

個別要素法を用いた捨石潜堤の断面変形計算

荒木進歩*・藤原由康**・宮崎敏弘***・出口一郎****

1. はじめに

構造物の破壊は水理機能喪失の程度によって判断するのが望ましい。それに加えて、近年では構造物の経済性向上の必要性もあり、断面変形を許容した研究がなされている。特に、捨石構造物は水理機能の低下が徐々に進行していく粘り強い構造物であるため、このような検討は非常に有効であると考えられる。また、断面変形を考慮することは高波浪時における構造物の終局領域での挙動を検討することでもあり、構造物の水理機能の粘り強さを最大限に引き出した設計を行うことにもつながる。

榎木・柳 (1983) は捨石防波堤の平衡断面について議論し、複合断面の防波堤は一樣断面の防波堤と比較して反射率の低減や安定性の増大を期待できることを示した。また、Van der Meer (1987) は堤体の変形量を考慮した被覆石の安定重量算定式を提案し、鹿島ら (1993) も消波ブロック被覆工の変形量評価式を提案している。しかし、これらの研究は捨石防波堤や消波ブロック被覆堤を対象としたものであり、潜堤を対象とした研究例は皆無に近い。また、堤体の変形量の評価は実験に基づいており、捨石やブロックに作用する波力や波力に対する応答は考慮されていない。したがって、今後の施工例の増加が予想される潜堤の断面変形に関する基礎資料の提供および予測手法の提案を行うことが必要であると考えられる。

波浪変形と捨石の応答を計算した研究としては、Kobayashi and Otta (1987) が Boussinesq 方程式による波浪変形計算から斜面上の捨石の安定性を評価したが、主に捨石の初期移動に関する議論であり断面の変形を予測するまでには至っていない。また、Norton and Holmes (1992) は同様に Boussinesq 方程式による波浪変形計算から捨石防波堤の断面変形を予測するモデルを構築し、Van Gent (1996) は VOF (Volume Of Fluid) 法による波浪変形計算から断面変形計算を行った。これらの断面変形計算は力学的な安定条件に基づいてはいるものの、

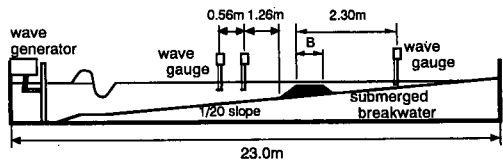
安定限界を超えると一定距離の変位を与えており、捨石の動的な挙動は考慮されていない。

断面変形を許容した設計法を確立するためには、波浪による断面変形とそれに伴う水理機能の変化を十分に把握し、予測することが必要となる。そこで本研究では、まず前者である潜堤の断面変形の傾向を把握し、予測手法を提案することを目的とする。計算手法としては、非線形分散波動方程式による波浪変形計算と個別要素法による断面変形計算を連立させ、捨石の動的な応答を考慮したモデルとする。

2. 水理実験

まず潜堤の断面変形の特性を把握するために水理実験を行った。図一に示す 2 次元造波水槽内の 1/20 の勾配を持つ水路床上に、代表粒径 $D_{50}=1.73\text{ cm}$ の碎石により潜堤を作製した。堤体内には core を設けず、全断面に同一の碎石を用いた。法先水深 h は 25 cm、法面勾配は沖側・岸側ともに 1/3、天端水深 R は 5 cm でいずれも一定とし、天端幅 B は 50 cm と 150 cm の 2 種類とした。実験には規則波を用い、周期 T は 2.0 s および 2.5 s の 2 種類、入射波高 H は 10~21 cm の間で変化させた。

作用波数は 1,000 波とし、断面形状を 200 波ないしは 400 波ごとに光学式砂面計により岸沖方向 2 cm 間隔で測定した。また、潜堤の水理機能を表す指標として反射率と透過率をとりあげ、潜堤前後での水位変動を容量式波高計で測定することにより断面変形に伴う反射率および透過率の変化を調べた。反射率の算定には合田ら (1976) の入射分離法を用い、透過率は透過エネルギーと分離された入射エネルギーの比の平方根として定義した。また潜堤表面上の水粒子速度を電磁流速計により測定した。なお、水位変動および水粒子速度のサンプリング



図一 実験水槽

* 正会員 博(工) 大阪大学大学院助手 工学研究科
** 正会員 工 修 日本道路公団
*** 大阪大学大学院 工学研究科
**** 正会員 工 博 大阪大学大学院教授 工学研究科

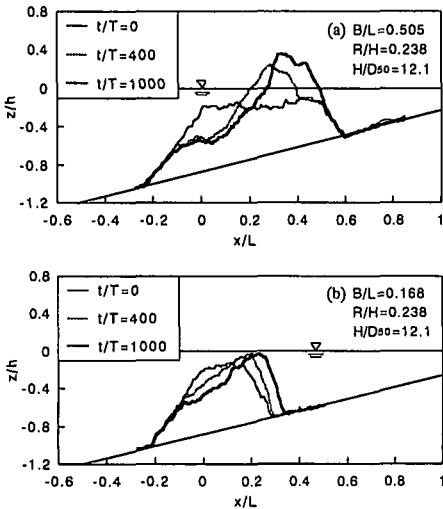


図-2 異なる天端幅を持つ潜堤の断面変形

グ間隔は 0.1 s とした。

3. 実験結果

すべてのケースにおいて、断面の変形は実験の初期の段階で大きく進行し、最終断面においてはほぼ平衡状態に達していた。図-2 に測定された断面形状の例を示す。水平方向は法先の波長、鉛直方向は法先水深で無次元化している。(a)は $B/L=0.505$ のケースであり、法肩付近の捨石が向岸方向に移動し、天端上に堆積するため、入射波数の増加に伴い天端高さが上昇し、天端が静水面よりも上に現れた。(b)は $B/L=0.168$ のケースであり、同様に法肩付近の捨石が向岸方向に移動するが、岸側の斜面および堤体背後にまで達するので天端高さはほとんど変化しないか、やや増加する程度であった。

図-3 に断面変形に伴う反射率 K_r および透過率 K_t の変化を示す。図は $B/L=0.505$ のケース (図-2(a)) であり、横軸には作用波数をとっている。断面変形に伴い天端高さが上昇したため、反射率は悪化し、透過率は向上した。また、図-2(b) のような天端幅が小さいケースでは断面変形が生じても天端高さの変化が小さいため、透過率および反射率はほとんど変化しなかった。

4. 波浪変形計算

4.1 基礎式および計算方法

波浪変形計算は、透水性を有する潜堤の存在を考慮するために、潜堤上およびその周辺の流体運動に非線形分散波動方程式を、潜堤内の流体運動に非定常非線形 Darcy 則を適用した出口・森脇 (1996) のモデルを用いた。図-4 に計算に用いる変数を示す。潜堤上およびその周辺の流体運動に対する連続方程式および運動方程式は

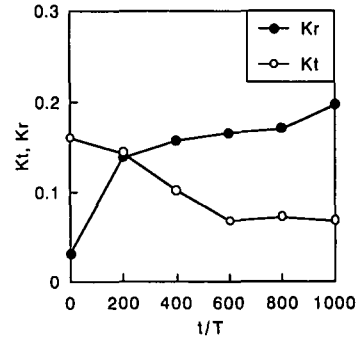


図-3 断面変形に伴う反射率・透過率の変化

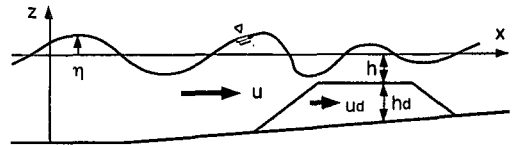


図-4 波浪変形計算に用いる変数

それぞれ式 (1) および (2) で表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\eta + h)u + h_d u_d] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{h}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] - \frac{h^2}{6} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] - D_t \quad (2)$$

$$D_t = \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa (h + \eta) \left(\frac{u}{h} \right)^2 \right] + \frac{\alpha_2}{h + \eta} f u |u| \quad (3)$$

また、潜堤内の流体運動に対する非定常非線形 Darcy 則は、移流項を付加した式 (4) で表される。

$$S \frac{\partial u_d}{\partial t} + u_d \frac{\partial u_d}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{\nu}{K_p} u_d - \frac{C_f}{\sqrt{K_p}} u_d |u_d| \quad (4)$$

$$S = \{1 + (1 - \lambda) C_m\} / \lambda \quad (5)$$

ここに、 u は潜堤上およびその周辺での断面平均流速、 u_d は潜堤内の断面平均流速、 h は堤体上およびその周辺の水深、 h_d は透水層の厚さ、 η は水位変動量、 C_f は乱流抵抗係数、 K_p は透水係数、 C_m は付加質量係数、 ν は動粘性係数、 λ は堤体の空隙率である。また、 D_t は碎波および境界せん断力によるエネルギー逸散で、 k は碎波減衰量に関する係数、 f は摩擦係数で、碎波地点以浅では $\alpha_1=1$ 、それ以降では $\alpha_1=0$ 、また水平床部では $\alpha_2=0$ 、潜堤上では $\alpha_2=1$ である。

空間差分間隔は $\Delta x = 5$ cm、時間差分間隔は $\Delta t_w = 0.01$ s とし、沖側境界で微小振幅波理論により水位と断面平均流速を与えて水位変動と流速を SOR 法で収束計算した。また、流速 u と線形長波の伝播速度 $C (= \sqrt{gh})$ の比が

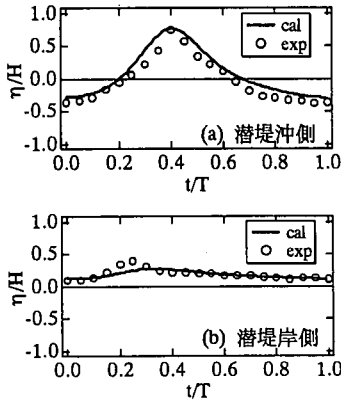


図-5 潜堤前後の水位変動の比較
($B/L=0.505$, $R/H=0.376$)

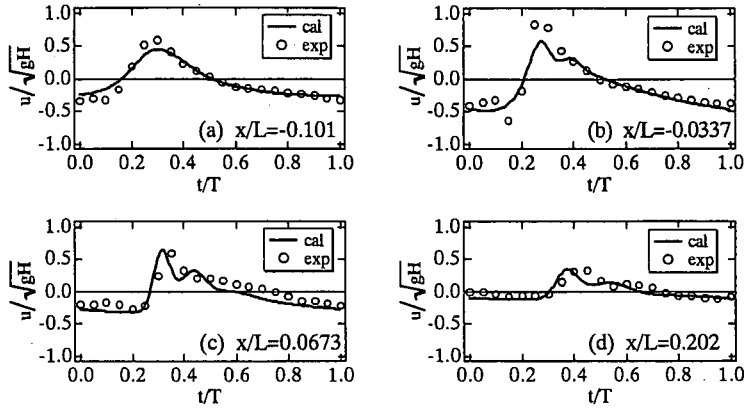


図-6 潜堤前後の水粒子速度の比較 ($B/L=0.505$, $R/H=0.376$)

0.7 以上となったときを砕波と判定した。 C_f , C_m , K_p および λ の値は出口ら (1988) を参考にした。

4.2 計算結果

図-5 に相対天端幅 $B/L=0.505$, $R/H=0.376$ のケースにおける潜堤前後の水位変動の計算結果と実験結果の比較を示す。水位変動は入射波高で無次元化しており、また潜堤沖での水位変動のゼロアップ点で実験値と計算値の位相を合わせた。潜堤沖での水位変動はまずまずの一致を示しているが、潜堤背後の水位変動では砕波後に卓越する高周波数成分が再現できず、透過波高が小さく算定される結果となっている。また図示しないが、反射率は逆に実験値より大きく算定された。

図-6 は同じケースにおける潜堤上での無次元流速の実験結果と計算結果の比較を示す。 x 軸は潜堤法肩を原点とし、岸向きを正としている。沖側法肩 ($x < 0$) では水位変動と同様の再現性があるが、非線形性の強くなる法肩付近 ($x=0$ 近傍) ではピーク値の差が大きくなっている。しかし、沖側法肩から岸側に離れると、実験結果と計算結果の一致度は再び良くなっている。

以上のことから、潜堤沖および天端上ではある程度の再現性があるものの、非線形性の強くなる法肩付近で再現性が悪くなり、また潜堤背後の水位変動に見られる高周波成分は再現できないことが分かった。この高周波数成分の再現性を高めるためには、砕波によるエネルギー逸散の与え方や透水性に関する諸係数の再検討が必要であると考えられるが、今回は一連の計算手法の確立を目標としたため、これらの詳細な検討は見送った。また、波高水深比が大きくなり入射波高の非線形性が強くなると、実験値と計算値のずれがやや大きくなる傾向が見られた。

5. 断面変形計算

5.1 個別要素法の基礎式

潜堤の断面変形計算は、捨石防波堤の断面変形計算を行った荒木・出口 (1997) と同様に個別要素法により行った。個々の捨石が満足すべき運動方程式は並進および回転に対してそれぞれ式 (6), (7) および (8) で表される。

$$(m_i + m'_i) \dot{u}_{pi} = \sum_j [F_{xi}]_j + [f_{xi}] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$(m_i + m'_i) \dot{w}_{pi} = \sum_j [F_{zi}]_j + [f_{zi}] - V_i (\rho_s - \rho) g \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$(I_i + I'_i) \dot{\omega}_{pi} = \sum_j [M_i]_j \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 m_i は捨石 i の質量、 u_{pi} , w_{pi} および ω_{pi} はそれぞれ捨石 i の速度の x , z 方向成分および角速度、 V_i は捨石 i の体積、 g は重力加速度、 ρ_s および ρ はそれぞれ捨石および水の密度、 m'_i および I'_i はそれぞれ付加質量および付加慣性モーメント、 $\sum_j [F_{xi}]_j$, $\sum_j [F_{zi}]_j$ および $\sum_j [M_i]_j$ はそれぞれ捨石 i が接触している粒子から受ける x , z 方向成分の力の総和およびモーメントの総和、 $[f_{xi}]$ および $[f_{zi}]$ はそれぞれ捨石 i に作用する波力の x および z 方向成分である。

また、捨石どうしの接触判定は式 (9) で表される。

$$r_i + r_j \geq R_{ij} \quad \dots\dots\dots (9)$$

捨石が接触した際の捨石間の作用力は弾性バネと粘性ダッシュポットの並列配置で表現され、バネ定数と粘性減衰係数は表-1 に示す値を用いた (ここに、 K_n , K_s : 法線方向および接線方向のバネ定数、 η_n , η_s : 法線方向および接線方向の粘性減衰係数)。また、個別要素法での時間差分間隔は $\Delta t_{DEM} = 10^{-4}$ s, 付加質量は $m'_i = 0.5 m_i$, 付加慣性モーメントは $I'_i = 0$ とした。

5.2 計算方法

式 (1)~(4) を用いて計算された潜堤内外の流速か

表-1 個別要素法の計算に用いた諸定数

バネ定数	$K_n/\rho_s g = 7.00 \times 10^3 (\text{cm})$ $K_s/\rho_s g = 4.00 \times 10^4 (\text{cm})$
粘性減衰係数	$\eta_n/\rho_s g = 9.40 (\text{cm/s})$ $\eta_s/\rho_s g = 7.11 (\text{cm/s})$
摩擦係数	$\mu = 0.6$
反発係数	$e = 0.0$
時間差分間隔	$\Delta t_{DEM} = 10^{-4} (\text{s})$

らモリソン式により波力を算定し、これを捨石に作用する外力 $[f_{xi}]$ および $[f_{zi}]$ として個別要素法により潜堤の断面変形計算を行った。モリソン式に用いる波力係数については、潜堤上の突出状態の捨石に対して算出した水谷ら (1991) の結果を参考にし、潜堤表層の捨石および潜堤内部の捨石ともに同一の波力係数を用いた。埋没状態ではなく突出状態に対する波力係数を用いたのは、捨石の初期移動のみを議論するのではなく、捨石が大きく移動し、断面が変形していく過程を計算するためである。波力は水平方向流速から算定されるが、表層の捨石に対しては、着目する捨石近傍の斜面勾配の方向に波力を作用させた。また、捨石の粒径は、実験に用いた捨石の粒径分布に従うように離散的にばらつかせた。

波浪変形計算の時間差分間隔は $\Delta t_w = 0.01 \text{ s}$ であり、次の時間ステップまでの Δt_w 間は流体運動は変化せず一定とし、同一の波力が捨石に作用するとして個別要素法による断面変形計算を 100 ステップ行った。その後、変形した潜堤の断面形状を波浪変形計算に取り込み、次のステップの波浪変形計算を行った。水理実験では、図-2 に示したように天端幅が長いケースにおいて断面変形により天端が静水面よりも上に出ることもあったが、現段階では、計算において天端が静水面よりも上に出ると背後への波の伝達や越波が表現できないため、天端が静水面上に達した時点で計算を終了した。

6. 断面変形計算結果

図-7 は断面変形の計算例で、100 波入射ごとの潜堤断面および $T/10$ ごとの波形が示されている。水平方向は法先での入射波の波長、鉛直方向は入射波の波高で無次元化している。沖側の法肩付近の捨石が岸側に移動し、天端上あるいは潜堤背後の斜面に堆積していく様子が計算されている。また、断面変形に伴い、沖側法肩付近の水位変動が変化する様子も計算されている。

図-8 に相対天端幅 $B/L = 0.505$ のケースでの実験結果と計算結果の比較を示す。細実線は初期断面、点線は実験結果、太実線は計算結果を表す。(a) は $R/H = 0.388$ のケースで、400 波入射後の断面形状を比較している。実験では天端高さが上昇しているが静水面にまでは達しな

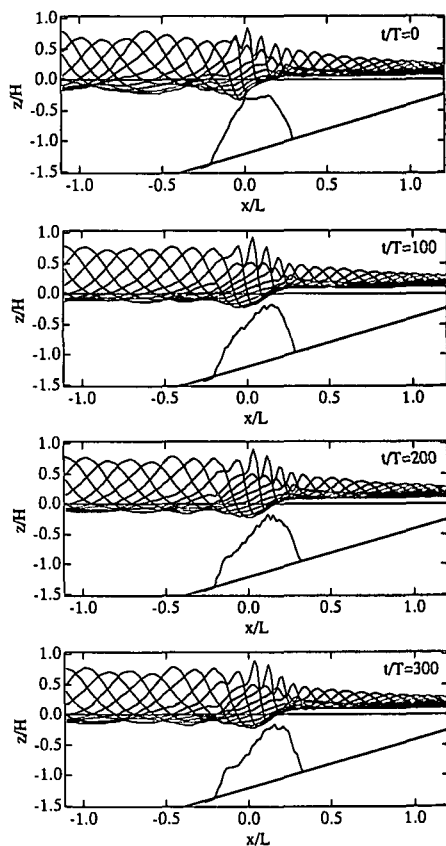
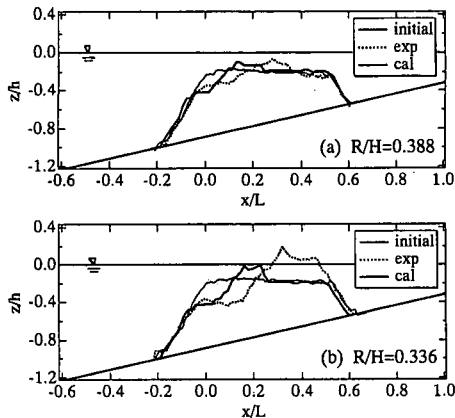
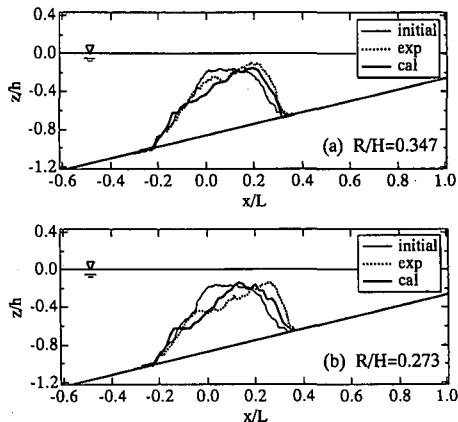


図-7 断面変形の計算例
($B/L = 0.168$, $R/H = 0.238$, $H/D_{50} = 12.1$)

かった。計算においても同程度の天端高の上昇を示しており比較的良好な再現性があるが、天端上で捨石が堆積する位置がやや異なっている。(b) は $R/H = 0.336$ のケースで、実験結果は 400 波入射後の断面形状であるが、計算では 150 波入射後に天端が静水面に達したため計算を打ち切った。天端が静水面に達するまでの変形は計算によりほぼ再現されていることが目視から確認されたが、(a) のケースと同様に、天端上での捨石の堆積位置がやや異なっている。これは、非線形性が強くなる法肩付近において波浪変形計算の再現性が低下するためと考えられる。

図-9 に相対天端幅 $B/L = 0.168$ のケースでの実験結果と計算結果との比較を示す。(a) は $R/H = 0.347$, (b) は $R/H = 0.273$ のケースで、ともに 400 波入射後の断面形状を比較している。(b) のケースにおいて、 $B/L = 0.505$ のケースと同様の理由から天端の後退量が若干の差がみられるものの、実験結果と計算結果の対応は良い。

図-10 に相対天端幅 $B/L = 0.132$, $R/H = 0.340$ のケースでの実験結果と計算結果との比較を示す。実験結果は 200 波入射後の断面形状であり、天端高さの変化はほと

図-8 断面形状の比較 ($B/L=0.505$)図-9 断面形状の比較 ($B/L=0.168$)

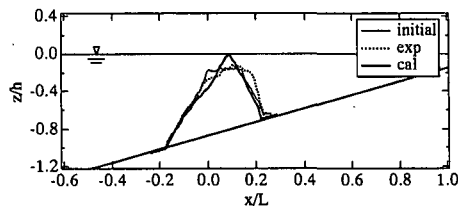
んど見られないが、計算では天端高さが増加し、180 波入射後に天端が静水面に達したため計算を打ち切った。図示しないが、 $B/L=0.132$ の他のケースにおいても、実験結果には見られない天端高さの増加が計算結果では現れた。したがって、この相対天端幅のケースでは実験とは異なる傾向の計算結果となった。

7. 結 言

本研究では、非線形分散波動方程式と個別要素法を組み合わせた潜堤の断面変形計算手法を提案した。断面変形については、相対天端幅が大きいケースでは概ね実験結果を再現できたが、相対天端幅が小さいケースでは実験結果と異なる傾向が現れた。また、透過率および反射率については定量的な評価を行うには至らなかった。断面変形計算の精度の向上および透過率・反射率の定量的な評価を行うためには、波浪変形計算の再現性を高めること、特に透水性に関する検討が必要であり、今後の課題である。

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.
 鹿島遼一・榊山 勉・清水琢三・関本恒浩・国栖広志・京谷 修 (1993): 不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 795-799.
 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入・反射分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.
 榎木 亨・柳 育魯 (1983): 捨石防波堤の複合断面設計に関す

図-10 断面形状の比較 ($B/L=0.132$, $R/H=0.340$)

- る基礎的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 361-365.
 出口一郎・榎木 亨・白谷宏司 (1988): 透水層上の波浪変形に対する非線形非定常ダルシー則の適用性について, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 487-491.
 出口一郎・森脇 清 (1996): 透水斜面上への遡上波の解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 136-146.
 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.
 Kobayashi, N. and A. K. Otta (1987): Hydraulic stability analysis of armor units, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 2, pp. 171-186.
 Norton, P. A. and P. Holmes (1992): Armour displacements on reshaping breakwaters, Proc. of 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 1448-1460.
 Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour layers—design formulae—, Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 219-239.
 Van Gent, M. R. A. (1996): Numerical modelling of wave interaction with dynamically stable structures, Proc. of 25th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 1930-1943.