

大水深混成堤のマウンド被覆材の安定性に関する実験的研究

Stability of Armor Units for composite Breakwater Mound in Deep Seas

木村 克俊 * ・ 谷本 勝利 ** ・ 高橋 重雄 ***

Katsutoshi KIMURA, Katsutoshi TANIMOTO and Shigeo TAKAHASHI

Recently breakwaters have been constructed in deep seas. For example, a trapezoidal caisson breakwater is under construction in the depth of 60m at Kamaishi Port. Although the design procedures for the upright section are established, the stability of rubble mound foundations is not sufficiently studied for the deep sea conditions.

In the present paper, the characteristics of wave-induced flow near the mound are disclosed, and the stability of armor units is investigated by two-dimensional experiments with irregular waves. According to the test results, the minimum necessary weight and covering area of armor units can be estimated for rubble mounds of composite breakwaters in the deep seas.

<Keywords>: deep water breakwater, composite breakwater, armor unit, irregular wave test

1. まえがき

我が国の主要な防波堤の構造形式は、基礎捨石マウンド上にコンクリートの直立部を据え付けた混成堤である。浅海域を対象とした混成堤の設計技術は、実用的にほぼ完成された段階にある。一方近年は大水深領域で、混成堤が建設される事例が増加している¹⁾。大水深においては、工費の高騰を抑えるとともに、施工性の向上や反射波の低減が求められている。こうした新しい要請に応えることのできる構造形式の開発が強く望まれている。

筆者らはこれまで大水深条件下の混成堤直立部の耐波安定性を検討し、理論的検討と水理模型実験を行って、大水深条件特有の波力特性を明らかにしている²⁾。本研究では、大水深条件を対象とした混成堤マウンド部の安定性について検討した。大水深の場合には、被覆材の必要重量を求めることとともに、深さ方向にどこまで被覆するかが問題となる。本報告では不規則波を用いた2次元実験結果に基づいて、大水深条件下における混成堤マウンド被覆材の設計法の考え方を明らかにするものである。

2. マウンド近傍流速と被覆材の安定重量

(1) 安定重量算定の基本式

混成堤のマウンド被覆材の安定重量は式(1)により算定できる。

$$W = \frac{\gamma_r H_{1/3}^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (1)$$

ここに、W:被覆材の安定重量 (tf)、
 γ_r :被覆材の空中単位体積重量 (tf/m³)、
 S_r :被覆材の海水に対する比重、 $H_{1/3}$:設

計有義波高(m)、 N_s :波の諸元、マウンドの形状、被覆材の特性などによって決まる安定数である。筆者ら³⁾は、堤幹部を対象として、波向きの影響を考慮した被覆石の安定数 N_s の算定式を、次のように提案している。なお、算定式で用いる混成堤の断面と記号を図-1に示す。

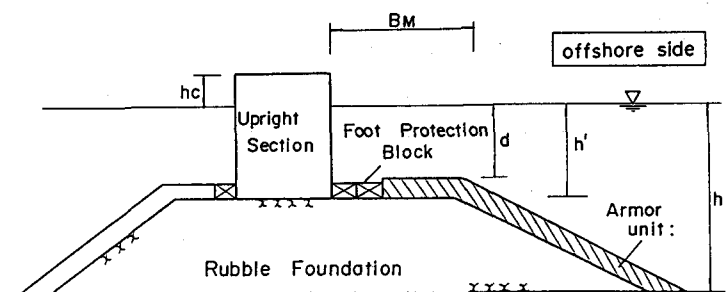


図-1 混成堤の標準断面と記号

* 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 水工部 港湾研究室 主任研究員 (〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)
 (元 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室 研究官)

** 正会員 埼玉大学教授 工学部建設基礎工学科 *** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室長

$$N_s = \max \left\{ 1.8, 1.3 + \frac{1-\kappa}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} 1.8 \exp \left[-1.5 \frac{(1-\kappa)^2}{\kappa^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} \right] \right\} \quad (2)$$

$$\kappa = \kappa_1 \cdot (\kappa_2)_B \quad (3)$$

$$\kappa_1 = \frac{2 k h'}{\sinh 2 k h'} \quad (4)$$

$$(\kappa_2)_B = \max \{ (\alpha_s)_v \sin^2 \beta \cos^2 (k l \cos \beta), (\alpha_s)_u \cos^2 \beta \sin^2 (k l \cos \beta) \} \quad (5)$$

ここに、 h' :基礎捨石マウンドの天端の水深 (m)、 L' :水深 h' での設計有義周期に対する波長 (m)、 k :波数 ($2\pi/L'$) である。また、 B_M は基礎捨石マウンドの前肩幅 (m) で、 $B_M/L_{1/3}$ が0.25以下が適用範囲である。 κ は微小振幅波理論で導いた無次元流速で、相対水深の影響を表す κ_1 と、直立壁からの相対的位置や波向きの影響を表す $(\kappa_2)_B$ の積で表される。

式(2)は谷本ら⁴⁾が提案した被覆石の安定数で、勾配が1:2のマウンドの堤幹部に波が直角入射する場合を対象としている。それ以外の条件に対しては、式(5)に示すように、法線方向の流速成分 (第1項) に対して $(\alpha_s)_v$ 、法線直角方向の流速成分 (第2項) に対して $(\alpha_s)_u$ を補正係数として乗する。

斜め入射波が作用する場合には、法線方向の流速成分によりマウンド天端の水平面上の被覆材の不安定になり易い。水平面のマウンド被覆材は斜面部に比べて一般に安定性が高く、この違いを考慮して筆者ら³⁾は $(\alpha_s)_v$ を0.45とした。

一方直角入射波に対しては、通常水深の混成堤の場合には被覆材の安定性に及ぼすマウンド勾配の影響は考慮していない。しかし大水深条件下の高マウンド型混成堤の場合には、おもに経済的な理由から、供用期間中にある程度の変形を許容する設計が必要となる。本報告では式(5)中の $(\alpha_s)_u$ をパラメーターとして、直角入射条件に対するマウンド勾配が被覆材の安定性に及ぼす影響の評価を試みた。

(2) 流速と安定重量の関係

流速と安定重量の関係については、以下に示すCERCの式⁵⁾ (流速の6乗則) が一般に用いられている。

$$W = \frac{\pi \gamma_r u^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (6)$$

ここに、 u :被覆材近傍の流速、 θ :水路軸方向の斜面勾配、 y :イスバッシュ数 (埋め込みの場合1.20、露出の場合0.86) である。筆者らは前報³⁾において、流速として有義波高に対応した1/3最大流速 $u_{1/3}$ を用いた場合、これに対応するイスバッシュ数 $y_{1/3}$ を0.7とすることで、式(6)により被覆材の安定重量が推定できることを確認している。

被覆材の安定重量を算定においては、波高の3乗に比例する式(1)と、流速の6乗に比例する式(6)の2種類の考え方がある。一般的な設計では、波浪条件が与えられる場合が多いため、前者の方法が適用される。しかし斜め入射や堤頭部での被覆材の安定性、あるいは水深方向の被覆範囲の決定といった特殊な条件に対しては、基準条件との流速比に応じて、「流速の6乗則」に基づいて安定重量を補正することができる。

3. 実験概要

(1) 実験水路および模型

実験は長さ105m、幅3m、深さ2.5mの大型造波水路で行った。堤体位置の前方の水底は1/100の勾配をつけてある。対象とした堤体は図-2に示す、水深60mにおける混成堤の縮尺1/40の模型である。堤体設置水深 h は150cm、ケーソンの基面水深 h' は67.5cmの大水深防波堤である。マウンドの勾配は港内側、港外側ともに1:2である。ケーソンは全高が82.5cmで、下方が台形 (下幅87.5cm、上幅47.5cm) で、上方の波の入射側には二重横スリットの消波部を有している。

谷本らはこの堤体を対象として、現地の設計周期 ($T_{1/3}=1.90$ s) に対する反射特性を調べている⁷⁾。反射率 K_R は0.5程度で、波高にかかわらずほぼ一定であった。また比較のために行った波の入射側を不透過としたケースでは、波高とともに反射率が小さくなり、被覆材の安定性が検討対象となる $H_{1/3}/d=0.3$ 以上の条件では、 K_R は0.7程度となる。したがって、設計条件に対しては消波部の効果がそれほど顕著でないことから、以下の安定重量の計算においては、消波部の反射低減効果を考慮しない。なお、マウンドの法肩幅を決める場合の直立部

(2) 実験の種類および実験波

流速測定実験では、周期 $T_{1/3}=1.90\text{ s}$ 、波高 $H_{1/3}=13.0\text{ cm}$ の1種類とし、作用波数は250波とした。

マウンド被覆材の安定実験では、都合により設計周期よりやや短い $T_{1/3}=1.83\text{s}$ を対象とした。波高は $H_{1/3}=15\sim 23\text{cm}$ の範囲で変化させ、各レベルごとにおよそ1000波を連続作用させた。実験での波の継続時間は1000波で28.5分で、現地に換算して3時間となる。安定実験の範囲を無次元表示すると、相対水深 $h/L_{1/3}$ は0.301で、マウンド上の水深 d に対する波高の比 $H_{1/3}/d$ は0.24~0.37、波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ は0.030~0.046となる。

(1) 測定方法

マウンド近傍において、電磁流速計により流速の水平成分を計測した。測定はマウンド面から3 cmの位置で行い、波向き方向にはケーソン直立面からの距離 x が20、45、89、133、177、220 cmの合計6個所とした。なお、流速計は0~100 cm/sのレンジを使用し、応答性を決める時定数は0.05 sとした。

(2) 流速分布

図-3は各測点での水平流速の1/3最大値 $u_{1/3}$ の分布を示している。流速は法肩で最大となり、後述する安定実験で法肩を中心に洗掘が進むことに対応している。同図では横軸に $x/L_{1/3}$ をとり、縦軸には各点での流速 $u_{1/3}$ を、法肩での流速 $(u_{1/3})_{peak}$ に対する比で示している。

図中の実線は細山田⁸⁾の境界要素法による計算曲線である。法肩から沖側のマウンド近傍流速の減少傾向に関して、計算曲線と実験値がほぼ一致していることがわかる。

5. マウンド被覆材の安定性

(1) 実験の種類および方法

マウンドの被覆材の安定性については、①被覆材の安定重量に関する実験、②安定限界を上回る波浪に対するマウンドの変形に関する実験の2種類を行った。

実験①では、平均重量の異なるQ1～3の3種類 ($\bar{W}=5.3, 8.1$ および 19.9gf)と、これらを混合した ($\bar{W}=7.8\text{gf}$ 、以下「混材」と呼ぶ)の、合計4種類の被覆材を用意した。被覆材の諸元を表-1に、重量加積曲線を図-4に示す。

実験では順次波高の大きな波を作用させるが、波高レベルを変更する際には並べ換えを行わず、移動は累積していった。また観察は被覆材の移動状況を目視観測するとともに、断面形状の変化を水路のガラス面上で測定した。写真-1は安定実験の状況を示している。被覆材の移動状況の観察を容易にするため、各層ごとに色分けして配置した。

被覆材の移動の割合を表す指標として、以下に示す断面欠損率Dを用いた。

$$D = a/A \quad (7)$$

ここに、Aは被覆層の全断面積で、aはその中の欠損部分の断面積である。今回の実験では、被覆材の重量が変わっても、被覆層の厚さは5cmで一定としている。したがって被覆材の種類によって層数が異なる。一般には2層とすることが多いので、被覆材の総数や被覆層の断面

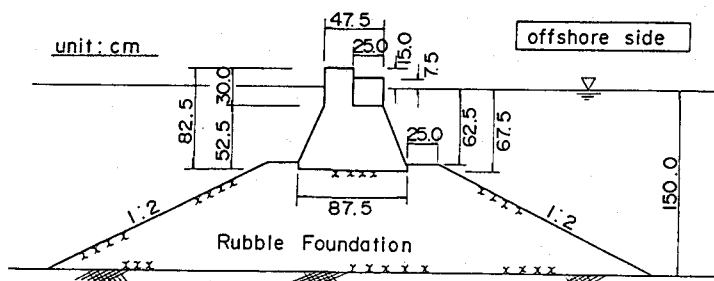


圖-2 實驗断面

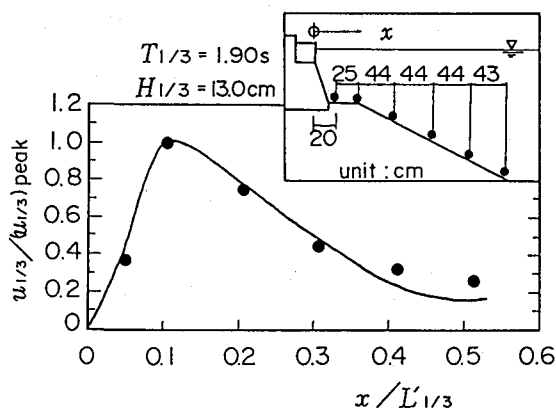


図-3 水平方向の1/3最大流速の空間分布

積を2層に換算して結果を表示する。

実験②では、混材 ($\bar{W}=7.8\text{gf}$) を用いて、 $H_{1/3}=19.3\text{cm}$ の条件の波を1000波ずつ、合計6回連続して作用させて、マウンド部の変形状況を調べた。なお、周期は $T_{1/3}=1.83\text{s}$ の1種類に対して、特性の異なる3種類の波群を作用させており、断面欠損率はこれらの3波群の平均値で表示した。

(2) 断面欠損率と波高の関係

図-5は被覆材Q1 ($\bar{W}=5.3\text{gf}$) を用いた場合のマウンドの変形状況を、波高レベルごとに示したものである。マウンドの法肩での変形が大きく、波高が大きくなるほど欠損範囲が拡大している。一般に法肩付近の被覆材は、波の上昇時に上方に吸い出されるように持ち上がり、いったんケーソン側に移動した後、波の下降時にマウンド法先方向に転落する。これらの被覆材は法面に広く分布するため堆積はあまり目立たない。

図-6は各種の被覆材に対する波高 $H_{1/3}$ と断面欠損率の関係を示している。 $\bar{W}$ が5.3gfと8.1gfのケースでは安定性の差は小さいけれども、 $\bar{W}$ が19.9gfでは安定性が高くなっていることがわかる。

また平均重量がほぼ等しいQ2 ($\bar{W}=8.1\text{gf}$) と混材 ($\bar{W}=7.8\text{gf}$) を比較すると、混材のほうが安定限界波高が大きくなっている。このことから、大きさのそろった被覆材より、異なる大きさの石材をある程度混合したほうが安定性が高い傾向がわかる。

(3) 安定限界重量と被覆必要範囲

図-7は、波高 $H_{1/3}$ と安定限界重量 $\bar{W}$ の関係を示しており、断面欠損率Dが0%および1%に相当する条件をプロットしている。図中の曲線は式(1)~(5)で求めた計算値であるが、実験値とおおむね一致している。した

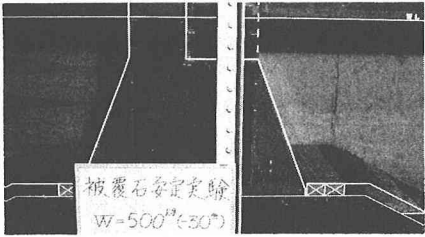


写真-1 安定実験の状況

表-1 被覆材の諸元

種類	平均重量 $\bar{W}$ (gf)	標準偏差 σ (gf)	変動係数 (%)	単位体積重量 γ_r (gf/m³)	2層換算平均厚さ (cm)
Q1	5.3	0.89	16.8	2.69	2.6
Q2	8.1	1.37	16.9	2.65	2.9
Q3	19.9	2.95	14.8	2.69	3.6
混材	7.8				

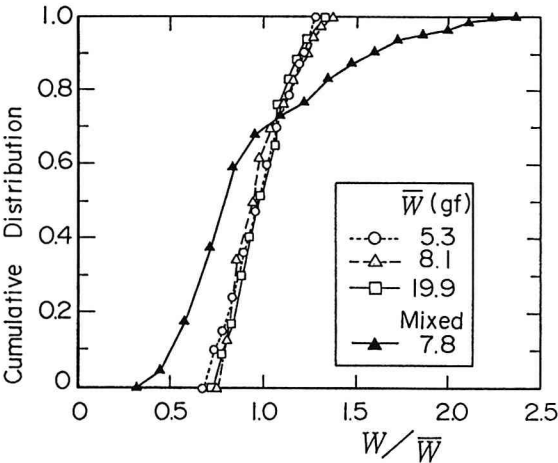


図-4 被覆材の重量分布

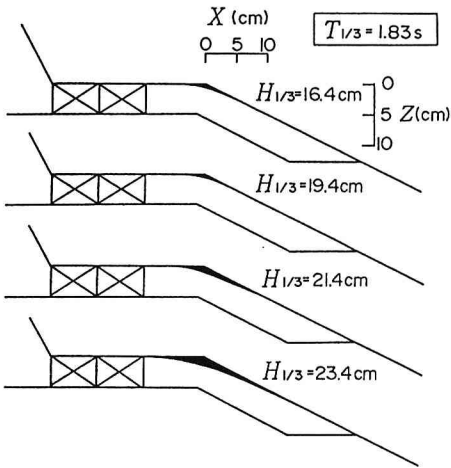


図-5 マウンドの変形状況

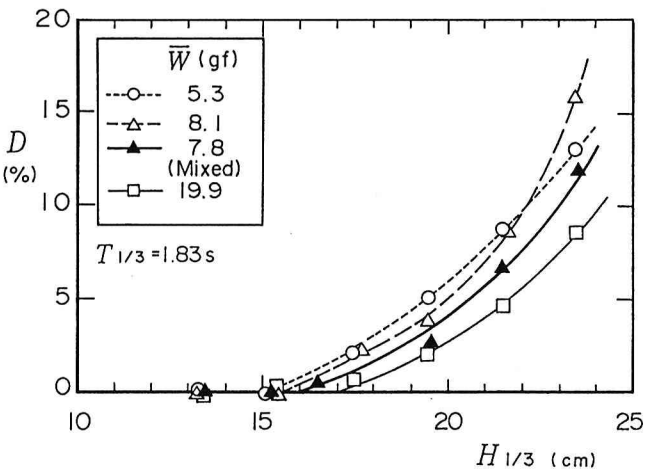


図-6 波高と断面欠損率

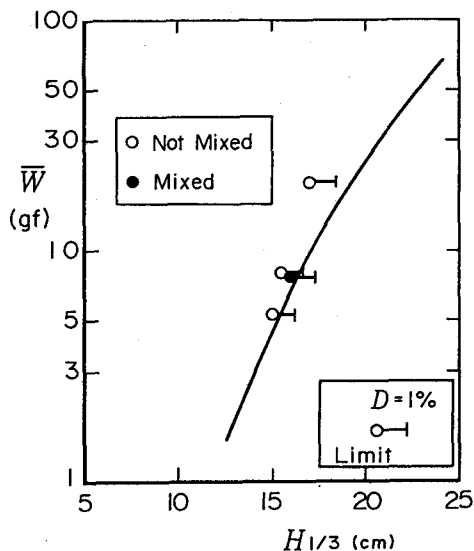


図-7 波高と安定重量

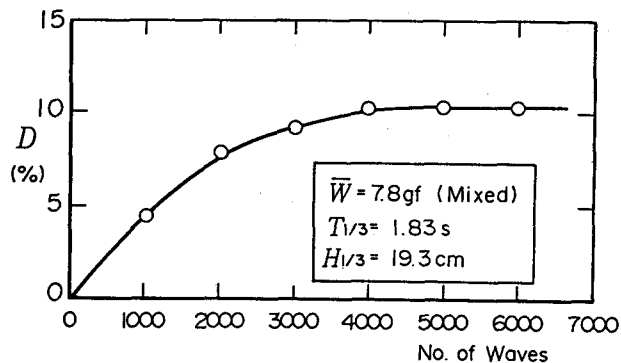


図-8 安定限界を上回る波浪による断面欠損

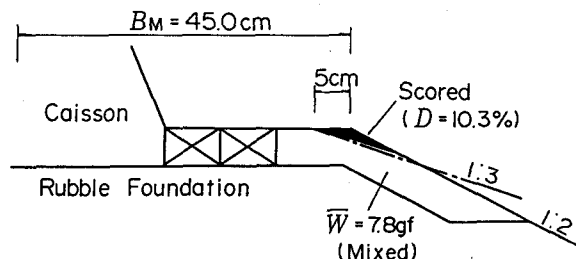


図-9 平衡状態のマウンド形状

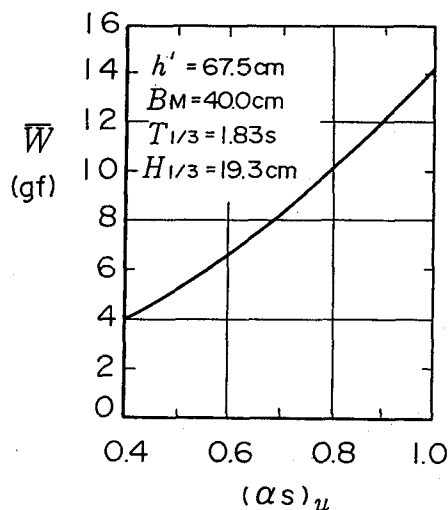


図-10 補正係数 $(\alpha_s)_u$ と安定重量の関係

がって、この方法は大水深条件に対しても、法肩部の安定重量の算定に適用可能である。

大水深混成堤の場合、基礎マウンド全体を被覆する必要はない。法肩から深さ方向の被覆必要範囲は、簡易的には前出図-3の流速分布に基づいて、流速の6乗則によって法肩の安定重量を低減することで求められる。たとえばスリット部前面からの距離 x が89cm、水深が81.5cmの位置におけるマウンド近傍流速は、法肩での流速の約75%である。したがって $(0.75)^6 = 0.178$ より、この位置では法肩の1/5程度の重量のマウンド材で済むことがわかる。ただし、平均重量の異なる被覆材を使う場合には、両者の境界部での変形状況が不明であるため、実際の設計に当たっては、以下に示すような安定限界を上回る波浪に対する検討を行う必要がある。

(4) 安定限界を上回る波浪によるマウンド部の変形

通常の水深の混成堤では、設計波浪に対して被覆材の被害率を1%程度以下に抑えることが一般的である。このため波浪条件が厳しい場合には、大重量のコンクリート製被覆ブロックが使用される。しかしながら、大水深条件では、捨石部の均しや被覆ブロックの据え付け作業が困難になる。さらにこれらのブロックの製作費が建設コストに占める割合を抑えるため、現地で供給可能な石材を被覆材として使用することが望ましい。

ここでは比較的小重量の被覆材を使用した場合を想定して、安定限界を上回る波浪によるマウンド部の変形について検討した。使用した被覆材は混材 ($\bar{W} = 7.8\text{gf}$) で、 $T_{1/3} = 1.83\text{s}$ 、 $H_{1/3} = 19.3\text{cm}$ の波浪を合計6000波作用させた。この波浪条件に対するマウンド被覆材の必要重量は $\bar{W} = 19.5\text{gf}$ である。

図-8は1000波ごとの断面欠損率 D の変化を示している。4000波程度の波の作用によって被覆材の移動は収まり、断面欠損率 D は10.3%となった。このように安定限界を上回る条件に対しても、作用波数が増えても必ずしも変形が進行しないことが明らかになった。図-9はこの条件に相当するマウンドの状況をスケッチしたものである。洗掘が進行した結果、法肩位置が5cm岸側に近づくとともに、マウンド勾配も緩くなりおよそ1:3で平衡

状態となった。

図-10は法肩幅 $B_N=40\text{cm}$ として、式(5)の勾配パラメーター $(\alpha_s)_u$ を変化させたときの被覆材の安定限界重量 W を示している。実際に使用した被覆材は $\bar{W}=7.8\text{gf}$ であるから、同図から勾配1:3の条件に対する補正係数 $(\alpha_s)_u$ は0.67と求められる。ただしこの値は、大水深の高マウンド条件に対するものであり、一般的な条件に対する適用性は確認されていない。

6. 結論

2次元水理模型実験結果に基づいて、大水深混成堤のマウンド被覆材の安定性を検討した。その結果、以下の事項が明らかになった。

- ①大水深混成堤のマウンド法肩部の被覆材の安定数 N_s は、式(2)～(5)により算定可能である。
- ②マウンド法肩から深さ方向の被覆必要範囲は、流速の6乗則に基づいて推定可能である。
- ③均一に近い被覆材よりも、ある程度重量分布が広がっている方が、安定性が高い傾向がある。
- ④安定限界を上回る波浪の作用を受けた場合、法肩の被覆材が転落する。その結果、法肩位置が直立部に近づるとともに法面勾配が緩くなり、マウンドの変形はそれ以上進まず平衡状態に達する。

今回の実験では構造条件や周期の条件を変化させていないため、一般的な結論を得るには至っていない。今後は設計法の確立をめざして、引き続き検討を行う予定である。

本研究は、現在建設中の釜石港湾口防波堤を対象とした実験的検討の一部である。実験計画や実施の段階で、運輸省第二港湾建設局に多大な協力を得た。本報告で示した安定実験は、元港湾技術研究所水工部防波堤研究室山岸一雄研究員（現第一港湾建設局）によって実施された。また、マウンド近傍流速の数値計算に当っては、前港湾技術研究所水工部の細山田得三主任研究官（現長岡技術科学大学工学部）の協力を得た。ここに記して関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1)中道正人・亀山 豊・加藤浩司・上部達生・近藤浩右・佐野泰三：釜石港湾口防波堤における現地観測について、海岸工学論文集、第40巻(2)、1993、pp. 741～745.
- 2)谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司：大水深混成堤の直立部に働く波力と滑動安定性、第35回海岸工学講演会論文集、1988、pp. 637～641.
- 3)高橋重雄・木村克俊・谷本勝利：斜め入射波に対する混成堤マウンド被覆材の安定重量算定法、海岸工学論文集、第38巻(2)、1991、pp. 596～600.
- 4)谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鋼三・合田良実：不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究、港湾技術研究所報告、第21巻第3号、1982、pp. 3～42.
- 5)Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, Vol. II, 1984.
- 6)高橋重雄・木村克俊・谷本勝利：斜め入射波に対する混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第29巻第2号、1990、pp. 3～36.
- 7)谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司：大水深混成堤の耐波安定性に関する研究、港湾技術研究所報告、第27巻第1号、1988、pp. 3～29.
- 8)細山田得三・高橋重雄：境界要素法による防波堤に作用する波力の数値計算—半没水型上部斜面堤に対する波力の算定—、海岸工学論文集、第40巻(2)、1993、pp. 726～730.