

# 島堤被覆捨石の安定性に及ぼす波の方向分散性の影響について

大野 賢一\*・松見 吉晴\*\*・木村 晃\*\*\*・家村 健吾\*\*\*\*

## 1. 緒 言

Matsumi ら (1994) による多方向不規則波での堤頭部の安定性に関する被災実験では、多方向波浪での堤頭部の被災が一方向波浪の場合よりも大きくなるケースが確認されている。その要因として堤体上の波浪流速場から考えると、堤頭部の形状特性での波の反射、回折、屈折現象および浅水変形、さらには多方向波浪における波の方向分散性の影響が相互干渉して、入射波浪条件によっては一方向不規則波を用いた場合より局所的に作用流速が大きくなる可能性が高いことが予測できよう。この結果、堤頭部に局所的な被覆捨石の初期被災が発生し、スポット状に分散した被災パターンに発展するものと考えられる。他方、一方向不規則波の被災パターンに関しては、堤頭部上で観察される非常に強い流れの発生位置およびその流れの突っ込む位置がほぼ一定であることから、静水面付近で帯状に被災するものと推察できる。また、堤体の最終的な破壊は、このような被覆材の初期移動がトリガーとなって発展すると考えられる。従って、堤体全体の平均的な被災を検討する方法では波の方向分散性の影響を見だし難いと思われるため、堤体周辺で発生する局所的流れによる被災に着目して検討を進めることが必要である。

そこで本研究は、堤頭部および主幹部における作用流速に及ぼす波の方向分散性の影響に着目し、堤体上の作用流速場の詳細な計測結果と、松見・大野 (1995) が提案した作用流速の方向による法面勾配の変化を考慮した捨石の移動限界流速の算定式に基づいて得られる捨石の空間的な移動発生頻度分布より、局所的な捨石の移動の可能性を検討する。ついで、初期被災と最終破壊位置の対応性を堤体上の流速の空間特性と被災状況を関連付けながら検討したものである。

## 2. 実験の内容

### (1) 実験装置

実験は、図-1 に示す 14 枚の造波板 (幅 60 cm) からなるスネーク型の多方向不規則波造波水槽 (9 m×16 m×0.6 m) を用いて行った。水槽側壁には、ステラシートの 2 層構造の遊水部をもつ消波工が設けられており、その反射率は 0.2 以下である。また、岸側には捨石による 1/5 のスロープ (長さ 1 m) とアルミ製の 1/30 のスロープ (長さ 6 m) が消波工として付設されている。

島堤モデルは、8 mm 径の鉄筋丸棒のフレーム構造で、図-2 に示すようにコア部と 2 層被覆捨石層より構成されている。島堤の構成材料はコンクリート用碎石で、島堤のサイズおよび被覆層、コア部の代表径は表-1 に示す通りである。なお、被覆層の捨石重量は、Van der Meer (1987) の設計公式に基づき、有義波高 6 cm、有義周期 1.4 s、ダメージ・パラメータ  $S=2$  の条件で算出された安定重量の 5 割増しにしている。堤体の高さ 50 cm は、水深 30 cm で越波が起こらないように設定した。堤頭部および主幹部の法面勾配は 1:2 である。島堤の配置は、筆者ら (1994) の多方向波浪場の計算モデルより得られた造波有効領域に、堤頭部および主幹部のほとん

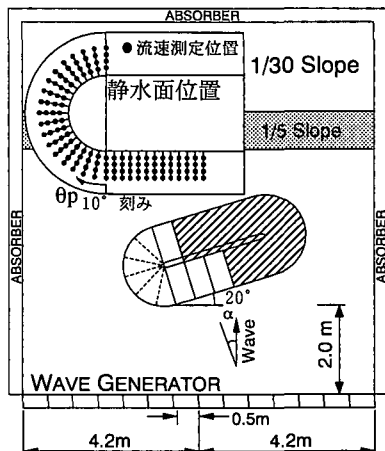


図-1 島堤の配置と流速測定位置

\* 学生会員 工修 鳥取大学大学院工学研究科社会開発工学専攻  
 \*\* 正 会 員 工博 鳥取大学助教授工学部社会開発システム工学科  
 \*\*\* 正 会 員 工博 鳥取大学教授工学部社会開発システム工学科  
 \*\*\*\* 正 会 員 ニュージェック(株)

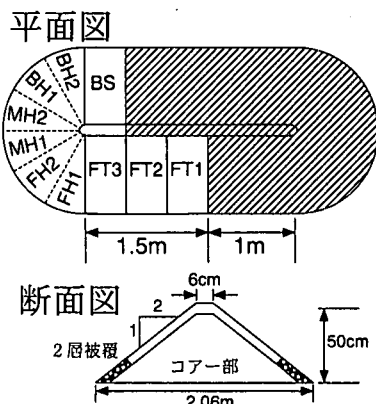


図-2 島堤模型の説明図

表-1 島堤模型の構成材料の寸法

|                         |                     |
|-------------------------|---------------------|
| 被覆捨石の中央重量 ( $W_{a50}$ ) | 42 gf (0.4116 N)    |
| 被覆捨石の代表径 ( $D_{n50}$ )  | 2.51 cm (0.0251 m)  |
| コア部の中央重量 ( $W_{c50}$ )  | 3.75 gf (0.03675 N) |
| 空隙率                     | 0.45                |
| 主幹部の長さ ( $T_L$ )        | 250 cm (2.50 m)     |
| 堤頭部の直径 ( $D$ )          | 206 cm (2.06 m)     |

$$D_{n50} = (W_{a50} / \rho_s)^{1/3} \quad \rho_s: \text{被覆捨石の密度}$$

どの部分が位置するように決定された。また、造波板からの再反射波をできる限り避けるために、島堤モデルは図-1に示すように造波板に対して20°傾けて配置された。

## (2) 流速場の計測実験

堤体上の流速場の計測実験では、被災による断面形状変化に伴う波浪場の変動を削除するため、堤体全表面を透過性防護ネットで覆って被覆捨石の移動を拘束している。堤体上の流速場は、図-1中の別図に示す静水面以下4箇所を、堤頭部は背面方向へ10°刻みで変化させた計76箇所の位置と主幹部前面は10 cm 間隔の計48箇所の位置で水平2成分電磁流速計を用いて計測された。堤頭部中心からの水平距離は、それぞれ58 cm, 66 cm, 74 cm および82 cmで、58 cmの位置は堤体の静水面位置から水平方向に13.8 cm離れた位置にあたる。

## (3) 堤体の被災実験

被災実験では、主幹部の一部と堤頭部(図-1中の斜線部以外)に注目して行った。被災の程度は、回転式ポテンシオメータを利用した接触型の変位計を用いて、堤体縦断面方向に5 cm 間隔で堤体の断面形状を測定した。堤頭部の被災量は、堤頭部の20本の断面形状の測定結果を基に、堤頭部の中心より放射方向に5°間隔の断面に関してダメージ・パラメータ  $S (= A_e / D_{n50}^2, A_e: \text{侵食面積},$

$D_{n50}$ : 被覆捨石の代表径) で評価している。

## (4) 波浪条件

入射波浪条件は、両実験共に、直角入射 ( $\alpha=0^\circ$ ) と斜め入射 ( $\alpha=-15^\circ$ ) の JONSWAP 型 (ピーク周期;  $T_p = 1.0, 1.4$  s) をもつ一方および多方向不規則波浪信号 ( $S_{\max}=5, 10$ ) を作成し使用した。造波信号のサイクル時間は25分間で、計測時間は20分間とした。この場合の計測時間あたりの波数は、1028 ( $T_p=1.4$  s の場合) および1440 ( $T_p=1.0$  s の場合) である。

流速場の計測実験での目標の有義波高  $H_m$  は、多方向および一方不規則波共に6 cmを採用した。これは、本研究で用いた被覆捨石層に初期被災が現れる程度の大きさである。

被災実験における波浪の作用方法は、1サイクルの作用時間が20分間で、堤頭部の各部分の被災状況が定常に達するまで同一の波浪条件を20分間繰り返し作用させ、定常状態に達した後に有義波高を増大させる方法を採用した。この時の有義波高  $H_m$  の変化は、4 cmを初期値として最大8 cmまで2 cm 間隔で、Vidal ら(1991)が定義している第2層目の捨石が欠落して堤体コア一部が露出する最終破壊に至るまで波高を段階的に増大させた。

## 3. 被覆捨石の初期移動に関する考察

### (1) 捨石の移動限界流速算定式の概要

堤頭部の被覆捨石の安定性と作用流速の関係は、堤頭部の同じ位置であっても、作用流速の方向によっては斜面が下り勾配に、または上り勾配になり、同じ作用流速の大きさであっても捨石の安定性は斜面の下り勾配と上り勾配の作用方向で大きく異なる。そこで、松見・大野(1995)は、図-3に示す捨石に作用する流体力と抵抗力の平衡関係から、作用流速とその方向変化に伴う堤頭部の斜面勾配の変化を考慮した捨石の移動限界流速  $v_{rc}$  に

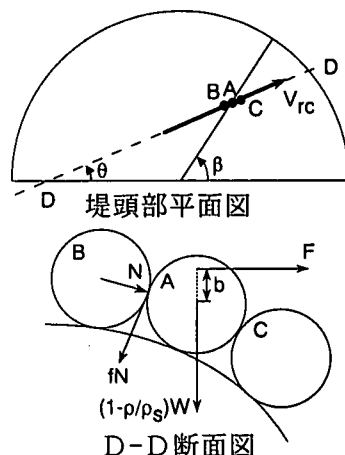
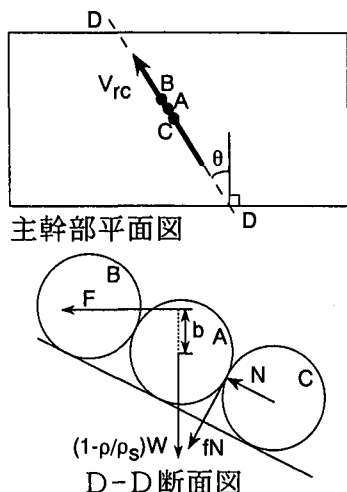
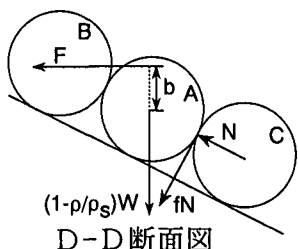


図-3 堤頭部上の捨石に作用する合成流速と作用力



主幹部平面図



D-D断面図

図-4 主幹部前面の捨石に作用する合成流速と作用力

関する算定式を次式のように導いた。

$$\frac{v_{rc}^2}{gr} = \frac{(1 - \frac{\rho}{\rho_s}) \{1 \pm f \cos(\beta - \theta)\}}{\frac{3}{4} m' (\frac{\rho}{\rho_s}) \left[ \frac{b}{r} \sqrt{1 + \left\{ \frac{\cos(\beta - \theta)}{2} \right\}^2} + \frac{\cos(\beta - \theta)}{2} \right]} \dots (1)$$

ここに、 $g$ ：重力加速度、 $r$ ：捨石の粒径、 $\rho$ ：流体の密度、 $f$ ：捨石間の摩擦係数、 $m'$ ：流体力係数、 $b$ ：流体力の作用位置と捨石中心部からの距離であり、分子の摩擦係数  $f$  の前の符号  $\pm$  は、斜面が下り勾配の場合がプラスに、上り勾配の場合がマイナスになる。

主幹部に関して、堤頭部との違いが生じるのは、作用流速の傾きが斜面上の高さによって変化しないことである。このことを考慮して、図-4 に示す捨石に作用する流体力と抵抗力の平衡関係から、主幹部における捨石の移動限界流速  $v_{rc}$  に関する算定式は次式で与えられる。

$$\frac{v_{rc}^2}{gr} = \frac{(1 - \frac{\rho}{\rho_s}) \{1 \pm f \cos \theta\}}{\frac{3}{4} m' (\frac{\rho}{\rho_s}) \left[ \frac{b}{r} \sqrt{1 + \left\{ \frac{\cos \theta}{2} \right\}^2} - \frac{\cos \theta}{2} \right]} \dots (2)$$

分子の摩擦係数  $f$  の前の符号  $\pm$  が、斜面が下り勾配の場合がマイナスに、上り勾配の場合がプラスになる。式 (1) および式 (2) に含まれる係数  $m'$ 、 $b$  および  $f$  については、便宜的に  $m'=1$ 、 $b=0.5r$ 、 $f=0.4$  と仮定して計算を進めている。

## (2) 捨石の初期移動の検討

図-5、図-6 は、それぞれ多方向および一方向不規則波における堤頭部と主幹部前面の平面 2 次元の流速場の計測結果と、式 (1) および式 (2) に基づいて本実験の被覆捨石のサイズを対象として得られた静水面下にお

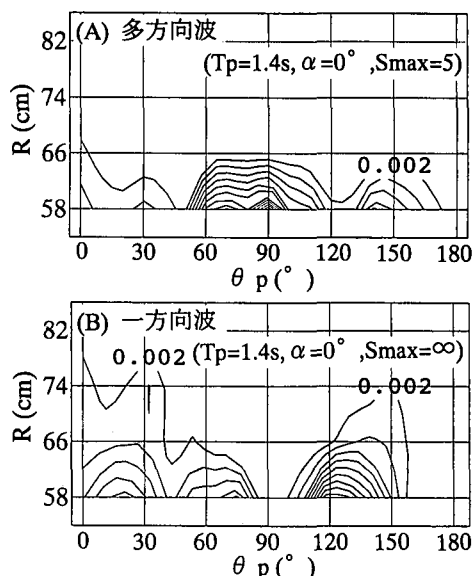


図-5 堤頭部上の捨石の被災発生頻度分布図

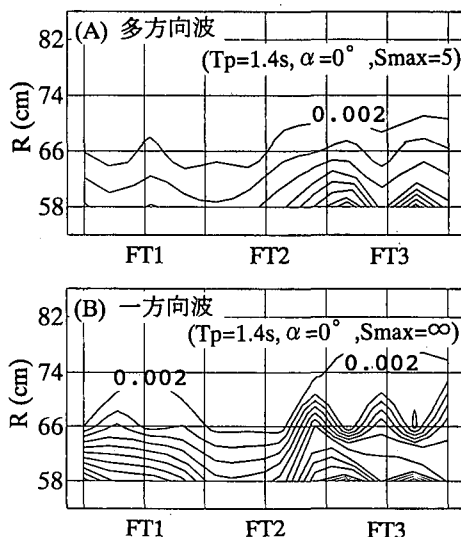


図-6 主幹部前面の捨石の被災発生頻度分布図

ける捨石の移動発生空間的な頻度分布を示したものである。ここでの頻度分布の値は、各測定点における 20 分間の時系列データに対して捨石の移動限界流速を越える発生頻度を全データ数で無次元化したものである。これらの図は、 $T_p=1.4$  s、 $H_m=6$  cm の直角入射波の結果である。図中の等相対頻度線の間隔は 0.002 であり、 $R$  は堤頭部中心からの水平距離である。

まず、図-5 に示す堤頭部に関して、(A) の多方向波 ( $S_{max}=5$ ) の場合、堤頭部中央 (MH 1) における捨石の局所的移動の可能性が一方向波に比較して高くなってい

る。一方、(B)の一向波 ( $S_{\max}=\infty$ ) の場合、背面部 (BH 1) での初期被災の可能性が高いことがわかる。発生頻度の値を比較すると、(A)の多方向波 ( $S_{\max}=5$ ) の場合に、波の方向分散性に伴って堤頭部中央への波の直接作用から、この位置において初期被災が起こる可能性が高くなり、これをトリガーとして破壊に発展すると推察できる。

次に、図-6 に示す主幹部に関しては、(A)の多方向波 ( $S_{\max}=5$ ) の場合も (B)の一向波の場合 ( $S_{\max}=\infty$ ) も静水面近くほぼ同じ位置 (FT 3) で発生する可能性が高いことがわかる。しかし、多方向波の場合、堤体に直角入射の条件であっても、波の方向分散性の影響により発生頻度の値が一向波の場合に比べて、かなり低減している。また、(A)、(B)両図とも FT 3 において発生頻度の値が大きいのは、堤頭部からの回折波の影響により、主幹部に沿って高い波高分布が発生したためだと考えられる。このことから、主幹部における安定性を一向波浪場での被災から考慮したのでは、過剰設計となる可能性が高いと推察できよう。

また、斜め入射波の場合についても、直角入射波と位置的なズレはあるものの、同様の結果が得られているが、 $T_p=1$  s の場合には多方向波と一向波における明確な違いが認められなかった。

### (3) 堤体上における作用流速の方向特性

初期被災に及ぼす波の方向分散性の影響について、多方向と一向不規則波における堤頭部および主幹部の静水面近くでの作用流速の卓越方向より検討を行う。図-7 は、計測された平面 2 成分流速の時系列データ (各 17500 個) より合成流速の最大値から 1/10 最大値までについて、多方向と一向不規則波の合成流速の方向別の頻度分布を比較して示したもので、図中実線が多方向波 ( $S_{\max}=5$ )、破線が一向波 ( $S_{\max}=\infty$ ) を示し、太い実線が堤体各位置における水平面上での接線方向を表す。この図は、直角入射、 $T_p=1.4$  s、 $H_m=6$  cm の場合である。図中の方向別頻度の値は、 $10^\circ$  間隔で求められた方向別度数を 1/10 最大流速以上の総個数で無次元化した相

対頻度である。

図-7(a) に示す主幹部前面では、多方向波および一向波共に斜面に沿った流れが主要な作用流速であり、この図より down-rush のほうが up-rush よりも相対頻度の値が大きいため、主幹部前面では down-rush が被覆捨石の被災の主要な要因であると推察できる。一方、堤頭部においては、図-7(b) の  $\theta_p=70^\circ$  の堤頭部中央部 (MH 1) では、堤体に沿った流れについては一向波の方が大きいものの、堤体下り方向の流れについては多方向波と一向波ともほぼ同じ大きさであり、多方向波のほうが波の方向分散性の影響により方向分布が広がっている。図-7(c) の  $\theta_p=100^\circ$  の位置 (MH 2) では、一向波の場合は図-7(b) と同様な卓越方向であるが、多方向波の場合は方向分散性に伴って直接に堤頭部へ来襲する波の反射波の影響と思われる堤体から離れていく方向に方向分布が広がりをもつ流れが認められる。また、図-7(d) の  $\theta_p=140^\circ$  の堤頭部背面部 (BH 1) では、多方向波および一向波とも堤体に沿った流れが大部分である。従って、主幹部前面から堤頭部前面部の被災と中央部から背面部における被災要因が、多方向および一向不規則波共に異なり、特に背面部での被災は堤体に沿って堤体後方へ回り込む流れによることがわかる。

## 4. 堤体の被災特性

図-8 は、堤頭部の中心より放射方向に  $5^\circ$  間隔に設定された断面のダメージ・パラメータ  $S$  を初期被災から最終破壊に至るまでの作用波浪毎に示したもので、横軸は被災断面の各セクションを表す。これらの図より、初期被災位置と最終破壊に至るまでの被災位置の対応性は、一向および多方向不規則波共によく認められる。

FH 部における被災は、筆者ら (1996) の被災実験と図-7(a) から明らかなように、一向および多方向不規則波とも斜面上の波の down-rush および up-rush が被災の要因であり、波高の増大に伴って被災が進行したものと推察される。

MH 部における被災は、一向波と多方向波を図-5

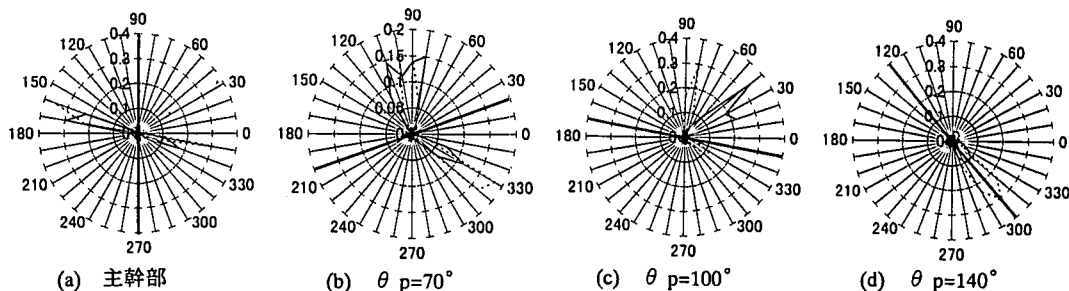


図-7 堤体上の合成流速の方向別頻度分布

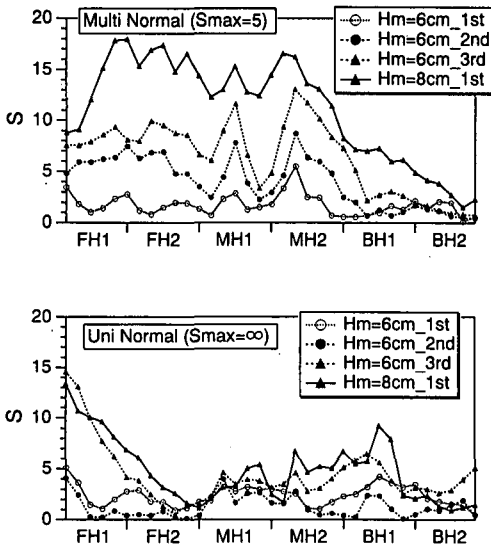


図-8 堤頭部のS値の経時変化

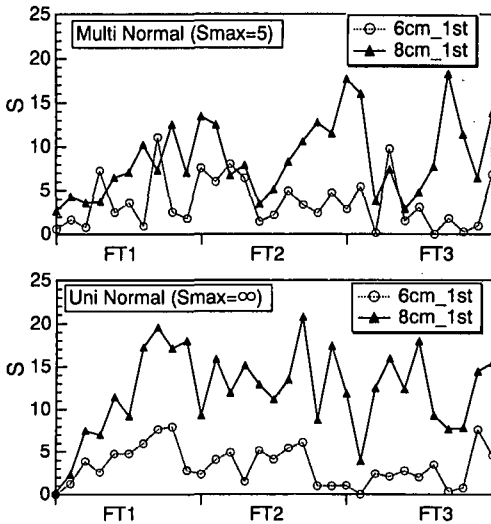


図-9 主幹部前面のS値の経時変化

と比較すると、初期移動発生位置との対応性が確認でき、波高の増大に伴い被災箇所を経時的な拡大が見られた。また、図-7(c)でも示したように多方向波の場合は、堤体から離れていく方向による作用流速によりMH2で被災が生じたと推察される。

BH部における被災は、MH部の前半斜面上で形成される水位の上昇によって生じる堤頭部に沿って後方へ回り込む強い流れによることが図-7(d)の合成流速の方向別頻度分布からも明らかである。特に一方方向不規則波

の場合は、その強い流れが初期被災の箇所を起点にして削り取るように後方へ回り込み、さらに波高の増加に伴って回り込む流れが強くなることから、この領域での被災が進行したものと考えられる。他方、多方向不規則波に関しても、堤体背面部へ回り込む流れによりMH部の被災が拡大されてS値が増加したと推察される。

図-9は主幹部前面のダメージ・パラメータSを初期被災と最終破壊について示したものである。一方方向不規則波の場合、down-rushおよびup-rushによりS値が増大しており、図-6に示した捨石の移動発生頻度分布と被災位置の対応性が認められる。他方、多方向不規則波の場合、被災位置の対応性は大部分で一致しているが、被災位置の若干のズレは波の方向分散性の影響によるものと推察されるが十分に明らかではない。

## 5. 結 言

本研究は、多方向および一方方向不規則波における島堤堤頭部の流速場の計測結果と、捨石の移動限界流速算定式に基づいて得られた堤頭部上の空間的な捨石の移動発生頻度より、多方向不規則波における局所的な捨石の移動の可能性が高い傾向にあること、また多方向および一方方向不規則波において局所的な初期被災から最終破壊に至る経時的な対応性が認められた。また、堤頭部上の流速測定より被覆捨石の被災を誘発する流れ場の特徴が把握できた。主幹部に関する捨石の移動限界流速の算定式を提案し、多方向および一方方向不規則波浪場における主幹部の安定性を検討した結果、主幹部の安定性を一方方向波浪場における被災結果から考慮すると過剰設計になる可能性が十分にあることが明らかになった。

## 参 考 文 献

- 松見吉晴・E. P. D. Mansard・大野賢一 (1994): 多方向波浪場における防波堤周辺の波動場の計算モデル, 海岸工学論文集, 第41巻(1), pp. 131-135.
- 松見吉晴・大野賢一 (1995): 多方向不規則波に対する堤頭部上の流速特性と被災パターン, 海岸工学論文集, 第42巻(2), pp. 881-885.
- 松見吉晴・大野賢一・家村健吾・木村 晃 (1996): 多方向不規則波浪場における堤頭部の被災特性, 海岸工学論文集, 第43巻(2), pp. 811-815.
- Matsumi, Y., E. P. D. Mansard and J. Rutledge (1994): Influence of wave directionality on stability of breakwater heads, Proc. 24th ICCE, pp. 1397-1411.
- Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour-layers design formulae, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 219-239.
- Vidal, C., M. A. Losada and R. Medina (1991): Stability of mound breakwater's head and trunk, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 117, No. 6, pp. 570-587.