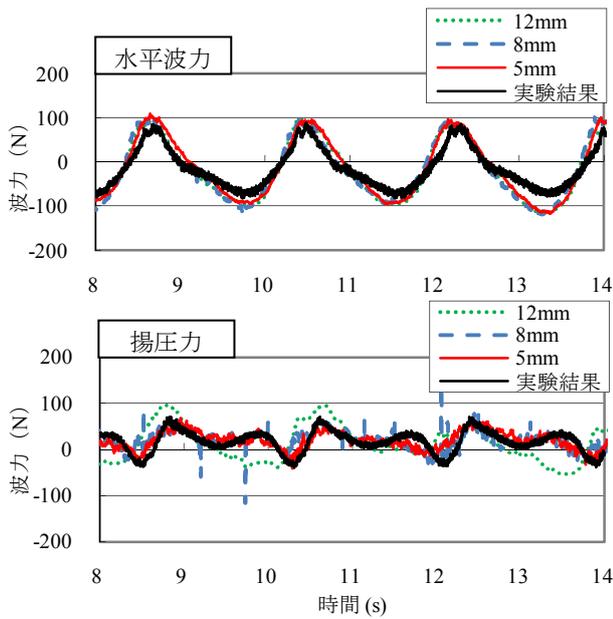


図-7 波力の時系列(CASE1)

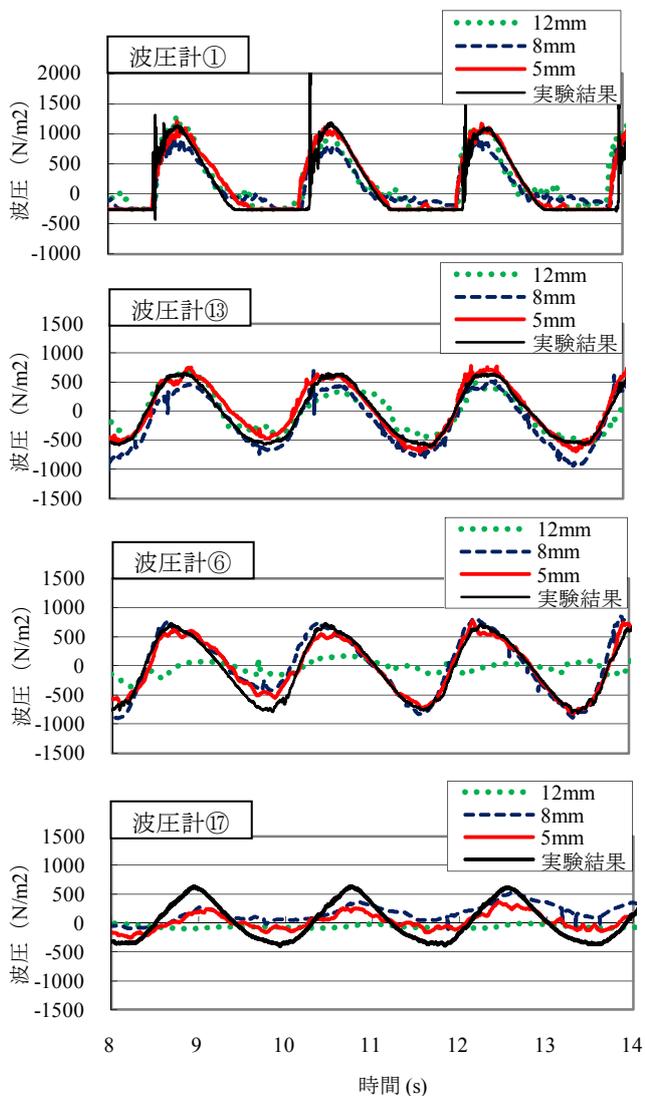


図-8 部材波圧の比較(CASE1)

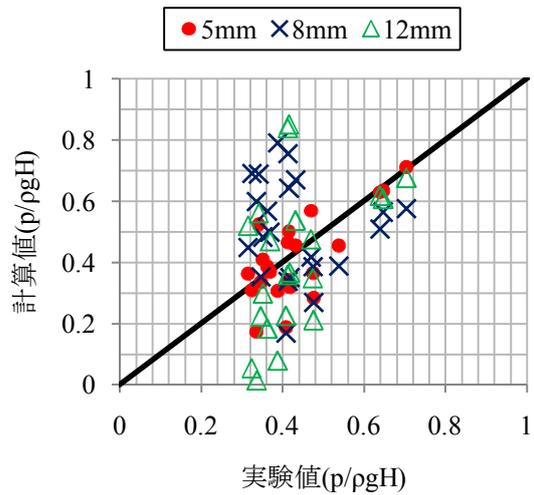


図-9 部材最大波圧の比較(CASE1)

(2) 作用波力の比較

a) 粒子サイズの違いによる影響(CASE1)

まず、非砕波条件の波力特性について検討した。

図-7は、CASE1における水平波力、揚圧力の合力について実験と比較した図である。なお、水平波力は岸向き、揚圧力は下向きを正として整理している。水平波力は、粒子サイズの違いによる相違が見られず、概ね実験を再現できている。揚圧力は12mmのケースでは、実験との整合性が悪く、8mmでは、波圧変動が大きくスパイクノイズが発生している。一方、5mmでは安定しており、実験と良く一致している。

図-8は、部材波圧を実験と比較した図である。静水面付近の前面斜面部材①は、8mmのケースで波圧がやや小さいが、概ね実験を再現できている。スリット部材⑬は、粒子サイズが小さくなるにつれて、実験とより一致する。これは、粒子サイズが大きくなるにつれて、スリットを通過する際に、壁面から反力を受けやすくなるためであると考えられる。前面側底版の部材⑥は、12mmのケースにおいて、実験の再現性が低い。背面側底版の部材⑰は、全てのケースにおいて実験値を大きく下回っている。

粒子サイズとスリット高の比 (B/A : A :粒子サイズ, B :スリット高) で比較すると、標準スリット高 $B=36\text{mm}$ に対して、粒子サイズ5mmでは $B/A=7.2$ となり、底版以外の箇所では、波圧は実験とよく一致している。一方、底面の開口部は $B=20\text{mm}$ で、 $B/A=4.0$ 程度であり、粒子サイズが開口部に対して大きいため、背面側底版の部材では実験を再現できなかったと考えられる。また、底版部の波圧は粒子サイズが粗くなるにつれて、精度が落ちる傾向を示すため、粒子サイズが粗いほど、揚圧力の精度が悪くなる要因の1つであると考えられる。

図-9は、押波時5波分の部材波圧係数について比較した図である。12mmのケースは実験と比較すると、全体的に過小であり、8mmでは過大な傾向がある。また5mmでは、ばらつきが少なく、実験とよく一致している。

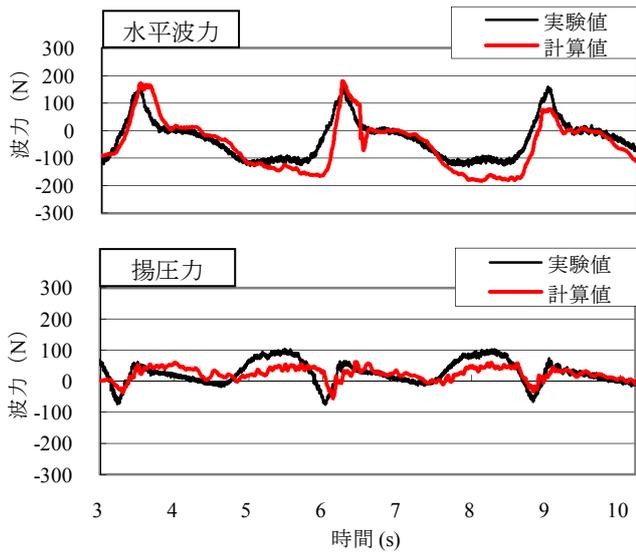


図-10 波力の時系列(CASE2)

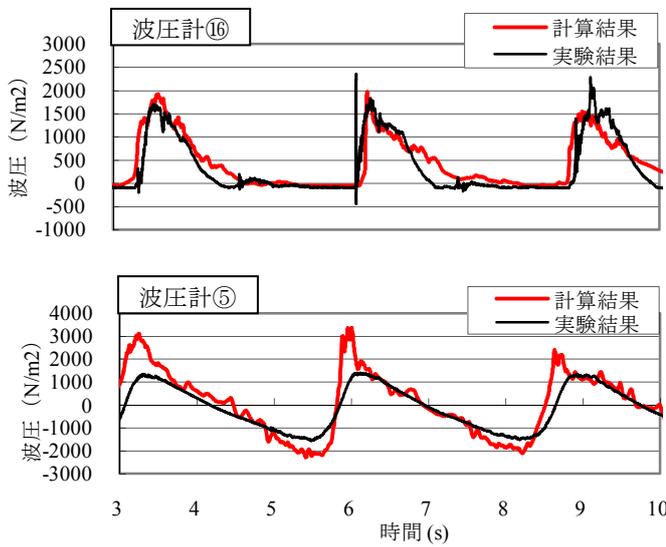


図-11 部材波圧の比較(CASE2)

以上より、本検討の結果からでは、スリットを有する構造物に対しては、スリット高に対して1/7程度の粒子サイズとする必要があると考えられる。

b) 波浪条件の違いによる影響

図-10は、CASE2における水平波力、揚圧力の合力を実験と比較した図である。水平波力は、水位変動と同様に押波側が小さく、引波側が大きい傾向があり、揚圧力は引波時におけるピーク波力が実験より小さくなっているが、実験を概ね再現できている。

図-11は、部材波圧を実験と比較した図である。静水面付近の背面側部材⑯は、衝撃波圧を伴う複雑な波圧を概ね再現することができている。前面側底版付近の部材⑤は、部材⑯と同様に衝撃波力と思われる卓越したピーク値が発生しているが、実験では生じていないため、底版付近の波圧に対する再現性は良好とは言えない。

図-12は水平波力最大時の部材波圧分布図である。

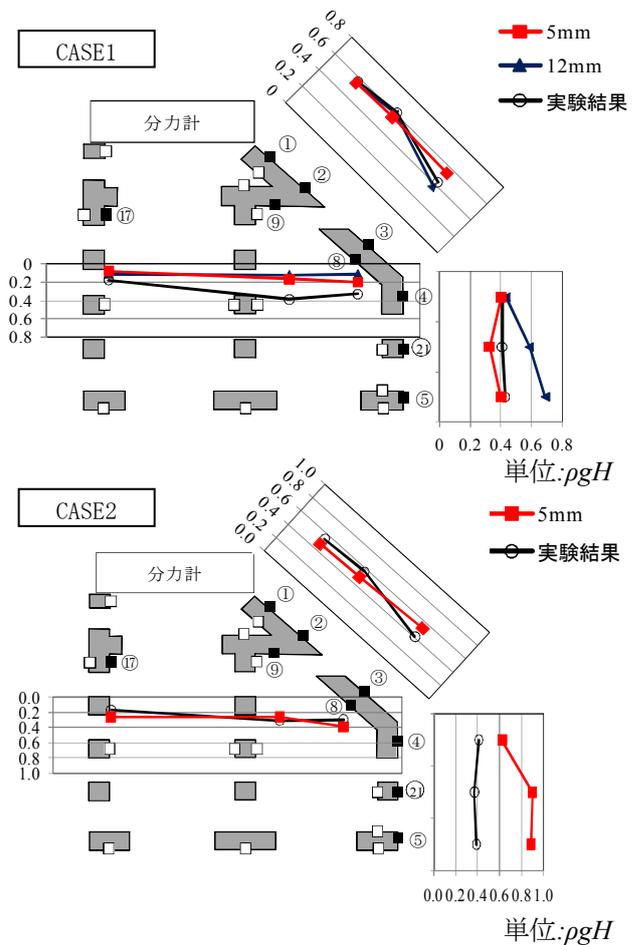


図-12 水平波力最大時の部材波圧

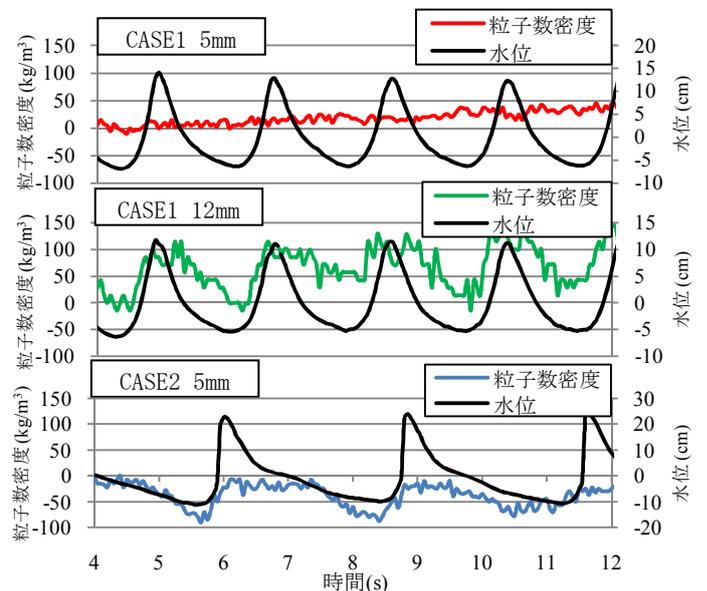


図-13 粒子数密度変動と水位変動の関係 (図の粒子数密度、水位は初期値を0としている)

CASE1 (A=5mm) の場合は構造物内の波圧が実験よりやや小さいものの、実験をほぼ再現できている。CASE2は、斜面部材や構造物内の波圧は再現できているが、前面側の底面付近の波圧は実験と比較して過大である。また、この傾向はCASE1 (A=12mm) の場合でもみられる。

図-13は、構造物より前面に100mm、底面より上側に100mmの範囲の粒子数密度変動を水位変動と比較した図である。粒子数密度は式(5)のように表される。

$$\rho = \frac{mN}{Vol} \quad (5)$$

ここで、 ρ : 粒子数密度, m : 重量, Vol : 空間体積, N : 個数である。また、粒子数密度は、流体の密度と等しくなる。

CASE1 (A=5mm) では、粒子数密度は水位変動に関係なく、時間が経過するにつれてやや増大するがほぼ一定である。一方、CASE1 (A=12mm) 及びCASE2では、水位変動に伴い粒子数密度の増減が大きいことが分かる。

これらの結果より、底面付近の部材波圧が過大になる原因は、前述の通り底面開口部に対する粒子サイズ(B/A)が小さいと、底面開口部を通過できずに、底面付近で粒子数密度が変動するためであると考えられる。また、CASE1 (A=5mm) では底面付近の粒子数密度変動は少ないものの、CASE2では大きいことから、波高が増大する程、粒子サイズの影響を受けやすい可能性がある。無論これらの現象は、kernel関数や、差分法の高度化に伴い、精度が向上することは間違いないが、簡便に粒子サイズを減少させるだけでも一定の効果が得られると考えられる。

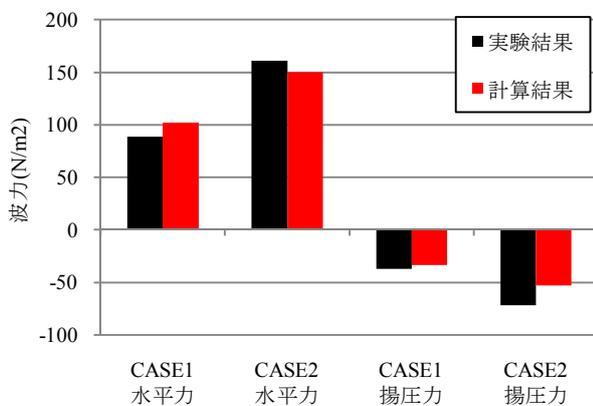


図-14 水平力と揚圧力の比較

図-14は、各ケースA=5mmにおける水平力と、上向きの揚圧力の最大値を平均し、実験と比較した図である。最大で3割程度の誤差はあるものの、実験を良く再現できており、WCSPH法を用いてスリット等を有する複雑な形状の構造物に対する波力算定への適用性があると考えられる。

4. まとめ

本研究は、SPH法を用いて波力低減型海域制御構造物に対する数値実験を行い、実験と比較して以下の結果が得られた。

(1) 水位変動について、砕波現象を伴うような複雑な水位変動も再現性が高い。

(2) 波力・波圧について、スリット部以外では粒子サイズに関わらず再現性が高い。スリット部では、B/Aが大きくなるほど精度よく実験を再現でき、本研究の範囲内ではB/Aが7.2で実験を精度よく再現することができた。

また、今後の課題としては以下の点が挙げられる。

- ・B/Aを大きくすることで、計算時間が増大するため、並列化、GPU処理等計算時間を短縮する方法が必要となる。

- ・CASE2では構造物前面側の平均水位が全体的に低下するため、平均水位を一定に調整する必要がある。

参考文献

- 1) 五十里洋行, 後藤仁志, 酒井哲郎, 谷岡弘邦: 衝撃波圧推定への疑似圧縮粒子法の適用性, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 731-735, 2005.
- 2) 後藤仁志, Khayyer Abbas, 五十里洋行, 堀智恵実, 市川陽一: 高次 Laplacian モデルを用いた高精度粒子法のスロッシング現象への適用性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66 No. 1, pp. 051-055, 2010.
- 3) Guilcher, P.M., Ducorzet, G., Alessandrini, B., Ferrant, P.: Water wave propagation using SPH models, 2nd Intl. SPHERIC Workshop, pp.119-124, 2007.
- 4) Monaghan, J.J.: Smoothed particle hydrodynamics, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, Vol.30, pp.543-574.1992.
- 5) Gomez-Gesteira M., Rogers B.D., Dalrymple R.A., Crespo, A.J.C., Narayanaswamy M.: *User Guide for the SPPhysics code*, 2010.
- 6) Benedict D. Rogers, Robert A. Dalrymple, Peter K. Stansby: Simulation of caisson breakwater movement using 2-D SPH, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48 Extra Issue, pp.135-141, 2010.
- 7) 西畑剛, 安野浩一朗, 下村直己, 山本敦, 羽田宏, 関恒宏: 波力低減型海域制御構造物の開発, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 525-530, 2008.
- 8) Vila, J.-P., On particle weighted methods and Smooth Particle Hydrodynamics, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 9(2), pp. 161-209, 1999.
- 9) Wendland, H., Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in computational Mathematics*, 4(1), pp389-396, 1995