

ブロックの形状特性を考慮した被覆層破壊過程のシミュレーション

原田 英 治*・後 藤 仁 志**・酒 井 哲 郎***・大 野 正 博****

一般的に被覆ブロックの安定重量は、設計波力に対する単一ブロックの安定性を基準に決定されており、設計波力を超えるレベルの波力の作用は想定されていない。想定外の波力の作用下における被覆層の臨界状態では、ブロック間衝突を伴う被覆ブロック層の動的挙動が顕在化する。壊滅的な被災を免れるための構造の選択には、被覆ブロック層の破壊直前状態におけるブロック間の噛み合わせ効果を考慮したブロック群の耐力の評価が有効である。そこで、本稿ではブロック間衝突を陽に取り扱える個別要素法型の数値シミュレーションを実施し、単一ブロックの幾何的形狀(ブロック群の噛み合わせ効果)の違いと安定性の関係について議論する。

1. 緒 言

被覆ブロックの安定性は、Hudson (1959) に代表されるように、単一ブロックに作用する駆動力(揚力)と抵抗力(重力)の均衡に基づいて論じられるのが一般的である。ところで、被覆層は、多数のブロックを組み合わせ形成されるので、被覆層全体の安定性を論じるには隣接ブロック間の相互干渉が鍵となる。言うまでもなく、単一ブロックの安定重量は設計波高に対して安全なように決定されているので、通常想定される波浪条件ではブロックは移動しない。しかし、構造物の設計においては、想定される外力下の安定性だけでなく、想定外の外力が作用した状態での動的挙動についても検討し、壊滅的破壊を免れる構造を選択することが肝要である。単一ブロックが移動を始めると被覆層はブロック群としての抵抗を示すので、被覆層全体が直ちに破壊される訳ではない。言い換えると、被覆層の破壊直前状態を予測するにはブロック群としての挙動すなわちブロック間干渉のモデルが不可欠である。そういった観点からのアプローチとしては、原田ら (2001) による矩形ブロック群の破壊過程の数値シミュレーションがあるものの、破壊直前状態でのブロック群の耐力の評価に果たす役割が大きいと考えられる噛み合わせの効果について論じた研究には前例がない。そこで、本研究では、ブロック間衝突を陽に取り扱える個別要素法型の数値シミュレーションによって、砕石上に配置された被覆ブロック群が破壊される過程を再現し、単一ブロックの幾何的形狀の違いによる噛み合わせ効果が、全層滑動モードにある被覆ブロック群の耐性に与える影響を検討する。

2. シミュレーションモデルの概要

2.1 粒 子 系

要素運動は、剛体連結モジュールを組み込んだ拡張型

* 正 会 員 工 博 日本学術振興会特別研究員
** 正 会 員 工 博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻
*** フェロー 工 博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻
**** 学生会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻

の 2 次元個別要素法を基礎としたモデルで表現され、ブロックは、要素を連結して構成される。個別要素法では、粒子間相互作用がバネ・ダッシュポット系で表現され(図-1 参照)、個々の要素の運動は、球の並進・回転の運動方程式

$$\rho\left(\frac{\sigma}{\rho}+C_M\right)A_3d^3\frac{du_{pi}}{dt}=F_{pint}+F_D+F_{gr} \quad \cdots (1)$$

$$F_D=\frac{1}{2}\rho C_D A_2 d^2|U-u_{pi}|(U-u_{pi}) \quad \cdots (2)$$

$$F_{gr}=-\rho\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)A_3 d^3 g \quad \cdots (3)$$

$$\frac{\sigma \pi d^5}{60} \frac{d\omega_{pi}}{dt}=T_i \quad \cdots (4)$$

$$C_D=C_{D\infty}+\frac{24\nu}{d\cdot|U-u_{pi}|} \quad \cdots (5)$$

を用いて記述される(後藤・酒井, 1995)。ここに、 F_{pint} : 要素間相互作用ベクトル、 F_D : 抵抗力ベクトル、 F_{gr} : 重力ベクトル、 u_{pi} : 要素 i の移動速度ベクトル、 C_M : 付加質量係数($C_M=0.5$)、 U : 要素の近傍流速ベクトル、 C_D : 抗力係数($C_{D\infty}=0.4$)、 A_2, A_3 : 要素の 2 次元・3 次元形状係数(球については、 $A_2=\pi/4, A_3=\pi/6$)、 d : 要素径、 σ : 要素密度、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度ベクトル、 ν : 動粘性係数、 T_i : 要素 i に作用するトルク、 ω_{pi} : 要素 i の回転速度ベクトルである。

ブロック構成要素に対する剛体連結モデルとして、ここでは、Koshizuka ら (1988) が MPS 法で用いた Moving Solid Model を準用した(後藤ら, 2001a)。ブロック

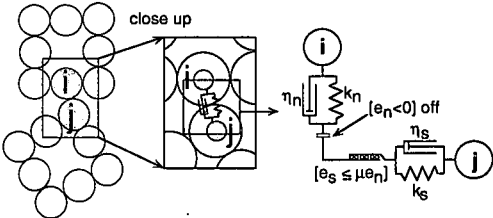


図-1 要素間接触モデル

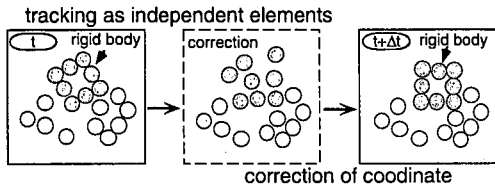


図-2 剛体連結モジュール

構成要素に対しては、個々のブロックの重心回りの角運動量が保存されるように相対回転角を算定し、要素間の相対位置が変化しないように座標修正を施すことにより、剛体挙動させる（図-2 参照）。

2.2 流れ系

流れ場の詳細な評価には、空間的非一様性、乱流特性、粒子混入による流れ場の影響等、検討事項が少なくないが、ここでは、要素の運動の記述に重点を置き、流れ場のモデル化は簡便な取り扱いとし、底面付近の流れ場は、原田ら（2000）と同様に鉛直 2 次元非定常流れの Reynolds 方程式を、 $k-\epsilon$ 乱流モデルで完結させ評価している。また、壁面境界条件は、解析対象要素の直径を粗度とした粗面を想定した壁法則で与えた。なお、対象とする水理条件では、ブロック混入による流速場の変化が生じているが、ここでは計算機の演算能力の制約から、ブロック間相互作用の追跡に焦点をあてて、流体とブロック間に関する混相流的なモデル化は行っていない。

3. シミュレーション結果

3.1 計算条件

噛み合わせの効果の違いを論じるため、矩形ブロック（square；case 1）および合掌ブロック・クロス（cross；case 2）の 2 種類を被覆ブロックに想定した計算を実施した。合掌ブロック・クロスについては、鉛直 2 次元で表現する必要から H 型・十字型で模擬した。図-3 に実際のブロック形状と今回のシミュレーションで採用した形状と、および各々のブロックの単一要素の比重を示す。何れのブロックも要素径 $d=2.0$ cm であり、ブロックは要素を連結して形成するので、ブロック形状が異なると使用する要素数も異なる。そこで、矩形ブロック構成要素の総重量を基準にし、ブロック単体の重量が等しくなるように他の形状のブロックの構成要素の比重を決定した。それぞれ矩形・H 型・十字型各ブロックの構成要素の比重は、 $\sigma/\rho=2.65, 3.03, 4.24$ である。

初期配列時には施行精度のばらつきを考え、底面碎石要素の平均高さ回りに標準偏差が $d/3$ になるように碎石配列に不規則な凹凸を与え、その上に各種ブロック群をブロック間に若干の間隙を持たせて配置した。なお、底面碎石要素の直径はブロック構成要素と同一の $d=$

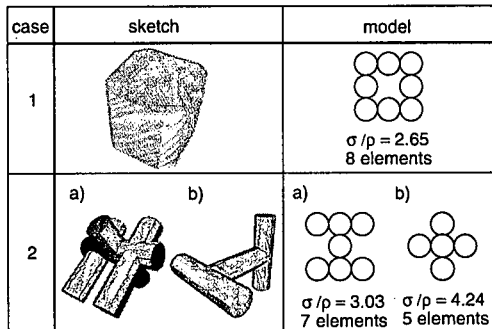


図-3 被覆ブロックの形状

表-1 計算条件

case	shape	T (s)	$U_{\max}$ (cm/s)	bottom surface shape
1	square	1.0	140.0	irregular
2	cross			

表-2 モデル定数

k_n	26.04×10^3 N/m
k_s	10.02×10^3 N/m
η_n	0.76×10^3 Ns/m
η_s	0.47×10^3 Ns/m

2.0 cm、比重は、 $\sigma/\rho=2.65$ である。なお、本研究のシミュレーションでは、計算領域の左右を周期境界条件として扱っている。

振動流の条件を表-1 に示す。ここに、 T ：周期、 $U_{\max}$ ：境界層外縁の最大流速振幅である。また、流速場の計算時間ステップ Δt_f は 0.1 s であり、粒子運動の計算では 0.1 s 毎に流速場を更新し、粒子の座標を参照して粒子に作用する流速を内挿補間で求めて、数周期計算を繰り返す。

粒状体モデルで使用したモデル定数（ k_n ：法線方向バネ定数、 k_s ：水平方向バネ定数、 η_n ：法線方向粘性定数、 η_s ：接線方向粘性定数）は、後藤ら（2001b）の設定法を参考にして既往の実験結果（田中・杉本、1965；国栖ら、1986）と対応がとれるように決定した（表-2 参照）。また、粒子系の計算時間ステップ Δt_p は、モデルが陽解法であることから、計算の安定性を考慮して $\Delta t_p=1.0 \times 10^{-5}$ s とした。

3.2 矩形ブロック群の破壊過程（case 1）

図-4 に、矩形ブロックを配置した case 1 のシミュレーション結果から得られるブロック群の各時間の挙動の瞬間像を示す。パッキング（重力のみの作用下で安定した要素配列を作る過程）が終了する時刻 $t=0.2$ s から振動流を作用させ始めると、ブロック群の水平運動が一

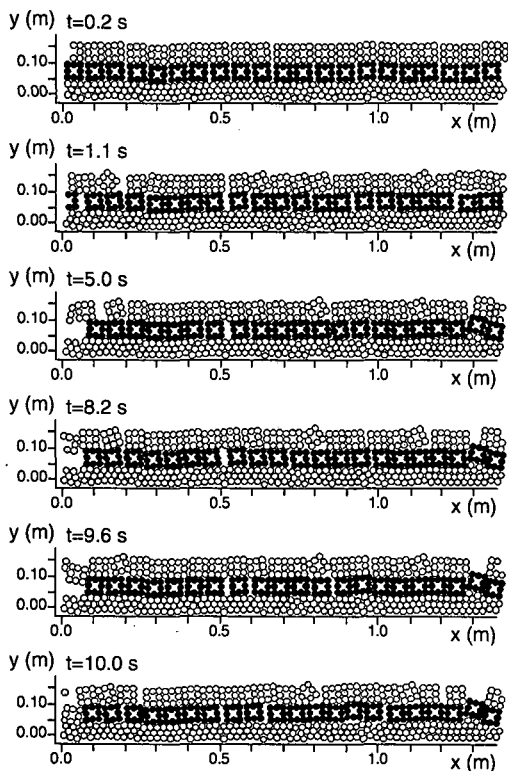


図-4 case 1, 矩形ブロック群の挙動

齊に生じる。その後、ブロック間の衝突が継続すると、徐々にブロック間の間隙が数カ所に集中する。上段における間隙が集中した位置付近のブロックは、他のブロックと比較して両側の隣り合うブロックに拘束され難く、動き易い状態になり、時刻 $t=1.1$ s以降に見られるように、ブロックの運動が活発化して、水平運動に加えて回転運動も顕在化する。一方、下段のブロックは、上段のブロックによって上下方向の運動の制約があるため、回転運動は僅かであり、主に水平方向の運動を呈する。また、底面碎石要素の凹凸や上段ブロックの拘束が原因でブロックの運動が著しく阻害されると jam が生じて、大きな間隙を発生させる。 $t=5.0$ – 10.0 s では、発生した間隙に上段からブロックが滑落する様子が示されている。以上のシミュレーション結果から、被覆ブロック層の破壊を抑制し、被覆ブロックが群としての機能を発揮するには、大きな間隙の発生を誘発するブロック運動の抑制が重要であると考察される。

3.3 合掌ブロック・ドロスの破壊過程 (case 2)

被覆ブロック間の噛み合わせ効果を検討するために、合掌ブロック・ドロスを想定した被覆ブロック群を配置したシミュレーションを実施した。図-5 に case 2 のシミュレーションから得られる各時刻のブロック群の瞬間

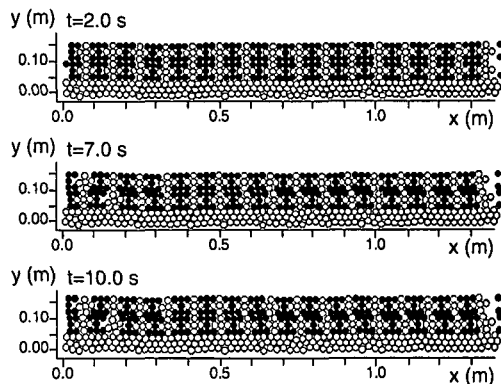


図-5 case 2, 合掌ブロック・ドロスの群の挙動

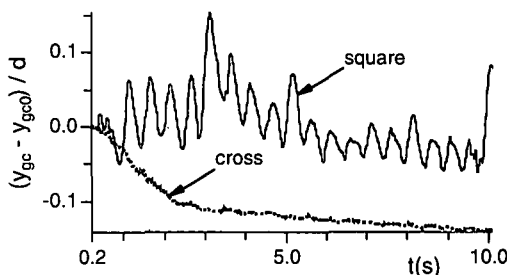


図-6 濃度重心時系列

像を示す。合掌ブロック・ドロスの場合では、矩形ブロックより強固にブロックが噛み合っている様子が理解できる。そのため、相互に隣接するブロックが拘束し合い、回転や水平方向の運動は鈍化して、大きな間隙は発生しにくいと考えられる。矩形ブロック (case 1) の場合と比較して、総じて安定した被覆ブロック層の挙動が示されており、ブロック間の噛み合わせ効果が、被覆ブロック群の安定性に大きな役割を担っていることが確認された。

3.4 濃度重心の時系列

図-6 に矩形ブロック群および合掌ブロック・ドロスの鉛直方向の全重心の時系列を示す。パッキング終了後の全重心からの偏差をブロック構成要素径 (d) で規格化してある。初期沈下を除くと合掌ブロック・ドロスは鉛直変位、振幅ともに小さいことが分る。このように、合掌ブロック・ドロスは矩形ブロックと比較して安定しており、被覆ブロックの安定性にはブロック間の噛み合わせ効果による抵抗力が有効であることが、再確認された。

3.5 要素間応力

隣接する要素間の法線方向の応力状態を図-7, 8 に示す。図中の要素中心間を結ぶ線分の方角は応力の作用方向を示しており、線分の太さは応力のレベルに比例して

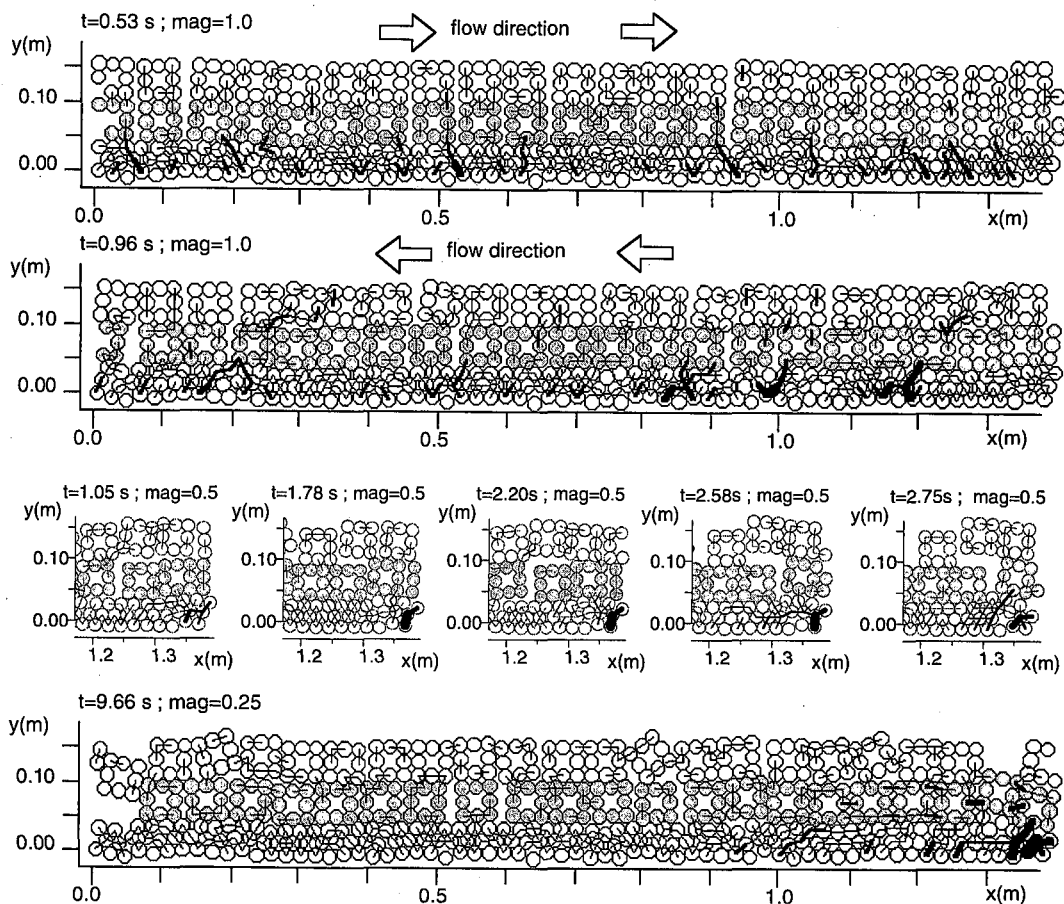


図-7 Force vector plots (case 1, 矩形ブロック)

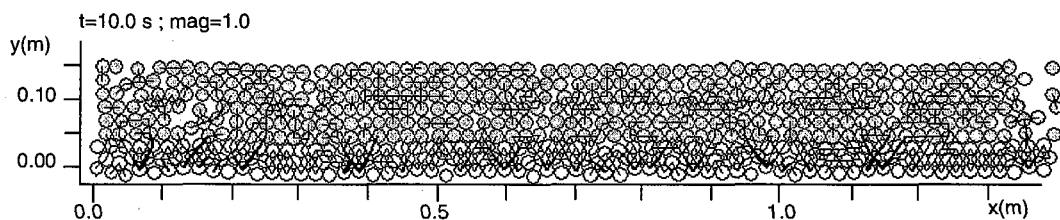


図-8 Force vector plots (case 2, 合掌ブロック・ドロス)

いる。また、図の見易さを考慮し、線分の太さを各図ごとに倍率 (mag=magnification) を変えて表示している。

矩形ブロックの場合 (図-7) では初期段階 ($t=0.53, 0.96$ s) には、被覆ブロック群の運動方向と逆方向に下段ブロックと碎石間に応力が働いている様子がわかる。このように底面碎石は、ブロック群間に生じる抵抗力によって配列を乱されて凹凸を増大させ、底面碎石の配列に影響されて被覆ブロック層の配列も不規則性を増大させる。被覆ブロック群の衝突・反発が繰り返されるうちに、 $x=1.3-1.4$ m 付近に見られるような碎石の突起が形

成され、この突起によってブロック群の運動が阻害されて、応力増加が促進される ($t=1.05-2.75$ s)。時間の経過につれて突起周辺にブロック群が密集し、さらに閉塞区間が増大していくと、高レベルの応力の作用領域も突起周辺に拡大する ($t=9.66$ s)。また、これと同時にブロック間の間隙も増加し、上段のブロックが下段へ滑落するといった被覆層配列の顕著な変化が発生する。

一方、合掌ブロック・ドロスの場合については、シミュレーション全体を通じて、顕著なブロック間の応力集中が見られず、被覆層の配列が急激に変化するという状

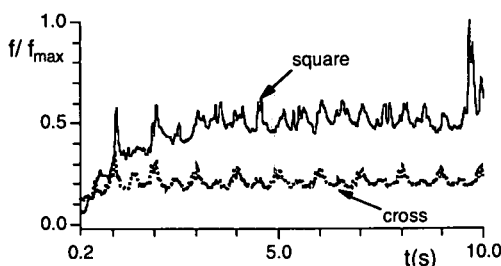


図-9 平均応力時系列

況にならずに安定していたので、case 2 についてはブロック要素間応力の代表例(図-8)を示すに留めた。矩形ブロックの場合と比較して応力集中する箇所が非常に少ないのは、ブロック間の噛み合わせ効果によりブロック群全体に応力が分散する安定した被覆層の構造が存在しているためであろう。

3.6 ブロック間応力の時系列

隣接するブロックの干渉によって生じるブロック間応力を量的に評価するために、全てのブロック要素に作用する法線方向の応力の合計をブロック構成要素数で平均化した応力 f を算出し、その時系列を図-9 に示した。なお、図中の $f_{\max}$ は最大平均応力である。振動流の作用に対応して応力も周期的に変動しているが、矩形ブロックの場合はブロック間の拘束が合掌ブロック・ドロスの場合と比較して緩く動き易いため、ブロック間衝突によるブロック間応力が大きくなり、応力変化率も大きく見積もられる。

矩形ブロックの場合は、振動流作用後約1周期 ($t=0.2-1.0$ s) で徐々に応力レベルが上昇する。この時間帯は、パッキング終了後の初期ブロック配列においてブロック間に若干の間隙を持たせて配置されたブロック群が、振動流の作用に伴って衝突・反発を繰り返しながらブロック数個の塊(クラスター)を形成する過程に相当する。この過程では、ブロック間の衝突・反発により次第にブロック間応力が増加し、同時に間隙の集積も進行する。その後時刻 $t=1.0$ s 以降では、集積した間隙付近のブロック運動が活発化し、ブロック間衝突による応力の変動が増加する。時刻 $t=2.0-9.7$ s では、ほぼ同じ応力レベルを保持し、また、ブロック間衝突による応力変動を伴いながら推移する。下段のブロック層に上段からのブロックの滑落が可能な幅の間隙が発生する程度のブロック群の密集状態が形成されると、時刻 $t=9.7-10.0$ s 付近に見らるブロック間応力の更なる増加が生じる。一

方、合掌ブロック・ドロスの場合では、振動流作用開始 ($t=0.2$ s) から、ほぼ同レベルの応力状態が保持され、その後も平均応力レベルに大きな増減は生じない。このことは、被覆ブロック群が安定した形状を維持していることと対応している。また、矩形ブロックの場合と比較して平均応力レベルおよび応力の変動レベルがともに小さく、ブロックの幾何的形狀特性による噛み合わせ効果が有効に作用した被覆層の特性が表れている。

4. 結 語

本研究では、振動流下での被覆ブロック群の破壊過程のシミュレーションを、剛体連結モジュールを組み込んだ個別要素法型の粒状体モデルを用いて実施した。特に被覆ブロックの幾何的形狀の相違による破壊過程を、ブロック配置の瞬間像やブロック重心の時系列、さらに、ブロック要素間応力やその時系列から詳細に検討した。その結果、ブロックの幾何的形狀特性によるブロック間の噛み合わせ効果が、被覆ブロック群の耐破壊特性に大きく寄与することが明らかになった。

今後はより詳細なブロック群破壊過程の再現を3次元モデルを導入して検討し予定である。

参 考 文 献

- 国栖広志・洞谷邦弘・清水虎重 (1986): 混成式防波堤堤頭根固め方塊ブロックの安定性に関する研究, 第33回海岸工学論文会論文集, pp. 437-441.
- 後藤仁志・酒井哲郎 (1995): 表層せん断を受ける砂層の動的挙動の数値解析, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 101-112.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2001a): 風倒木の溪流斜面崩壊過程に及ぼす影響, 水工学論文集, 第45巻, pp. 721-726.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2001b): 個別要素法に基づく移動床シミュレーターのモデル定数の最適化, 土木学会論文集, No. 691/II-57, pp. 159-164.
- 田中茂・杉本修一 (1965): 特殊消波機構を有するブロックの実験的研究, 第12回海岸工学論文会論文集, pp. 224-233.
- 原田英治・イエガネ・バクティアリ・アバース・後藤仁志・酒井哲郎 (2000): 粒状体モデルによるシートフロー漂砂の分級過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 491-495.
- 原田英治・後藤仁志・酒井哲郎 (2001): 被覆ブロックの幾何配列特性の破壊抵抗に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 936-940.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters, *Jour. Waterways and Harbors Div., ASCE*, Vol. 85, No. WW3, pp. 93-121.
- Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka (1988): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 26, pp. 751-769.