

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 ( $L$ )	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箇所的位置と主幹部前面は10cm間隔の計48箇所的位置で水平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  $S (= A_e / D_{n50}^2)$ 、 $A_e$ : 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有義波高  $H_m$  は、多方向および一方不規則波共に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した。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  $\theta_r$  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。

$$\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) W r \cos a_t + f N \{r + r \cos(a_t - a_u)\} = F_D(b + r \sin a_t) + F_L r \cos a_t \dots\dots\dots (1)$$

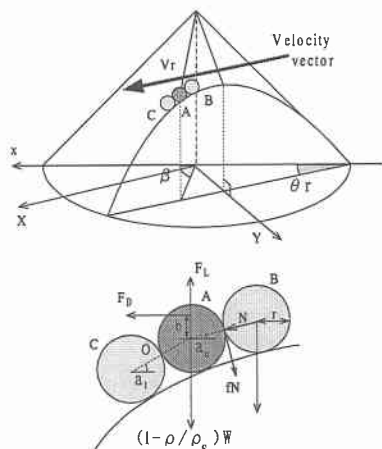


図-3 堤頭部上の捨石に作用する作用合成流速と作用力

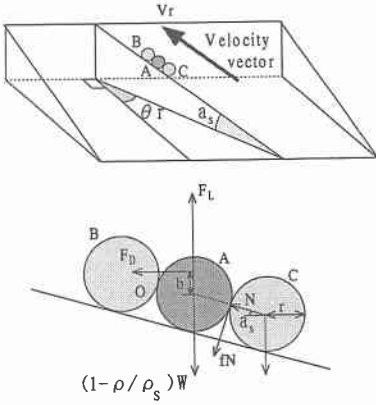


図-4 主幹部上の捨石に作用する作用合成流速と作用力

ここに、 $W$  は捨石の空中重量、 $\rho$  および  $\rho_s$  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。

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

ここに、 $m'$  は抗力係数、 $C_L$  は揚力係数、 $\varepsilon$  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。

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

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。

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

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。

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

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ことにする。

(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 ( $S_{max}=5$ ) および一方方向不規則波における静水面付近 ( $R=58 \text{ cm}$ ) 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、 $T_p=1.4 \text{ s}$ 、 $H_m=6 \text{ cm}$  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ったためと推測される。また (B) の一方方向不規則波では、堤頭部中央部までは 2 倍程度の割増率になって

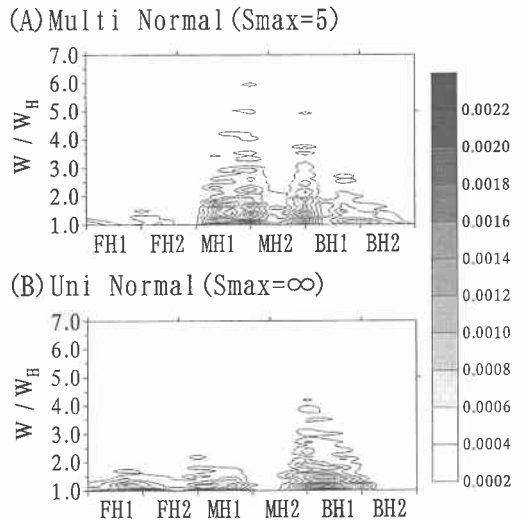


図-5 堤頭部における重量割増率の頻度分布図

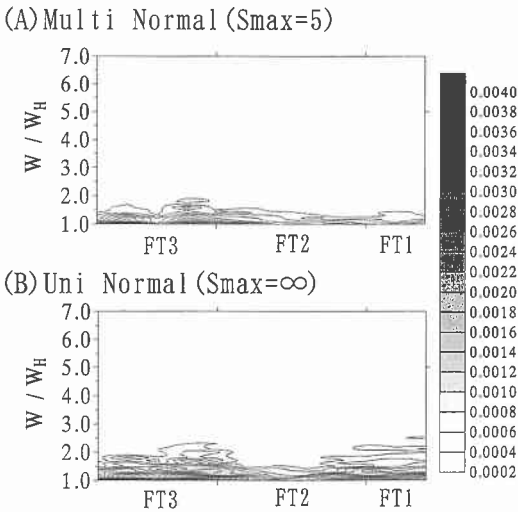


図-6 主幹部における重量割増率の頻度分布図

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、 $T_p=1.4s$ ,  $H_m=6cm$ 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

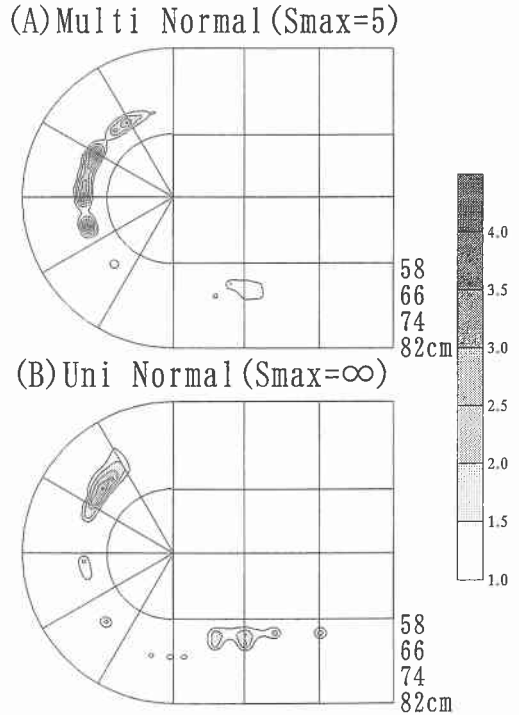


図-7 捨石の安定重量の空間分布特性

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4cm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 $D_{n50}$ 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の影響と思われる帯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6cm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( $H_m=8cm$ )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

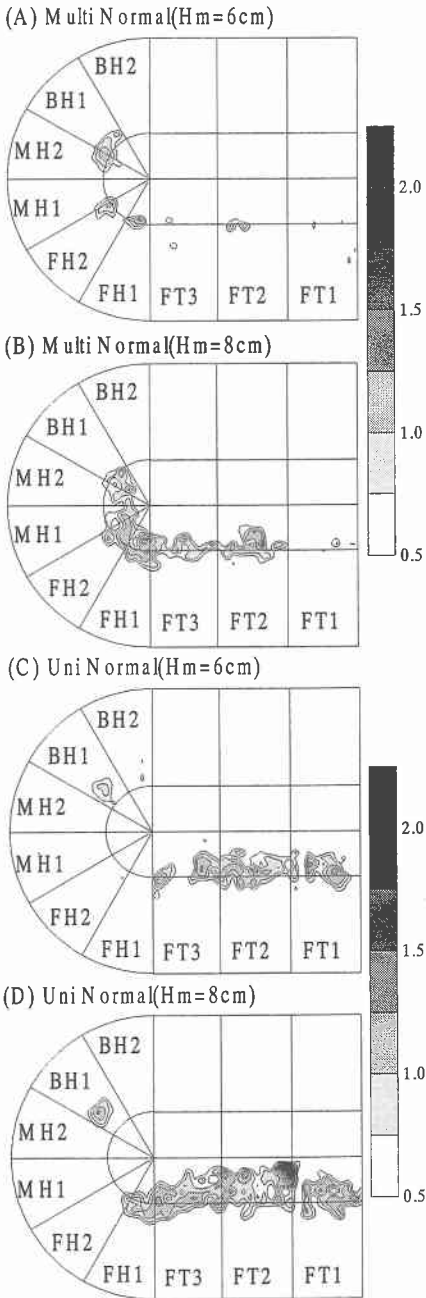


図-8 堤体上の被災パターン

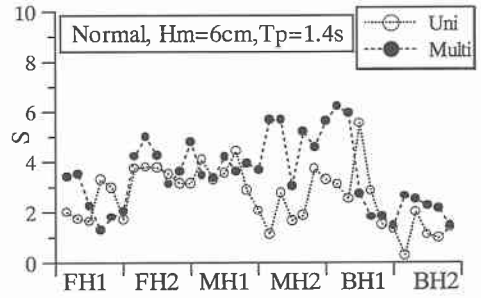


図-9 堤頭部のダメージ・パラメータ

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 巻, 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 巻, 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 巻, 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, pp. 881-885.  
 Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour-layers design formulae, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 219-239.