

被覆ブロックの幾何配列特性の破壊抵抗に及ぼす影響

原田 英 治*・後 藤 仁 志**・酒 井 哲 郎***

1. 緒 言

海岸堤防の主要な機能の一つは、海岸侵食の抑制である。侵食性海岸では、防波堤・離岸堤が多く設置され、水際地盤への作用波力を低減し、侵食を抑止している。防波堤・離岸堤は直接的な波力の作用を受けるので、堤体自体が激しい侵食力に曝される。それ故、堤本体が剛なコンクリート構造を有するか、完全に被覆ブロックで覆われるように設計される。さらに、堤脚部はしばしば洗掘を受けるので、消波ブロック・捨て石等の根固め工（洗掘防止策）が施される。したがって、防波堤自体が十分な耐侵食性能を発揮するには、来襲波に対して十分な安定性を有する捨て石・ブロック等の被覆材が必要不可欠である。

被覆材の安定性は、Hudson 公式 (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。例えば、Brebner and Donnelly (1962) は、振動流中に置かれた捨て石個体に作用する慣性力と個体の抗力及び水中重量との釣り合いを考慮して限界方程式を導いているし、国栖ら (1986) は、ブロックの各移動形態ごとに力の釣り合い式を求め、ブロックの安定性に対する危険率を定義している。Hudson 公式のように静的な力の釣り合いのみを論じる初期の理論は、捨て石のロッキングなど動的な特性を考慮した不安定性の議論（青木ら、1994；荒木ら、1996）へと発展し、洗練されてきたが、現在のところ単一被覆材の安定性を論じるに留まっており、ブロック群としての挙動すなわちブロック間干渉と被覆材の破壊抵抗との関連を論じたものは例がない。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ブロック群が破壊される過程を再現し、ブロック間相互作用と大規模な被覆材破壊の関連を考察する。

2. シミュレーションモデルの概要

2.1 粒 子 系

粒子要素の運動は、後藤・酒井 (1995) を参考に個別要素法を基礎とした粒状体モデルでモデル化され、ブロックは、粒子要素を連結して構成される。各ブロックの構成要素に対しては、要素の相対位置関係を変化させないための補正計算を追加して、剛体挙動させる。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 (1988) らが MPS 法で用いた浮体等の剛体モデルを準用する（後藤ら、2001）。

まず、砕石構成要素、ブロック構成要素を区別せず、ブロック構成要素間の特殊な連結関係もないものとして、全要素を個別要素法で追跡する。その結果、ブロック構成要素は初期の相対位置関係が崩れ変形するが、ブロック構成要素のみに対して座標修正計算を実施し、ブロック構成要素間の初期の相対位置を変化させないようにする（図-1 参照）。ブロック構成要素の時刻 $t + \Delta t$ での仮速度と仮座標より重心座標 r_{kg} と重心座標での並進速度ベクトル T_k 、重心回りでの角速度ベクトル R_k を算定する。

$$T_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} u_{ki} \dots \dots \dots (1)$$

$$R_k = \frac{1}{I_k} \sum_{i=1}^{N_k} u_{ki} \times (r_{ki} - r_{kg}) \dots \dots \dots (2)$$

$$r_{kg} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} r_{ki} ; I_k = \sum_{i=1}^{N_k} |r_{ki} - r_{kg}|^2 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 I_k ：ブロック構成要素の重心周りの慣性モーメント、 N_k ：ブロック構成要素の総数である。並進速度ベクトル、角速度ベクトルを用いて、剛体的挙動を満足するためのブロック k の構成要素 i の移動速度は、

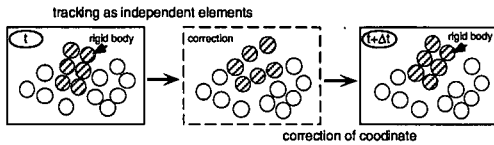
$$\dot{u}_{ki} = T_k + (r_{ki} - r_{kg}) \times R_k \dots \dots \dots (4)$$

と記述され、これを用いてブロック k の構成要素 i の座標は、

$$r_{ki}(t + \Delta t) = r_{ki}(t) + \dot{u}_{ki} \Delta t \dots \dots \dots (5)$$

と修正される。個別要素法による要素の座標の更新が行われる度に、ブロック構成要素に対してのみ座標修正を施すことにより、ブロック間相互干渉やブロックと砂粒

* 学生会員 工修 京都大学大学院博士後期課程 土木工学専攻
** 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



図一 剛体に対する座標補正

表一 計算条件

case	$T(s)$	$U_{\max}$ (cm/s)	bottom surface shape
1	1.0	130.0	regular
2		110.0	
3			irregular
4			

表二 モデル定数

k_n	$6.51 \times 10^3 \text{ N/m}$
k_s	$2.50 \times 10^3 \text{ N/m}$
η_n	$3.81 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
η_s	$2.36 \times 10^2 \text{ Ns/m}$

子の相互干渉の運動を追跡できる。

2.2 流れ系

本研究で用いる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、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルで完結させたものを用いている。また境界条件は、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壁面境界条件を与えた。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關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

底面の碎石要素には、比重 $\sigma_p/\rho=2.65$ 、ブロック要素には既往の実験（田中ら、1965；国栖ら、1986）を参考にして $\sigma_b/\rho=2.25$ の要素を用い、要素径は両方とも $d=2.0 \text{ cm}$ とした（ σ_p ：碎石要素の密度、 σ_b ：ブロック要素の密度、 ρ ：水の密度）。

被覆ブロックには、鉛直方向に3個、水平方向に5個の要素を剛体連結した矩形のものを採用した。さらに、被覆ブロックを平坦な碎石要素上に配置した場合と、被覆ブロックが僅かに不規則性を伴って碎石上に配置された場合を想定した。僅かな不規則性を伴う場合の凹凸のレベルは、碎石底面粒子の平均高さ回りに標準偏差が $d/3$ になる様に設定した。

振動流の条件を、表一に示す。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、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（2000）の設定法により定めた（表二参照）。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より、計算の安定性を考慮し $\Delta t_p=2.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ とした。本研究でのシミュレーションは、計算領域の左右を周期境界条件として扱っている。また底面形状、振動流の条件により表一に

示す4ケースのシミュレーションを実施した。

3.2 被覆ブロックの破壊過程

図二に、底面の碎石を平坦に敷き並べた上に、被覆ブロックを等間隔に配置した case 1 のシミュレーション結果を示す。初期状態から振動流を作用し始めると一斉にブロックの運動が生じる。時刻 $t=0.6 \text{ s}$ では、これまで等間隔に並んでいた被覆ブロックが、不規則な間隔で並ぶ様子がわかる。被覆ブロック間の間隔が広がる箇所では、両側に接する被覆ブロックに拘束されにくいので、振動流が作用すると被覆ブロックの運動が、活発になり、時刻 $t=1.0 \text{ s}$ の被覆ブロック No. 4, 5 に見られるように、それまでの水平運動から回転運動へと転じて、被覆ブロックの動きがより活発になる。被覆ブロックの運動が活発化すると同時に、被覆ブロック同士の衝突・反発が激しさを増し、被覆ブロックと底面に規則的に敷き並べられていた碎石粒子との干渉が次第に活発化し、ブロックが碎石粒子を牽引し始め、徐々に碎石が凹凸を形成するようになる。このような底面碎石粒子の凹凸表面の形成が、さらに被覆ブロックの運動を活発化させる。以上のように、被覆ブロックの運動が底面形状の凹凸を引き起こし、底面形状の凹凸が被覆ブロックの運動を助長するといった相互作用を反復するうちに、底面の碎石形状の凹凸が増大し、時刻 $t=5.2 \text{ s}$ で見られるように被覆ブロック（ブロック No. 2）の離脱が生じ、被覆層の破壊が生じる。以上のシミュレーション結果より、被覆ブロックの破壊を防ぎ、被覆ブロックの機能を発揮するためには、被覆ブロック間の間隙を小さくし、被覆ブロックを配置する碎石表面の凹凸を少なくすることが重要であると判断される。

次に、case 1 のシミュレーションで考察された被覆ブロックの破壊要因を詳細に検討するために、case 2, 3 のシミュレーションを実行した。被覆ブロック間の間隙の影響を確かめるため、case 2 のシミュレーションでは、ブロック No. 1 とブロック No. 16 の間に他の被覆ブロック間に比べてやや広い間隙を設けている。また碎石

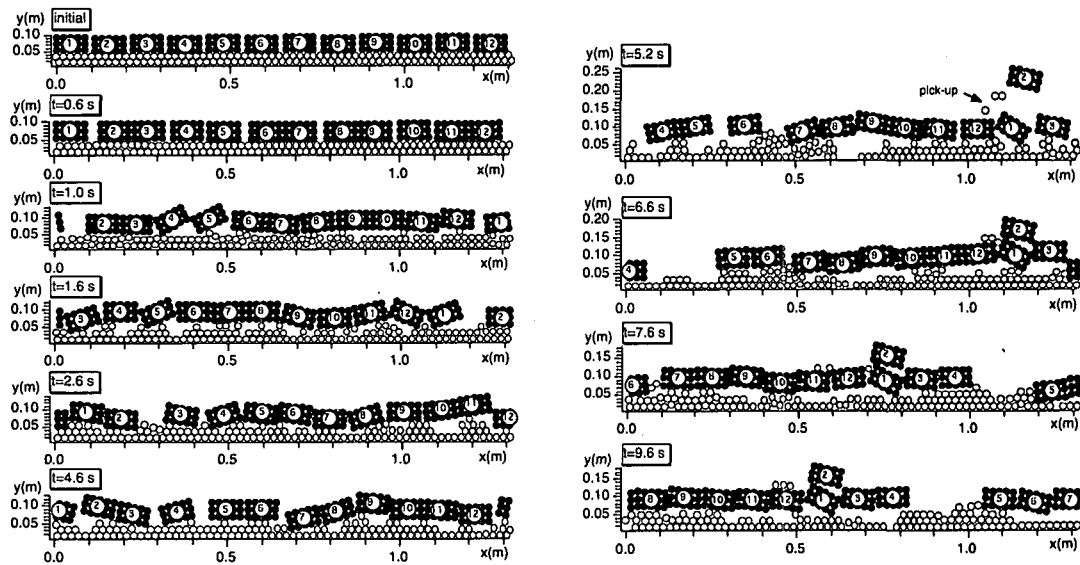


図-2 case 1 スナップショット

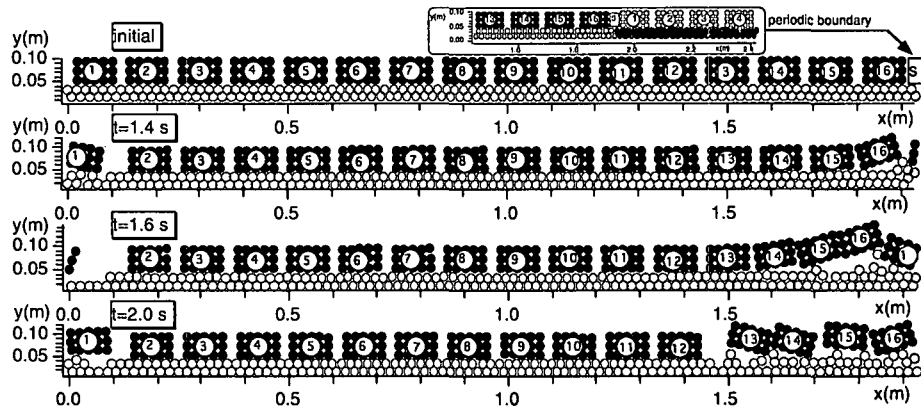


図-3 case 2 スナップショット

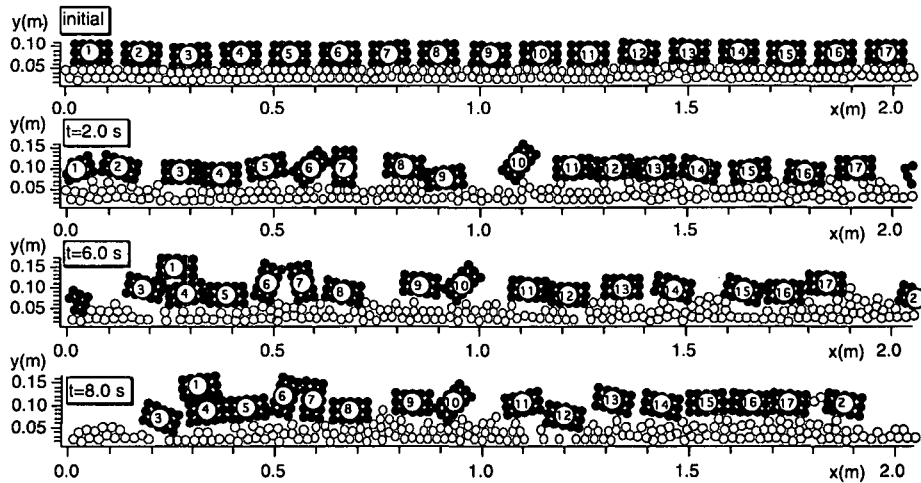


図-4 case 3 スナップショット

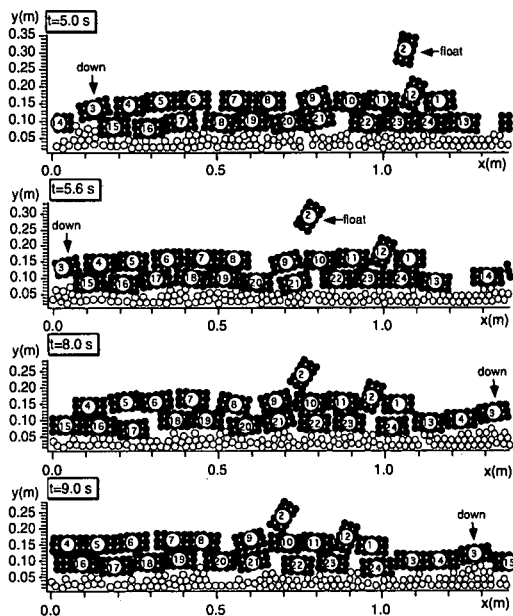
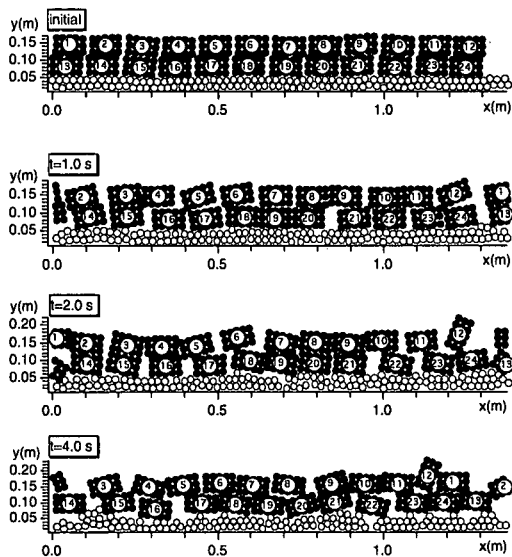


図-5 case 4 スナップショット

表面の凹凸の影響を確かめるため、case 3 のシミュレーションでは、底面碎石要素を不規則に配置した。図-3, 4 にそれぞれ case 2, 3 のシミュレーション結果を示す。図-3 より、僅かに広い被覆ブロック間の間隙 (No. 1 と No. 16 のブロックの間隙) の箇所では、他の被覆ブロック間と比較してブロックが運動しやすく、このやや広い間隙から被覆ブロックの不安定化が始まり、時間の経過とともに徐々に隣接する被覆ブロックへと不安定化の影響が波及して行く様子が分かる。また、図-4 からは、底面の碎石要素の配列の不規則性が、明らかに被覆ブロックの不安定化に大きく影響していることが理解できる。

以上のシミュレーション結果より、被覆ブロックの破壊には、被覆ブロック間の間隙と底面表層の凹凸が大きく関与していることが明らかになった。しかしながら現実には、被覆ブロック間の間隙を全く許さないように、さらに底面の碎石表層を完全に平坦にすることは不可能で、僅かな被覆ブロック間の間隙や底面の碎石表層の凹凸は存在する。このような制約条件の下でより強固な被覆機能を維持するには、被覆ブロック層厚を増加させる手段が考えられる。そこで、被覆ブロックを 2 段積にした条件でのシミュレーションを行った (case 4)。なお、先に言及した施工精度上の問題を想定し、予め底面碎石要素は不規則配置にし、被覆ブロック No. 1, 12 および被覆ブロック No. 13, 24 の間に他の被覆ブロック間の間隙より広い間隙を設けた。

図-5 に、case 4 のシミュレーション結果を示す。図-2 に示した 1 段積の被覆ブロックの場合と比較して、

case 4 の上段の被覆ブロックは速い流速にさらされ、活発に運動するが、図-2 の時刻 $t=5.2$ s に見られた碎石要素の表層への pick-up は、被覆ブロックを 2 段積にした case 4 のシミュレーションでは見られない。これは、case 4 では被覆ブロック間に間隙があり、かつ底面表層の凹凸があるという被覆ブロックが不安定化し易い条件であるにもかかわらず、2 段積の被覆ブロックにしたことで、下段の被覆ブロック間に広い間隙が生じて上段からのブロックが下段に供給され、間隙を埋めることで、碎石要素の配列の不安定化を抑制しているためである。上段からの下段への被覆ブロックの供給は、図-5 の被覆ブロック No. 3 に表れている。

被覆ブロックの運動特性の変化を定量的に把握するため、図-5 の被覆ブロック No. 2, 3 を例に、鉛直方向の重心 (y_{gc}) と回転角 (θ) の時系列を図-6 に示す。被覆ブロック No. 2 は、小刻みな上下運動を伴い時刻 $t=5.0$ s 前後で反時計回りに大きく回転し、その後ブロックの傾きを維持しつつ上下方向に小刻みな運動をしている。また、時刻 $t=5.0-5.5$ s では、高さ $y=0.3$ m 以上で流れの影響を受け回転を伴い浮遊している様子も理解できる。被覆ブロック No. 3 は、時刻 $t=4.0$ s までは速い流速にさらされていることもあり、回転を伴った上下運動しているが、時刻 $t=5.0$ s 付近より下層に向かって徐々に下降していく。特に、時刻 $t=8.0$ s 付近から回転角の変化が活発化しているが、これは碎石の底面表層形状の起伏との衝突を反映したものと考えられる。

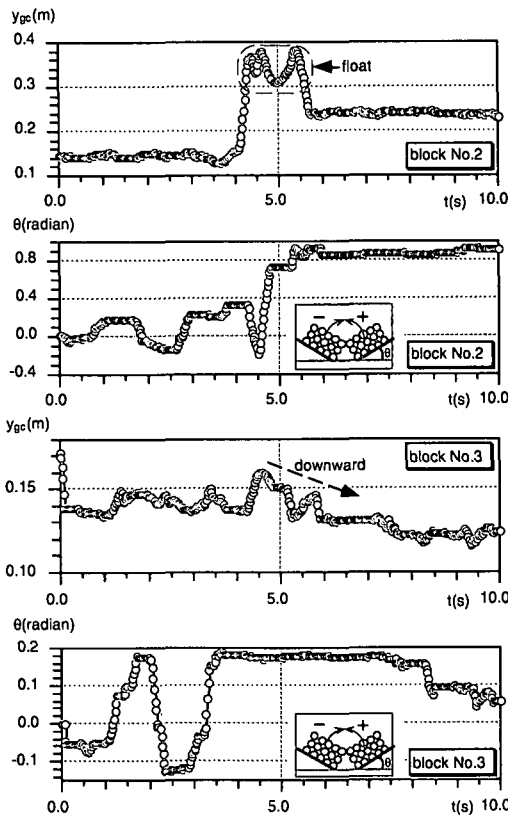


図-6 被覆ブロックの重心・回転

4. 結 語

本研究では、個別要素法型の粒状体モデルに、個々の要素を剛体連結させる剛体モジュールを組み込んで任意形状の物体間の相互作用を陽に表現可能にしたコードを用いて、振動流下での被覆ブロックの運動のシミュレーションを実施した。

本研究で得られた主要な成果を以下に要約する。

被覆ブロックの破壊防止のためには、できるだけ被覆ブロック間の間隙を小さくすること、またできる限り底面表層の凹凸を抑えることが重要であることが明らかになった。

被覆ブロックの破壊は、流れが被覆ブロックに作用し被覆ブロックの衝突・反発が生じ、それに伴って底面の碎石との相互干渉が誘発され、底面形状の凹凸ができる。この底面の凹凸がさらに被覆ブロックの運動を活発化させ、底面との干渉が増加、底面凹凸の起伏の増大へと繋がる。この一連のサイクルによって被覆ブロックの活発な運動に伴い被覆ブロックの破壊が起こることを示した(図-7 参照)。

これまでの研究では、被覆ブロックの移動限界や安定基準について単一のブロック等を用いた指標が示されてお

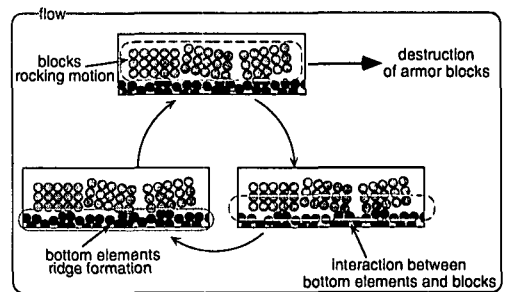


図-7 被覆ブロックの破壊への流れ

り、ブロック間の相互干渉まで考慮されていなかったが、本研究で示したように、ブロック間衝突を陽に取り扱える個別要素法型の粒状体モデルを使用することによって、碎石上に配置されたブロック群が破壊する過程が再現できる。通常の設計にあたっては、設計波力に対して単一ブロックの移動が生じないことが条件であり、多数ブロックが連成して動くような破局的な状態をそもそも対象としていない。しかし、いわゆる破壊プロセスを追跡できるフレームワークを有することで、想定外の極値的波力に対する被覆層の振る舞いを確認することができる。

参 考 文 献

- 宵木伸一・樺木 亨・伊藤禎和 (1994): 振動外力を受ける斜面上の捨石の挙動に関する数値的検討, 第49回年次学術講演会講演概要集, pp. 826-827.
- 荒木進歩・伊藤禎和・出口一郎 (1996): 動的応答を考慮した捨石防波堤の平衡勾配について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 826-830.
- 国栖広志・洞谷邦弘・清水虎重 (1986): 混成式防波堤堤頭根間め方塊ブロックの安定性に関する研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 437-441.
- 土屋義人・上田康裕・大下哲則 (1984): 漂砂の移動限界の理論, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 272-276.
- 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 (2000): 数値移動床による混合粒径流砂の流送過程のシミュレーション, 水工学論文集, 第44巻, pp. 665-670.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2001): 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.
- 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回海岸工学講演会論文集, pp. 224-233.
- 原田英治・イエガネ・バクティアリ・アバズ・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.
- Brebnar and Donnelly (1962): Laboratory Study of Rubble Foundation for Vertical Breakwater, Proc. of 8th Conference on Coastal Engineering, pp. 408-429.
- 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., Nobe, A. and Oka, Y. (1988): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 26, pp. 751-769.