

被覆捨石の動的挙動を考慮した多方向不規則波浪場における 堤頭部の安定性について

大野 賢一*・松見 吉晴**・木村 晃***

1. 緒 言

防波堤被覆材の安定重量に関する算定式は、被覆材に作用する流体力と抵抗力の静的な平衡関係によって導出されたものが用いられてきている。大野ら（1999）も、多方向不規則波浪場における島堤堤頭部の安定性について、捨石の移動に関する平衡方程式より堤頭部被覆材の所要重量に対して重量割増率の空間分布を示した。その結果、多方向不規則波の場合、堤頭部中央部での波の反射、回折、屈折および浅水変形と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の場合より局所的に被覆材の極端な重量割増を必要とすることを明らかにしてきた。

しかし静的な安定条件では、例えば、ある瞬間において作用流体力により被覆材が初期状態よりわずかに移動しても被災と判定されることになるが、作用波浪条件によっては被災に至らずに被覆材がもとの初期状態に戻る可能性もある。すなわち、被覆材の斜面上でのロッキング現象である。従って、被覆材の安定重量に関して静的な平衡条件により検討することは、過剰設計になる可能性が十分に考えられる。

そこで本研究は、島堤堤体上の作用流速と波の方向分散性の関連性に着目し、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動的挙動に関する計算モデルを開発し、堤体上の流速場の詳細な計測結果を用いて堤体上の空間的な捨石の安定性に関して作用流速と捨石の動的な動きから検討したものである。

2. 実験の内容

(1) 実験装置

実験は 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浪造波水槽（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-1 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、実験時の水深 30 cm で越波が起こらないように設定した値である。堤頭部および堤幹部の法面勾配は 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、堤頭部および堤幹部のほとん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、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 箇所の位置と堤幹部前面は 10 cm 間隔の計 48 箇所の位置で水平

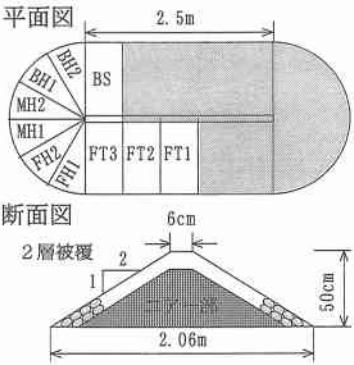


図-1 島堤モデルの説明図

* 正会員 博(工) 鳥取大学助手 総合情報処理センター
** 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

表-1 島堤モデルの構成材料の寸法

被覆捨石の中央重量 (W_{c50})	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 (L)	250 cm (2.50 m)
堤頭部の直径 (D)	206 cm (2.06 m)

$$D_{n50} = (W_{c50}/\rho_s g)^{1/3} \quad \rho_s: \text{被覆捨石の密度}$$

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 58 cm, 66 cm, 74 cm および 82 cm である。

(3) 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 ($T_p=1.4$ 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、多方向および一方向不規則波共に 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有義波高の大きさである。

3. 被覆捨石の動的挙動に関する計算モデル

被覆捨石の動的モデルの開発において、中川ら (1991) によって提案された砂粒子の転動離脱モデルを基に、堤体上の作用流速の方向による斜面勾配の変化を考慮した被覆捨石の動的挙動に関する計算モデルの開発を行う。

図-2 に示す斜面上の捨石 A が作用力を受けて移動する場合を仮定する。捨石の動作については回転運動に限定するため、捨石 A に作用する水平および鉛直方向の流体力として抗力 F_D と揚力 F_L 、捨石 A の回転角 θ を用いた運動方程式が次式で表される。

$$Md \frac{d^2 \theta}{dt^2} = (F_L - W) \sin(\beta_u - \theta) + F_D \cos(\beta_u - \theta) - F_f \dots (1)$$

ここに、 M は捨石の仮想質量、 d は捨石の直径、 W は捨石の水中重量、 β_u は初期状態の捨石 A と捨石 B の中心を結んだ直線と鉛直軸とのなす角、 F_f は捨石 A と捨石 B との間の摩擦力である。また、捨石 A 周りの回転運動の方程式は、次式で表される。

$$I_C \frac{d\omega}{dt} = F_f \frac{d}{2} \dots (2)$$

ここに、 I_C は捨石 A の直径周りの慣性モーメント、 ω は

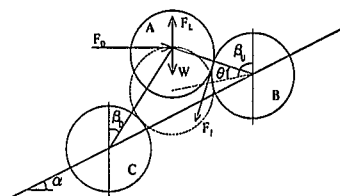


図-2 被覆捨石の転動離脱モデル

回転の角速度である。完全転動を仮定しているため、

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{d\omega}{dt} \dots (3)$$

となる。式 (2) と式 (3) より、摩擦力 F_f は以下の式で与えられる。

$$F_f = \frac{4I_C}{d} \frac{d^2 \theta}{dt^2} \dots (4)$$

式 (4) を式 (1) に代入することで、以下に示す捨石の動的挙動に関する安定性モデルの運動方程式が得られる。

$$\left(Md + \frac{4I_C}{d} \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} = (F_L - W) \sin(\beta_u - \theta) + F_D \cos(\beta_u - \theta) \dots (5)$$

また、捨石を球体と仮定しているため M , W , I_C , F_D , F_L はそれぞれ次式のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{\pi}{6} \rho \left(\frac{\rho_s}{\rho} + C_M \right) d^3 \\ W &= \frac{\pi}{6} \rho g \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) d^3 \\ I_C &= \frac{2}{5} \left(\frac{d}{2} \right)^2 M \\ F_D &= \frac{1}{4} \rho m' \varepsilon \pi d^2 V_r^2 \\ F_L &= \frac{1}{8} \rho C_L \varepsilon \pi d^2 V_r^2 \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

ここに、 ρ および ρ_s は流体および捨石の密度、 m' は抗力係数、 V_r は作用流速の大きさ、 C_L は揚力係数、 ε は遮蔽係数である。ここでは捨石の直径を 2.5 cm とし、式中の諸定数については、 $C_M=0.5$, $m'=1$, $\varepsilon=0.3$, $C_L=0.5$ とする。

次に、上記の鉛直 2 次元モデルを 3 次元モデルへ拡張するとき、作用流速の方向の変化に伴う堤体の斜面勾配の変化を導入する必要がある。そのため、松見・大野 (1995) が提案した捨石の移動限界流速の算定式を基にして斜面勾配 α を導出し、図-2 に示す捨石の転動離脱モデルを新しい斜面勾配で作用流速の方向へ回転させ、捨石の動的挙動を疑似 3 次元的に計算している。被災の判定条件については、捨石 B の頂部から上方へ離脱する場合もしくは捨石 C の頂部から下方へ転落する場合とする。

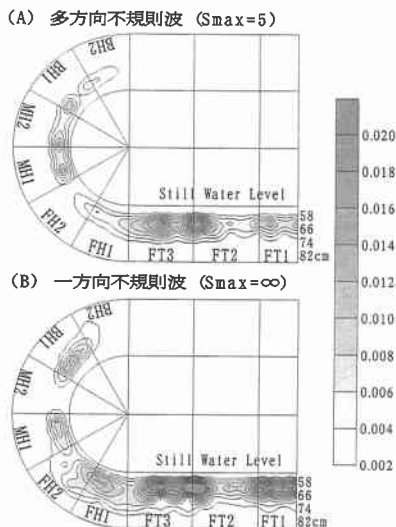


図-3 堤体上の初期被災発生頻度分布

4. 被覆捨石の安定性に関する考察

(1) 被覆捨石の被災個数に関する検討

図-3は有義波高6 cm, $T_p=1.4$ s, $\alpha=0^\circ$ での多方向および一方不規則波における堤体上の被災個数に関する空間分布特性を示したものである。図中の値は各測定点における流速の時系列データに対する被災個数を全データ数で無次元化した相対頻度であり、初期値が0.002で刻みが0.002である。これらの図より、被覆材の安定性に及ぼす波の方向分散性の影響は大野ら(1998)による静

的な解析結果より明確になり、特に(A)の多方向波($S_{max}=5$)の堤頭部中央部(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る被災個数の相対頻度値の増大が顕著である。(B)の一方向波の場合は、従来から指摘されているように堤体背後へ回り込む流れにより堤頭部背面部において相対頻度値の増大が確認できる。一方、堤幹部に関しては、多方向波および一方向波ともに静水面付近で相対頻度値が高いが、多方向波の場合は波の方向分散性の影響により一方向波よりも頻度値が小さく、局所的に被災が発生する被災実験結果(大野ら, 1998)とほぼ一致することが認められた。

(2) 被災捨石の移動方向と波の方向分散性について

堤体上において被災が発生した場合、入射波浪条件の違いにより捨石がどの方向へ離脱もしくは転落したのかについて検討する。

図-4は有義波高6 cm, $T_p=1.4$ s, $\alpha=0^\circ$ での多方向($S_{max}=5$)および一方不規則波における堤体上の静水面付近($R=58$ cm)での流速場の計測結果を用いて式(5)より得られた被災個数の方向別相対頻度を示す。図中の方向別相対頻度の値は、各計測箇所で 10° 間隔で求められた被災個数を被災した全個数で無次元化したもので、図中の実線が多方向波($S_{max}=5$)、破線が一方向波($S_{max}=\infty$)を示している。なお、 θ_p は堤頭部前面部から背面方向への角度であり、図中の太い実線は各位置における水平面上での堤体の接線方向を表す。

図(a)の堤幹部前面部において多方向および一方向波とも捨石は斜面下方へ転落しているため、斜面に沿ったdown-rushが主な被災要因であることがわかる。多方向

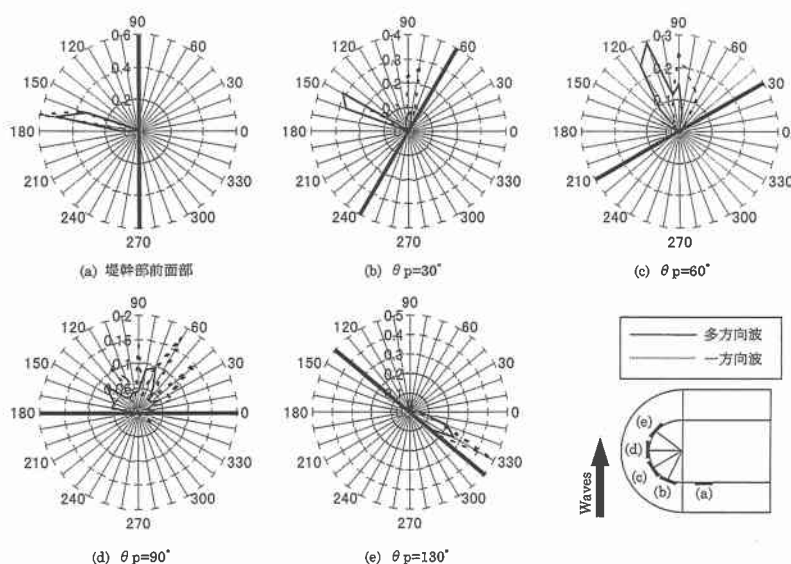


図-4 被災捨石の移動方向特性

波の場合には一方向波の場合よりも相対頻度値が小さくなっており、波の方向分散性の影響と考えられる。図(b)の堤頭部前面部($\theta_p=30^\circ$)において、多方向波の場合、転落方向が堤体斜面を下る方向へ卓越しているのに対し、一方向波の場合には堤体接線に沿う方向に転落している。図(c)の堤頭部前面部($\theta_p=60^\circ$)では、一方向波の場合、波の回折、屈折による作用流速方向の収斂化のために $\theta_p=30^\circ$ で2方向に分かれていた転落方向が一方向となる。

図(d)の堤頭部中央部($\theta_p=90^\circ$)において、多方向波の場合にはそれぞれの方向別頻度値は小さいものの堤体下る方向へほぼ一様に分散して転落している。この要因として、堤頭部の形状特性により捨石が不安定であることも考えられるが、波の方向分散性の影響により堤頭部中央部への直接的な来襲波の影響によるものと考えられる。一方向波の場合も同様に斜面下方へ捨石が転落しているが、転落方向が多方向波に比べて分散化は大きくない。

図(e)の堤頭部背面部($\theta_p=130^\circ$)においては、多方向波および一方向波とも堤頭部に沿って背面部へ回り込む流れにより堤体の接線方向へ卓越して転落している。

(3) 被災状況に及ぼす波の方向分散性の影響について

堤体上の作用流速により被災捨石が動き始める時、捨石は不安定な状態ではあるが被災には至っていない。従って、捨石が不安定な状態になったときに、被災に至った場合と被災に至らなかった場合(すなわち初期状態に戻った場合)の被災個数について検討する。

図一5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($R=58\text{ cm}$)での流速場の計測結果と、式(5)に基づいて得られた捨石の移動および被災個数に関する頻度分布を示したものである。ここでの頻度分布の値は、各測定点において被災した個数もし

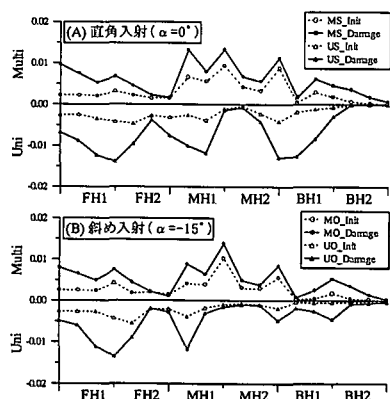
くは移動したが被災しなかった個数を流速の全データ数で無次元化したものである。これらの図において、横軸は堤体上の各セクションを示し、縦軸はゼロ線より上向きが多方向波、ゼロ線より下向きが一方向波の相対頻度値を表している。ここでは一方向波の相対頻度値を作図上の都合からマイナスを付けて表している。

図(A)の直角入射($\alpha=0^\circ$)および図(B)の斜め入射($\alpha=-15^\circ$)とも多方向波は堤頭部中央部(MH)で被災に至ったケース(図中 Damage)が多いが、同様に被災に至らなかったケース(図中 Init)も多いことが確認できる。この要因として、波の方向分散性の影響により作用流速の卓越方向が変動するため、堤体上で被災が発生していなくても捨石の移動は起こっているものと推察できる。他方、一方向波の場合は被災に至った箇所と被災に至らなかった箇所の差が大きくなっている。これは堤体上における流れの発生位置およびその流れのつっこむ位置がほぼ一定であることから、被災が発生する条件がほぼ決まっているためと考えられる。

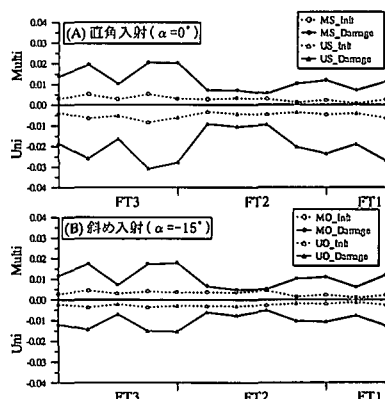
図一6に示す堤幹部に関しては、斜面に沿った down-rush および up-rush が主要な作用流速であるため、多方向波および一方向波ともほぼ同じような結果を示している。図(A)の直角入射の場合には、被災に至らなかったケースが空間的に同程度であるのに対し、被災に至ったケースでは多方向波の方が一方向波よりも相対頻度値が小さくなっている。このことは、多方向波の堤幹部前面部では波の方向分散性の影響により一方向波ほど斜面上での up-rush および down-rush の周期による共振現象が発生しなかったため、堤体上の被災個数が減少したものと推察できる。図(B)の斜め入射の場合は、多方向波と一方向波には大きな違いは認められない。

(4) 被覆捨石の重量割増率について

ここでは、多方向波および一方向不規則波浪場における堤体上の捨石の所要重量に関して捨石の動的挙動を考



図一5 入射波浪条件による被災状況の違い(堤頭部)



図一6 入射波浪条件による被災状況の違い(堤幹部)

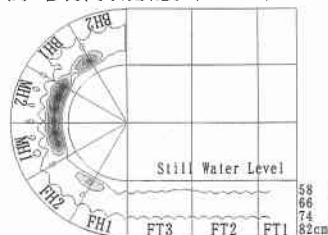
(A) 多方向不規則波 ($S_{max}=5$)(B) 一方向不規則波 ($S_{max}=\infty$)

図-7 動的モデルより求めた重量割増率

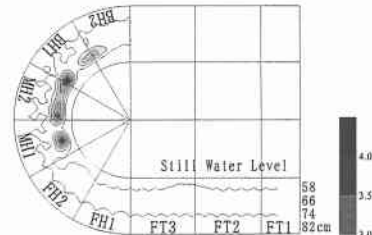
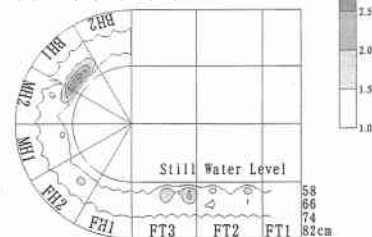
(A) 多方向不規則波 ($S_{max}=5$)(B) 一方向不規則波 ($S_{max}=\infty$)

図-8 静的モデルより求めた重量割増率

慮した重量割増率を検討する。重量割増率の算定にあつては、捨石の動的挙動に関する計算モデルで捨石の転落および離脱が起こらない最小重量 W を求め、その重量 W と本波浪条件を用いて Van der Meer 公式および Hudson 公式より得られた安定重量 W_H の比で定義している。

図-7 は、直角入射 ($T_p=1.4$ s, $H_m=6$ cm) での多方向波 ($S_{max}=5$) および一方向波における堤体上の被覆捨石の重量割増率に関する空間分布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 である。これらの図に示す重量割増率の値は、先に大野ら (1999) が静的平衡モデルより求めた図-8 に示す重量割増率と比較すると、捨石の動的挙動を考慮することにより明らかに小さい値となっている。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所要重量は、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_o 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。

5. 結 言

本研究は、作用流速の方向による法面勾配の変化を考

慮した捨石の動的挙動に関する計算モデルを開発し、多方向および一方向不規則波における堤体上の流速場の詳細な計測結果を用いて堤体上の空間的な捨石の安定性に関して動的な側面から検討を行った。

多方向不規則波の場合、堤頭部中央部において波の方向分散性の影響が大きいため、捨石が不安定になることで転落被災が発生することが確認できた。また、一方向不規則波の場合には背面部へ回り込む流速場を形成することから堤頭部背面部において被災個数が増大することが確認できた。被覆捨石の動的挙動を考慮したときの安定重量の割増は、多方向不規則波の場合では特に堤頭部中央部において Hudson 公式の値の約 3.5 倍、一方向不規則波の場合では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わかった。今後は、捨石の動的挙動に関する計算モデルを実現象の 3 次元モデルへ拡張する予定である。

参 考 文 献

- 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.
- 大野賢一・松見吉晴・木村 晃 (1999): 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, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 911-915.
- 中川博次・辻本哲朗・後藤仁志 (1991): 非定常性を考慮した砂粒子の離脱過程のモデル化, 水工学論文集, 第 35 巻, pp. 429-434.
- 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.