

# SPH法における消波ブロック被覆堤の 簡易モデルの提案

古牧 大樹<sup>1</sup>・西畑 剛<sup>2</sup>・森屋 陽一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: daiki.furumaki@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2,3</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746栃木県那須塩原市四区町1534-1)

<sup>2</sup>E-mail: takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>E-mail: yoichi.moriya@mail.penta-ocean.co.jp

粒子法で消波ブロックの効果を再現するためには、空間解像度を上げて消波ブロック形状を3次元で正確に再現する方法や、擬似的な力を与える方法等が研究されているが、実務上は空間解像度をあまり必要とせず、複雑な仮定を必要としないより簡易的な手法が望ましい。本研究は2次元SPH法を使用して、簡易なモデルで消波ブロックを再現し、透過率や波力を既往の研究と比較してその適用性を確認することを目的とした。

全体として透過性を持つように小さな構造物を空間的に複数個配置することで、簡易的に消波ブロックモデルを構築した。非越波条件における消波ブロック堤の透過率や、消波ブロック被覆堤における構造物への波力は既往の研究と良く一致しており、本簡易モデルの実務への適用の可能性が確認された。

**Key Words :** SPH, wave dissipating block, transmission coefficient, wave force

## 1. はじめに

粒子法は流体や固体を粒子で扱うためメッシュレスであり、複雑な形状の再現や水面の追跡等に優れている。渡邊ら<sup>1)</sup>は、MPS法を用いて複雑な消波ブロック2個を粒子で再現して、3次元解析で消波ブロック周りの流体の動きを再現した。また、後藤ら<sup>2)</sup>は、被覆ブロックを粒子で再現し、3次元解析で被覆ブロックの安定性評価を行った。このように粒子法の性質上、粒子で消波ブロックを忠実に再現すれば、ブロックの影響を考慮した流体計算が可能である。しかし例えばテトラポッド等のかみ合わせがあるブロックは、ブロック同士の隙間が小さいので、流体粒子がその間を通過するためには、空間解像度を上げる必要があるが、現時点における計算機の性能では現実的ではない。一方、粒子法で透過層の空間に擬似抵抗力を付与することで、透過層の再現を試みる例等があり(今瀬ら<sup>3)</sup>)、その適用性が確認されつつあるが、実務上は複雑な仮定を必要としないより簡易的な手法が望ましい。本研究では、SPH法による2次元解析で簡易的に消波ブロックを再現することを試みた。また消波ブロックを通過する際の透過率と、消波ブロック被覆堤の構造物に作用する波力に対して既往の研究(沼田<sup>4)</sup>、合

田ら<sup>5)</sup>、高橋ら<sup>6)</sup>)と比較し、その適用性を確認することを目的とした。

## 2. 数値計算方法の概要

### (1) SPPhysics 概要

計算は SPPhysics2D.ver.2.2<sup>7)</sup>を用いて SPH 法による 2 次元計算を行った。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、 $\omega$  : 体積、 $\rho$  : 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  $ij$ ,  $\otimes$ : 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, Vila<sup>9)</sup>を参照されたい.

カーネル関数は式(3)の Quintic 型(Wendland<sup>9)</sup>)を使用した.

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

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. 水位表面や境界付近では, 隣接粒子が存在しないことにより, カーネル関数の整合性が確保できなくなるため, Bonet and Lok<sup>10)</sup>の方法を用いてカーネル関数を修正した.

境界条件は Monaghan<sup>11)</sup>が提唱した, 粒子間の距離に応じて反力を与える方法を使用した.

### (2) 消波ブロック堤のモデル化

沼田<sup>4)</sup>や合田ら<sup>5)</sup>は, 非越波条件での鉛直ブロック堤と傾斜式ブロック堤の透過率として式(4)を提案し, 実設計に利用されている.

$$K_T = 1 / [1 + \kappa_N (H_I/L)^{0.5}]^2 \quad (4)$$

鉛直ブロック堤  $\kappa_N = 1.184 (B_{SWL}/D_{eff})^{0.895}$   
 傾斜式ブロック堤  $\kappa_N = 1.135 (B_{SWL}/D_{eff})^{0.65}$

ここに,  $L$  は波長,  $D_{eff}$  はブロックの代表径,  $B_{SWL}$  は静水面におけるブロック堤の天端幅である. 式(4)のように, ブロックの代表径と静水面における天端幅を決定すれば, 透過率を推定することが可能である. なお, 本研究では触れないが, 捨石層に対する検討を行う際には, 捨石層に応じた  $\kappa_N$  を使用する.

上記の理由から消波ブロック堤のモデル化は, ブロック代表径とブロック幅を選定できるような形状とした.

図-1のように, 鉛直ブロック堤 (以下鉛直堤) は小さな四角形を複数配置することで, 傾斜式ブロック堤 (以下傾斜堤) は小さな三角形を複数配置することでモデル化を行った. ここで表-1のようにブロック代表径はモデル単位長と, ブロック幅はモデル列数と対応させた.

ブロック代表径は, 長さが増加するほど空隙率および透過率が増加する. 一方, 四角形単位長が増加するほど空隙率および透過率は減少するため, 両者の関係は逆比例するものとした. 傾斜堤においてもブロック幅が海底から天端まで一定の幅とし, モデルの列数と比例関係とした.

式(4)において, 傾斜堤は鉛直堤より透過率が増加する傾向にある. これは, 傾斜堤では, 法面への波の遡上が鉛直堤に比べ増大するためであるとされている. よって, 鉛直堤では四角形であった形を, 傾斜堤では波に対して遡上を促すような三角形にすることとした.

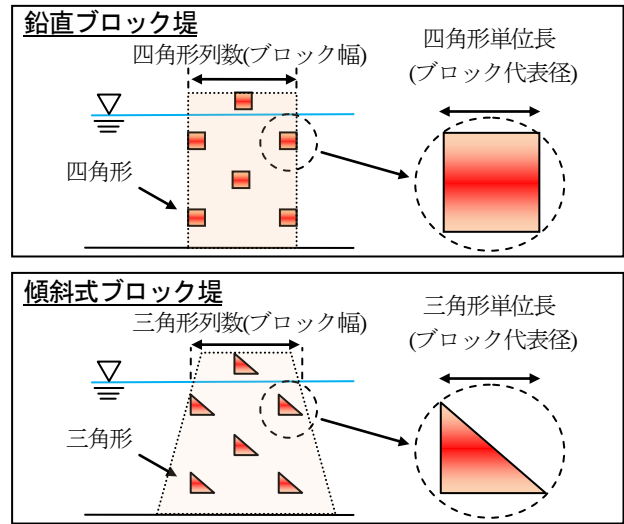


図-1 消波ブロックモデル概念図  
(上図: 鉛直ブロック堤, 下図: 傾斜式ブロック堤)

表-1 消波ブロックモデル対応一覧

消波ブロック諸元		モデル諸元		対応方法
項目	記号	項目	記号	
代表径	d	単位長	A	$d \propto 1/A$
天端幅	BL	列数	B	$BL \propto B$
		間隔	C	Cは任意(固定)

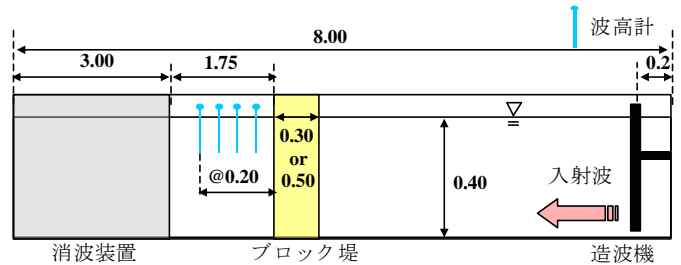


図-2 透過率実験配置図

### 3. 透過率の検討

#### (1) 計算条件の設定

本手法の検証にあたり, 非越波条件の数値計算を行い透過率を既往の研究と比較した. 計算は, 図-2に示すように計算領域の中央にブロック堤のモデルを配置し, 造波境界から規則波を3~4波造波させた. ブロック堤背後には, 式(5)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.

$$\text{if } x_i > x_0 \quad v_{new} = v - C\Delta t \left(\frac{x_i - x_0}{R}\right)^2 \quad (5)$$

ここで、 $x_0$ :減衰帯の開始位置、 $x_i$ :粒子位置、 $R$ :減衰帯長(3.0m)、 $C$ :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。

初めにブロック堤を設置しない状態で通過波検定を行い、次にブロック堤を設置した状態でブロック堤背面の波高を測定して、平均波高変化率を透過率とした。波浪条件やモデル条件は表-2の通りである。モデル条件は、事前に $d$ が20cm、BLが30cmのケースにおけるモデル長、列数、間隔について透過率を合わせるようにパラメータスタディを行って決定した。なお現状において本手法は、粒子径や影響範囲等の設定が変化すると、再度パラメータスタディを行わなければならないため、波浪条件とモデル条件以外は同条件で計算を行っている。

(2) 透過率の検討

図-3は鉛直堤において代表径20cmを条件として、ブロック幅ごとの透過率( $K_T$ )と $H/L$ の関係を示している。ブロック幅が増加すると透過率が減少する傾向や、 $H/L$ が増加すると透過率が減少する傾向が捉えられており、沼田の式と比較しても多少のばらつきはあるものの良く一致している。

図-4は鉛直堤においてブロック幅30cmを条件として、代表径毎の透過率と $H/L$ の関係を示している。代表径が

表-2 透過率計算条件

波高(H)	10, 20 (cm)		
周期(T)	1.1~1.8 (s) (0.1秒刻み)		
水深(h)	40 (cm)		
ブロック代表径(d)	5 (cm)	10 (cm)	20 (cm)
モデル単位長	6 (cm)	3 (cm)	1.5 (cm)
ブロック幅(BL)	30 (cm)		50 (cm)
モデル列数	2 (列)		3 (列)
モデル間隔	15 (cm)		
粒子径	0.02 (m)		

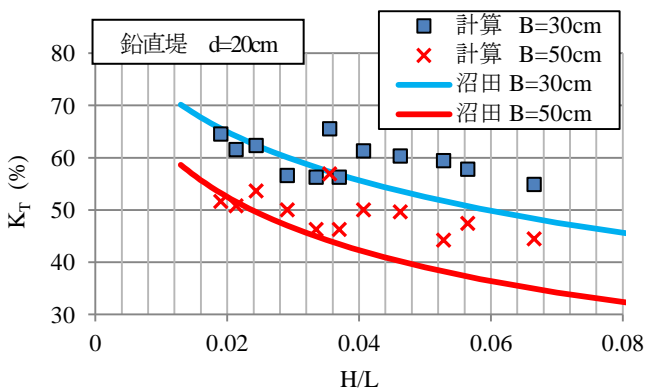


図-3 ブロック幅と透過率の関係

増加に伴い、透過率が増加する様子が捉えられており、沼田の式にも良く一致している。よって代表径が増加するほど、モデル単位長を減少させるという本手法の考え方は、妥当であると考えられる。

図-5はブロック幅30cm、代表径20cmを条件として、鉛直堤と傾斜堤による透過率の比較を示している。傾斜堤の透過率は鉛直堤と比較して全体的に高い傾向が捉えられている。また鉛直堤に対する傾斜堤の透過率の増加割合は、計算値と沼田の式ではほぼ同程度であり、図のケース以外でも同様の傾向がみられた。

図-6はモデル形状以外を同一条件とした場合の同時刻における静止画比較であり、鉛直流速の大ききで色分けを行っている。傾斜堤は鉛直堤より、モデル内で鉛直流速が卓越しており、モデルの斜面に沿って流れが遡上

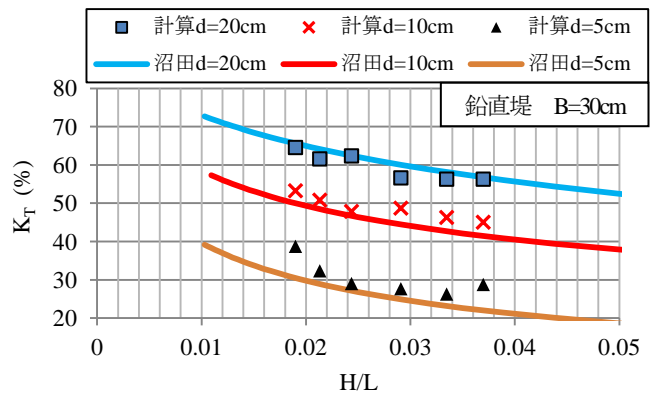


図-4 代表径と透過率の関係

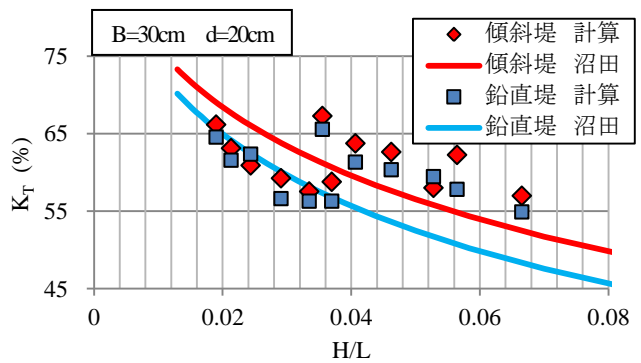


図-5 直立堤と傾斜堤の透過率

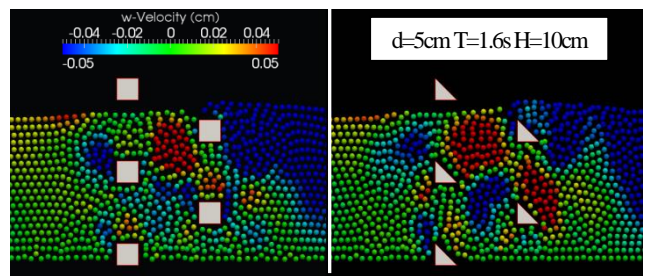


図-6 鉛直堤と傾斜堤の鉛直流速比較図

している様子が伺える. このように, モデル形状を三角形から四角形に変化させることで, 鉛直堤と傾斜堤における透過率の変化を捉えられることが可能となった.

透過率の検討結果より, 本モデルによるブロック堤の透過率は, 代表径やブロック幅, ブロック堤形式等による変化を捉える事が可能であり, また沼田の式との整合性が良いことが確認された. ただし, 本検討は非越波条件における透過率を比較した結果であり, 越波条件での透過率も検証する必要がある.

#### 4. 波力の検討

##### (1) 計算条件の設定

消波ブロック被覆堤における構造物にかかる波力を, 高橋らの式と比較して本手法の妥当性の検証を行う. 計算は図-7に示すように, 1/50の勾配を有した斜面上に消波ブロック被覆堤を設置し, 非越波条件で造波境界から規則波を3~4波造波させた. 初めに消波ブロック被覆堤を設置しない状態で, 構造物前面における通過波検定を行った. 次に構造物のみ設置した状態で構造物にかかる波力を算定し, 合田式と比較することで波力算定方法の妥当性を確認した. 最後に消波ブロック被覆堤の構造物にかかる波力を算定し, 消波ブロックを設置しないケースの波力と比較した. 通過波検定の際は, 反射波の影響が無いようにエネルギー減衰帯を端部に設置した.

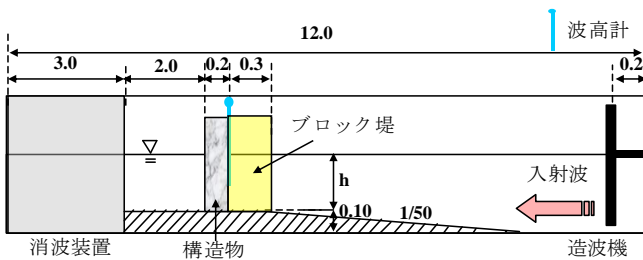


図-7 波力実験配置図

表-3 波力実験における計算条件

波高(H)	2~20(cm) のうち7ケース	
周期(T)	1.46, 2.00, 2.20(s)	
水深(h)	40(cm)	
ブロック代表径(d)	5(cm)	10(cm)
モデル単位長	6(cm)	3(cm)
ブロック幅(BL)	30(cm)	
モデル列数	2(列)	
モデル間隔	15(cm)	
粒子径	0.02(m)	

計算において, 波力は構造物境界の流体粒子に対する反力を積分することで求めた. 詳細は筆者ら<sup>19)</sup>を参照されたい. 波浪条件やモデル条件は, 透過率の検討における条件を参考として表-3のようにした.

##### (2) 合田式との比較

構造物のみ配置した状態で構造物にかかる波力計算を行い, 波浪条件と波力の関係を合田式と比較した. 図-8に水平波力の計算値と合田式の比較を示す. 合田式は, 通過波検定における最大波高を条件として算出しており, 計算では各ケースにおける最大水平波力を図中に示している.

T=1.46sのケースでは, 波高の増大に伴い波力が増加しており, 計算値と合田式は良く一致している.

T=2.20sのケースにおいても, 計算値と合田式は良く一致しているが, 計算値は合田式より若干大きい傾向がある. これは今回の検討条件は, 例えば捨石マウンドを有していない, 非越波条件である等, 合田式的前提条件とは若干異なるため, 合田式と比較して波力が大きくなる傾向があると考えられる.

他水深のケースでも, 計算値は合田式より波力が若干大きい傾向はあるが良く一致しており, 消波ブロックを配置しない状態における波力計算は妥当であると, 改めて確認することができた.

##### (3) 消波ブロックによる波力の低減率

###### a) 時刻歴による波力比較

図-8に, T=2.0s, H=18cmの条件における, 被覆形式別の波力時刻歴を示す. 被覆有りのケースでは被覆無しの場合より波力が低減しており, その低減率は被覆(鉛直)の方がより大きい. これは被覆(鉛直)は被覆(傾斜)と比較して透過率が小さいため, 波力も小さくなったと考えられる. また消波ブロック被覆堤では, ブロックを設置しない状態より, 押し波による波力の継続時間が長くなっている.

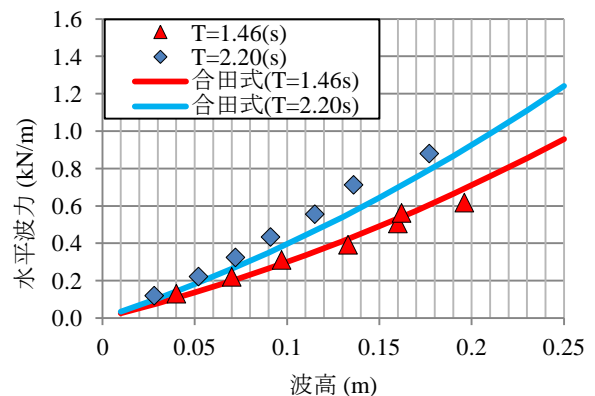


図-8 合田式との比較 (ブロック堤無)

これは、消波ブロックが反射波の透過を防ぐことにより、構造物前面で水位上昇が起こっているためであると考えられる。

図-10は被覆無しの場合における波力最大時と、引き波時の静止画を被覆形式別に比較したものである。波力最大時において静止画を比較すると、被覆無しの場合では被覆有りのケースに比べ、構造物前面の水位が増加している。被覆（傾斜）と被覆（鉛直）の水位には明確な差はみられないが、構造物前面の底面において、若干ではあるが被覆（傾斜）の方が圧力が高くなっている。次に引き波時を比較すると被覆がある場合は、ブロックが構造物前面において水位の減少を妨げており、被覆無しのケースより押し波による水位上昇が継続した。

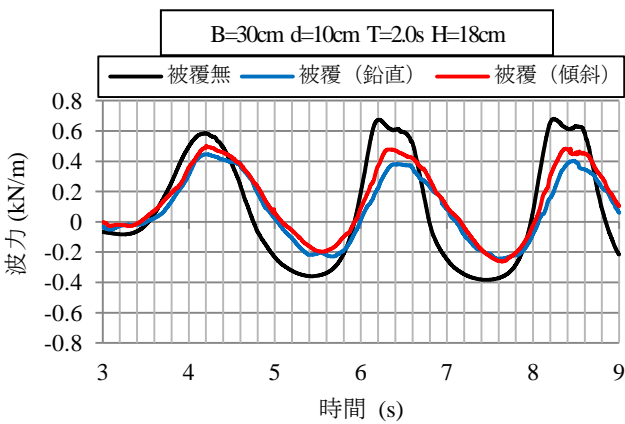


図-9 被覆形式別の波力時刻歴

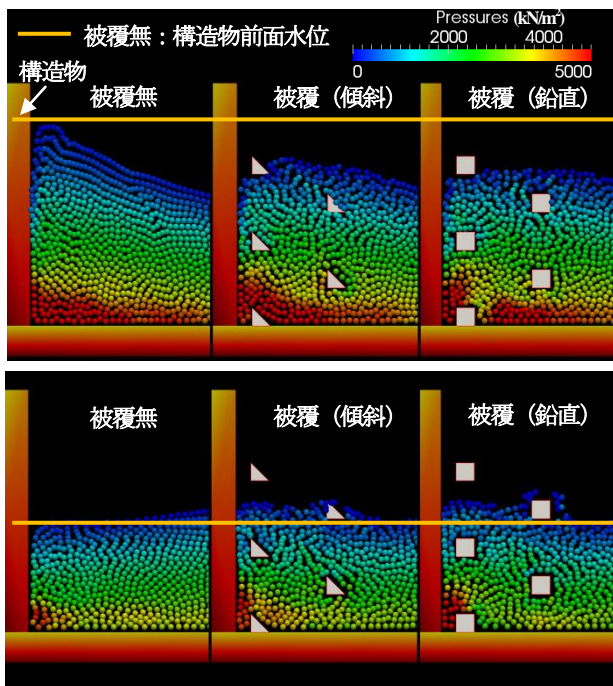


図-10 被覆堤形式別の静止画 (T=2.0s H=18cm d=5cm)  
(上図：波力最大時 t=6.2s, 下図：引き波時 t=7.0s)

## b) 波力低減率の比較

図-11は、 $H/h$ と波力低減率の関係を高橋ら<sup>11)</sup>の式と比較したものである。計算では、波力低減率はブロックの有無による最大水平波力の比としている。被覆（鉛直）においては、全体的に波力低減率が0.8を下回っているが、被覆（傾斜）では、 $H/h$ が小さい場合に波力低減率が1.0に近づいており、高橋の式と傾向が一致している。また代表径が増加するほど、波力低減効果が減少している傾向もみられており、波力においても代表径の影響が考慮することができている。

このように、消波ブロックを設置することによる波力の低減や、構造物前面の水位上昇、 $H/h$ と波力低減率の関係等が再現できており、更なる検討を行う必要はあるが、本モデルは波力に対しても適用性が高い可能性が示された。

## 5. まとめ

本研究は2次元SPH法を使用して、簡易なモデルで消波ブロックを再現し、透過率や波力を既往の研究と比較してその適用性を確認した。主要な結論を以下に示す。

- ・三角形や四角形の小さな構造物を空間的に複数配置することで、鉛直ブロック堤と傾斜式被覆堤のモデルを簡

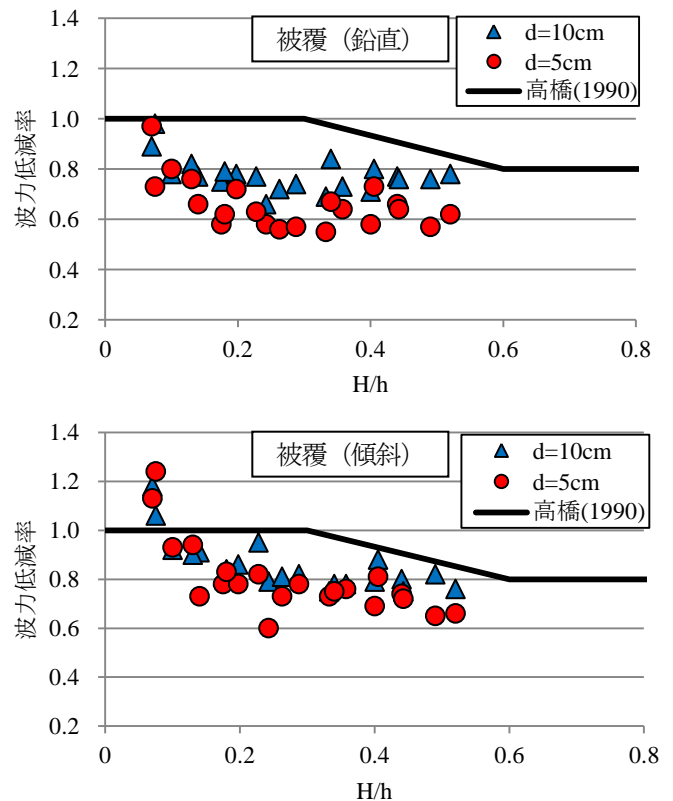


図-11 波力低減率の比較

(上図：被覆（鉛直）、下図：被覆（傾斜）)

易に構築することが可能となった。

・非越波条件で沼田の式と透過率を比較すると、代表径や被覆幅、被覆形式等による透過率の変化が考慮できていた。

・非越波条件で高橋の式と波力低減率を比較すると、傾斜式ブロック被覆堤のケースでは、 $H/h$ の増加に伴い波力低減率が0.8に近づく傾向が捉えられていた。

本研究で検討した消波ブロックの簡易モデルについて、実務への適用を行うために、今後検討が必要な項目を以下に示す。

・本研究では、非越波条件での検討しか対象としていないため、越波条件に対しても検証が必要である。

・消波ブロック以外に例えば捨石層等の透過層についても検証が必要である。

・3次元に拡張するためのモデル化の方法を検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 渡邊忠尚, 入部綱清, 仲座栄三, Rahman MD. Mostafizur: 複雑な3次元海岸構造物周りの水理現象のMPS法による解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.721-725, 2011.
- 2) 後藤仁志, 原田英治, 五十里洋行, 安岡恒人, 有光剛, 大江一也, 鶴田修己: 防波堤被覆ブロック群の安定性評価のためのワイヤー連結ブロック群シミュレーションの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.846-850, 2010.

- 3) 今瀬達也, 前田健一, 三宅達夫, 鶴ヶ崎和博, 澤田豊, 角田紘子: 津波襲来時における海底地盤の変形に起因した防波堤の不安定化, 第22回中部地盤工学シンポジウム, 2011.
- 4) Gomez-Gesteira M., Rogers B.D, Dalrymple R.A., Crespo, A.J.C., Narayanaswamy M.: User Guide for the SPHysics code, 2010.
- 5) Vila, J.-P., On particle weighted methods and Smooth Particle Hydrodynamics, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*,9(2), pp.161-209, 1999.
- 6) Wendland, H., Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in computational Mathematics*, 4(1), pp389-396,1995.
- 7) Monaghan,J.J., Simulating free surface flows with SPH, *Journal Computational Physics*, 159,pp399-406,1994.
- 8) Bonet J. , T. - S. L. Lok : Variational and momentum preservation aspects of Smoothed Particle Hydrodynamic formulations, *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*,180, pp. 97-115, 1999 .
- 9) 沼田淳: ブロック堤の消波効果に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, 第22巻, pp.501-505, 1975.
- 10) 合田良実, 吉田秀樹, 蜂須賀和吉, 黒木敬司: 低天端堤の波高伝達率の実用的推定法と現地への適用性について, 土木学会論文集 B, Vol.65 No.1, pp.56-69, 2009.
- 11) 高橋重雄, 谷本勝利, 下迫健一郎: 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重, 港湾技研研究所報告, 第29巻 第1号, 1990.
- 12) 古牧大樹・安野浩一朗・西畑剛, 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, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.67, No.2, pp.64-69, 2011.

## A PROPOSAL FOR SIMPLIFIED MODELIZATION OF BREAKWATERS COVERED WITH WAVE-DISSIPATING BLOCKS IN SPH METHOD

Daiki FURUMAKI, Takeshi NISHIHATA and Yoichi MORIYA

In numerical analyses using particle methods, reappearance of wave dissipation effect has been realized through some methods as to duplicate 3-dimensional configuration of wave dissipation blocks accurately or to assume artificial forces. On the other hand, a concise model not to require high spatial grid resolution or complex presumption is necessary from the practical viewpoint. A simplified model of wave dissipation blocks in the 2-dimensional SPH method is proposed in this study. This paper aims to confirm the duplicability of the model for permeabilities of wave dissipation blocks and wave forces exerting on the seawall behind the blocks in comparison with those obtained from the previous studies.

Wave dissipation blocks are simply modeled as to provide total permeability appropriately by arraying some little square or triangle structures. Wave transmission coefficients of block mound breakwaters and wave forces exerting on seawalls with wave dissipation blocks by the simulation agree with those derived from the design formulae under the condition of no wave overtopping, which verifies the fine applicability of our model.