

個別要素法による表層捨石の質量増加が捨石潜堤の 変形に及ぼす影響の検討

荒 木 進 歩*・出 口 一 郎**

3次元個別要素法を用いて捨石潜堤の中央部と端部の変形計算を行った。堤体中央部の変形計算については、計算領域として切り出した岸沖断面を周期境界とした場合と固定壁とした場合の2通りの計算を行ったが、後者の計算では固定壁との摩擦やかみ合わせの効果が強く現れたため、固定壁付近の球体の移動が制限された。堤体端部の計算では、中央部より変形が大きくなる現象が再現されなかった。これは粒子の配置状況に起因すると考えられる。表層捨石の質量増加が潜堤の変形に及ぼす影響は捨石の密度を増加させた場合と粒径を増加させた場合を検討した結果、密度を増加させた場合のほうが捨石の移動個数が大きく減少した。

1. はじめに

捨石潜堤や消波ブロック被覆堤等の構造物への性能設計や信頼性設計などの高度化・合理化された設計法の適用、また効率よい施工が求められており、高波浪時の構造物の変形や、施工期間中における被覆工施工前の変形を精度よく予測することが必要となっている。ここ数年では、水理実験に伴う労力の緩和、多様な条件に対する検討、縮尺効果の回避等の目的から数値的な変形予測手法の開発が期待され、変形計算が試みられている。

変形計算の手法は主として個別要素法が用いられており、断面2次元での捨石構造物の変形計算(例えば、荒木ら, 1997; 伊藤ら, 2000)、断面2次元でのケーソンの滑動や消波ブロック被覆部の変形計算(例えば、藤井ら, 2001)、ブロック被覆部の変形・沈下過程の3次元計算(例えば、原田ら, 2002)、3次元での捨石潜堤主幹部の変形を計算した荒木ら(2003 a)の研究例がある。伊藤ら(2002)は個別要素法に確率理論を適用した確率個別要素法による計算も行っている。個別要素法による3次元変形計算も行われてはいるが、構造物の堤頭部(端部)の捨石移動および変形計算は行われていない。

そこで本研究では、捨石潜堤の堤体端部および中央部の捨石移動や変形を3次元個別要素法を用いて計算する。さらに、表層の捨石の質量増加が堤体の変形に及ぼす影響を、密度の増加と粒径の増加の両面から検討する。

2. 3次元個別要素法の概要

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。

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

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

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

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。

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

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

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

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。

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

$$\begin{bmatrix} M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{bmatrix} = \sum_j \begin{bmatrix} M_{xij} \\ M_{yij} \\ M_{zij} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3b)$$

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*に作用する波力の*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。

二つの要素が接触したときの取り扱いには吉田ら(1988)および重松ら(2000)と同様に局所座標系を導入し、要素間の作用力は弾性のパネとダッシュポットで表現した。要素に作用する波力はMorison式で算定した。

3. 計算条件

(1) 捨石潜堤表面上での流速

捨石に作用する波力の算定にMorison式を用いるた

* 正会員 博(工) 大阪大学講師 大学院工学研究科

** 正会員 工 博 大阪大学教授 大学院工学研究科

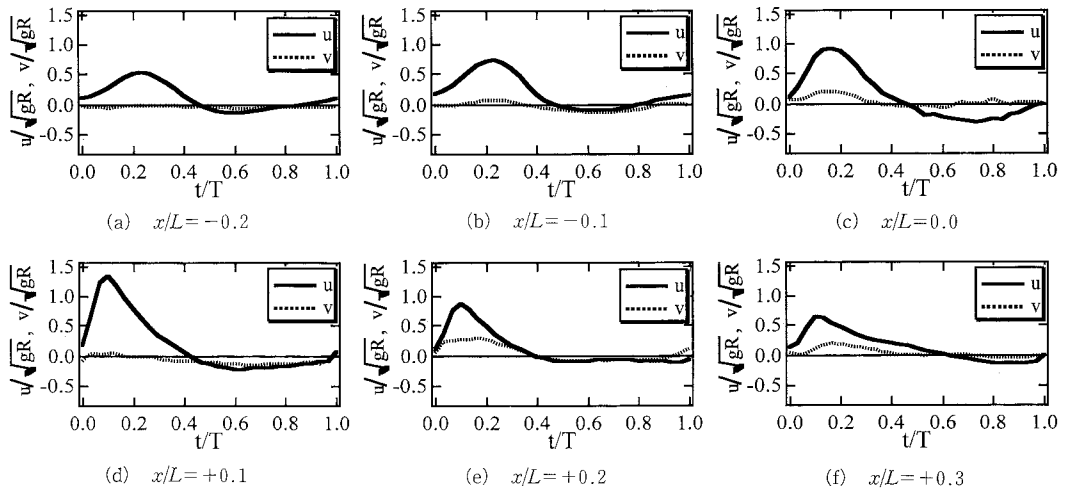


図-1 堤体端部 ($y/L = -0.75$) で測定された流速 ($H = 8.8$ cm, $T = 1.5$ s, $B/L = 0.25$)

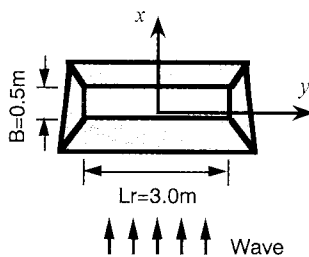


図-2 座標系 (x, y)

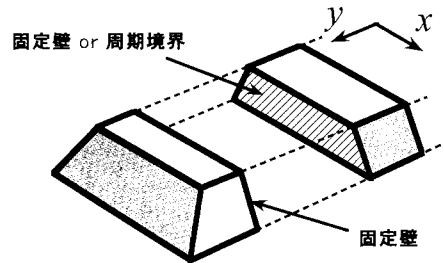


図-3 計算対象領域

め、堤体表面上での流速が必要となる。ここでは、荒木ら (2003b) が測定した堤体表面上での流速実験を用いることにする。代表粒径 $D_{50} = 0.75$ cm の砕石で作製された天端幅 50 cm、堤長 300 cm、天端水深 5 cm、法先水深 20 cm、法面勾配 1:3 の捨石潜堤上で電磁流速計により流速を測定した。流速の測定点は堤体表面から 3 cm 上方である。

堤体中央部での流速の時系列は既に図示しているので、入射波高 $H = 8.8$ cm、周期 $T = 1.5$ s の規則波を入射させた際に堤体端部 $y = -150$ cm で測定された流速波形のみを図-1 に示す。座標系は図-2 に示す通り、沖側法肩を原点として岸向きに x 軸、潜堤堤体中央を原点として沿岸方向に y 軸を取る。 u 、 v はそれぞれ岸沖、沿岸方向流速で、天端上での線形長波の波速で無次元化している (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 $x/L = +0.1$ 付近でピークとなること、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ることが分かる。また、沿岸方向流速 v は沖側斜面 ($x/L < 0$) ではほとんど発生していないが、岸側法肩付近 ($x/L = +0.2 \sim 0.3$) での v の最大値は岸沖方向流速 u の最大値の $1/4 \sim 1/3$ 程度と

なっている。

なお、堤体中央部 ($y/L = 0.0$) で測定された流速については、岸沖方向流速 u は各測定点とも堤体端部 ($y/L = -0.75$) と同程度の値、沿岸方向流速 v はすべての測定点で非常に小さな値であった。

(2) 堤体の岸沖断面

堤体全体を一度に計算するのは計算負荷が大きいため、中央部と端部に分割し、それぞれの部分の変形計算を行うこととした。

図-3 に計算対象領域の模式図を示す。堤体端部の変形計算では、捨石 3 個分の天端幅、沖側・岸側斜面および堤体側面を対象とし、切り出した岸沖断面には移動しない要素を配置して固定壁を形成した。堤体中央部の変形計算では、捨石 4 個分の天端幅および沖側・岸側斜面を対象としたが、切り出した岸沖断面の取り扱い、端部の計算と同様に移動しない要素を配置して固定壁とした場合と、周期境界として一方の岸沖断面から飛び出した要素がもう一方の岸沖断面から流入するとした場合の 2 通りを計算した。

(3) その他

捨石潜堤は均一な粒径 $D_0 = 0.75$ cm の球体で構築し

た、図-4に球体の配列状況を例示する。計算時間間隔 Δt は 5.0×10^{-6} s とし、安定な計算が行えるようバネ定数と粘性減衰係数は表-1に示す値を用いた。ただし、ねじりモーメントは考慮していない。式(1a)～(1c)中の付加質量は $m' = 0.5 m$ 、式(2a)～(2c)中の付加慣性モーメントは $I' = 0$ とした。球体に作用する波力算定の Morison 式中の係数は抗力係数 $C_D = 0.5$ 、慣性力係数 $C_M = 1.2$ 、揚力係数 $C_L = 0.4$ とし、これらの値の周りに標準偏差 0.05 で正規分布する変数とした。また、伊藤ら(2001)を参考に隣接する球体による遮蔽効果も取り入れた。波力の空間的な変化は波形が線形長波の波速で伝播するものとして考慮し、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て波力を作用させた。また、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になるため、流速測定点と堤体表層の差を考慮し、測定値の 0.6 倍を入力した。以上の計算条件で流速波形 5 周期分の変形計算を行った。

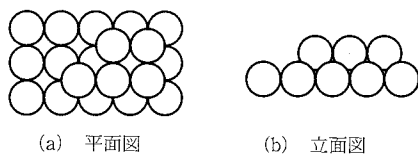


図-4 球体の配列状況

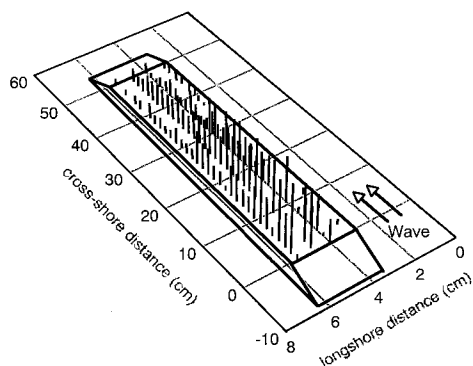
表-1 計算で用いた諸定数

Spring Constant	K_n	2.73×10^5 N/m
	K_s	1.56×10^4 N/m
Damping Coefficient	η_n	5.7×10 Ns/m
	η_s	1.0×10 Ns/m
Time Increment	Δt	5.0×10^{-6} s

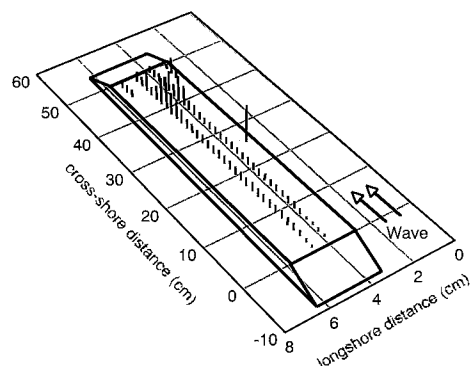
4. 設定した条件の検証

図-5に堤体中央部および堤体端部において計算された表層第1層の捨石移動量の空間分布を示す。図-5(a)は切り出した岸沖断面を周期境界とした場合の中央部での計算結果、図-5(b)は切り出した岸沖断面を固定壁とした場合の中央部での計算結果、図-5(c)は端部での計算結果である。図中には太実線で計算対象領域の形状(天端面付近のみ)を示しており、捨石の岸向きの移動量を鉛直方向の実線の長さで表し、捨石の初期位置にプロットしている。図-5(a)では天端上で全体的に捨石が移動し、沖側での移動量がやや多くなっている。図-5(b)および(c)では天端上の沖側での捨石移動量は小さく、堤体に変形が生じるような捨石移動は天端上の岸側で多く見られる。実験においても岸側法肩付近の捨石は移動していたが、堤体が侵食されるのは沖側法肩付近である。

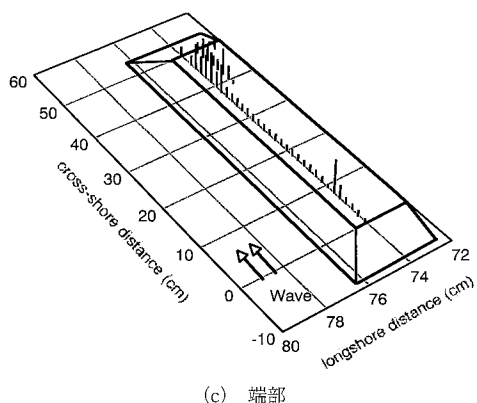
捨石に作用する波力の算定方法、隣接する捨石による遮蔽効果等を再考し、再現性を高める必要がある。また、図-5(b)の切り出した岸沖断面を固定壁とした場合の計算結果では、固定壁付近の捨石の移動量が小さく、図-5(a)の周期境界を用いた場合の計算結果との違いが顕著である。これは固定壁として配置した球体と計算領域内の球体との摩擦やかみ合わせが強く現れたことによ



(a) 中央部(岸沖断面を周期境界とした場合)



(b) 中央部(岸沖断面を固定壁とした場合)



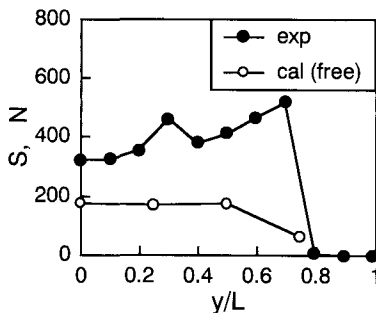
(c) 端部

図-5 捨石移動量の空間分布

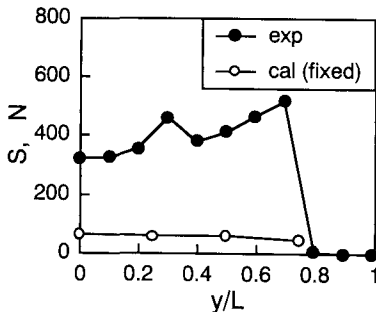
り、捨石の移動量が小さくなったと考えられる。同様に、図-5(c)の端部の計算結果においても、固定壁付近では捨石移動がほとんど見られない。図-5には岸向きの捨石移動量を示したが、沖向きに移動した捨石はわずかであった。

図-6に、潜堤の変形実験(荒木ら, 2003b)から得られた堤体岸沖断面内での被災レベル S と、計算結果から得られた捨石の移動個数 N (個)を沿岸方向(y 軸)に沿って比較する。被災レベル S は岸沖断面内で侵食された面積を捨石の個数に換算したものであり、岸沖断面内で移動したすべての捨石の個数ではないが、ここでは両者を定性的に比較する。捨石の移動は、初期位置から捨石の粒径($=0.75$ cm)以上の変位が生じたときに移動と判定し、移動個数 N は沿岸方向単位幅当たりの移動個数として算出している。ここでは、沿岸方向の単位距離を粒径 $D_0=0.75$ cmとしたので、堤体中央部では総移動個数を4で、端部では総移動個数を3で除して N を算出した。なお、図中に示す被災レベル S の実験結果は有義波高 $H_{1/3}=7.6$ cm, 有義周期 $T_{1/3}=1.5$ sの不規則波の24,000波入射後の値である。

図-6(a)に、堤体中央部の変形計算において、切り出した岸沖断面を周期境界とした場合の計算結果と実験結果を示す。図中に黒丸で示す実験結果の被災レベル S は



(a) 岸沖断面を移動境界として計算



(b) 岸沖断面を固定壁として計算

図-6 実験による被災レベル S と計算結果の定性的な比較

堤体端部($y/L=0.7$ 付近)で大きく、中央部では小さい。一方、白丸で示す計算結果の捨石移動個数 N は堤体端部で小さく、中央部で大きくなっており、逆の傾向を示している。これは前述したように、堤体端部の計算において、切り出した堤体岸沖断面に形成した固定壁と計算領域内の球体とのかみ合わせや摩擦の影響が強く現れたためと考えられる。

図-6(b)には、堤体中央部の変形計算において、切り出した岸沖断面を固定壁とした場合の計算結果と実験結果を示す。堤体端部と中央部の側面の条件が同等になったため、端部での N と中央部での N は近い値となっている。ただし、端部において侵食量(捨石の移動量)が大きくなる現象は再現できていない。この原因は捨石(球体)の配列状況にあると考えられる。今回の計算では図-4に示した配列状況を用いているため、端部と中央部での相違は側方の捨石による遮蔽の効果および側方の捨石との摩擦である。しかし、捨石(球体)の安定性に最も影響を及ぼすと考えられるかみ合わせの抵抗に関しては、端部と中央部とで相違はない。このため端部で侵食量が大きくなる現象を再現できていないと考えられる。

堤体中央部の変形計算においては切り出した岸沖断面は周期境界とするのが、より実際の状況に近いと考えられる。しかし、堤体端部では周期境界を設定することができないため、端部の計算との整合性の観点から、中央部の計算においても岸沖断面を固定壁として以後の計算を行った。

5. 表層捨石の質量増加の効果

図-7に、表層の捨石の密度を変化させることにより質量を増加させた場合の捨石移動個数 N の変化を、堤体中央部と端部とに分けて示す。ここでは捨石の粒径は変化させていない。 ρ は変化させた捨石の密度、 ρ_0 は図-5、図-6の計算で用いた基準となる捨石の密度($=2.65$ g/cm³)である。図中の黒丸で示す中央部、白丸で示す端部ともに捨石の密度が増加すると移動する捨石の個数は大きく減少する。基準値より密度が小さい場合、 $\rho/\rho_0=1$ での値からの変化は小さいが、これは計算領域内にある表層第1層の捨石がほとんどすべて移動したためである。中央部と端部でほとんど相違がないのは、前述の通り、捨石の配列状況に起因すると考えられる。

図-8に、捨石の粒径を変化させることにより質量を増加させた場合の捨石移動個数 N の変化を、堤体中央部と端部とに分けて示す。ここでは捨石の密度は変化させていない。 D は変化させた捨石の粒径、 D_0 は図-5、図-6の計算で用いた基準となる捨石の粒径($=0.75$ cm)である。計算は $D/D_0=0.986, 0.993, 1.007, 1.013$ および 1.02

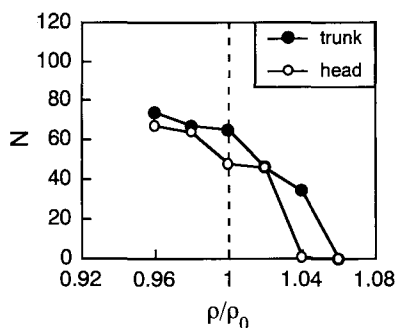


図-7 捨石密度が捨石の移動個数に及ぼす影響

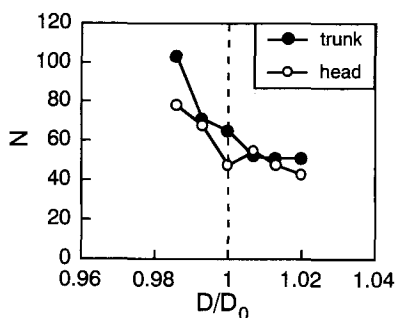


図-8 捨石粒径が捨石の移動個数に及ぼす影響

に対して行ったが、これらはそれぞれ $\rho/\rho_0 = 0.96, 0.98, 1.02, 1.04$ および 1.06 の質量変化に相当する粒径の変化である。粒径が大きくなると移動する捨石の個数は減少するが、図-7 に示した密度を変化させることによる質量増加と比較すると減少の割合は小さい。粒径の増加による捨石の質量を増加させた場合は、同時に作用波力も大きくなることが一因と考えられる。

なお、図-5～8 の計算を C_D, C_M および C_L のばらつきをなくして確定値とした場合の計算も行ったが、図示した標準偏差 0.05 のばらつきを持つ場合の計算結果と顕著な相違は見られなかった。

6. 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。堤体中央部の計算では、切り出した岸沖断面を固定壁とすると、固定壁に配置した粒子との摩擦やかみ合わせの効果が強く現れ、粒子の移動が制限された。また、捨石の密度あるいは粒径の変化による質量変化が堤体の変形（捨石の移動個数）に及ぼす影響を検討した結果、粒径を増加させるより捨石の密度を増加させるほうが捨石の移動個数が大きく減少することが示された。しかし、以下の2点が大きな課題である。

- ・堤体中央部に比べて端部の変形が大きくなる現象が再現できていない
- ・堤体端部を切り出して計算する場合に、切り出した岸沖断面の処理方法

今後はこれらの課題を解決し、堤体端部の捨石に対して適切な質量割り増しを算定する手法の確立を目指す所存である。

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・柳原哲也・出口一郎 (2003a): 3次元個別要素法による捨石潜堤の変形予測の試み, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 831-835.
- 荒木進歩・柳原哲也・新島 宏・麗 博史・出口一郎 (2003b): 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.
- 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.
- 原田英治・後藤仁志・酒井哲郎・大野正博 (2002): 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, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 796-800.
- 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.