

捨石防波堤の断面変形に関する研究

荒 木 進 歩*・出 口 一 郎**

1. はじめに

捨石防波堤は、その構成要素である捨石が波浪外力により移動することで防波堤としての機能を失う場合があるが、現行の設計法では捨石が移動すると防波堤としての機能が保たれていても破壊とみなされる。これは、現行の設計法が静的な釣合式を用いており、構造物の変形が許容されていないからであり、したがって、外力に対する捨石の動的な挙動を考慮しても、設計上には反映されない。しかし、捨石のわずかな移動により防波堤の機能が完全に失われるわけではない。現地での波浪が不規則であることを考えると、ごくまれにしか発生しないような高波に対して捨石が移動しないように設計するより、入射波に応じた断面の変形を許容する方が合理的である。また、設計基準を越える外力に対して機能の低下が小さい構造物が優れているのは明らかであり、捨石の移動、すなわち断面の変形を許容し、外力に対する動的な挙動を考慮することにより、構造物の機能の喪失率を考えていくことが合理的な設計につながると考えられる。

捨石防波堤の断面は、規則波の入射が十分に続くとその入射波に対して安定な平衡断面に近づいていく。この平衡断面には、底質が汀線付近に堆積する堆積型、汀線付近が侵食される侵食型、その中間の遷移型の3つがあり、礫浜については van Hijum・Pilarczyk (1982) が、捨石防波堤については van der Meer (1992) が、種々の入射波に対する平衡断面形状を実験により明らかにしているが、入射波の諸元と平衡断面形状をそのまま結びつけており、捨石の移動に寄与する波力に関しては触れられていない。捨石防波堤の平衡断面の形成機構を把握するには力学的な観点からの議論が必要であり、作用波力により捨石の移動が向岸方向であるか離岸方向であるかを解明することが重要であると考えられる。

そこで本研究では、水理実験により様々な入射波に対する断面変形形状を測定し、検討を加えるとともに、捨石防波堤斜面上の捨石に作用する波力を測定し、捨石の移動方向および断面形状と関連づけて議論する。さらに

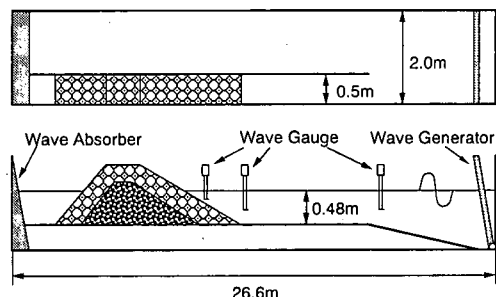


図-1 実験水槽

個別要素法による断面変形シミュレーションを行い、作用波力と捨石の移動方向の関係を解析的に検証する。

2. 水理実験

実験は図-1に示す長さ26.6m、幅2.0m、高さ1.8mの屋外片面ガラス張りの2次元大型水槽を幅50cmに仕切った水路で行った。捨石防波堤は砕石により作成し、被覆層の平均粒径を $D_{50}=1.35$ cm, 4.08 cm の2種類、斜面勾配は $\tan \beta=1/2, 1/3, 1/5$ の3種類、法先水深は48 cm とし、波高10 cm~22 cm, 周期1.6~3.0秒の規則波を800波入射させ、水槽側面より200, 400, 800波入射後の断面形状を岸沖方向に3 cm 間隔で測定した。また、側面からビデオカメラで撮影し、斜面への遡上高さも測定した。斜面上の捨石に作用する波力の測定は、静水面から水深5 cm ごとに設定した防波堤斜面上の5点で斜面方向および斜面垂直方向をキャンティレバー型波力計により測定し、同時に波力測定点、防波堤法先および防波堤沖8 m での水位変動を容量式波高計で測定した。

波力および水位変動の時間波形はサンプリング間隔0.01秒で記録し、2048個のデータを解析に使用した。

3. 実験結果とその考察

3.1 断面形状に関する検討

実験からは、砂浜の海浜断面と同様に、堆積型、遷移型、侵食型の断面形状が得られた。ここでは、静水面より上に捨石が堆積するものを堆積型、静水面より下に捨石が堆積するものを侵食型、静水面の上にも下にも捨石

* 学生会員 工修 大阪大学大学院 工学研究科

** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

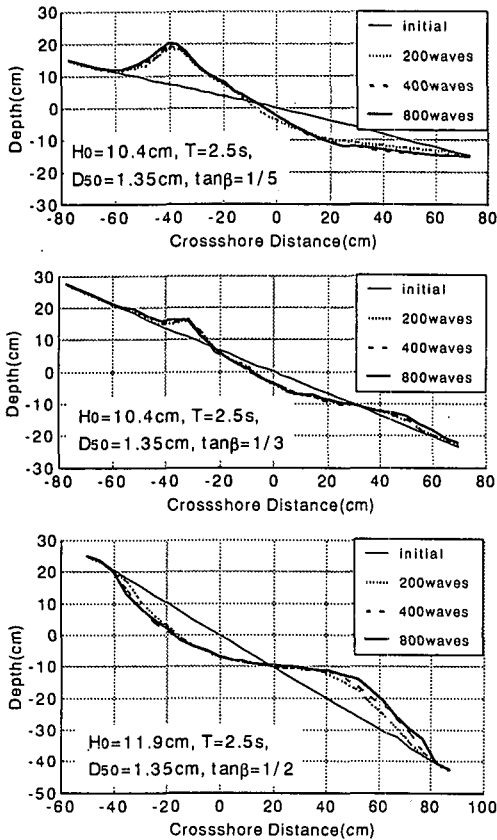
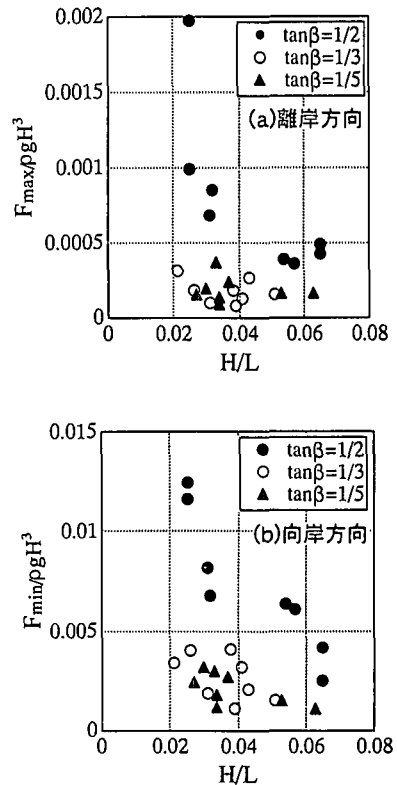


図-2 実験による断面形状

が堆積するものを遷移型とする。 $D_{50}=1.35$ cmの小さい粒径を用いた場合の代表的な断面変形の例を図-2に示す。 $\tan \beta=1/2$ のケースではすべて侵食型、 $\tan \beta=1/5$ のケースではすべて堆積型の断面となったが、 $\tan \beta=1/3$ のケースでは、入射波の諸元により堆積型、遷移型、侵食型に分かれた。一方、 $D_{50}=4.08$ cmの碎石を用いた場合では遷移型と判定できるケースはなく、 $\tan \beta=1/3$ のケースではすべて侵食型の断面となった。したがって、 $\tan \beta=1/3$ のケースでは粒径が大きくなると、侵食型の断面になりやすくなる。これは、砂あるいは砂礫を底質とする海浜変形に関する既往の研究結果の傾向とは異なり、礫浜に関する van Hijum ら (1982) の結果とも異なる。粒径が大きい捨石の場合は、慣性力の寄与や自重の効果が大きいためと考えられる。また通常、堆積型は汀線が前進するタイプとして分類される場合が多いが、本実験においては、すべてのケースにおいて汀線が後退している。これは、砂・砂礫の海浜断面は海底勾配が非常に緩やかなために砕波点が比較的沖に位置するが、捨石防波堤では勾配が急であることから、砕波による衝撃波力や強い乱れが汀線付近に集中し、向岸方向の捨石移動によって堆積型の断面が形成されても汀線付近の水深は増

図-3 斜面方向最大波力の比較 ($D_{50}=1.35$ cm)

加し、汀線が後退しているものと思われる。

3.2 作用波力に関する検討

静水面付近で測定された作用波力には衝撃的な波力が含まれており、捨石の初期移動に大きな影響を与えていることが分かった。この波力は水面の衝突による捨石の付加質量の時間変化に基づく衝撃力と考えられる (荒木ら, 1996) が、波力の大きさは斜面勾配により差が見られた。図-3に静水面付近で測定された斜面方向最大波力の大きさを示す。(a)は離岸方向、(b)は衝撃的に作用する向岸方向の波力を示すが、どちらの向きにおいても侵食型の断面が得られた $\tan \beta=1/2$ のケースが大きく、 $\tan \beta=1/3, 1/5$ のケースは比較的小さい。したがって、 $\tan \beta=1/2$ のケースでは衝撃的な波力が大きいため捨石が不安定になりやすく、その後は離岸方向に移動しやすいので侵食型の断面形状になると考えられる。

4. 個別要素法によるシミュレーション

4.1 計算手法

Cundall・Strack (1979) によって提唱された個別要素法は、要素間の力の伝達が作用・反作用の法則に従うことを条件として、要素の集合体の動力学的挙動を数値的に解析する手法である。

ここでは捨石を円形と仮定し、座標系を図-4のようにとる。2つの捨石が衝突するときの捨石間の相互作用は図-5のように接触点間に挿入された弾性バネ（バネ定数 K ）と粘性ダッシュポット（粘性減衰係数 η ）で表現する。捨石 i （半径 r_i ）と捨石 j （半径 r_j ）の接触条件は図-4から次式で表される。

$$r_i + r_j \geq R_{ij}, \quad R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad \cdots (1)$$

また、共通法線の x 軸となす角（反時計回りを正）を α_{ij} として、接触中の Δt 間の法線方向（接近を正）および接線方向（反時計回りを正）の相対変位増分 $\Delta u_n, \Delta u_s$ はそれぞれ次式で表される。

$$\Delta u_n = (\Delta u_i - \Delta u_j) \cos \alpha_{ij} + (\Delta w_i - \Delta w_j) \sin \alpha_{ij} \quad \cdots (2)$$

$$\Delta u_s = -(\Delta u_i - \Delta u_j) \sin \alpha_{ij} + (\Delta w_i - \Delta w_j) \cos \alpha_{ij} + (r_i \Delta \varphi_i + r_j \Delta \varphi_j) \quad \cdots (3)$$

$$\sin \alpha_{ij} = -(z_i - z_j) / R_{ij} \quad \cdots (4)$$

$$\cos \alpha_{ij} = -(x_i - x_j) / R_{ij} \quad \cdots (5)$$

時刻 t における捨石間の法線方向作用力 $[f_n]_t$ は、 Δu_n に比例した弾性バネによる抗力 Δe_n 、および相対変位速度 $\Delta u_n / \Delta t$ に比例した粘性ダッシュポットによる抗力 Δd_n により次式で表される。

$$[f_n]_t = [e_n]_t + [d_n]_t \\ = ([e_n]_{t-\Delta t} + \Delta e_n) + \Delta d_n \quad \cdots (6)$$

$$\Delta e_n = K_n \Delta u_n, \quad \Delta d_n = \eta_n \Delta u_n / \Delta t \quad \cdots (7)$$

ただし、捨石間の引張力は認めないので次の条件が付加される。

$$[e_n]_t < 0 \text{ のとき} \\ [e_n]_t = [d_n]_t = 0 \quad \cdots (8)$$

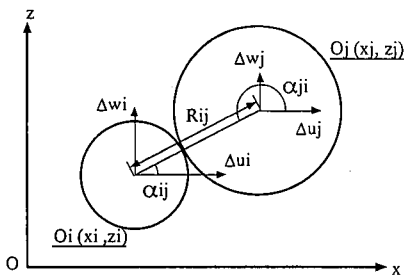


図-4 座標系

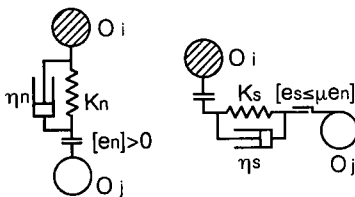


図-5 捨石間作用力モデル

同様に、時刻 t における捨石間の接線方向作用力 $[f_s]_t$ は、弾性バネによる抗力 Δe_s および粘性ダッシュポットによる抗力 Δd_s により次式で表される。

$$[f_s]_t = [e_s]_t + [d_s]_t \\ = ([e_s]_{t-\Delta t} + \Delta e_s) + \Delta d_s \quad \cdots (9)$$

$$\Delta e_s = K_s \Delta u_s, \quad \Delta d_s = \eta_s \Delta u_s / \Delta t \quad \cdots (10)$$

ただし、非接触状態では摩擦力は生じないこと、また静止摩擦力の限界から次の条件が付加される。

$$[e_n]_t < 0 \text{ のとき} \\ [e_s]_t = [d_s]_t = 0 \quad \cdots (11)$$

$$|[e_s]_t| > \mu [e_n]_t \text{ のとき} \\ [e_s]_t = \mu [e_n]_t \times \text{SIGN}([e_s]_t), [d_s]_t = 0 \quad \cdots (12)$$

ここに、 μ は捨石間の静止摩擦係数、 μ' は運動摩擦係数、 $\text{SIGN}(z)$ は変数 z の正負を表すものとする。

これらを用いて捨石 i が捨石 j から受ける作用力の x 方向成分 $[F_x]_{ij}$ 、 z 方向成分 $[F_z]_{ij}$ および捨石（円要素）中心回りのモーメント $[M]_{ij}$ は次式で表される。

$$[F_x]_{ij} = -[f_n]_t \cos \alpha_{ij} + [f_s]_t \sin \alpha_{ij} \quad \cdots (13)$$

$$[F_z]_{ij} = -[f_n]_t \sin \alpha_{ij} - [f_s]_t \cos \alpha_{ij} \quad \cdots (14)$$

$$[M]_{ij} = r_i [f_s]_t \quad \cdots (15)$$

捨石の挙動は、次の運動方程式で表される。

$$m(1 + C_A) \dot{u}_i = \sum_j [F_x]_{ij} + [f_x] \quad \cdots (16)$$

$$m(1 + C_A) \dot{w}_i = \sum_j [F_z]_{ij} + [f_z] - V(\rho_s - \rho_w)g \quad \cdots (17)$$

$$(I + I') \dot{\omega}_i = \sum_j [M]_{ij} \quad \cdots (18)$$

ここに、 u_i, w_i, ω_i はそれぞれ捨石 i の x 方向速度、 z 方向速度、回転角速度で、 m は捨石の質量（ C_A は付加質量係数）、 I は慣性モーメント（ I' は付加慣性モーメント）、 V は捨石の体積、 ρ_s, ρ_w はそれぞれ捨石の密度（ $=2.65 \text{ g/cm}^3$ ）、流体の密度、また g は重力加速度で、 $[f_x], [f_z]$ は捨石 i に作用する波力である。この運動方程式を逐次積分することにより、各捨石の運動を追跡する。

4.2 計算条件

材料定数 K, η と時間ステップ Δt は木山・藤村（1983）を参考にして決定し、計算時間を勘案して $\Delta t = 10^{-4}$ 秒とした。捨石は、勾配および粒径により78～311個の円要素を用いて、わずかに空隙ができるように配置し、重力落下の計算を行った後、5波分の計算を行った。なお、捨石の転がりを抑制するため、松見・泉（1992）と同様に底面および防波堤内部には捨石粒径の凹凸を付けた。付加質量係数 C_A は1.0、付加慣性モーメント I' は0とし、その他の定数を表-1に示す。

捨石には、実験結果をもとに図-6に示す向岸方向に短時間に作用するパルス状にモデル化した波力を与え、周期 T 、向岸方向最大波力 $F_{\min}$ 、離岸方向最大波力 $F_{\max}$ 、向岸方向波力の作用時間 δt を変化させた。ここでは、水平方向波力のみを考え鉛直方向波力は与えなかった。また、波力の大きさは静水面で最大とし、実験で測定され

表-1 計算に用いた諸定数

$K_n/\rho_s g$	$7.00 \times 10^3 \text{ (cm)}$
$K_s/\rho_s g$	$4.00 \times 10^2 \text{ (cm)}$
$\eta_n/\rho_s g$	$5.65 \text{ (cm} \cdot \text{s)}$
$\eta_s/\rho_s g$	$1.00 \text{ (cm} \cdot \text{s)}$
μ	0.6
μ'	0.5

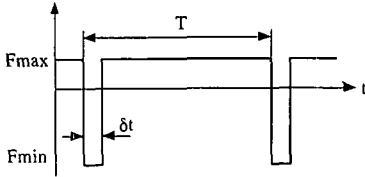


図-6 作用波力モデル

た遡上高さまで波力が作用するものとして、静水面から上下方向に指数関数的に減少させた。また、堤体内の捨石に作用する波力は表層の捨石に作用する波力よりも小さくなるので、各捨石周辺の局所的な空隙率に応じて作用波力を低減させた。

静水面付近の捨石は、没水・非没水状態を繰り返すので捨石に作用する浮力に変化が生じる。ここではモデル化した波力を用いており、水面形を定めることができないので、静水面下のみで浮力が作用することとした。

5. シミュレーション結果と考察

図-7 に計算結果の一例を示す。これは $\tan \beta = 1/3$ で、侵食型の断面形状となったケースである。まず静水面より下の捨石が、衝撃的な波力により lift-up されて静水面より上に移動し、その後、不安定になった捨石が離岸方向波力および自重の効果により静水面より下に移動して堆積していく様子が分かる。

向岸方向波力の作用時間 δt を変化させたときの断面形状の出現特性を図-8 に示す。図は $\tan \beta = 1/3$ のケースを示しており、作用時間 δt が大きいほど堆積型の断面になりやすく、 δt が小さくなると堆積型および遷移型の断面はほとんど現れなくなる。これは、堆積型の断面は捨石が重力に逆らって斜面上方に移動するので、ある程度の継続した波力が作用する必要があるためである。実験では向岸方向に明瞭に波力が作用している時間は 0.05~0.20 秒の範囲であったが、向岸方向波力に含まれる衝撃力の大きさや作用時間によって捨石の移動方向も変化すると考えられ、更なる検討が必要である。

$\tan \beta = 1/3$ のケースで粒径の違いによる断面形状の出現特性を図-9 に示す。ここに、 W は捨石の重量である。 $D_{50} = 1.35 \text{ cm}$ では $F_{\max}/W$ がほぼ 0.4 以上では侵食型、

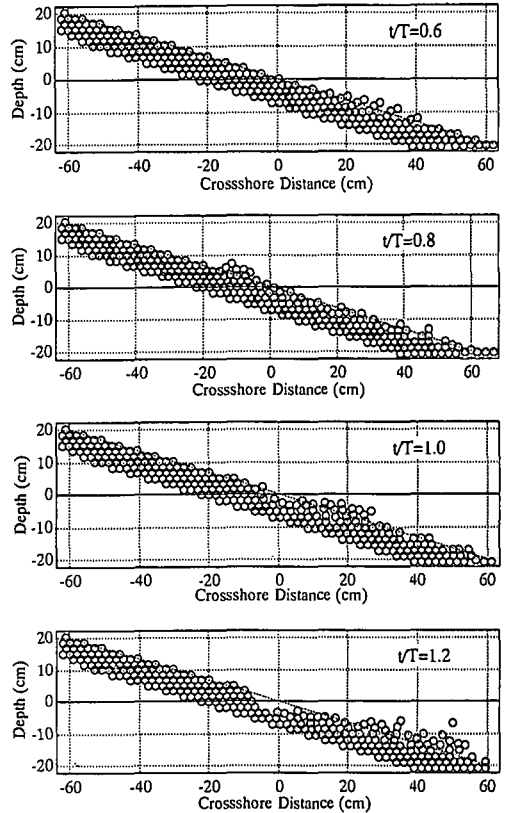


図-7 断面変形の計算結果 ($F_{\max} = 5.0 \text{ gf}$, $F_{\min} = 11.0 \text{ gf}$, $T = 1.6 \text{ s}$, $\delta t = 0.14 \text{ s}$, $\tan \beta = 1/3$)

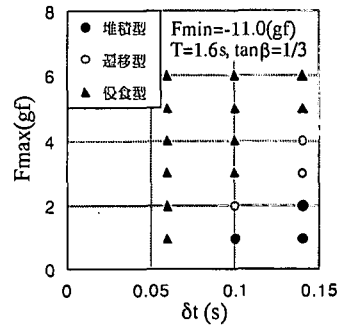
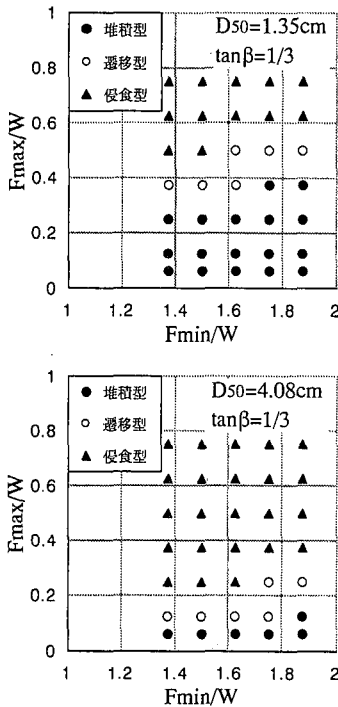


図-8 断面形状に及ぼす向岸方向波力作用時間の影響

それ以下では堆積型となるのに対し、 $D_{50} = 4.08 \text{ cm}$ では $F_{\max}/W$ がほぼ 0.2 以上で侵食型、それ以下で堆積型となっている。実験においては、 $\tan \beta = 1/3$, $D_{50} = 4.08 \text{ cm}$ ではすべてのケースが侵食型となったため限界値は明らかではないが、 $D_{50} = 1.35 \text{ cm}$ では $F_{\max}/W$ の値は 0.10 付近で侵食型と堆積型に分かれた。 $D_{50} = 1.35 \text{ cm}$ のケースでは実験と計算ではずれがあるが、粒径が大きいほど侵食型の断面形状が現れやすくなる傾向は一致している。計算結果の例を図-10 に示す。


図-9 断面形状に及ぼす粒径の影響 ($T=2.0$ s)

6. 結 語

本研究で得られた主要な結果をまとめる。

1) 水理実験から、 $\tan \beta=1/2$ ではすべて侵食型、 $\tan \beta=1/5$ ではすべて堆積型、 $\tan \beta=1/3$ では入射波の諸元および捨石の粒径により侵食型、遷移型、堆積型の断面形状が得られた。

2) 断面形状に及ぼす捨石の粒径の効果については、粒径が大きいくほど侵食型の断面になりやすい。これは砂浜の断面形状とは異なり、粒径の増加による慣性力の寄与や自重の効果によるものと考えられる。

3) 捨石は向岸方向の衝撃的な波力により lift-up されて不安定になる。また侵食型の断面が形成されるケースでは衝撃的な向岸方向波力、離岸方向波力ともに大き

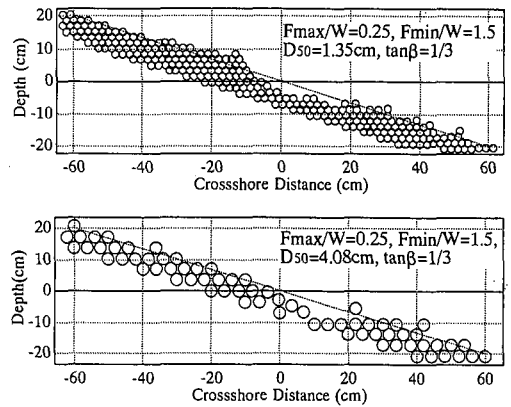


図-10 粒径による計算結果の違い

く、捨石が不安定になった後、離岸方向に移動しやすくなっていることが水理実験により確認された。

4) パルス状にモデル化した波力を用いて個別要素法による断面変形シミュレーションを行った。その結果、粒径の増加に対する断面形状の出現特性の傾向は、実験結果と一致した。

参 考 文 献

- 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.
- 木山英郎・藤村 尚 (1983): カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, 第 333 号, pp. 137-146.
- 松見吉晴・泉 一幸 (1992): 底開式バージによる投入捨石群の堆積形状に関する予測モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 966-970.
- Cundall, P. A. and O. D. L. Strack (1979): A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique* 29, No. 1, pp. 47-65.
- van der Meer, J. W. (1992): Stability of the seaward slope of berm breakwaters, *Coastal Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 205-234.
- van Hijum, E and K. W. Pilarczyk (1982): equilibrium profile and longshore transport of coarse material under regular and irregular wave attack, Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics publication No. 274.