

作用波力を考慮した幅広潜堤の被覆材の所要安定重量 算定手法に関する研究

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

1. 緒 言

近年、海浜保全・防災面や景観・海水交換性の面など環境面で利点の大きい幅広潜堤工法が高く位置づけられつつある。幅広潜堤を設計・施工する際、被覆材の安定性を確保することは幅広潜堤の耐波安定性に極めて重要であることはその言を待たない。被覆材の所要安定重量の算定手法に関する研究は、人工リーフを対象とした宇多ら(1988, 1990)の研究があるが、極めて少ない。被覆材の安定性は作用波力と関連づけて論議する必要があるが、両者の関係はこれまでの研究ではブラックボックスとして扱われており、大きな問題点として残されている。

著者らは、これまでに水理実験結果に基づき、幅広潜堤の被覆材の作用波力の実態を論議し、移動限界重量を作用波力と関連づけて論議してきた(水谷ら, 1991)。しかし、肝要の移動限界時の作用波力は計測しておらず所要安定重量と作用波力を明確に関連づけるまでには至っていない。そこで、本研究では、被覆材の移動限界時の作用波力を計測し、これまで未解明であった移動限界重量と移動限界時の被覆材の作用波力の関係を明確にし、力学モデルに立脚した被覆材の所要安定重量算定手法を提案しようとするものである。

2. 水理実験

(1) 実験方法

昨年度の実験(水谷ら, 1991)と同様、直径 $D=3\text{ cm}$ のガラス球を使って天端幅 220 cm 、法面勾配 $1/3.2$ の幅広潜堤の模型を構築し、被覆材も同じ直径の球を使用した。法先水深 h_t 、天端水深 d は、それぞれ 28 cm 、 7 cm と昨年度より若干変化させた(図-1 参照)。入射波は規則波とし、周期を3種類($T=1.0, 1.4, 1.8\text{ 秒}$)変化させた。まず、波力の基本的な特性を解明するた

め、碎波・非碎波を含む4種類の波高($H_T=3, 5, 7, 10\text{ cm}$)の波に対し、水平・鉛直方向の波力(F_x, F_z)の計測を Cantilever 式波力計で行った。

ついで、比重 ρ_s の異なる12種類の被覆材($\rho_s=1.15, 1.24, 1.31, 1.42, 1.56, 1.72, 1.88, 1.94, 2.03, 2.20, 2.31, 2.77$)に対し、上記の3種類の周期の波の入射波高を徐々に増大させながら、それぞれの移動限界状態を目視により求め、移動限界時の作用波力の計測を行った。なお、昨年度の移動限界実験の結果より、天端上では岸向き、斜面上では沖向きに被覆材の移動が多いことがわかっているため、それぞれの方向に対象とする球が動き易いような配置で行った。

波力計測実験および移動限界実験の計測位置はいずれも入射波の波長に応じて潜堤上11~16地点変化させ、被覆材は、天端上に完全に突出した場合と完全に埋没した場合を対象とした(図-2 参照)。また、波力と同時に水位変動 η を電気容量式水位計で、水平・鉛直方向流速(u, w)を電磁流速計で計測した。流速の計測位置は、完全突出と完全埋没のいずれの場合も被覆材の重心位置に一致させた。計測した水位、流速と波力のアナログ出力を磁気テープに、50 Hz 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。

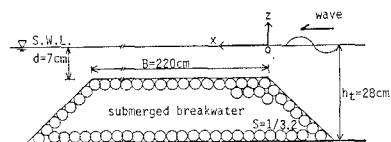


図-1 幅広潜堤模型の概要

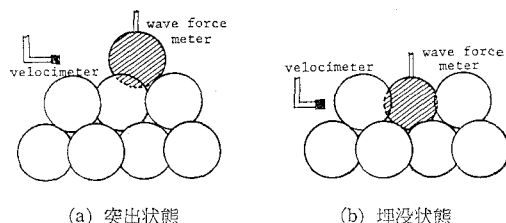


図-2 被覆材の設置状況

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

(2) 次元解析

法面勾配 S , 天端幅 B , 球径 D , 潜堤の空隙率 λ ($\approx 26\%$) が一定の本実験の条件下では, 無次元移動限界重量 $W_0/\rho g D^3$ と無次元最大波力 $F_{im}/\rho g H D^2$ ($i=x, z$) 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.

$$\frac{W_0}{\rho g D^3} = \phi \left(\frac{H_f}{h_t}, \frac{h_t}{L}, \frac{x}{L}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d}{h_t} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{F_{im}}{\rho g H D^2} = \phi \left(\frac{H_f}{h_t}, \frac{h_t}{L}, \frac{x}{L}, \frac{d}{h_t} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに, W_0 : 移動限界重量, ρ : 水の密度, g : 重力加速度, L : 法先での波長, H : 計測位置での波高で, 下添字 m は最大値を示す.

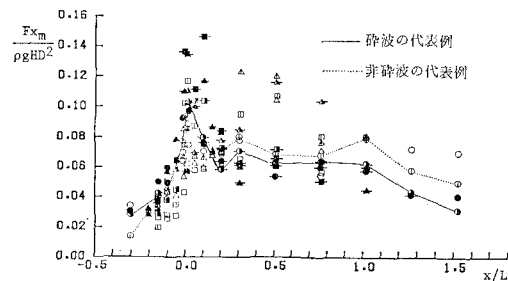
(3) 解析方法

次元解析の結果に基づいて, 無次元最大波力, 無次元移動限界重量を, 無次元最大流速などの支配無次元量と関連づけながら論議した. また, 最小自乗法を使って Morison 式中の波力係数を計算し, Morison 式の適用性を論議するとともに作用波力の予測手法についても検討を加えた. ついで, 移動限界時の作用波力と被覆材重量の関係を論議し, 力あるいはモーメントの釣合より力学モデルを導き, 両者の関係を明らかにした.

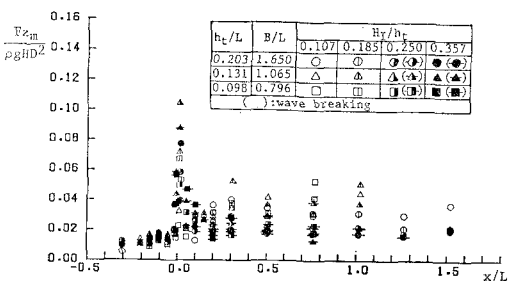
3. 結果とその考察

(1) 無次元最大波力の特性

図-3 に突出状態の無次元最大波力 $F_{xm}/\rho g H D^2$, $F_{zm}/\rho g H D^2$ と x/L の関係を示す. まず, 水平方向の無次元最大波力 $F_{xm}/\rho g H D^2$ について考察する. 斜面



(a) 水平方向波力



(b) 鉛直方向波力

図-3 無次元最大波力の変動特性 (突出状態)

上では, x/L が増加すると静水面に近づくため, 水粒子の運動が大きくなる. このため $F_{xm}/\rho g H D^2$ は, x/L の増加とともに増大し, 法肩付近 ($x/L \approx 0.0$) で最大になる. また, この範囲では H_f/h_t の大きい方が大きくなる. 天端上では, x/L の増加にともない $F_{xm}/\rho g H D^2$ は全体的には減少傾向にあるが, 碎波と非碎波の場合では差が認められる. すなわち, 碎波の場合, $F_{xm}/\rho g H D^2$ は碎波後に急激に減少するが, 非碎波の場合には減少の割合は小さく, $0.5 < x/L < 1.0$ で再び極大値を持つ. そして, この範囲では $F_{xm}/\rho g H D^2$ は碎波の場合より非碎波の方が総じて大きくなる. これは, 天端上では碎波よりも非碎波の方が同一波高に対する水平方向流速が大きくなるためであり, 昨年度の結果と同様である.

一方, 鉛直方向の無次元最大波力 $F_{zm}/\rho g H D^2$ は, $F_{xm}/\rho g H D^2$ と比べて x/L にともなう変化は小さく, 入射波高による差も小さい.

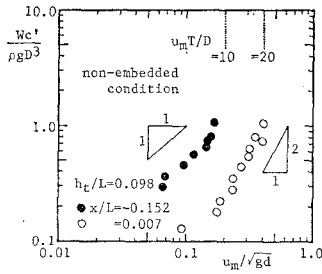
図示していないが, 埋没状態では, $F_{xm}/\rho g H D^2$ は突出状態よりも小さいこと, また, x/L にともなう変動も小さくなること, そして, $F_{zm}/\rho g H D^2$ は法肩で小さくなる以外は突出状態と埋没状態で $F_{xm}/\rho g H D^2$ にみられるような明瞭な差はないことなど, 昨年度と同様の結果が得られた. これは, 突出状態と埋没状態では, 水平方向の水粒子の運動は大きく変化するのに対し, 鉛直方向の水粒子の運動はあまり変化しないためであると考えられる.

d/h_t の効果については, 昨年度の実験結果との比較より, 天端水深の浅いほうが作用波力は大きくなることが判明した. とくに, 天端水深が浅い本実験では, 巻き波碎波の波頂の突っ込み点近傍で大きな波力が計測されており, 天端水深の減少は被覆材の安定性に大きく影響を及ぼすことが指摘できる.

(2) 移動限界重量と波力の関係

移動状況についてまず簡単に記述する. 突出状態では, 天端上では, 大半が岸向き方向に移動するが, 碎波後の大規模渦を伴うような場合は必ずしも岸向き方向に限らず沖向き方向にも移動する. 斜面上では, ほぼ全てが沖向き方向, すなわち斜面降下方向に転がり落ちる形で移動する. この場合, いずれも回転を伴う移動形態であり, 被覆材に作用する転倒モーメントが復元モーメントより大きくなったときに移動がおこると考えられる.

一方, 埋没状態では, 移動開始時には天端上, 斜面上いずれの場合も岸向きに移動する場合が大半である. しかし, 斜面上での岸向き移動量は高々直径の2倍程度であり, 流速反転時に沖向き方向, すなわち斜面降下方向に大きく移動する. 埋没状態の場合, 被覆材は吹出されるように天端上に突出し, 移動するが, ビデオ観察によると, 天端上に吹出される時も回転をとまなっており,

図-4 $W_c'/\rho g D^3$ と $u_m/\sqrt{gd}$ の関係

移動機構としては、突出状態と同様、転倒モーメントが復元モーメントより大きくなった瞬間に移動が始まると考えられる。

つぎに、移動限界時の外力について考察する。図-4に水中での無次元移動限界重量 $W_c'/\rho g D^3$ と無次元最大流速 $u_m/\sqrt{gd}$ の関係を例示する。なお、 W' は水中の被覆材重量であり、図中には K. C. 数 $u_m T/D$ が 10 と 20 に対する値も記入してある。一般に、 $W_c'/\rho g D^3$ は K. C. 数が 10 以下の範囲では $u_m/\sqrt{gd}$ に比例し、10 以上では $u_m/\sqrt{gd}$ の増加に対する $W_c'/\rho g D^3$ の増加の割合は傾き 2 に近づく。K. C. 数が小さい場合、慣性力が抗力よりも卓越し、逆に K. C. 数が大きくなると抗力が慣性力よりも卓越することを考えれば、被覆材の重量が小さい場合、慣性力の卓越範囲で被覆材は移動し、被覆材の移動に対する慣性力の寄与は無視できない。すなわち、被覆材の所要安定重量の算定に慣性力の効果を考慮する必要があることが指摘できる。特に、慣性力が支配的な波力成分になる場合、被覆材の体積を大きくして重量を増加させるより、比重を増大させて重量を増加させる必要があり、注意を必要とする。

図-5 に無次元移動限界重量 $W_c'/\rho g D^3$ と $F_{pm}/\rho g D^3$ ($F_{zm}/\rho g D^3$) の関係を例示する。ここに、 F_p は潜堤表面の接線方向波力であり、天端上では F_x に等しい。また、添え字 m は最大値を示すが、斜面上の突出状態の被覆材に対する場合は沖向きの最大値、それ以外は岸向きの最大値を採用する。同図に示すように、

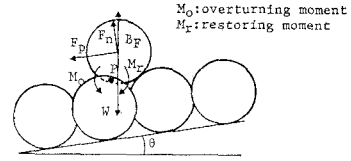


図-6 モーメントの釣合状態の概念図 (突出状態)

$W_c'/\rho g D^3$ は、若干のばらつきはあるものの作用波力と密接な関係にあり、作用波力が大きいほど大きくなる。

つぎに、移動限界重量と作用波力の関係に着目する。既述したように、被覆材の移動は、いずれの場合も回転を伴うものであり、転倒モーメントが復元モーメントよりも大きくなった瞬間に移動が始まると考えられる。作用外力としては①波力、②重力、③浮力と④被覆材間の摩擦力の 4 つが考えられるが、球体の場合、接触する球体間の摩擦力は小さいため、本研究では考慮しないことにする。ただし、この取り扱いには安全側の立場である。また、波力としては、移動状況から推察される接線方向波力 F_p と鉛直方向波力 F_z をそれぞれ突出状態と埋没状態に対し取り上げ、図-6 に例示するように被覆材接触点 P 周りのモーメントの釣合を考えると次式を得る。

a) 突出状態

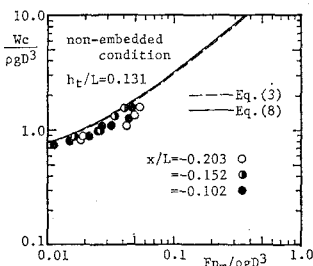
$$\frac{W_c}{\rho g D^3} = \frac{2\sqrt{2}}{\cos \theta - 2\sqrt{2} \sin \theta} \frac{F_{pm}}{\rho g D^3} + \frac{B_F}{\rho g D^3} \dots (3)$$

b) 埋没状態

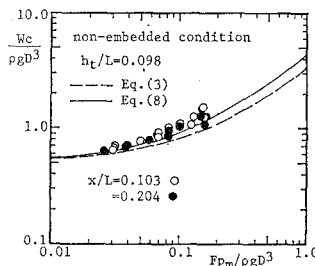
$$\frac{W_c}{\rho g D^3} = \frac{F_{zm}}{\rho g D^3} + \frac{B_F}{\rho g D^3} \dots (4)$$

ここに、 B_F は浮力、 θ は斜面勾配で、係数 $2\sqrt{2}$ は、モーメントのアームの鉛直長さと水平長さの比から求まる値であり、被覆材の形状、配置によって変化する。また、移動状況の観察結果より、斜面上の突出状態以外は、岸向き方向の移動限界状態を対象とした。

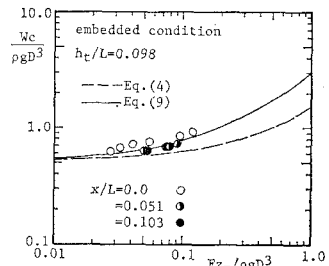
図-5 には、式 (3) と (4) の値を破線で示した。同図より明らかなように、斜面上の突出状態の被覆材に対するケースを除いて両式の計算値は実験値を過小評価



(a) 突出状態 (斜面上)



(b) 突出状態 (天端上)



(c) 埋没状態 (天端上)

図-5 移動限界重量と波力の関係

する。これは、式(3)と(4)では作用波力をそれぞれ1方向しか考慮していないためである。すなわち、突出状態では外向きの法線方向波力は、安定性を減少させる効果があること、また、埋没状態の被覆材が鉛直上向きの作用波力で若干浮上した場合、同時に作用する水平方向波力は移動を助長する効果を持つことになるのに対し、両式にはこれらの効果が含まれていないためである。そこで、式(3)と(4)に上記の効果を導入すると次式を得る。

a) 突出状態

$$\frac{W_c}{\rho g D^3} = \frac{2\sqrt{2}}{\cos\theta - 2\sqrt{2}\sin\theta} \frac{Fp_m}{\rho g D^3} + \frac{B_F}{\rho g D^3} + \frac{Fn_t}{\rho g D^3} \quad \dots\dots\dots(5)$$

b) 埋没状態

$$\frac{W_c}{\rho g D^3} = \frac{Fz_m}{\rho g D^3} + \frac{B_F}{\rho g D^3} + \frac{Fx_t}{\rho g D^3} \quad \dots\dots\dots(6)$$

なお、式(5)と(6)で新たに加えた右辺第3項の Fn_t と Fx_t は、それぞれ Fp と Fz が最大値となる位相の法線方向波力と水平方向波力である。

ここで、 Fx の Fz 、あるいは Fp と Fn の位相関係に着目すると、特に斜面上および法肩に近い天端上ではほぼ両方向の波力の最大値は同位相で発生することが判明した。この状態は被覆材の安定性に最も危険側の状態であり、安全側設計の観点から Fn_t 、 Fx_t としてそれぞれ Fn_m と Fx_m を採用することにする。

式(5)と(6)は2方向の波力の関数として移動限界重量を与える。しかし、実際の使用に際しては Fx_m と Fz_m 、あるいは Fp_m と Fn_m の関係を明らかにし、それぞれの状態に対し、 Fp_m もしくは Fn_m の1変数の関数として移動限界重量を表示する方が便利である。特に、両方向の波力の卓越成分がいずれも抗力、あるいは慣性力である場合は両者は線形関係で関連づけることが可能である。図-7に Fx_m と Fz_m の関係を例示する。同図に示すように、多くの場合、鉛直方向波力や埋没状態の被覆材の作用波力には抗力と慣性力以外の波力成分の寄与も大きく(Rufin ら, 1992)、実験値にはばらつきはあるものの、両者の関係は次式で表現可能である。

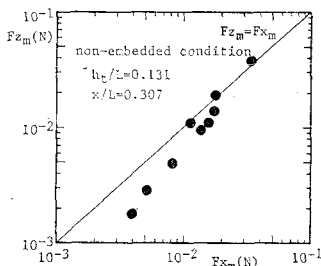


図-7 Fx_m と Fz_m の関係の例 (突出状態)

$$Fn_m = \alpha Fp_m, \quad Fz_m = \alpha Fx_m \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 α は係数である。 α 値は、全ての条件に対し、図-7と同様に Fp_m と Fn_m 、あるいは Fx_m と Fz_m の関係を調べ、実験値の上限値として突出状態の天端上と斜面上の被覆材に対し $\alpha=1.0$ 、埋没状態の天端上と斜面上の被覆材に対しそれぞれ $\alpha=0.7$ と $\alpha=1.6$ を採用した。式(7)を式(5)と(6)に代入すると次式を得る。

a) 突出状態

$$\frac{W_c}{\rho g D^3} = \left(\frac{2\sqrt{2}}{\cos\theta - 2\sqrt{2}\sin\theta} + \alpha \right) \frac{Fp_m}{\rho g D^3} + \frac{B_F}{\rho g D^3} \quad (\alpha=1.0) \quad \dots\dots\dots(8)$$

b) 埋没状態

$$\frac{W_c}{\rho g D^3} = \left(\frac{\alpha+1}{\alpha} \right) \frac{Fz_m}{\rho g D^3} + \frac{B_F}{\rho g D^3} \quad (\alpha=0.7 \dots \text{天端上}, \alpha=1.6 \dots \text{斜面上}) \quad \dots\dots\dots(9)$$

図-5には、式(8)と(9)の結果を実線で示してある。斜面上の突出状態の被覆材を除いて1方向の波力のみを考えた場合に比べて実験値との対応は非常によいことが明らかである。この結果は、移動限界を考える場合、1方向の波力のみを考慮したのでは不十分であることを示す結果である。

斜面上の突出した被覆材に対しては、式(3)の結果が実験値の上限を与えており、他のケースの結果と異なる。これは、斜面上の突出状態の被覆材に対しては、沖向き方向の移動限界を考慮しているが、斜面降下方向の最大波力作用時には構造物内向きの法線方向波力が作用する。これは、天端上とは逆に被覆材を安定させる効果を与える。したがって、1方向のみの波力を考えた式(3)よりも実験値が下回ったと考えられる。

(3) 被覆材の所要安定重量算定手法に関する考察

以上論議してきたように、式(8)と(9)より被覆材に作用する潜堤表面の接線方向と法線方向の最大波力が与えられれば、被覆材の所要安定重量は推算可能である。

図-3に示したように、水平・鉛直方向の最大波力の特性は既知である。また、斜面上の接線方向と法線方向の最大波力も容易に求めることができる。そこで、その結果を式(8)と(9)に代入すると被覆材の所要安定重量を与える図-8を得る。

図-8によれば、被覆材の所要安定重量は、法肩で最大となり、天端上では波進行方向に向かって減少する。突出状態では埋没状態に比べて作用波力が大きくなるため、被覆材の所要安定重量はかなり大きくなる。特に、斜面上に設置された被覆材は、重力の一部が転倒モーメントとしても作用するため、所要安定重量は非常に大きくなり、法肩を境にして大きく変化する。また、天端上の碎波後の領域では、入射波高の増大による所要安定重

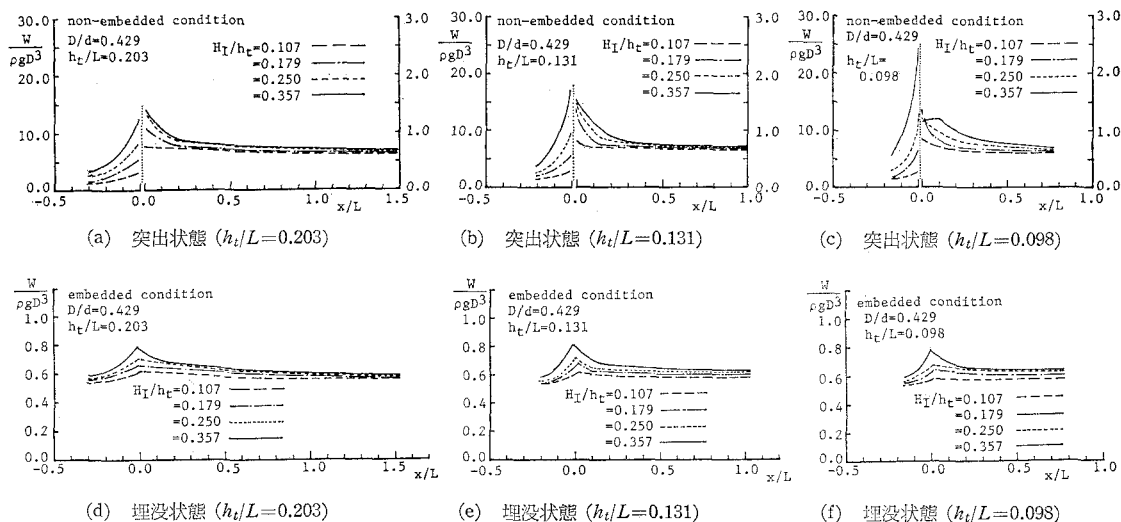


図-8 所要安定重量算定図(球状被覆材の場合)

量の増加は非常に小さい。

宇多らの方法(1988, 1990)による所要安定重量と比較すると(本研究では捨石の代わりに球体を使っているため、直接比較できないが)、 x/L に伴う所要安定重量の変化は本手法の方が滑らかであり、特に、法面上の水深の増加に伴う所要安定重量の軽減が可能になることが言えそうである。

式(8)と(9)の妥当性は図-5から確認できる。したがって、その有用性は作用波力の正確な予測に依存する。天端水深の浅い本実験範囲では、砕波後の乱れた範囲を除いて Morison 式により突出状態の球状被覆材に作用する水平方向波力の算定が可能であり、この場合、一様水深域の単一球体に対する波力係数を使用できる(Rufin ら, 1992)、しかし、埋没状態の被覆材の作用波力や突出状態の被覆材の作用波力の中には Morison 式により正確に波力を算定できない場合も多いので、この面からの今後の検討が必要である。

4. 結 言

本研究で明らかとなった主要な結論を以下に要約する。

(1) 潜堤上の被覆材に作用する無次元最大波力は、法肩付近で最大となる。なお、天端水深の小さい方が無次元最大流速、無次元最大波力とも大きくなる。

(2) 重量の小さい被覆材は慣性力が支配的な範囲で不安定となり移動する。したがって、被覆材の所要安定

重量の算定には慣性力の効果も考慮する必要がある。

(3) 移動限界重量と作用波力には密接な関係があり、力のバランスを考慮した力学モデルにより両者の関係は明確に結び付けられる。ただし、被覆材が突出する場合、埋没する場合のいずれも水平方向と鉛直方向の両波力を考慮しなければ被覆材の所要安定重量を過小評価する。

(4) 幅広潜堤上の被覆材の所要重量算定方法を提案した。

最後になるが、本研究では、捨石を球体で近似して被覆材の作用波力と所要安定重量について検討を加えた。今後、実際の捨石との関連性について引き続き検討を加える所存である。また、本研究の一部は文部省科学研究補助金・重点領域研究(1)(代表者：中央大学 服部昌太郎教授)によったことを付記する。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久(1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第2696号, 79p.
- 宇多高明・小俣 篤・斎藤友伸(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, 48p.
- 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., Mizutani, N., Iwata, K., Totsuka, N. and Kurata, K. (1992): Laboratory investigation on the estimation of wave forces acting on a spherical armor unit of a submerged breakwater, 第47回年次学術講演会概要集2, pp.1174-1175.