

多方向不規則波における堤頭部被覆材の安定重量に関する研究

大野 賢一*・松見 吉晴**・木村 晃***

1. 緒 言

従来、傾斜堤や消波ブロック被覆防波堤の安定性は、構造物に対して直角方向からの来襲波だけを対象に検討することで、十分な安定性が得られると考えられた。防波堤の堤頭部では、波の方向分散性の影響により色々な方向から波の直接的な来襲を受けることから、堤頭部に使用する捨石や被覆ブロックの重量は Hudson 公式や Van der Meer 公式によって与えられる安定重量の 1.5 倍以上が推奨されているが、堤頭部の被覆材の安定重量に関する上記の割り増しの水理学的な根拠や具体的な割増率の決定法は明らかにされていない。

大野ら (1998) による多方向不規則波浪場での堤頭部上の流速場に関する計測実験では、入射波浪条件によつては一方不規則波の場合より局所的に作用流速が大きくなることが確認されている。また、多方向不規則波浪における作用流速の局所的な増大は局所的な被覆材の初期移動を発生させ、この被覆材の初期移動がトリガーとなって最終的な堤体破壊にまで発展する。従って、堤頭部および主幹部の被覆材の安定重量については、特に波の反射、回折、屈折現象および浅水変形、さらには波の方向分散性の相互干渉によって生じる局所的な作用流速の増加に着目した検討が必要となる。

本研究は、堤頭部および主幹部上における作用流速に着目し、捨石に作用する流体力と抵抗力の平衡関係式より作用流速の方向による法面勾配の変化を考慮した被覆捨石の安定重量の算定式を誘導し、堤体上の流速場の計測結果を用いて堤体上の被覆捨石の安定重量に関して検討するものである。また、安定重量の空間特性と堤体の被災状況を関連づ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 に示すようにコア一部と 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、コア一部の代表径は表-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 割り増しをしている。堤体の高さ 50 cm は、実験時の水深 30 cm で越波が起らないように設定した値である。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、松見ら (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どの部分が位置するよう決定された。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

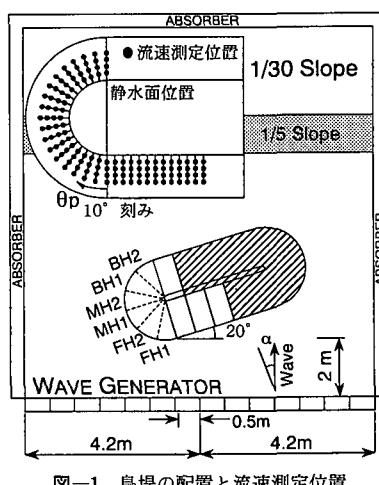


図-1 島堤の配置と流速測定位置

* 正会員 工博 烏取大学助手 総合情報処理センター
** 正会員 工博 烏取大学助教授 工学部社会開発システム工学科
*** 正会員 工博 烏取大学教授 工学部社会開発システム工学科

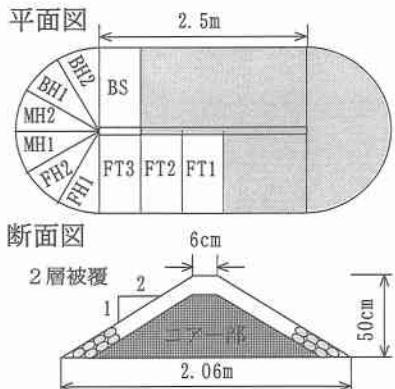


図-2 島堤モデルの説明図

表-1 島堤モデルの構成材料の寸法

破覆捨石の中央重量 (W_{a50})	42 gf (0.4116 N)
破覆捨石の代表径 (D_{n50})	2.51 cm (0.0251 m)
コア一部の中央重量 (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)

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

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水平方向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10cm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。堤頭部中心から計測点までの水平距離は、それぞれ58cm, 66cm, 74cmおよび82cmである。

(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、回転式ポテンショメータを利用した接触型の変位計を用いて、堤体縦断面方向に対して5cm間隔で堤体の断面形状を測定した。堤頭部の被災量は、堤頭部における20本の測定結果を基に、堤頭部の中心より放射方向に5°間隔の断面に変換し、ダメージ・パラメータ $S (= A_e / D_{n50}^2, A_e : \text{侵食面積}, D_{n50} : \text{被覆捨石の代表径})$ 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; $T_p=1.0, 1.4\text{s}$)をもつ一方向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($T_p=1.4\text{s}$ の場合)および

1440($T_p=1.0\text{s}$ の場合)である。

流速場の計測実験での目標有義波高 H_m は、多方向および一方向不規則波共に6cm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有義波高の大きさである。

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、堤頭部における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了。この時の有義波高 H_m の変化は、4cmを初期値として最大8cmまで2cm間隔で、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. 被覆捨石の安定重量に関する考察

(1) 被覆捨石の安定重量の算定式について

松見ら(1995)が提案した捨石の移動限界流速の算定式を導出した方法を基に、作用合成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被覆捨石の安定重量の算定式を誘導する。

図-3に示す堤頭部上の捨石Aに対して作用合成流速ベクトルがx軸に関して角度 θ_r で、大きさ V_r で作用しているとする。作用合成流速ベクトルの作用方向に対する堤頭部の鉛直断面形状は、堤頭部面を円錐面と仮定すると双曲線になる。ここで、同図に示すような双曲線に沿って配列された半径 r の捨石の安定条件について、点Oに関する捨石に作用する流体力と抵抗力の回転モーメントを考えると、斜面が下り勾配の場合での平衡関係式が次式のように得られる。

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) W_r \cos a_t + fN \{ r + r \cos(a_t - a_u) \} \\ & = F_D(b + r \sin a_t) + F_L r \cos a_t \quad \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

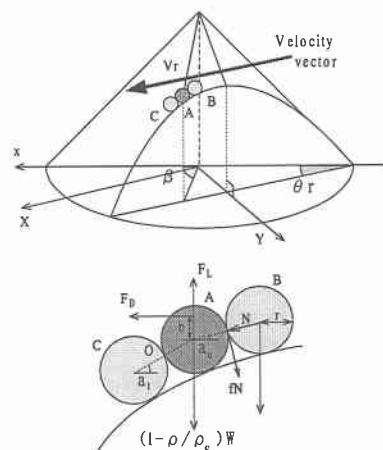


図-3 堤頭部上の捨石に作用する作用合成流速と作用力

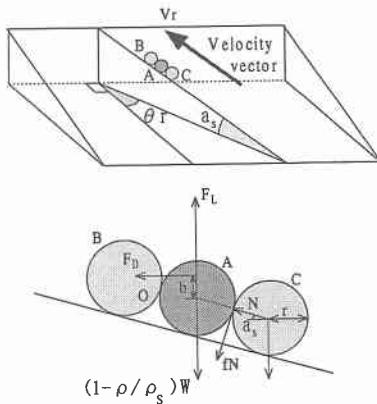


図-4 主幹部上の捨石に作用する作用合成流速と作用力

ここに、 W は捨石の空中重量、 ρ および ρ_s は流体および捨石の密度、 f は捨石間の摩擦係数、 b は水平方向流体力 F_D の作用位置である。捨石 A に作用する水平および鉛直方向の流体力として捨石の断面積に比例する抗力 F_D と揚力 F_L 、並びに抵抗力として N を次式のように考える。

$$\left. \begin{aligned} F_D &= m' \rho \pi r^2 V_r^2 \\ F_L &= \frac{1}{2} \rho C_L \varepsilon \pi r^2 V_r^2 \\ N &= \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) W \sin \alpha_u \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 m' は抗力係数、 C_L は揚力係数、 ε は遮蔽係数である。式 (2) を式 (1) に代入し、作用合成流速ベクトルの作用方向に対する傾きを考慮に入れて整理すると、堤頭部における被覆捨石の安定重量の算定式は、次式のように表せる。

$$W = \left(\begin{aligned} &\rho \pi r^2 V_r^2 \left\{ m' \left(\frac{b}{r} \sqrt{1 + \left(\frac{\cos(\beta - \theta_r)}{2} \right)^2} \right) \right. \\ &\left. + \frac{\cos(\beta - \theta_r)}{2} \right\} + \frac{C_L \varepsilon}{2} \end{aligned} \right) \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \{ 1 + f \cos(\beta - \theta_r) \} \quad (3)$$

ここに、斜面が上り勾配の場合には摩擦係数 f の前の符号がマイナスになる。

主幹部に関して、堤頭部と違いが生じるのは、作用流速の傾きが斜面の高さによって変化しないことである。図-4 に示す主幹部上の捨石 A に対して、斜面が上り勾配の場合での平衡関係式が次式のように得られる。

$$\begin{aligned} &\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) W r \cos \alpha_s + 2 f N_r \\ &= F_D (b - r \sin \alpha_s) + F_L r \cos \alpha_s \end{aligned} \quad (4)$$

式 (2) を式 (4) に代入し、作用合成流速ベクトルの作用方向に対する傾きを考慮に入れて整理すると、主幹

部における被覆捨石の安定重量の算定式は、次式のよう に表せる。

$$W = \left(\begin{aligned} &\rho \pi r^2 V_r^2 \left\{ m' \left(\frac{b}{r} \sqrt{1 + \left(\frac{\cos \theta_r}{2} \right)^2} \right) \right. \\ &\left. - \frac{\cos \theta_r}{2} \right\} + \frac{C_L \varepsilon}{2} \end{aligned} \right) \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) (1 + f \cos \theta_r) \quad (5)$$

ここに、斜面が下り勾配の場合には摩擦係数 f の前の符号がマイナスになる。

式 (3) および式 (5) における諸係数については、便宜的に $m'=1$ 、 $b=0.5r$ 、 $f=0.4$ 、 $\varepsilon=0.4$ 、 $C_L=0.5$ と仮定して計算を進めるところとする。

(2) 堤体上における安定重量の割増率に関する検討

図-5 および図-6 は、それぞれ多方向 ($S_{max}=5$) および一方向不規則波における静水面付近 ($R=58$ cm) での流速場の計測結果と、式 (3) および式 (5) に基づいて得られた捨石の重量割増率に関する頻度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 Hudson 公式で求められた安定重量 W_H を越える安定重量 W の比に対する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、直角入射、 $T_p=1.4$ s、 $H_m=6$ cm の結果である。

図-5 に示す堤頭部において、(A) の多方向不規則波では相対頻度値が 0.0002 と小さいものの、堤頭部中央部において Hudson 公式による安定重量の 6 倍程度が必要となる。これは波の方向分散性に伴う直接的な来襲波の影響により堤頭部中央部において局所的に作用流速が大きくなつたためと推測される。また (B) の一方向不規則波では、堤頭部中央部までは 2 倍程度の割増率になつて

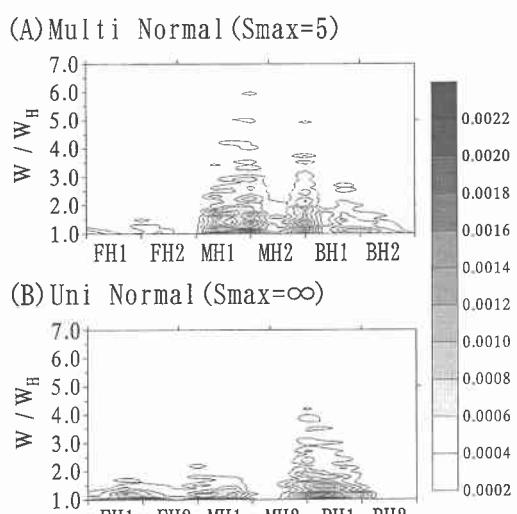


図-5 堤頭部における重量割増率の頻度分布図

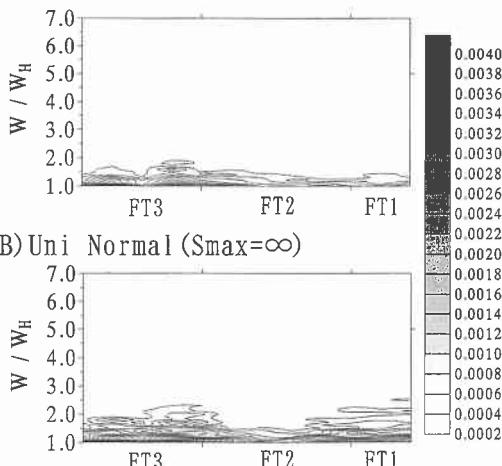
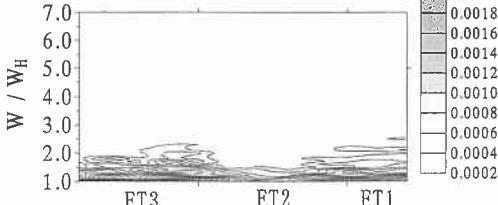
(A) Multi Normal ($S_{\max}=5$)(B) Uni Normal ($S_{\max}=\infty$)

図-6 主幹部における重量割増率の頻度分布図

いるが、背面部になると4倍程度まで増大している。この背面部における重量割増率の急激な増加は、堤頭部前面部から中央部で形成された水位の上昇に伴う強い流れの突っ込む位置が堤頭部背面位置にあたる(大野ら, 1997)ためと考えられる。図-6に示す主幹部において、斜面に沿った up-rush および down-rush が主要な作用流速であるため、多方向および一方向不規則波とも重量割増率はほぼ同程度となっている。以上のことから、堤頭部中央部の安定重量に対する波の方向分散性の影響は大きく、一方向不規則波に比べて重量割増率を大きくする必要性があると指摘できる。

(3) 堤体上における安定重量の空間分布特性

ここでは、多方向および一方向不規則波浪場における堤体上の安定重量の具体的な割増率および割増が必要となる空間的な領域について検討する。図-7は直角入射、 $T_p=1.4$ s, $H_m=6$ cm での多方向 ($S_{\max}=5$) および一方向不規則波浪場における堤体上の安定重量に関する空間分布特性を示したものである。図中の値は初期値が 1.0 で刻みが 0.5 であり、計測された流速の時系列データを用いて、作用合成流速には 1/250 最大流速および作用方向には方向別頻度分布の最大値を示す卓越方向に基づいて得られた捨石の安定重量 W を Hudson 公式で算定された安定重量 W_H で割った重量割増率を表している。これらの図より、特に (A) の多方向不規則波では、堤頭部中央部 (MH1, MH2) においては波の方向分散性に伴う直接的な来襲波により Hudson 公式で算定された重量の約 3.5 倍の安定重量が必要になることが認められる。また、一方向不規則波の堤頭部背面部における被覆材の安定重量は、従来から指摘されているように堤頭部背面部へ回り込む流れにより約 2.5 倍の割増を必要とすることがわ

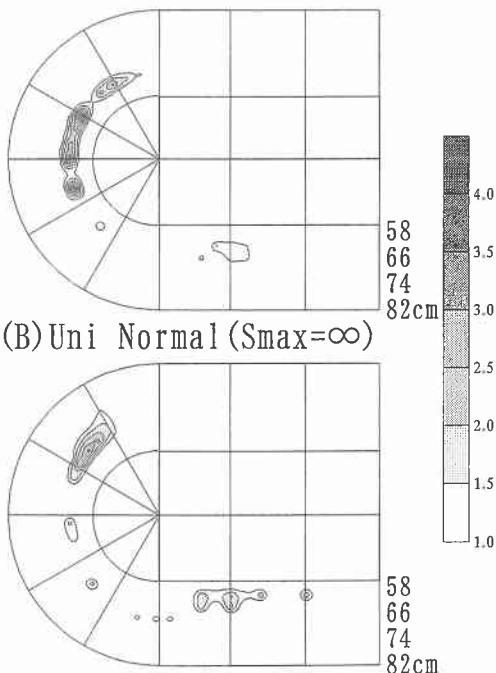
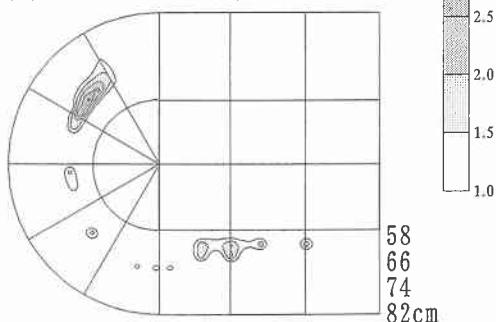
(A) Multi Normal ($S_{\max}=5$)(B) Uni Normal ($S_{\max}=\infty$)

図-7 捨石の安定重量の空間分布特性

かる。一方、主幹部の安定重量に関しては、多方向不規則波の重量割増率は波の方向分散性の影響に伴って一方向不規則波の結果より小さく、一方向不規則波とともに Van der Meer 公式により K_D を求め Hudson 公式によって与えられることが明らかになった。

4. 堤体の被災特性

図-8は多方向 ($S_{\max}=5$) および一方向不規則波での被災実験における被災パターンを示したもので、図中の値は有義波高 4 cm の初期断面と各作用波浪毎に計測された堤体の侵食断面との差を捨石の中央粒径 D_{z50} で無次元化した侵食差を表している。図-7に示した捨石の安定重量の空間分布特性と比較すると、(C) の一方向不規則波浪場の主幹部において up-rush および down-rush の影響と思われる帶状の被災パターンが見られるものの、(A) および (C) ともほぼ一致している。また、(B) および (D) について、実験に用いた捨石は有義波高 6 cm を対象として設定していたため、最終的な破壊を引き起こす有義波高 ($H_m=8$ cm) を作用させたことで被災パターンの拡大および侵食差の増大が見られたものと考えられる。図-9は、堤頭部のダメージ・パラメータ S の初期被災を示したもので、横軸は被災断面の各セクションを表す。多方向不規則波 ($S_{\max}=5$) では MH2 部から BH1 部にかけて、一方向不規則波では BH1 部において

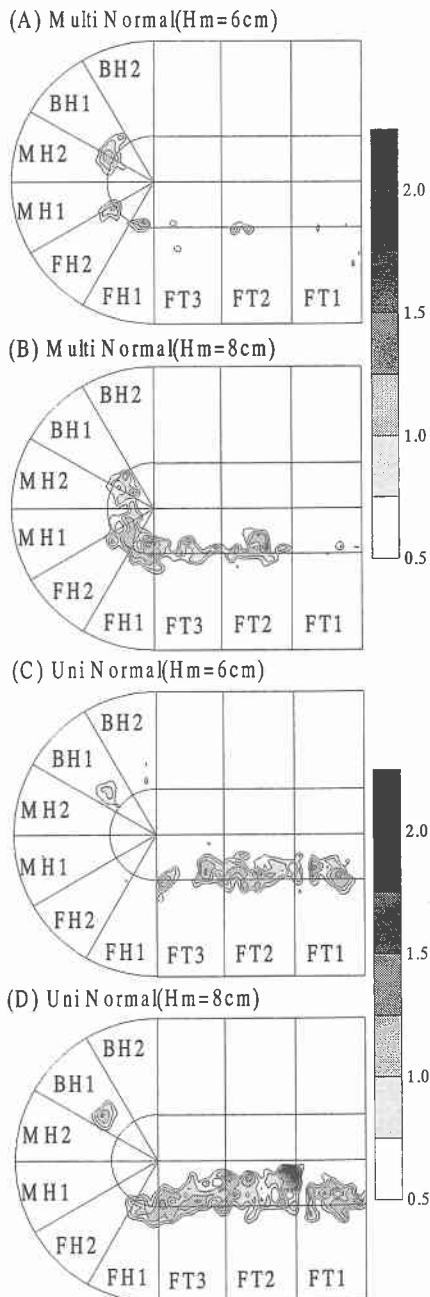


図-8 堤体上の被災パターン

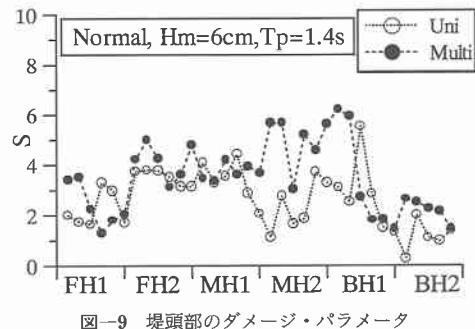


図-9 堤頭部のダメージ・パラメータ

S 値が増大している。以上のことから、捨石の安定重量の算定式は実験結果を比較的良く再現していることが確認できる。

5. 結 言

本研究は、多方向および一方向不規則波における島堤堤体上の流速場の計測結果と、捨石の安定重量の算定式に基づいて得られた堤体上における空間的な重量割増率および割増が必要となる空間的な領域について明らかにした。多方向不規則波では波の方向分散性の影響により堤頭部中央部において Hudson 公式の約 3.5 倍の重量割増を必要とすることがわかった。また、一方向不規則波では流体場の特徴から堤頭部背面部において約 2.5 倍の重量割増が必要であることが確認できた。

参 考 文 献

- 大野賢一・松見吉晴・木村 晃・家村健吾 (1997): 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, 海岸工学論文集, 第 44 卷, pp. 951-955.
- 大野賢一・松見吉晴・木村 晃 (1998): 島堤堤体上における多方向不規則波の作用流速と被災特性, 海岸工学論文集, 第 45 卷, pp. 761-765.
- 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 卷, 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 卷, pp. 881-885.
- Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour-layers design formulae, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 219-239.