

3 次元個別要素法による捨石潜堤の変形予測の試み

荒木進歩*・柳原哲也**・出口一郎***

3 次元個別要素法と断面 2 次元個別要素法により, 捨石潜堤の変形計算を行った。捨石に作用する波力は, 平面実験と断面 2 次元実験による潜堤表面での流速測定結果から算定した。断面 2 次元実験で測定された流速を用い, 潜堤中央部の変形計算を 3 次元モデルと断面 2 次元モデルとで行うことにより, 捨石の形状および配列状況の 3 次元性が堤体の変形および捨石の移動に及ぼす影響を検討した。その結果, 捨石の形状および配列状況の 3 次元性は捨石の移動方向に若干の影響を及ぼすことが分かった。その一方で, 外力の算定精度の影響が顕著に現れる結果が得られた。

1. はじめに

高波浪時の捨石構造物の変形や, 施工期間中における被覆工施工前の捨石マウンドの変形を精度良く予測することが求められている。信頼性設計や性能設計など設計法の合理化, また効率の良い施工のためには, 変形予測が不可欠なためである。水理模型実験による検討は従来からなされているが, 実験条件や実験施設の関係等から数値的な検討・予測が必要になる場合もあり, 数値予測手法を確立させる必要がある。

捨石構造物等の変形解析には個別要素法が適用され始めており, 断面 2 次元での検討が行われている (例えば荒木・出口, 1997; 荒木ら, 2000; 伊藤ら, 2000; 伊藤ら, 2001, 2002)。3 次元個別要素法は, 重松ら (2000) が直投土砂の沈降挙動の検討に, また後藤ら (2002) がシートフロー層の鉛直分級過程の解明に適用しているが, 捨石構造物の変形に適用された例はない。3 次元モデルの個別要素法による変形予測が可能となれば, 構造物堤頭部の変形を検討する際, 水理模型実験 (平面実験) に伴う労力を大幅に緩和することにつながる。また一方で, 構造物中央部においても被覆工の形状および配列状況の 3 次元性が及ぼす影響を検討するためにも 3 次元モデルが必要となる。

本研究では, 3 次元個別要素法による捨石構造物の変形予測手法の確立を目指し, 捨石潜堤中央部の変形計算を試みる。堤体中央部の変形については断面 2 次元モデルとの比較も行い, 捨石の移動および堤体の変形に及ぼす捨石形状の 3 次元性 (球か円柱か), また配列状況の 3 次元性の影響について検討を加える。

2. 3 次元個別要素法

(1) 基礎式

3 次元個別要素法の基礎式は並進および回転の運動方程式であり, 要素 i に関する並進の運動方程式は次式で

表される。

$$(m_i + m'_i) \ddot{u}_{pi} = F_{xi} \dots \dots \dots (1a)$$

$$(m_i + m'_i) \ddot{v}_{pi} = F_{yi} \dots \dots \dots (1b)$$

$$(m_i + m'_i) \ddot{w}_{pi} = F_{zi} \dots \dots \dots (1c)$$

また, 要素 i に関する回転の運動方程式は次式で表される。

$$(I_i + I'_i) \ddot{\xi}_{pi} = M_{xi} \dots \dots \dots (2a)$$

$$(I_i + I'_i) \ddot{\phi}_{pi} = M_{yi} \dots \dots \dots (2b)$$

$$(I_i + I'_i) \ddot{\zeta}_{pi} = M_{zi} \dots \dots \dots (2c)$$

ここに, m_i および m'_i : 要素 i の質量および付加質量, u_{pi} , v_{pi} および w_{pi} : 要素 i の x , y および z 軸方向の速度成分, F_{xi} , F_{yi} および F_{zi} : 要素 i に作用する力の x , y および z 軸方向成分, I_i および I'_i : 要素 i の慣性モーメントおよび付加慣性モーメント, ξ_{pi} , ϕ_{pi} および ζ_{pi} : 要素 i の x , y および z 軸方向の角速度, M_{xi} , M_{yi} および M_{zi} : 要素 i に作用する x , y および z 軸回りのモーメントである。

また, F_{xi} , F_{yi} , F_{zi} , M_{xi} , M_{yi} および M_{zi} は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \end{bmatrix} = \sum_j \begin{bmatrix} F_{xij} \\ F_{yij} \\ F_{zij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \\ f_{zi} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

$$\begin{bmatrix} M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{bmatrix} = \sum_j \begin{bmatrix} M_{xij} \\ M_{yij} \\ M_{zij} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4)$$

ここに, F_{xij} , F_{yij} および F_{zij} : 要素 i に接触している要素 j から受ける要素間作用力の x , y および z 方向成分, f_{xi} , f_{yi} および f_{zi} : 要素 i に作用する流体力の x , y および z 方向成分, M_{xij} , M_{yij} および M_{zij} : 要素 i に接触している要素 j から受ける x , y および z 軸回りのモーメントである。

(2) 要素の接触

二つの要素接触した時の取り扱い, 吉田ら (1988) および重松ら (2000) と同様に, 局所座標系を導入することにより定式化した。すなわち, 要素 $i(x_i, y_i, z_i)$ と要素 $j(x_j, y_j, z_j)$ が接触するとき, 要素 i の中心を原点とし, 要素 j の中心を通る方向を X_i 軸, X_i 軸と直交する平面と

* 正会員 博(工) 大阪大学助手 大学院工学研究科
** 修(工) 清水建設(株) 土木事業本部
*** 正会員 工 博 大阪大学教授 大学院工学研究科

xy 平面に平行な任意の平面との交線の中で、要素 i の中心を通るものを Y_i 軸、また X_i 軸および Y_i 軸と右手系をなすものを Z_i 軸とする局所座標系 $[X_i, Y_i, Z_i]$ 、および要素 j に関して同様に設定した局所座標系 $[X_j, Y_j, Z_j]$ を導入した。

要素が接触する際の計算手順は以下の通りである。

- ①前時間ステップの要素 i および j の変位から、二要素の相対変位増分および相対回転変位増分を局所座標系で算出
- ②局所座標表示された二要素の相対変位増分および相対回転変位増分から要素間の作用力を算定
- ③要素間の作用力を一般座標系に変換し、要素 j 以外の接触している要素からの作用力、波力等と合わせて要素 i に作用する外力とし、要素 i の運動を一般座標系で追跡

(3) 要素間の作用力

要素が接触したときに生じる法線方向の作用力は、反力 e_x を生じる弾性バネ (バネ定数 K_n) と反力 d_x を生じる粘性ダッシュポット (粘性減衰係数 η_n) の並列配置により、圧縮を正として次式で表される。

$$[F_x]_t = [e_x]_t + [d_x]_t \\ = ([e_x]_{t-\Delta t} + K_n \Delta X_i) + \eta_n (\Delta X_i / \Delta t) \quad \cdots (5)$$

ただし、 $[e_x]_t < 0$ のとき

$$[e_x]_t = [d_x]_t = 0 \quad \cdots (6)$$

接線方向の作用力も同様に、反力 $e_{Y(Z)}$ を生じる弾性バネ (バネ定数 K_s) と反力 $d_{Y(Z)}$ を生じる粘性ダッシュポット (粘性減衰係数 η_s) の並列配置により、 Y_i 軸または Z_i 軸の正方向に変位が生じるようなせん断力が生じる場合を正として次式で表される。ここで、 $Y(Z)$ は Y または Z を意味する。

$$[F_{Y(Z)}]_t = [e_{Y(Z)}]_t + [d_{Y(Z)}]_t \\ = ([e_{Y(Z)}]_{t-\Delta t} + K_s \Delta Y(Z)_i) + \eta_s (\Delta Y(Z)_i / \Delta t) \quad \cdots (7)$$

ただし、 $[e_x]_t < 0$ のとき

$$[e_{Y(Z)}]_t = [d_{Y(Z)}]_t = 0 \quad \cdots (8)$$

$||[e_{Y(Z)}]_t| > \mu [e_x]_t$ のとき (μ は摩擦係数)

$$[e_{Y(Z)}]_t = \mu [e_x]_t \cdot \text{SIGN}([e_{Y(Z)}]_t) \quad \cdots (9)$$

$$[d_{Y(Z)}]_t = 0 \quad \cdots (10)$$

ねじりモーメントについても、反力 $e_{Y(Z)}$ を生じる弾性バネ (バネ定数 K_r) と反力 $d_{Y(Z)}$ を生じる粘性ダッシュポット (粘性減衰係数 η_r) の並列配置により、 X_i 軸の正方向に右ネジを回す向きを正として、次式で表される。

$$[M_r]_t = [e_r]_t + [d_r]_t \\ = ([e_r]_{t-\Delta t} + K_r r^2 \Delta \Phi) + \eta_r r^2 (\Delta \Phi / \Delta t) \quad \cdots (11)$$

$$\Delta \Phi = (l_i, m_i, n_i) \begin{bmatrix} \Delta \phi_{xi} - \Delta \phi_{xj} \\ \Delta \phi_{yi} - \Delta \phi_{yj} \\ \Delta \phi_{zi} - \Delta \phi_{zj} \end{bmatrix} \quad \cdots (12)$$

ただし、 $[e_x]_t < 0$ のとき

$$[e_r]_t = [d_r]_t = 0 \quad \cdots (13)$$

3. 水粒子速度の測定

(1) 平面実験

捨石 (要素) に作用する波力を Morison 式により算定するため、水理実験により捨石潜堤表面上の水粒子速度を測定した。平面実験は東洋建設株式会社鳴尾研究所の平面水槽を用いて行った。水槽内には平均勾配 1/50 の固定床が設置されており、図-1 に示すように天端幅 $B=50$ cm、堤長 $L_r=300$ cm、天端水深 $R=5$ cm、法先水深 $h=20$ cm、法面勾配 1:3 の捨石潜堤を $D_{50}=0.75$ cm の碎石により作製した。入射波は波高 $H=8.8$ cm、周期 $T=1.5$ s の規則波で、堤体に対して直角に入射させた。この入射波条件では堤体表層の捨石が容易に移動するため、堤体の表層を質量 30~40 g のブロックで被覆した。

水粒子速度の測定には水平 2 成分電磁流速計を用い、初期形状の堤体表面より 3 cm 上方の岸沖、沿岸水粒子速度 u 、 v を岸沖方向に 10 cm 間隔、沿岸方向に 25 cm 間隔、計測時間間隔 0.05 s で測定した。ただし、直角入射であるので、沖側から見て左半分の堤体上でのみ測定を行った。平面実験では、沖側法肩を原点とし、岸向きに x 軸、潜堤堤体中央を原点とし沿岸方向に y 軸を取る。

図-2 に、堤体中央部 ($y/L=0.0$) で測定された岸沖および沿岸方向流速 u 、 v の時系列の位相平均を、天端上での線形長波の波速で無次元化して示す (L は法先での入射波の波長)。岸沖方向流速 u の最大値は、沖側法肩からやや岸寄りの $x/L=0.1$ 付近でピークとなっている。また、どの測定地点においても岸向き (正方向) の平均流成分が顕著であり、沖向き (負方向) に流れが生じている時間は非常に短い。一方、沿岸方向流速 v は岸沖方向流速 u と比較すると、その大きさは非常に小さい。

また図示しないが、潜堤端部 ($y/L=-0.75$) の測定結

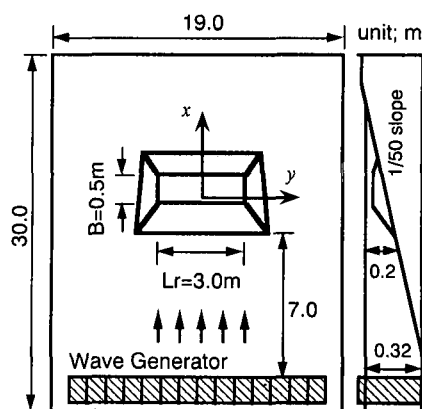


図-1 平面水槽

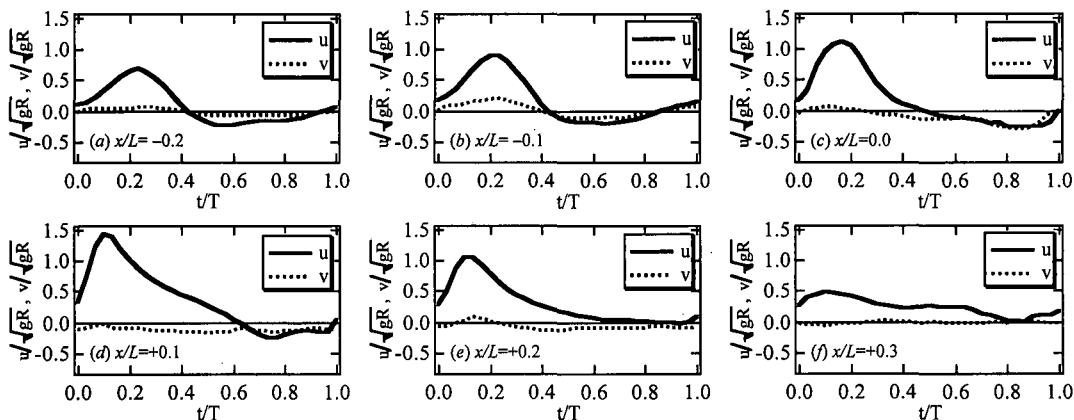


図-2 平面実験での堤体中央部 ($y/L=0.0$) で測定された流速 ($H=8.8$ cm, $T=1.5$ s, $B/L=0.25$)

果を見ると、岸沖方向流速 u の岸向き平均流成分が堤体中央部と同程度に見られ、沿岸方向流速 v は沖側および岸側法肩付近 ($x/L=0.0$ および 0.4) でやや大きくなるが、それでも v の最大値は u の最大値の $1/4 \sim 1/3$ 程度であった。

(2) 断面2次元実験

断面2次元実験は大阪大学工学部の屋内断面2次元実験水槽を用いて行った。図-3に示すように平坦床上に平面実験と同寸の捨石潜堤を $D_{50}=0.71$ cmの砕石により作製した。堤体の表層は質量 $30 \sim 40$ gの砕石で被覆した。ただし、捨石潜堤は平坦床の上に設置した。

水粒子速度の測定は、岸沖方向に 10 cm 間隔、計測時間間隔 0.05 s で、水槽中央の1測線上でのみ行った。その他の実験手順および実験波は平面実験と同様とした。なお、水槽幅は 70 cm である。

図-4に、天端上での線形長波の波速で無次元化した流速 u の時系列の位相平均を示す。 u の最大値は沖側法

肩 ($x/L=0.0$) 付近でピークとなっており、平面実験の結果と少しずれが見られる。平均流成分も平面実験結果と比較すると非常に小さく、全体的には沖向き(負方向)に作用している。

4. 計算結果

(1) 計算条件

潜堤中央部の変形計算を、3次元モデルと断面2次元モデルを用いて行った。3次元モデルおよび断面2次元モデルでは、それぞれ捨石を直径 0.75 cmの球および円

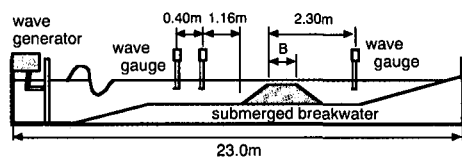


図-3 断面2次元水槽

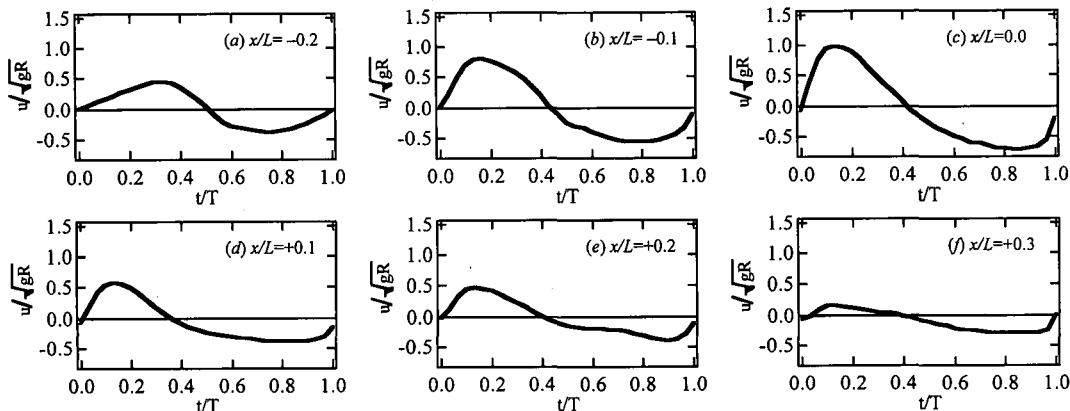


図-4 断面2次元実験で測定された流速 ($H=8.2$ cm, $T=1.5$ s, $B/L=0.25$)

柱とし、3次元モデルでは沿岸方向に捨石5列分の幅を計算領域として捨石(要素)を配置した。計算ケースを表-1に示す。3次元モデルによる変形計算では、断面2次元実験で測定された流速を用いた計算も行った。これにより、断面2次元モデルによる計算結果との比較から、捨石の形状および配列状況の3次元性が捨石の移動および堤体の変形に及ぼす影響を検討した。なお、沿岸方向の境界(岸冲断面)は周期境界とした。

計算時間間隔 Δt は 5.0×10^{-6} s とし、安定した計算が行えるようバネ定数と粘性減衰係数は表-2に示す値を用いた。ただし、今回の計算では、ねじりモーメントは考慮せず $K_r=0$, $\eta_r=0$ とした。これらの定数は3次元モデルと断面2次元モデルとで同一の値を用いた。また、式(1a)~(1c)中の付加質量は $m'=0.5m$, 式(2a)~(2c)中の付加慣性モーメントは $I'=0$ とした。波力算定のMorison式中の抗力係数 C_D および慣性力係数 C_M は水谷ら(1991)を参考に $C_D=0.7$, $C_M=1.2$ とし、波力の空間的な変化は、波形が天端水深に対する線形長波の波速で伝播するものとして考慮した。また、堤体内の捨石には、堤体表層からの深さに応じて指数関数的に減少さ

せた波力を作用させた。なお、水理実験で測定された流速の値をそのまま用いると変形が過大となるため、隣接する捨石による遮蔽効果を考慮し、測定値の0.8倍を入力した。

以上の条件で、Case 1~3の計算を5周期間行った。

(2) 3次元性の影響

図-5および図-6に、それぞれCase 1およびCase 2の計算結果(岸冲断面)を示す。横軸の正方向が波の進行方向であり、破線は初期形状を示す。また、図-5の3次元モデルによる結果は、すべての捨石を1枚の岸冲断面に投射している。どちらの結果においても沖側法肩に変形が見られるが、Case 2(図-6)の断面2次元モデルのほうが沖側法肩での変形が大きく、捨石が斜面下方に転落しやすい傾向がある。表層を被覆せずに断面2次元実験を行うと、沖側法肩付近の捨石も含め、ほとんどの捨石は岸向きに移動していたため、3次元モデルのほうが再現性が高いことが分かる。また、岸側法肩ではどちらの結果においても変形はあまり見られない。したがって、変形の大まかな傾向は両モデルで一致するが、捨石の移動方向には捨石の形状(球形あるいは円柱)および配列状況の3次元性の影響が若干見られる。

図-7にCase 3の計算結果(岸冲断面)を示す。Case 1(図-5)とは逆に、沖側法肩付近の変形はわずかであるが、堤体岸側での変形が大きくなっている。これは実験時にも見られた傾向であるが、水理実験で測定された流速(図-2および図-4)の相違が大きく影響していると考えられる。かみ合わせ効果のある異形ブロックをモデル化した場合の個別要素法による計算においては形状や配列状況の3次元性の影響は大きいと考えられる。しかし、単純な形状(球形および円柱)を用いた個別要素法による堤体中央部の計算では、外力の算定精度と比較すると形状や配列状況の3次元性の影響はそれほど大きくないと思われる。

表-1 計算ケース

	DEM モデル	作実流速
Case 1	3 次元	断面 2 次元実験で測定された流速
Case 2	2 次元	断面 2 次元実験で測定された流速
Case 3	3 次元	平面実験で測定された流速

表-2 計算で用いた諸定数

バネ定数	K_n	$1.82 \times 10^3 \text{ N/m}$
	K_s	$3.64 \times 10^2 \text{ N/m}$
粘性減衰係数	η_n	14.7 Ns/m
	η_s	6.57 Ns/m
計算時間間隔	Δt	$5.0 \times 10^{-6} \text{ s}$

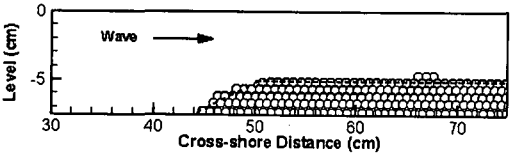


図-5 Case 1の計算結果(5波入射後)

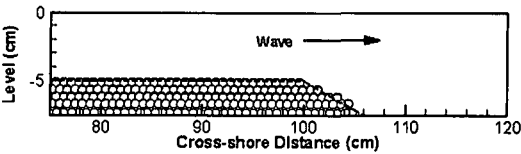
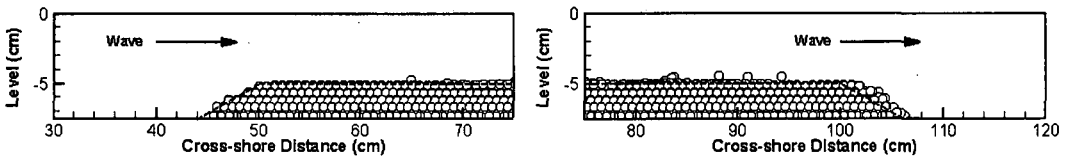


図-6 Case 2の計算結果(5波入射後)



図—7 Case 3 の計算結果 (5 波入射後)

なお、入射波を十分に作用させたときの潜堤の変形に関する実験結果については、荒木ら (2003) が報告している。

5. ま と め

本研究では、3次元個別要素法を用いて捨石潜堤の変形計算を行った。また、個別要素法の3次元モデルと断面2次元モデル、および平面実験および断面2次元実験で測定された流速を組み合わせることで、捨石の移動に及ぼす捨石形状および配列状況を検討した。その結果、球形および円柱のような単純な形状を用いた場合には、捨石の形状および配列状況の3次元性の影響も見られるが、外力の算定精度と比較するとそれほど大きくないことが予想された。今後は、3次元個別要素法による捨石潜堤変形計算を実験結果と比較し、計算精度を向上させる所存である。

謝辞：水粒子速度の平面実験は東洋建設株式会社鳴尾研究所の実験施設を用い、同社の金澤 剛氏、小澤貴生氏、松村章子氏にはお力添え頂いた。ここに記して謝意を表します。また、実験の遂行およびデータ整理には大阪大学大学院工学研究科の新島 宏君・麓 博史君に多大なご協力を頂いた。また、本研究の一部は石原藤次郎奨学基金の助成を受けて行った。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 荒木進歩・出口一郎 (1997): 捨石防波堤の断面変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 531-535.
- 荒木進歩・藤原由康・宮崎敏弘・出口一郎 (2000): 個別要素法を用いた捨石潜堤の断面変形計算, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 761-765.
- 荒木進歩・柳原哲也・新島 宏・麓 博史・出口一郎 (2003): 捨石潜堤の変形に関する平面的な効果, 海洋開発論文集, Vol. 19, pp. 201-206.
- 伊藤一教・東江隆夫・勝井秀博 (2000): DEM法とVOF法を用いた粒状体構造物の破壊シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 746-750.
- 伊藤一教・樋口雄一・東江隆夫・勝井秀博 (2001): 個別要素法に基づく捨石のランダム性を考慮した潜堤の変形予測手法, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 806-810.
- 伊藤一教・樋口雄一・東江隆夫・勝井秀博 (2002): 確率理論に基づく個別要素法の拡張, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 771-775.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2002): 3次元数値移動床によるシートフロー層の鉛直分級課程の数値解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 471-475.
- 重松孝昌・小田一紀・田野雅彦・廣瀬真由 (2000): 個別要素法による水中沈降粒子群の3次元挙動に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 996-1000.
- 水谷法美・岩田好一朗・Teofilo Monge Rufin, Jr.・倉田克彦 (1991): 幅広潜堤上の被覆材に作用する波力の特性と移動限界に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 591-595.
- 吉田 博・梶谷 浩・今井和昭 (1988): 個別要素法による敷砂上への落石の衝撃特性に関する解析, 土木学会論文集, 第392号, pp. 297-306.