

# MPS粒子法による潜堤の消波メカニズムの シミュレーション

Simulation of Wave Dissipating Mechanism of Submerged Breakwater using MPS Particle Method

戸倉 直<sup>1)</sup>, 永井英一<sup>2)</sup>

Sunao Tokura and Eiichi Nagai

1) 博(工) プロメテック・ソフトウェア(株) & (株)トクラシミュレーションリサーチ (E-mail: tokura@prometech.co.jp)

2) プロメテック・ソフトウェア(株) (東京都文京区本郷三丁目34-3, E-mail: nagai@prometech.co.jp)

Large-scale coastal erosion due to climate change has become a global issue. However, ordinary breakwaters spoil the beauty of the coast as a tourist resource. On the other hand, a submerged breakwater installed below the sea surface can achieve both wave dissipation and seashore protection as well as landscape preservation. When designing a submerged breakwaters based on small-scale experiments, it is difficult to reproduce actual phenomena due to scale effects. Therefore, CFD simulation based on particle method, which can express complex sea level changes, is an effective means for considering the design of submerged breakwater. This paper shows that the MPS particle method is an effective technique to investigate the capability of submerged breakwaters for the wave-dissipating mechanism and the effect of preventing coastal erosion.

**Key Words :** MPS, Particle method, CFD, submerged breakwater

## 1. はじめに

気候変動とともに大規模な潮汐変動や海岸浸食などが世界的規模で大きな課題となっている。海岸の保全や沿岸地域の防災のためには防波堤や消波ブロックなどの護岸施設が建設されることも多いが、こうした一般的な護岸施設は観光資源としての海岸の景観を損なうことから海岸防護と環境保全の両立が難しい。これに対し海面下に設置される潜堤は消波や浸食防止の役割を果たしながら、景観を損ねないというメリットがある。潜堤の効果の検討には通常、模型実験が用いられるが、スケール効果のため、実物の現象の再現が困難な側面もある。そこで実物スケールでの海岸地形、波形状、流速などを直接モデル化でき、複雑な海面の変動や碎波が容易に表現できる粒子法によるCFDシミュレーションは現地の地形も考慮した潜堤の設計検討のための有効な手段であると考えられる。本稿ではMPS粒子法が潜堤の消波メカニズムの検証や海岸の浸食防止効果の検討に有効であることを示す。

## 2. 数値計算手法

海岸近傍における波と護岸構造物の相互作用を対象とする現象の定量的な把握に関しては波力によって構造物が受けける圧力や、構造物の周囲における流れ場の再現に加え、海面における波形状のダイナミックな変化や碎波といった複雑な現象をとらえる必要がある。こうした現象に対し、従来型の格子法をベースとしたCFD手法によるアプローチも可能ではあるが[1]、自由表面の大きな変動や流体の分裂、合体を特別な設定を必要とせず、Lagrange的に追跡できる粒子法によるCFDシミュレーションは海岸付近の波の挙動を模擬するために極めて適し

た手法であると考えられる。そこで本稿では数値計算手法として非圧縮性流体のモデル化を対象として開発された粒子法の一種であるMoving Particle Simulation (MPS) 法[2]を適用することとした。また実物のモデル化に当たっては流体領域だけでなく、その周辺と、流体と相互作用する構造体もモデルに含める必要がある。そのためシミュレーションのツールとしてはMPS法をベースとした市販のCFD解析ソフトウェアParticleworks V.8[3]を使用した。Particleworksは実験用水路、潜堤、造波板、海岸地形などの構造体を汎用的なCADデータの一種であるSTLデータで定義することができる。STLデータは構造体形状を単純な三角形ポリゴンの集合体として表している。具体的な計算条件については以下の個々のシミュレーションの説明で述べる。

## 3. 潜堤による消波効果の検証

海岸線が長く、岩石海岸から砂浜海岸、リアス式海岸、サンゴ礁など複雑な形状を有する日本の護岸を目的とした模型実験による護岸構造物の機能に関する研究に関しては過去に多くの文献が提出されている。本稿ではその中の文献[4]で示されている実験結果に対し、今回実施した数値シミュレーション結果との比較を試みた。実験を再現するための数値計算モデルの形状および主要寸法を図-1に示す。水路の全長は50 m、高さは6 m、幅は1 mである。水路左端 ( $x=0$  m) から5 mの位置に造波板が置かれている。さらに左端から15 mの位置に潜堤が設置されている。潜堤は波進行方向に対する幅(天面長さ)  $l$ 、高さ  $D$  の矩形断面を有する。水深を  $h$  とすると潜堤天端から水面までの深さ  $d$  は  $d = h - D$  となる。これらのパラメーター

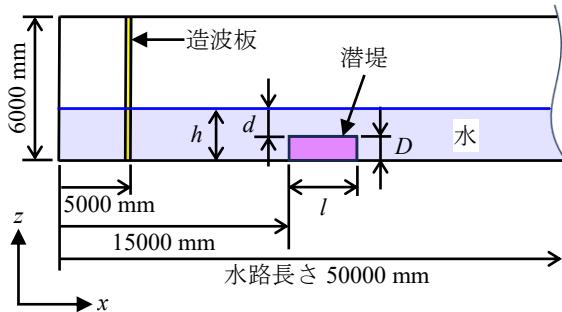


図-1 水路実験装置の形状および主要寸法

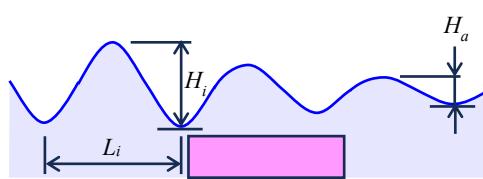


図-2 潜堤通過前後の波の寸法の定義

を変化させて潜堤の消波効果を測定した。消波効果は図-2に示すように潜堤通過前の入射波の振幅 $H_i$ と通過後の波の振幅 $H_a$ の比 $H_a/H_i$ （以下本稿では波高変化）により定義される。造波板を様々な振幅で前後に振動させ、発生した波が潜堤を通過する状態をシミュレーションで求めた。粒子法ではモデルの解像度は粒子直径で決まる。模型実験のシミュレーションでは粒子直径を20 mmとした。その結果最も水体積が大きい水深700 mmのモデルでは粒子数は約420万個となった。計算時間短縮のため、圧力計算には陽的アルゴリズムを用いた[5]。計算した現象時間としては15 s、時間増分は $2.5 \times 10^{-4}$  sに設定した。図-3に潜堤消波シミュレーションの一例を示す。幅2000 mm、高さ400 mmの潜堤に対し、造波板を周期1.5 s、振幅1000 mmで振動させたときに発生した波が潜堤を通過したときの状態を示している。図-4は文献[4]の図-6「潜堤通過による波高変化」のグラフに今回のシミュレーション結果を追加したものである。緑黄色系の点群は文献[4]の実験結果であり、潜堤幅を入射波長で除した無次元量 $l/L_i$ で4群にグループ化されている。図中の赤い○はシミュレーション結果である。オレンジの□は潜堤上の水深 $d$ を入力波高 $H_i$ で除

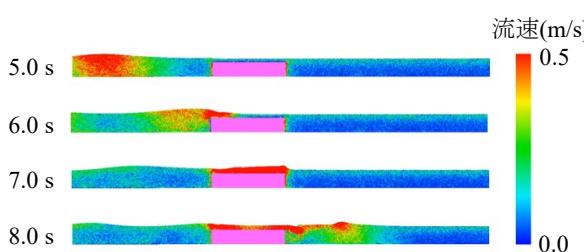
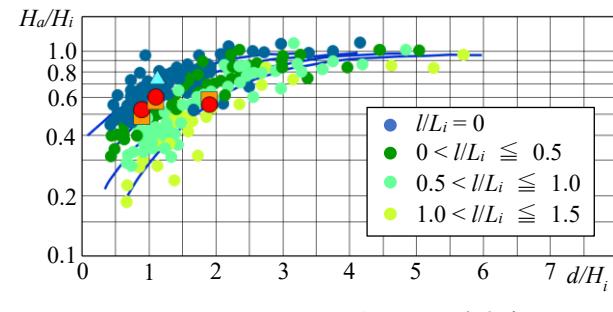


図-3 潜堤通過中の波形の時間変化の例



- シミュレーションで得られた波高変化
- 実験結果から読み取れる波高変化
- ▲ 実物サイズモデルのシミュレーション結果

図-4 潜堤の寸法と消波率 ( $H_a/H_i$ ) の関係[4]表-1 モデル寸法とシミュレーションの波高変化  
(寸法と水深は図-1, 2 参照)

モデル寸法	実験模型 (mm)			実物 (m)
	1	2	3	
潜堤幅 $l$	2000.0	2000.0	3000.0	20.0
潜堤高さ $D$	400.0	400.0	500.0	4.0
水深 $h$	500.0	700.0	700.0	7.0
$d = h - D$	100.0	300.0	200.0	3.0
入射波高 $H_i$	125.93	287.18	112.27	2.80
入射波長 $L_i$	4645.4	5461.4	4282.5	55.33
透過波高 $H_a$	69.21	184.97	64.85	2.10
$d/H_i$	0.55	0.64	0.58	0.75
$l/L_i$	0.43	0.37	0.70	0.36
$H_a/H_i$	0.55	0.64	0.58	0.75

した無次元量（グラフ横軸）について、グラフから読み取ったシミュレーションから期待される波高変化であり、実際にシミュレーションで得られる波高変化のターゲット値（期待される値）となる。すなわちこのグラフからは、実験で得られた波高変化にシミュレーション結果がよく一致することが示された。さらにスケール効果を確認するために実物サイズのモデルによる消波シミュレーションを実施した。潜堤のサイズは模型の10倍となる幅20 m、高さ4 mで、水深は7 mとした。得られた波高変化は図-4の△で示された点に相当する。模型実験のシミュレーション結果とやや乖離がみられるが、実験のばらつきの範囲に収まっているとみることができる。実際、文献[4]では実験結果と実際の現地観測の結果の傾向がほぼ一致していることが示されており、今回対象とした消波実験においてはスケール効果の影響は小さいと考えられる。

#### 4. 潜堤による海岸保全のシミュレーション

近年の台風やハリケーン、高潮、海面上昇といった気象現象の大規模化にともない、海岸の保全は世界的な課題となっている。例えば砂浜海岸はそれ自体防護されるべ

き景観であるが、より内陸の地盤や、道路や建物などの人構造物が砂浜により防護されている面もあり、砂浜自体が海岸保全施設であるとの認識が広がっている。またウミガメの産卵場所といった生物の生存環境としても重要な機能をもっている。そこで潜堤の役割としては消波にくわえ、砂浜などの海岸の保全の効果も期待される。砂浜の保全の要件のひとつとして波による浸食を防ぐ対策を考えられる。本稿では実物スケールで海岸地形をモデル化し、沿岸近傍に潜堤を設置した場合の海水の流れをシミュレーションにより可視化した。図-5に海浜のモデルを示す。沖から海岸方向をx方向、海岸線方向をy方向とし、それぞれ400 mと300 mの範囲を解析領域とした。海岸から200 mの領域に1/10勾配(5.7°)の勾配を設定した。海岸の傾斜がはじまる直前に潜堤を設置した。潜堤の寸法は底面が100 m×46 m、天面が94 m×40 mで高さ3 mとした。水深は5 mとした。沖に設置した造波板を5秒間で海岸方向に20 m移動させて孤立波を発生させた。粒子直径は50 mmとした。粒子数は約130万となった。実際の計算は左右対称性を考慮して1/2モデルで行った。図-6に波が海岸に打ち寄せ、引いていくまでの過程を示す。波が潜堤上を通過すると波高と速度が低下し、海岸に遡上する高さが低くなっていることがわかる。また砂浜からの砂の流

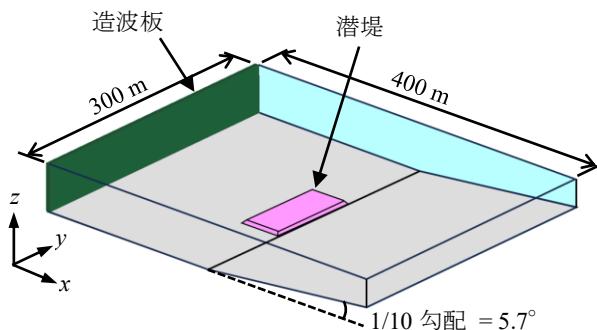


図-5 海浜モデル形状および主要寸法

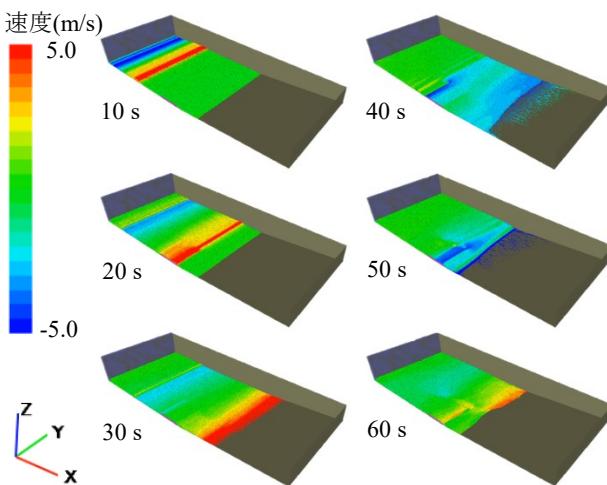


図-6 海岸に打ち寄せる波の時間変化

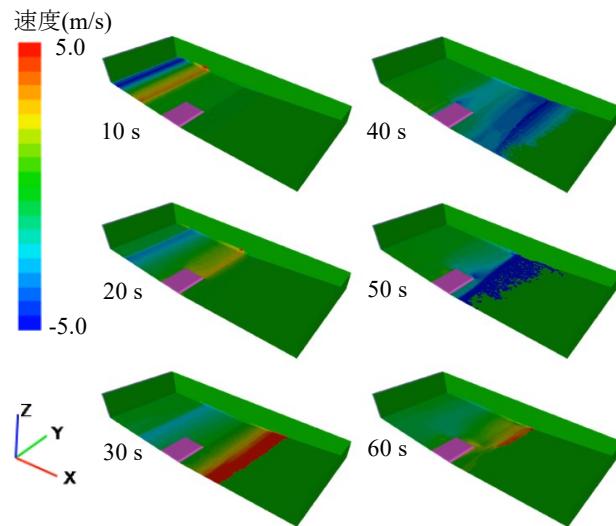


図-7 海底近傍の流速

出は海底表面に近い海水の流れが大きく影響していると考えられる。海底に近い流体粒子の流速を海底面上にマッピングすることで図-7が得られた。とくに潜堤のある箇所では波が引く時の流速が緩和されていることが示され、これにより砂の流出が抑制されることが推定される。さらに解像度をあげ、圧力分布等を可視化することにより、潜堤周りの洗堀の状態をとらえることも可能であると考えられる。

## 5. まとめ

沿岸地域の大きな観光資源である海岸の景観保持と海岸保全を両立できる潜堤の消波メカニズムと堆砂機能を、MPS粒子法により容易にモデル化し、定量的な評価に適用できることが示された。計算コストとしてはNVIDIA製GPU GV100を用いた水路モデルが約3時間、海浜モデルが約40分であった。小さなリソースで大規模モデルが計算できることもMPS法のメリットであると考えられる。

## 参考文献

- [1] S. Tokura, T. Ida: Simulation of Wave-Dissipating Mechanism on Submerged Structure using Fluid-Structure Coupling Capability in LS-DYNA, 5<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference, 2005
- [2] S. Koshizuka and Y. Oka: Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, pp.421-434, 1996
- [3] Particleworks WEB site: <https://www.particleworks.com/>
- [4] 中村 充, 白石英彦, 佐々木泰雄: 潜堤による消波について, 海岸工学講演会講演集, 13巻, pp.76-79, 1966
- [5] 大地雅俊, 越塙誠一, 酒井幹夫: 自由表面流れ解析のためのMPS陽的アルゴリズムの開発, 日本計算工学会論文集, No.20100013, 2