

潜堤の被覆捨石に作用する波力に及ぼす捨石の形状効果について

Teofilo Monge Rufin*・戸塚奈津子**・水谷法美***
岩田好一郎****・倉田克彦*****

1. 緒 言

近年、幅広潜堤は、海岸保全・防災面および景観・海水交換性といった環境面で利点の大きい構造物として、また面的防御工法の重要な一構造物として高く位置づけられつつある。幅広潜堤の設計・施工に際しては、被覆材の耐波安定重量を正確に算定する事は極めて重要である。従来、被覆捨石の所要安定重量について提案がなされているが(例えば、宇多ら(1990))、被覆捨石に作用する波力と関連づけて被覆捨石の安定限界重量を検討した研究は少ない。また、被覆捨石の作用波力や安定限界重量と被覆捨石の形状との関係については、ほとんど議論されていない。

本研究では、被覆捨石に作用する波力や被覆捨石の移動限界が捨石の形状によりどのように変わるのかを水理実験により考究しようとするものである。

2. 水理実験

(1) 実験装置と実験方法

水理実験は名古屋大学工学部土木工学科の鋼製2次元造波水槽(長さ25m、幅70cm、高さ1m)で行われた。水槽の片面はガラス張りになっており、水槽の一端にはフラップ型造波機が、他端には消波装置が設置されている。潜堤の模型本体を被覆捨石と同じ重量を持つ球体で構築し、作用波力や移動限界重量を計測する被覆部材として天然石を使用した。潜堤の前面水深 h_t を28cmで一定、潜堤の天端水深 d を7cm、潜堤の天端幅 B を220cm、潜堤法面勾配を1/3.2でそれぞれ一定にした。また、潜堤の空隙率は26%であった。

被覆捨石として、 $W=6.2\text{g}$ 、 9.5g 、 19.6g の3種類の重量の異なった天然石を使用し、それぞれの重量の捨石に対して、Round-typeの石(丸味を帯びた石)($S_1/S_2\cong 1.6$)、Edged-typeの石(角張った石)($S_1/S_2\cong 2$)とFlat-typeの石(偏平な石)($S_1/S_2\cong 3$)の3種類の形状の異な

る捨石を選び、合計9個の幾何形状の異なった天然石を使用した。なお、 S_1 と S_2 は、それぞれ捨石の重心を通る最大の辺長と最小の辺長であり、両者の比 S_1/S_2 が1より大きくなるにつれて、捨石は球形状から偏平な形状になる。

捨石の移動状況と移動限界波高を計測する位置を潜堤の表面上で、入射波の波長に応じて、15cm~20cmの間隔で選び、合計11~16地点で被覆捨石の移動状況を調べた。移動限界波高の決定は、入射波高を増大させながら、目視観察により注意深く求めた。また、同時に、その移動限界時に捨石に作用する波進行方向 x の波力 F_x と鉛直方向 z の波力 F_z をキャンティレバー型波力計で同時に計測した。さらに、被覆捨石の移動限界時の水位変動 η と水平方向 x と鉛直方向 z の水粒子速度(u 、 w)も、それぞれ電気容量式水位計と電磁流速計で計測した。なお、流速の計測位置は、被覆部材の重心の位置に一致させた。

捨石の移動限界の実験は、第一層目(表層)の被覆材の上に乗った状態の突出状態と突出していない埋没状態の2つの場合を対象にして行われた(岩田ら(1992))。作用波は全て規則波とし、波の周期 T を3種類(1.0秒、1.4秒、1.8秒)とし、各々の周期に対して波高を非碎波と碎波を含む4種類($H_t=3\text{cm}$ 、 5cm 、 7cm 、 9cm)変化させた。なお、計測した水位変動 η 、作用波力 F_x と F_z 、水粒子速度 u 、 w のアナログ出力を磁気テープに収録するとともに、50Hzで離散化したデジタル出力をフロッピーディスクに記録した。

(2) 次元解析

斜面勾配 S 、天端幅 B 、潜堤の空隙率 λ 、天端水深 d 、と潜堤の法先水深 h_t が一定の実験条件の下では、無次元移動限界重量 $W_c/\rho_w g H_t D_e^2$ と無次元最大波力 $F_{im}/\rho_w g H_t D_e^2$ ($i=x, z$)は式(1)と式(2)の右辺の無次元物理量に大きく支配される。

$$\frac{W_c}{\rho_w g H_t D_e^2} = \phi\left(\frac{h_t}{L}, \frac{H_t}{h_t}, \frac{x}{L}, \frac{D_e}{d}, \frac{S_1}{S_2}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{F_{im}}{\rho_w g H_t D_e^2} = \phi\left(\frac{h_t}{L}, \frac{H_t}{h_t}, \frac{x}{L}, \frac{D_e}{d}, \frac{S_1}{S_2}\right) \quad (i=x, z) \dots\dots\dots (2)$$

* 学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科
** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科
*** 正 会 員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
**** 正 会 員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
***** 正 会 員 工博 東洋建設(株) 技術部技術研究所

ここに、 W_c は水中での捨石の移動限界重量、 ρ_w は流体の密度、 g は重力加速度、 L は水深 h_t での波長、 D_e は捨石を球体換算した時の等価直径、下添字 m は最大値を示す。

(3) 解析方法

本論では、上記の無次元解析の結果に基づき、被覆捨石に作用する波力 $F_{xm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ と $F_{zm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ 、移動限界重量 $W_c/\rho_w g H_1 D_e^2$ と被覆捨石の移動機構の特性およびそれらに及ぼす、 h_t/L 、 H_1/h_t 、 x/L 、 D_e/d と S_1/S_2 の効果、特に捨石の形状特性 S_1/S_2 の効果について考察を進める。また、モリソン式の適用範囲についても検討を加えるものとする。

3. 実験結果とその考察

(1) 無次元最大波力の特性

図-1 と図-2 は突出状態の場合の x 方向と z 方向の無次元最大波力 $F_{xm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ と $F_{zm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ の x/L との関係を示した例である。なお、 $x/L=0$ は沖側の法肩であり、 $x/L>0$ は沖側法肩から向岸方向を示す。同図によれば、斜面上では ($x/L<0$)、被覆捨石の形状 (S_1/S_2) や無次元換算径 D_e/d に関係なく、無次元最大波力 $F_{xm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ と $F_{zm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ は $x/L \rightarrow 0$ に伴い増大し、 $x/L \sim 0$ で最大となる。この事は被覆材が球体の場合と同様の結果である (水谷ら, 1991)。また、 H_1/h_t が大きい方が無次元波力 $F_{xm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ と $F_{zm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ が大きくなっているが、これも、被覆部材が球体の場合と同一である。このように沖側法肩部 ($x/L \sim 0$) で被覆部材に作用する波力が最大になることが判明するが、これは、沖側法肩部で水粒子速度が大きくなるためである (水谷ら, 1991, 岩田ら, 1992)。一方、天端上では ($x/L>0$)、 x/L の増大に伴い $F_{xm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ と $F_{zm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ は全体的に減少の傾向になること、また碎波より非碎波に対する無次元波力が大きくなることが認められるが、これも被覆材が球体の場合と同じである (水谷ら, 1991)。

図-1 と図-2 によれば、被覆材の形状により、すなわち、 S_1/S_2 の値より、 $F_{xm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ と $F_{zm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ の値が変化する。Edged-type の被覆石に対する x 方向波力 $F_{xm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ は Round-type の被覆石の作用波力より一般に大きくなる。これは、捨石が角張っているのでより大きな渦の形成と吹き出しのため抗力が Round-type の被覆材より大きくなる事に帰因すると考えられる。また、 z 方向波力 $F_{zm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ については、Round-type の被覆石より Flat-type の被覆石に作用する波力の方が一般に大きくなる。なお、図-2 に示していないが、Edged-type の被覆捨石に作用する波力も、一般に、Flat-type の被覆捨石に作用する波力より小さい。この鉛直方向波力については、被覆石の長辺の部分を下にして設計

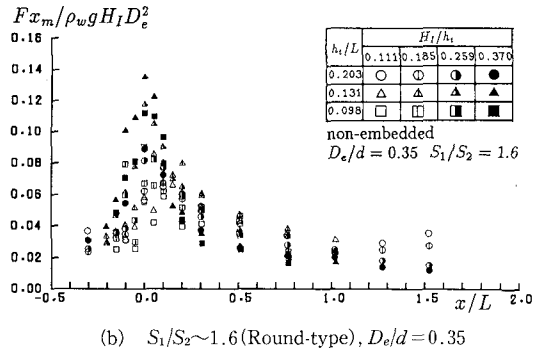
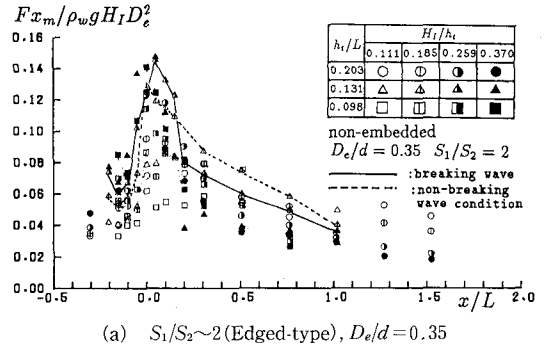


図-1 $F_{xm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ と x/L の関係 (突出状態)

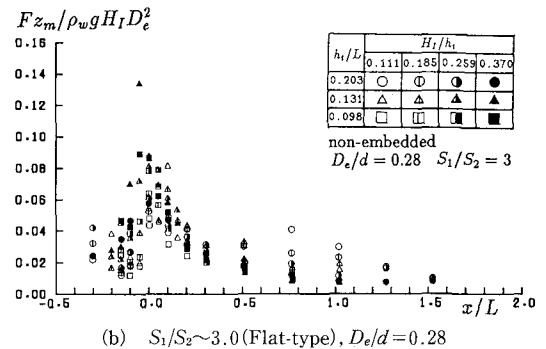
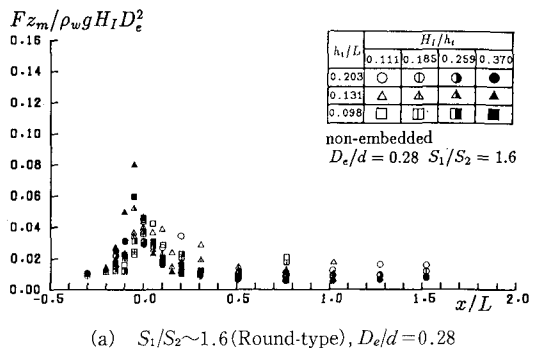


図-2 $F_{zm}/\rho_w g H_1 D_e^2$ と x/L の関係 (突出状態)

したので、三つの形状の中では、Flat-type の作用波力の面積が一番大きく、従って卓越波力成分である揚力が一番大きくなったためと考えられる。

図-3 は、 x 方向の無次元波力 $F_{xm}/\rho w(u\sqrt{u^2+w^2})_m D_e^2$ と Keulegan-Carpenter 数 ($=u_m T/D_e$: 以後 KC_x と略称する) との関係を示した二例である。同図には、単一球体に作用する波力の平均値も比較のために示されている。図-3 にも示されているように、 S_1/S_2 や D_e/d に関係なく、 $KC_x < 10$ の範囲では、 $F_{xm}/\rho w(u\sqrt{u^2+w^2})_m D_e^2$ は KC_x の-1 乗にほぼ比例し、 $KC_x > 20$ では $F_{xm}/\rho w(u\sqrt{u^2+w^2})_m D_e^2$ はほぼ一定値に近づくことが認められる。これは、被覆部材が球体の場合とほぼ同じである(水谷ら, 1991)。すなわち、 $KC_x <$

10 では、慣性力が卓越波力、 $KC_x > 20$ では抗力が卓越波力であることを示している。 $F_{xm}/\rho w(u\sqrt{u^2+w^2})_m D_e^2$ の値は D_e/d が大きくなるにつれて若干大きくなること、また Edged-type の捨石に作用する $F_{xm}/\rho w(u\sqrt{u^2+w^2})_m D_e^2$ の値は、他の Rounded-type や Flat-type の捨石より若干大きくなることが認められる。

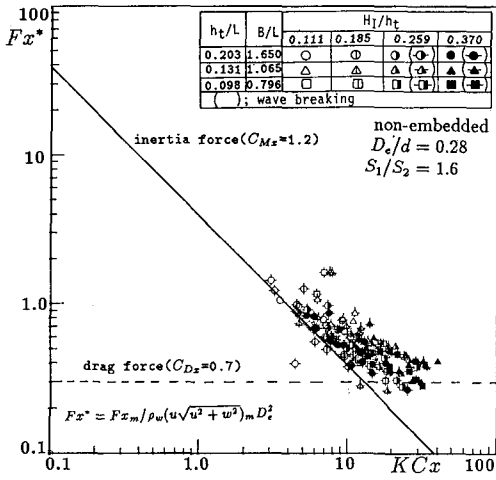
一方、無次元鉛直波力 $F_{zm}/\rho w(w\sqrt{u^2+w^2})_m D_e^2$ と $KC_z (=w_m T/D_e)$ の関係については本論で図示していないが、被覆部材が球体の場合と同様(水谷ら, 1991)、実験データーのばらつきが大きく、 $F_{xm}/\rho w(u\sqrt{u^2+w^2})_m D_e^2$ の値のような傾向を見出すことはできなかった。これは、鉛直方向波力 F_{zm} は揚力により大きく支配されるためである。

被覆部材が球体場合には、 x 方向の波力 F_{xm} の算定式としてモリソン式が適用される領域のあることが既に解明されている(Mizutani, 1991)。図-4 は、突出状態の捨石に対して、 F_{xm} の波力の算定式としてモリソン式が適用される領域を示した一例であり、メッシュのない領域に、モリソン式を適用できる。モリソン式適用の可否は、波力の計測波形とモリソン式による計算波形の相関係数 γ が 0.9 より大きい場合にモリソン式が適用できるものとしている(Mizutani 1991)。

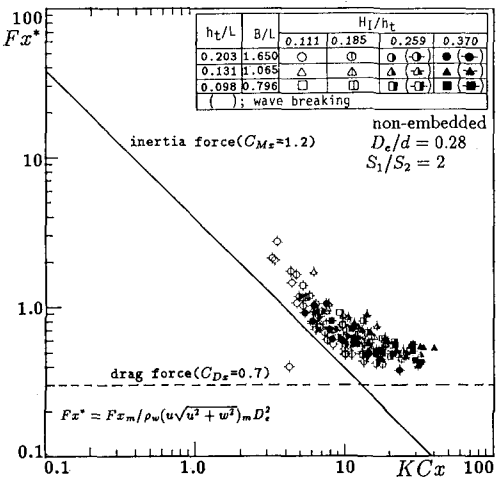
本研究によれば、 $x/L < 0.1$ で $0.24 \leq D_e/d \leq 0.35$ と $0.107 \leq H_l/h_l \leq 0.357$ の条件に対してモリソン式を使って、 x 方向波力 F_x を算定できることが判明した。モリソン式(式(3))の波力係数である抗力係数 C_{Dx} と慣性力係数 C_{Mx} は捨石の形状により変化する。

$$F_x = \frac{1}{8} C_{Dx} \rho w \pi D_e^2 u \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{1}{6} C_{Mx} \rho w \pi D_e^3 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

図-5 に例示されているように、Round-type の捨石の場合は、球体に対する値に近い。一方、Edged-type の捨石に対する C_{Dx} と C_{Mx} の値は球体に対する値より一般に大きくなるので、Round-type の捨石の場合と異なり、



(a) $S_1/S_2 = 1.6$



(b) $S_1/S_2 = 2.0$

図-3 $F_{xm}/\rho w(u\sqrt{u^2+w^2})_m D_e^2$ と KC_x との関係 (突出状態)

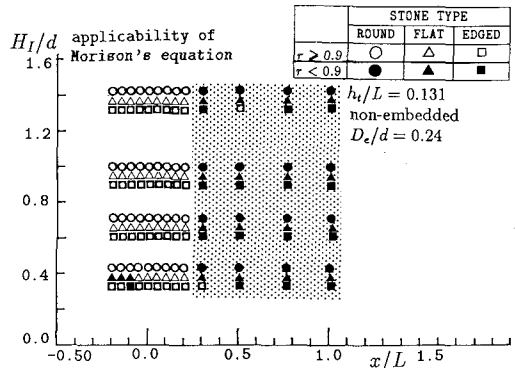
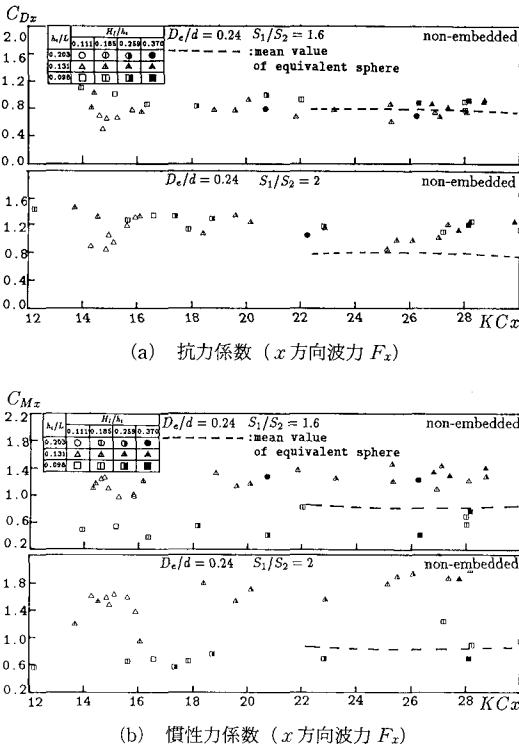


図-4 モリソン式の適用領域 (突出状態)

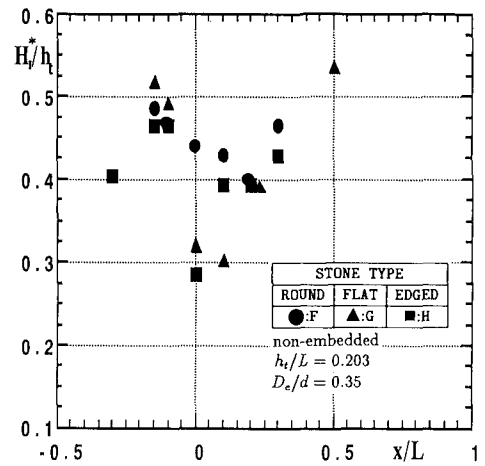
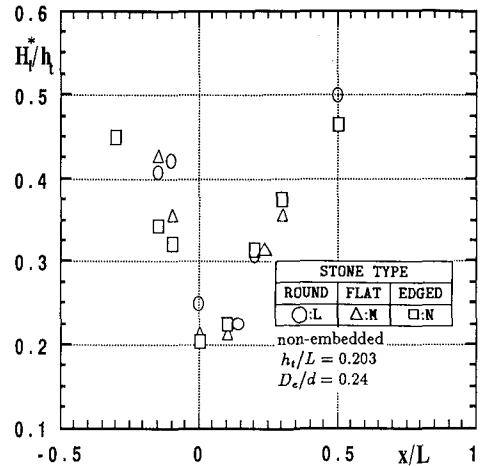
図-5 x 方向波力の波力係数と KC_x との関係 (突出状態)

球体に対する値をそのまま使用すると、作用波力を過小評価するので注意を要する。一方、突出状態の捨て石に作用する鉛直波力 F_z や埋没状態の捨て石に作用する波力 F_x や F_z をモリソン式で算定できないことも判明したが、このことは被覆部材が球体の場合と同様である (Mizutani, 1991)。

(2) 被覆捨て石の移動状況

被覆捨て石の移動状況は、捨て石の重さ、捨て石の形状と潜堤上の設置位置と設置方法により変化する。被覆材が球体の場合は、岩田ら (1992) が報告したように、突出状態の場合は全て回転して移動したが、被覆部材が天然石の場合は、捨て石の形状によりその移動状況が異なる。

捨て石が Round-type の場合は、球体の場合と同様、ほとんどが回転により移動した。Flat-type の形状の場合は、回転により移動する場合もあったが、滑動 (Sliding) により移動した。Edged-type の場合は、 $D_e/d = 0.28$ と 0.24 の場合は回転により移動するが、 $D_e/d = 0.35$ の場合は、斜面上では回転により移動するが、天端上では滑動により移動する。以上、突出状態の場合の移動状況を記述したが、埋没状態の場合には、 $D_e/d = 0.24$ の場合の Flat-type の捨て石が天端の沖側先端部で浮き上がって移動することが認められた。

図-6 H_1^*/h_t と x/L の関係 (突出状態)

(3) 移動限界波高

つぎに、被覆捨て石の移動限界波高 (入射波高) に及ぼす捨て石の形状効果について検討する。図-6 は、無次元移動限界波高 H_1^*/h_t と捨て石の設置位置 x/L の関係を捨て石の形状をパラメータとして示したものである。図-6 に示されているように、移動限界波高 H_1^* は被覆捨て石の設置位置 x/L と捨て石の形状 (Round-type, Edged-type と Flat-type) により変化する。すなわち、波高が増大したり、碎波したりする $x/L \sim 0$ の沖側法肩の部分では、 H_1^*/h_t はかなり小さくなることが判明し、沖側法肩の被覆捨て石が一番移動し易い状況にあることが確認できる。勿論、図-6(a) (b) に示されているように、被覆捨て石の重量の重い $D_e/d = 0.35$ の無次元移動限界波高 H_1^*/h_t は重量の軽い $D_e/d = 0.24$ の場合より大きいので、被覆捨て石の重量を重くすることにより耐波安定性を

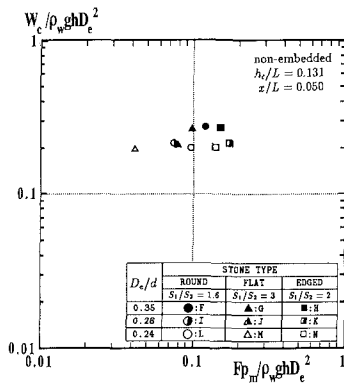
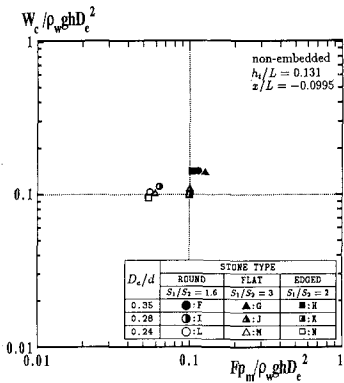

 (a) $x/L=0.05$ の場合

 (b) $x/L=-0.1$ の場合

 図-7 $W_c/\rho_w g h D_e^2$ と $F_{pm}/\rho_w g h D_e^2$ の関係 (突出状態)

増加させることは当然である。

また、図-6(a)(b)にも示されているように、本実験では、Edged-type の被覆捨石の方が、Round-type や Flat-type の被覆捨石より総じて移動し易いことが見出された。これは、図-2 に示すように、Edged-type の被覆捨石に作用する波力が、他の形状の捨石に作用する波力より大きいためであると考えられる。

(4) 移動限界重量と波力との関係

図-7 は、無次元移動限界重量 $W_c/\rho_w g h D_e^2$ と無次元波力 $F_{pm}/\rho_w g h D_e^2$ の関係を示した二例である。なお、 F_{pm} は潜堤表面の接線方向波力であり、潜堤天端上では F_{xm} に等しい。また、添字 m は最大値を示すが、斜面上で突出状態の被覆材の場合は冲向き最大値、それ以外は岸向き最大値を採用している。同図に示すように、若干ばらつきはあるものの、同一の移動限界重量 $W_c/\rho_w g h D_e^2$ に対して斜面上の Edged-type の被覆捨石には、他の type の捨石より小さな力が作用している。さらに、図-2、図

一6を総合すると、Edged-type の被覆捨石には、他の type の捨石より、より大きな力が作用するので、より移動し易いことが指摘できる。なお、図-7 によれば、Flat-type の捨石に作用する法面接線方向の波力 F_p は、他の type の捨石より小さい場合が多いが、図-3 に示されているように、法面法線方向（天端上では z 方向）の波力が、逆に大きいので、合力としての波力は、他の type の捨石と比べて、極めて小さいことにはならない。

4. 結 言

得られた重要な結論を以下に要約する。

(1) 被覆捨石の形状や重量に関係なく、沖側法肩部の被覆部材が最も移動し易い。

(2) 被覆捨石の幾何形状の差異により、突出状態の捨石に作用する波力の大きさに差異が生じる。すなわち、Edged-type の捨石に作用する法面接線方向の波力が他の type の捨石より総じて大きい。一方、Flat-type の捨石に作用する法面法線方向波力は、他の type の捨石より、総じて大きい。

(3) 突出状態の被覆捨石に作用する法面接線方向波力をモリソン式で算定できる。その適用範囲は、 $0.24 \leq D_e/d \leq 0.35$, $0.107 \leq H_t/h_t \leq 0.357$ で $x/L < 0.1$ である。Round-type の捨石の C_{Dx} と C_{Mx} は球体に対する値に近いが、Edged-type の C_{Dx} と C_{Mx} は Round-type の値より総じて大きい。

(4) Flat-type, Edged-type と Round-type の形状の異なる捨石の中で、Edged-type の捨石が三者の中で比較的移動し易い。

最後になるが、本研究は文部省科学研究費重点領域研究(計画)(代表者 中央大学 服部昌太郎教授)と重点領域研究(公募)(代表者 名城大学 岩垣雄一教授)の助成により行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・水谷法美・T. M. Rufin・戸塚奈津子・倉田克彦(1992): 作用波力を考慮した幅広潜堤の被覆材の所要安定重量算定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 661-665.
- 宇多高明・小俣篤・斉藤友伸(1990): 人工リーフ被覆材の所要重量算定法, 土木研究所資料, 第2893号, 48 p.
- 水谷法美・岩田好一朗・T. M. Rufin・倉田克彦(1991): 幅広潜堤上の被覆材に作用する波力の特性と移動限界に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 591-595.
- Mizutani, N., K. Iwata, T. M. Rufin, and K. Kurata (1991): Experimental study on wave force on a spherical armor unit of the submerged breakwater, Proc. Intl. Sympo., NDRC, pp. 107-115.