

幅広潜堤の被覆捨石の安定重量の算定法に関する実験的研究

水谷法美* ・岩田好一朗** ・Teofilo M. Rufin Jr.***
戸塚奈津子**** ・倉田克彦*****

1. 緒言

今後の主要な波浪制御工法として位置づけられる面的防御工法の基幹となるのが人工リーフや潜堤に代表される潜水型の波浪制御構造物である。特に広い天端を有する幅広潜堤は、単独でも高い消波効果が期待できる。このような構造物は、通常、被覆捨石や被覆ブロックで覆われるが、これらの被覆材の耐波安定重量の算定手法は必ずしも確立されているとはいいがたい。被覆材の耐波安定重量は、被覆材の作用波力に大きく依存するため、その作用波力の特性と移動メカニズムをまず解明し、力学的な機構を明らかにした上で算定されるべきであると考えられる。著者らは、複雑な形状の捨石を球形状で理想化し、球状被覆材の耐波安定重量について作用波力と関連づけて考究し、安定重量の算定法について提案した(水谷ら、投稿中；岩田ら、1992；水谷ら、1991)。しかし、これらの成果を実際の構造物に適用するには、捨石の形状の効果を明らかにし、捨石の安定重量算定法を明らかにする必要がある。本研究は、水理実験を行って幅広潜堤の被覆捨石の作用波力を計測し、その特性を明らかにするとともに、移動限界実験も行って移動機構を考究し、両者の成果を統合することにより、幅広潜堤の被覆捨石の耐波安定重量の算定法を提案しようとするものである。

2. 水理実験

本研究では移動限界実験と波力計測実験の2種類の水理実験を行った。いずれの実験も水深(h)は28 cmで一定とし、発生波は規則波(周期1.0, 1.4, 1.8秒)とした。

移動限界実験では、自然石を使って天端幅(B)220 cm, 天端水深(d)7 cm, 法面勾配1/3.2の幅広潜堤の模型を構築し、それぞれの周期の波に対する移動限界時の波高を求めると同時に移動状況の観察を行った。対象とした被覆材は、これまでの実験で使用した3種類の直径(D)=

表-1 実験で使用した捨石の緒元

D (cm)	D/d	shape	L_1 (cm)	L_2 (cm)	L_1/L_2
2.47	0.353	round-type	2.39	1.98	1.207
		flat-type	1.97	1.11	1.775
		edged-type	2.03	1.66	1.223
1.94	0.277	round-type	2.14	1.44	1.486
		flat-type	1.75	1.22	1.434
1.65	0.236	edged-type	1.84	1.88	0.979
		round-type	1.69	1.30	1.300
		flat-type	1.91	0.81	2.358
		edged-type	1.60	1.76	0.909

2.47, 1.94, 1.64 cm)のガラス球(Rufinら、1993)と同じ体積で形状の異なる3種類の自然石(丸い石, 平らな石, 角張った石)で、最小断面と最大断面がそれぞれ波進行方向に対し直角・平行になるように突出状態で設置した。それぞれの被覆材の諸元を表-1に示す。なお、表中の L_1 と L_2 は波進行方向に平行な断面の水平方向の最大長と鉛直方向の最大長で、捨石の大きさと形状に関するパラメーターである。また、本研究では捨石の大きさを体積の等価な球体の直径 D を使って表示することとする。

波力計測実験では、全ての被覆材に対し、移動限界実験と同じ位置で移動限界時の波と所定の波高の波に対する水平・鉛直方向波力(F_x, F_z)を水位変動, 水平・鉛直方向流速(u, w)と同時に計測した。なお、水位変動を電気容量式水位計で、流速を電磁流速計で、また、波力をCantilever型波力計で計測した。

計測したこれら物理量の時間波形は磁気テープと記録紙に記録するとともに時間間隔0.02秒でAD変換し、フロッピーディスクにも同時に記録し、解析に使用した。

3. 作用波力の特性

(1) 最大波力の特性

まず、水平方向の無次元最大波力 $F_{xm}/\rho g H_1 D^2$ (ρ は水の密度, g は重力加速度, H_1 は入射波高, 添字 m は最大値を示す)の基本的な特性について考察する。図-1に例示するように $F_{xm}/\rho g H_1 D^2$ は、斜面上では x/L (x は沖側法肩から波進行方向に測った距離, L は水深 h における波長)と H_1/h の増加に伴い増大する。そして、 h/L による差はほとんどない。天端上では、碎波の場合、急激に

* 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
*** 学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科
**** 正会員 工修 日本工営(株) コンサルタント第1事業部
***** 正会員 工博 東洋建設(株) 総合技術研究所

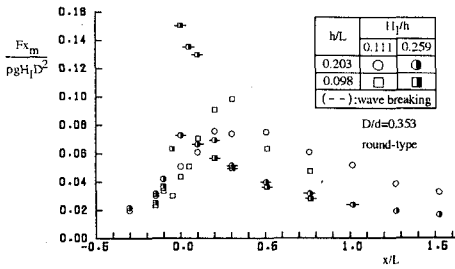


図-1 $Fx_m / \rho g H_i D^2$ と x/L の関係の例

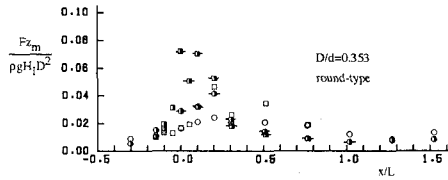


図-2 $Fz_m / \rho g H_i D^2$ と x/L の関係の例

無次元最大波力は減少し、 $x/L > 0.5$ ではほぼ一定値になる。これに対して、非碎波の場合、無次元最大波力の x/L に伴う減少の割合は小さく、場合によっては再度増大し、 $0.5 < x/L < 1.0$ で極大となる場合もある。これらの傾向は全般的には球状被覆材の場合と非常に似ているが(岩田ら, 1992), 非碎波の場合、 $x/L = 0.0$ 付近の最大値があまり明瞭ではなくなっている。一方、図-2 に例示するように、鉛直方向の無次元最大波力 $Fz_m / \rho g H_i D^2$ も水平方向波力と同様、 x/L に大きく支配され、斜面上では x/L の増加に伴い無次元最大波力は増大する。碎波の場合、天端上では無次元最大波力は減少するが、非碎波の場合には、さらに増大する場合もある。非碎波の場合に天端上でも無次元最大波力が x/L とともに増大する一原因には、捨石で構築した潜堤の空隙率が球体で構築した場合よりも大きく、波の潜水変形が斜面上から天端の法肩付近までの広範囲で起こっていることが挙げられる。

なお、水平方向波力に関して、岸方向と冲向方向の最大波力を比較した結果、全体的に岸方向の波力が大きくなることが判明した。そして、その差は一般に入射波高の大きい方が顕著である。これは、潜堤上では波の非線形性がかなり強くなり、流速の時間変化にも非対称性が強く現れるようになり、岸向きの運動が冲向に比べてかなり大きくなることによる。

これらの基本的な特性は捨石の形状によらないが、波力の大きさは形状により変化する。以下にその特性について論述する。

(2) 波力に及ぼす捨石の形状効果

球状被覆材の作用波力 Fx_{sp} と他の代表的な形状の捨石に作用する波力 Fx_{st} の比の変動特性を図-3 に示す、

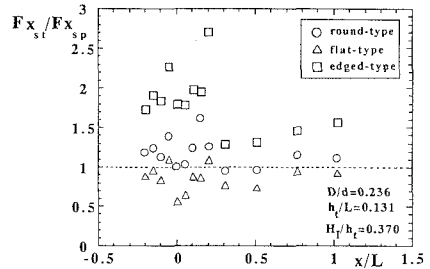


図-3 水平方向波力に及ぼす捨石の形状効果

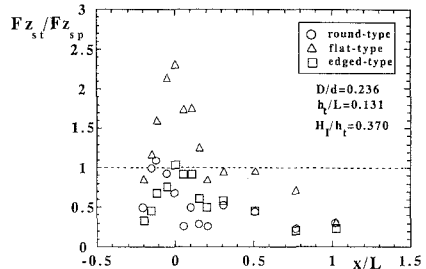


図-4 鉛直方向波力に及ぼす捨石の形状効果

水平方向波力に対しては、一般に丸い石に作用する波力(図中○印)は球状被覆材の値に近いといえる。これに対して、角張った石に作用する波力(図中□印)は全体的に球や他の形状の石の作用波力よりも大きくなっている。角張った石の場合、角から流れが剥離しやすいために抗力の寄与が大きくなるので全体の波力も大きくなったと考えられる。これに対し、平らな石の場合(図中△印)、作用波力は全体的に小さい。これは、本実験では波進行方向に最小断面が直交するように配置しているため、断面積の小さくなった分波力が減少したと考えられる。逆に、図-4 に示すように、鉛直方向波力の場合、断面積が最も大きくなる偏平な石の作用波力が全般的に大きくなっている。これは波圧の作用面積が大きくなること、また、流れも剥離し易いことによる。一方、丸い石と角張った石を比較すると、流速が大きくなる、換言すれば KC 数が大きくなる法肩付近で角張った石の値が大きく、球状被覆材の値よりも大きくなっていることがわかる。これは、水平方向波力の場合と同様、流れの剥離による抗力の増大の寄与によると考えられる。しかし、斜面の下方や $x/L > 0.5$ の天端上では角張った石と丸い石の値の差は小さくなり、また、球状被覆材の値が最も大きくなることもある。これは、これらの範囲では KC 数はかなり小さく、剥離の効果があまりないことを考えると、付加質量係数が形状により異なるためその差が表れたものと考えられる。しかし、鉛直方向波力には揚力の効果が大きいためモリソン式による慣性力の分離がうまくいかないためこの点に関しては現段階では詳細に検

討するには至っておらず今後の課題である。

なお、被覆材の大きさが変化すると、剝離のしやすさなどのため波力の大きさは変化するが、同一のKC数に対して比較した限りでは捨石の大きさによる波力の特性の変化はないことを確認している(戸塚, 1994)。

4. 被覆材の安定重量

(1) 安定重量算定式のモデル化

作用波力と移動限界はともに捨石の形状に依存するため、厳密には個々の捨石により安定重量は異なるが、実際には個々の捨石の安定重量算定式を導くのは困難である。そこで本研究では、捨石を理想化した球状被覆材の安定重量算定式を作用波力の関数として誘導し、移動に最も密接に関連する物理量のみ捨石の値を代入することにより捨石の安定重量算定式を導くこととした。

まず、球状被覆材の最も移動しやすい配置(CASE-A)と最も移動しにくい配置(CASE-B)に対して(図-5参照)、各種の移動形態に対する安定重量算定式を誘導し、ついで、移動に最も重要と考えられる作用波力や幾何形状などの物理量のみを捨石固有の値を使用し、捨石の安定重量算定式とすることを考える。

たとえば、CASE-Aの配置の球状被覆材に対する岸向きの回転移動の限界時には次式の関係が成立する。

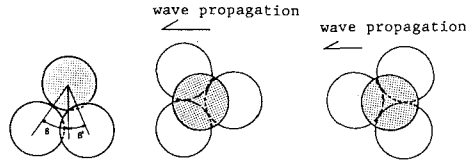
$$(W_b \cos \alpha - Fn) \frac{D \sin \beta}{4} \geq (Fp - W_b \sin \alpha) \frac{D \cos \beta}{2} + \epsilon Fp \dots\dots\dots (1)$$

ここに、FpとFnは波力の斜面平行成分と垂直成分、αは潜堤表面が水平軸となす角度、βは接触角、εは遮蔽効果を考えた場合、波力作用点の重心からの偏心量である。なお、一般に、被覆材間の接触面積は非常に小さいので摩擦力は無視している。回転移動の場合、モーメントに関係する作用外力とモーメントのアーム長さが基本的に重要であると考えられる。そこで、波力とアーム長に関連する球径を捨石の代表径に置き換えると次式を得る。

$$(W_b \cos \alpha - Fn) \frac{L_1 \sin \beta}{4} \geq (Fp - W_b \sin \alpha) \frac{L_2 \cos \beta}{2} + \epsilon Fp \dots\dots\dots (2)$$

同様の考え方にしたがって、回転移動についてはモーメントの釣合、滑動については力の釣合より球状被覆材の移動限界を考え(水谷ら, 投稿中)、結果に波力と捨石の代表径を代入すると最終的に捨石の水中における移動限界重量 $W_i (i=1\sim 8)$ が各移動形態に対して以下のようになる。

a) 沖側への回転移動 (CASE-A)



(a) 側面図 (b) 平面図 (CASE-A) (c) 平面図 (CASE-B)

図-5 球状被覆材の配置

$$W_1 \geq \frac{Fn - L_e S (1 + \epsilon / L_2 e_2) Fp}{\cos \alpha - L_e S \sin \alpha} \dots\dots\dots (3)$$

b) 沖側への回転移動 (CASE-B)

$$W_2 \geq \frac{Fn - 2L_e S (1 + \epsilon / L_2 e_2) Fp}{\cos \alpha - 2L_e S \sin \alpha} \dots\dots\dots (4)$$

c) 岸側への回転移動 (CASE-A)

$$W_3 \geq \frac{Fn + 2L_e S (1 + \epsilon / L_2 e_2) Fp}{\cos \alpha + 2L_e S \sin \alpha} \dots\dots\dots (5)$$

d) 岸側への回転移動 (CASE-B)

$$W_4 \geq \frac{Fn + L_e S (1 + \epsilon / L_2 e_2) Fp}{\cos \alpha + L_e S \sin \alpha} \dots\dots\dots (6)$$

e) 沖側への滑動 (CASE-A)

$$\begin{aligned} & \{Fn(\sin \beta + \mu \cos \beta) \\ W_5 \geq & \frac{-Fp(\cos \beta - \mu \sin \beta)}{(\cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta)} + \mu(\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

f) 沖側への滑動 (CASE-B)

$$\begin{aligned} & \{Fn(\sin \beta + 2\mu \cos \beta) \\ W_6 \geq & \frac{-2Fp(\cos \beta - \mu \sin \beta)}{(\cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta)} + 2\mu(\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

g) 岸側への滑動 (CASE-A)

$$\begin{aligned} & \{Fn(\sin \beta + 2\mu \cos \beta) \\ W_7 \geq & \frac{-Fp(\cos \beta - \mu \sin \beta)}{(\cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta)} + 2\mu(\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

h) 岸側への滑動 (CASE-B)

$$\begin{aligned} & \{Fn(\sin \beta + \mu \cos \beta) \\ W_8 \geq & \frac{-Fp(\cos \beta - \mu \sin \beta)}{(\cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta)} + \mu(\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ただし、μは摩擦係数、 $L_e = L_2/L_1$, $S = \cot \beta$ で、 $\tan \beta = 2 \tan \alpha$ の関係が使っている。空中重量 W_i を求める際には浮力 $\rho \pi D^3/6$ を加える必要がある。なお、これらのほかに浮上に対する式もあるが本実験では浮上による移動はなかったのでここでは示していない。

(2) 移動限界実験結果との比較

実験における捨石の移動形態について記述する。まず、天端上では、丸い石と角張った石のほとんどが岸向きの

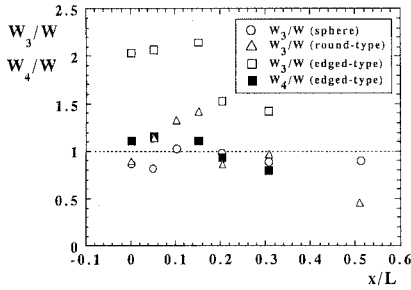


図-6 回転移動に対する安定重量の比較例

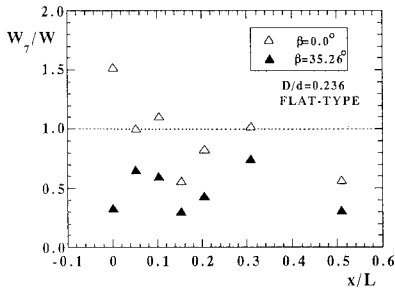


図-7 滑动に対する安定重量の比較例

回転移動をし、偏平な石については $D/h=0.277$ の場合は岸向きの回転移動が多く、逆に $D/h=0.353$ と 0.236 の場合、ほとんどが岸向きの滑动であった。いずれの場合も沖向きの移動はほとんどなかった。一方、斜面上では丸い石と角張った石は回転移動のみ観察されたが、移動方向は岸向きが多いものの沖向きの移動も観察された。これは、重力の効果により、冲向(斜面下方)への移動が起きやすいが、波力は非線形性のために岸向に大きくなり、周囲の石の状態などにより、移動方向が決まるためである。偏平な石については沖側への滑动が卓越した。

ここで、それぞれの移動形態に対し、式(3)~式(8)に実測による波力 F_p と F_n を代入して安定重量を求め、実際の捨石の重量と比較して重量算定式の妥当性を論議する。なお、この際、波力の時間波形は碎波による乱れ等のため、波毎に若干ばらつきがあるが、実際の移動にはこのばらつきも重要であると考え、すべての中の最大値を採用した。ところで、実際の捨石構造物では球状被覆材の CASE-A、CASE-B のような理想的な配置はない。しかし、両者の配置は最も動きやすい場合と動きにくい配置に相当しているため、実際には両者の間になると考えられ、両計算値と比較を行う。

a) 回転による移動

まず、回転に対する安定重量の算定値と実際の捨石の重量との比較を行う。天端上に置かれた球状被覆材

(CASE-A)、丸い石と角張った石に対する比較を図-6に示す。なお、突出した被覆材の場合、遮蔽効果は小さいと考えられるので ε は 0 とした。また、ほとんどの場合、岸向きの回転移動が確認されたため、岸向きの回転移動に対する算定値を対象とする。

まず、球状被覆材に着目すると、潜堤表面のわずかな凹凸や、摩擦力を考慮していないなどの原因により、 W_3/W は必ずしも 1.0 にはならないが、全体的に 1.0 に近く、球状被覆材に対する式の妥当性が確認できる。丸い石の場合、周囲の石の設置状態が場所により変化するため、球状被覆材に比べるとばらつきはかなり大きくなるが、全体的には W_3/W は 1.0 に近く、CASE-A の球状被覆材の式に基づいた本研究の提案式(式(5))によりほぼ安定重量が予測できるといえる。一方、角張った石に対しては、CASE-A に基づく W_3/W は実験値を 1.5 倍から 2 倍近く過大評価している。これは、角張った石の場合、石同士のかみ合わせの効果が大きく、同じ波力が作用した場合には丸い石よりも移動しにくくなる事による。そこで、図には、最も移動しにくい配置である CASE-B の状態での算定値も同時に示した。この場合、 W_4/W は全体的に 1.0 に近い値となっており、CASE-B の配置に対する提案式(式(6))により角張った石の安定重量の推算が可能であるといえる。すなわち、捨石の形状が移動に及ぼす効果も、球状被覆材の配置を変えて移動し易さを考慮することによりモデル化が可能であるといえる。なお、潜堤を球体で構築した場合、角張った石が移動しやすいことが報告されているが(Rufin ら, 1993)、これはこの場合、かみ合わせの効果が小さいことによる。

b) 滑动による移動

つぎに滑动に対する式の妥当性について検討を加える。一例として、 $D/h=0.236$ の天端上での W_3/W を図-7に示す。同図より明らかなように、本研究の岸向の滑动に対する計算値は実験値よりかなり小さい。すなわち、安定重量を過小評価している。この一原因として、平らな石の場合、接触角度が球の場合より小さくなっていることが考えられる。そこで、滑动の場合、接触角度も石の値を採用することとする。しかし、既述したように、石の接触角度を評価するのは困難であるため本研究では最も安全側の立場から $\beta=0.0$ とした。図-7にはこの結果も Δ 印で示してある。ばらつきがあるが実験値と計算値の対応は良好である。したがって、作用波力と接触角度を考慮することにより球状被覆材の滑动に対する安定重量算定式を修正して捨石の安定重量を算定できるといえよう。

ところで、回転移動と滑动の安定重量算定式は異なるのでその適用限界が重要となる。 $\beta=0.0$ とすると天端上では回転移動と滑动の限界が L_1 と L_2 を使って次式で

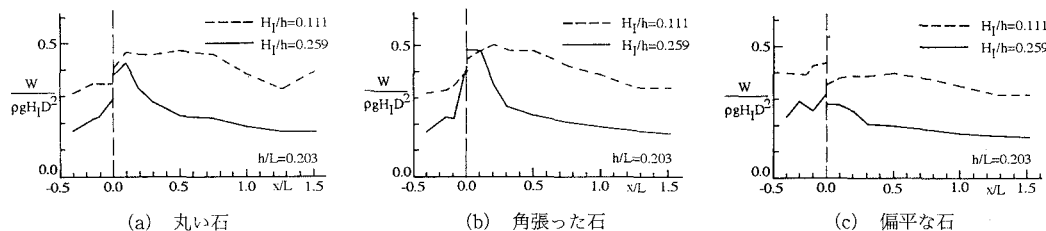


図-8 被覆材の安定重量の分布

与えられる。

$$L_1/L_2=1.70 \quad (\text{on crown}) \cdots \cdots \cdots (11)$$

すなわち、 L_1/L_2 がこの値より大きい場合に滑動が、逆に小さい場合に回転移動が生じることになる。既述したように $D/h=0.277$ の偏平な石は回転移動が多かったのは $L_1/L_2=1.43$ と上記の値より小さかったためである。なお、斜面上では、この限界の値は斜面勾配などの関数にもなるため若干複雑になるが、ほぼこの値に近い。

一方、斜面上では以下のような結果が得られた。まず、丸い石と角張った石の場合、実験では多く観察された岸向きの移動に対して CASE-A の状態で安定重量を求めた結果、ほぼ実験値に対応することが確認された。この場合、角張った石のかみあわせの効果はあまり大きくない。また、平らな石の場合、沖向きの滑動がほとんどであるため、沖向きの滑動に対する式(7)により算定が可能である。ただし、天端上と同様、 $\beta=0.0$ とする必要がある。

以上より、球体に対して誘導された安定重量算定式の一部に捨石の代表量を代入して修正をすることにより捨石の安定重量の算定が可能であることが示された。ここで、提案式はいずれも2つの波力の関数となっているが、1つの波力で定式化できればより簡便になる。 F_p と F_n の最大値の比較を行った結果、場合によっては F_n の最大値が F_p の最大値に近くなることのあることが確認された。安定性に対して最も危険な状態は2つの波力が同時に最大値をとる場合である。そこで、本研究では安全側の立場から2つの力が同時に最大となる場合を想定し、 $F_{pm}=F_{nm}$ の関係を使って F_n を消去した。この簡略化は計算値がかなり過大評価するおそれがあるが、実際には波力の時間波形にはかなりの乱れがあり、しかもその乱れは移動に関して重要な寄与をする。これに対して、最大波力の予測の観点からは乱れの効果までは现阶段では予測できず、乱れを含んだ最大波力を過小評価することになる。したがって、 F_{pm} の値として、各周期毎の最大値の平均値を代入することにより、結果的には安定重量を過大評価することはないことを確認している(戸塚、1994)。

本研究の提案式に実験で求めた最大波力を代入すると

潜堤上の安定重量の分布が求められる。空中重量に補正した結果を図-8に例示する。斜面上と天端上では重力の寄与が異なるため分布は不連続になるが、天端近傍では大きな重量が必要であることがわかる。なお、図-8に例示したように、波力や安定重量算定式は捨石の形状によって変化するが、最終的な安定重量は形状による差はあまりないことがわかる。これは、捨石の形状の効果は、波力に対するものと移動限界に対するものの2つがあり、両者は互いに打ち消しあう効果があることを示すものである。

5. 結 言

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

- 1) 捨石に作用する波力は、捨石の形状によって変化する。特に流れが剥離しやすい角張った形状に対して作用波力は大きくなる。また、流れ方向の断面積の増加は波力を増大さす。
- 2) 球状被覆材に対する安定重量算定式に、回転移動の場合は作用波力と捨石の代表径の2つを、また、滑動に対しては作用波力と接触角度を考慮して修正することにより、捨石の安定重量の算定が可能である。
- 3) 捨石の形状が作用波力と安定性に対する効果は互いに打ち消しあう傾向があり、所要安定重量に及ぼす効果は小さい。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・水谷法美・T. M. Rufin Jr.・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.
- 戸塚奈津子 (1994): 幅広潜堤の被覆捨石に作用する波力の特性と安定重量算定式に関する実験的研究, 名古屋大学修士論文, 31 p.
- 水谷法美・岩田好一朗・T. M. Rufin Jr.: 幅広潜堤の被覆材の耐波安定重量の算定法に関する研究—球形被覆材の場合—, 土木学会論文集 (投稿中)
- 水谷法美・岩田好一朗・T. M. Rufin Jr.・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.
- Rufin, T. M. Jr.・戸塚奈津子・岩田好一朗・水谷法美・倉田克彦 (1993): 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, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 801-805.