

変形を許容した混成堤マウンド被覆材の必要重量算定法

須藤賢哉*・木村克俊*・笹島隆彦*
水野雄三**・竹田英章***

1. ま え が き

混成堤の設計法のうちケーソン部に働く波力特性は概ね解明されており、経済性を追求するため期待滑動量の概念を本格的に導入する動きがある(下迫・高橋, 1994)。これに対し混成堤のマウンド部については、波力と変形特性の関係が十分明らかにされていないため、被害率の許容限界を被覆材総数に対して1%とする設計法が採用されている。しかし実際には数%程度の被害率を許容しても、防波機能には直接影響しないと考えられる。

これまで傾斜堤や消波ブロック被覆堤に対しては、消波工の変形を考慮した設計法に関するいくつかの研究が行われている(楳木ら, 1982; Van der Meer, 1987; 鹿島ら, 1993)。混成堤マウンドについても同様の概念を導入すれば被覆材の必要重量の低減が図られ、従来はコンクリートブロックで対処した条件に対しても自然石が使用できる可能性がある。こうした利点は巨大マウンドを有する大水深混成堤の建設コスト低減や、水産協調目的のマウンド利用とも結びつくことが期待される。

本報告では水理模型実験により、安定限界を越える波浪が作用する場合のマウンド部の変形特性を明らかにする。これにより作用波数と変形量の関係に基づいた安定数を定式化し、変形を許容したマウンド被覆材の必要重量算定法を提案する。

2. 必要重量算定法の基本式

混成堤の標準断面を図-1に示す。マウンド被覆材の安定重量は、波の諸元とケーソンおよびマウンドの構造条件によって異なる。設計ではこれらを考慮した上で、被覆材の安定重量を式(1)で算定する。この式はHudson (1959) が捨石式傾斜堤被覆材の安定性の検討に際して示したもので、Brebner・Donnelly (1962) によって混成堤マウンド被覆材の安定重量算定の基本式として用いられて以来広く用いられている。

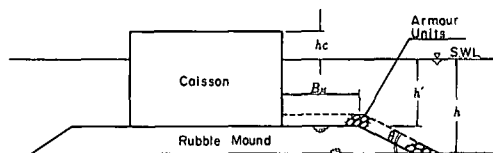


図-1 混成堤の標準断面

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

ここで、 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 :安定数である。ただし、 N_s は波浪および構造条件を考慮して水理模型実験等により適切に定める必要がある。谷本ら(1982)は不規則波による系統的な実験に基づいて、直角入射波に対する N_s を以下のように定式化した。

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

$$\kappa = \frac{4\pi h' / L'}{\sinh(4\pi h' / L')} \sin^2(2\pi B_m / L') \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 h' :被覆層を除く基礎捨石マウンド天端上水深(m), L' : h' に対する波長(m), B_m :マウンド前肩幅(m)である。また、 $\max\{a, b\}$ は a または b のいずれか大の値である。ただし式(2), (3)は作用波数が約500波の条件に対して被害率が1%となるような N_s を与えるものである。したがって変形を許容する設計を行うためには、被害率および作用波数のパラメーターを適切に導入することによって N_s を求める必要がある。

3. 実験方法

実験は、不規則波発生装置を備えた長さ28.0m、深さ1.0m、幅0.8mの2次元造波水路に勾配1/50のモルタル床を製作して行った。模型堤体は基礎捨石マウンド上に木製ケーソンを設置し、マウンド部は2層被覆とした。被覆材としては砕石を使用し、その平均重量を3種類に変化させた。

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所環境水工部港湾研究室
** 正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所環境水工部長
*** 正会員 北海道東海大学教授 工学部海洋開発工学科

実験波は Wallops 型スペクトルとし、形状母数は $m=5$ (Bretschneider・光易型に相当)、 $m=11$ (うねり性の波浪) の 2 種類を目標スペクトルとした。安定実験は同一の波高 (1 波群 160 波) を連続して 30 回 (合計 4800 波) 作用させる方法で行ったが、マウンド法面勾配の影響に関する実験に限って 1 波群 500 波で波高条件を順次大きくしていく方法をとった。いずれの場合も 1 波群を作用させた後の被覆材の並べ直しは行わず、被害個数を累積した。被覆材の挙動を 1 波群ごとに目視観測し、他の帯へ移動した場合を被害と定義した。被害率は次式で表される。

$$D(\%) = (n/N_A) \times 100 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 N_A は被覆材の総数、 n はそれぞれの波高条件における累積被害個数である。

またマウンド法面勾配の影響に関する実験では、2 成分電磁流速計によりマウンド近傍流速を測定した。流速計の測定レンジは 0~200 (cm/s)、時定数は 0.05 s を用い、検出部先端をマウンド表面から 2.5 cm 離れた位置に設置した。

今回の実験条件を、表-1 にまとめて示す。

表-1 実験条件

海底勾配	1/50
堤体設置水深 h (cm)	24.0
マウンド天端上水深 h' (cm)	12.0, 16.8
マウンド前肩幅 B_M (cm)	20.0
マウンド法面勾配 $\tan \theta$	1/2, 1/3, 1/5
被覆材の平均重量 W (gf)	7.6 [2.59], 15.1 [2.55],
[単位体積重量 γ_r (gf/cm ³)]	25.1 [2.58] (重量差 ± 20 %以内)
ケーソン天端高 h_c (cm)	7.2
有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	1.80 (一部 1.20, 2.40 を実施)
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	3.1, 5.1, 7.1, 8.3, 10.0, 12.8
スペクトル形状母数 m	5, 11

4. マウンドの変形特性

(1) 作用波数とマウンドの変形状況

図-2 は波高を $H_{1/3}=10.0$ cm, 周期を $T_{1/3}=1.80$ s, スペクトル形状母数を $m=5$ で一定とし、被覆材の平均重量が $W=7.6$ gf, 15.1 gf および 25.1 gf の場合の作用波数 N と被害率 D の関係を示している。式 (1)~(3) により計算される安定重量は $W_c=29.6$ gf であり、いずれも安定限界を越える波高条件に相当する。全体的には波が作用する初期段階で被害率が大きく増加し、作用波数とともに大きくなっている。しかし被害率の増加は次第に緩やかとなり、やがて一定値に収束する傾向がある。 W が小さいほど被害の進行も速いが、被害率が一定値に

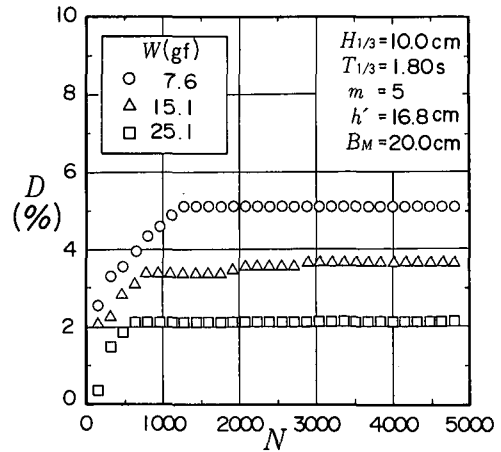
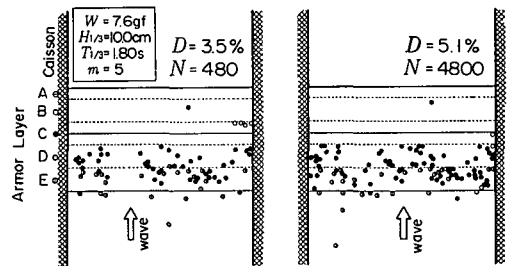


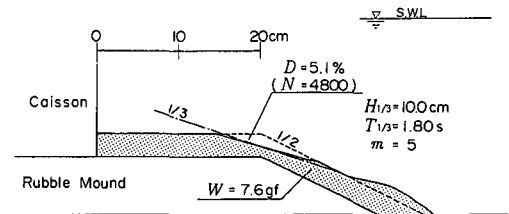
図-2 作用波数と被害率

収束する傾向は変わらない。

図-3(a) は図-2 で $W=7.6$ gf における、 $N=480$ および $N=4800$ のときの各被害率に相当する被覆材の移動状況を示したものである。被覆層は 5 色の帯状に形成しており、図中のプロットは各被覆層から移動した個々の被覆材を表している。移動はおもに法肩 (図中 C の帯) で発生し、そのほとんどが法先部分に堆積している。図-3(b) は $N=4800$ で被害率が $D=5.1$ % に収束した状態での、マウンドの変形の概略断面を示している。法肩部分を中心として局所的に 2 層被覆のうち 1 層目の被覆材の欠損が認められるが、マウンドの機能を損なうほどの変形には至っていないことが確認された。欠損部分はおおよそ 1/3 から 1/5 の緩やかな勾配の斜面となるが、



(a) 移動状況



(b) 収束断面

図-3 マウンドの変形状況

このような形状が当該波浪条件に対して平衡断面となっているものと思われる。木村ら (1994) は大水深で高マウンド条件の混成堤に対して安定限界を上回る波高を作用させ、マウンド形状が平衡断面に達することで変形が一定値に収束することを示している。今回のような低マウンド条件においても、同様の変形特性となることが明らかとなった。

(2) マウンド法面勾配の影響

図-4 はマウンド法面勾配 $\tan \theta$ と、被害率 1% における安定数 N_s の関係を示している。 $\tan \theta$ が小さいほど N_s が大きくなっており、 W, h, B_M 等の条件が同じでも法面勾配によって安定限界波高が変化することがわかる。図-5 は法面勾配の違いによる、波高と法肩部分の近傍流速の関係を示している。流速は有義波高の定義に従って $1/3$ 最大流速 $U_{1/3}$ とし、波の入射方向 (正方向) の流速を採用している。波高とともに流速は直線的に増大しているが、法面勾配による流速の違いは特に認められない。したがって同じ近傍流速が作用する場合には、より緩やかな斜面上に置かれた被覆材の方が安定性が高いこ

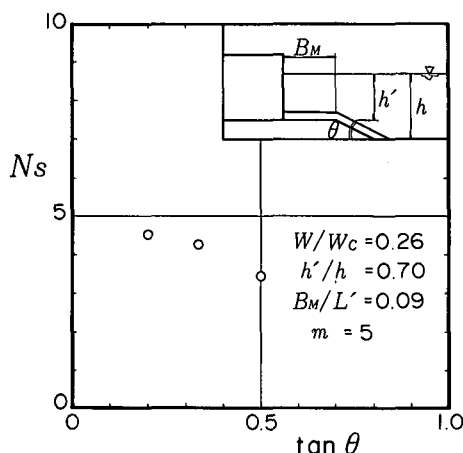


図-4 マウンド法面勾配と安定数

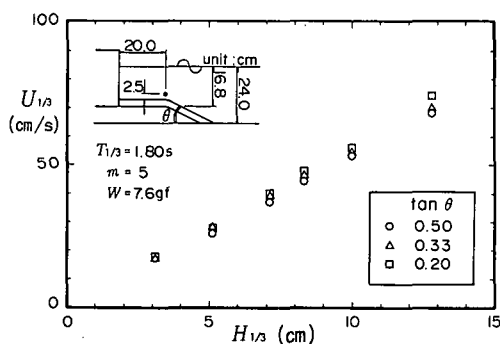


図-5 波高とマウンド近傍流速

となる。安定限界を越える波浪が作用してもマウンドの変形が一定量に収束するのは、被覆層の欠損により法肩部分の勾配が局部的に緩やかになり被覆材の安定性が高くなることが原因であると考えられる。

(3) スペクトル形状の影響

図-6 はスペクトル形状母数を $m=5$ および $m=11$ としたときの、作用波数と被害率の関係を示したものである。同じ波高で比較した場合では、被害率の増加傾向および収束傾向ともに大きな違いは認められない。よって変形特性に及ぼすスペクトル形状の影響は特に問題とするほどではないと考えられる。

(4) 変形量の収束傾向

図-7 は、谷本ら (1982) の実験で基準とした $N=500$ の被害率 D_{500} に対する各作用波数 N の被害率 D_N の比を縦軸とし、横軸を作用波数として、非砕波領域における両者の関係を示している。 $N=500$ を越えても変形は進行するが、 D_N/D_{500} はおよそ 1.1~1.5 の範囲に収束する。データのばらつきを考慮し、 D_N/D_{500} と N の関係を次式の

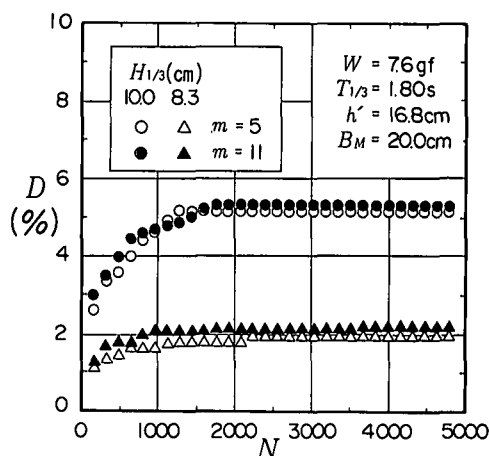


図-6 スペクトル形状の影響

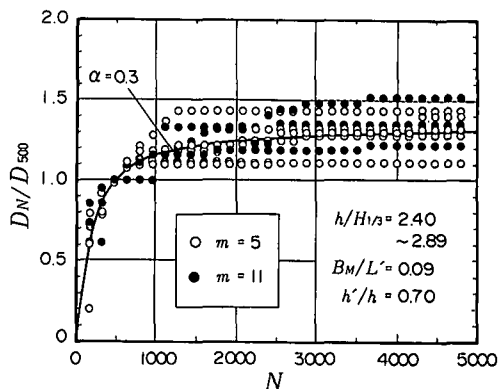


図-7 変形量の収束傾向

ように定式化する。

$$D_N/D_{500} = \exp \{ \alpha(1-500/N) \} \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、 α は定数である。図中に示すように $\alpha=0.3$ を適用した場合の実線が、概ね実験値の平均的な傾向をとらえている。

5. 被害率と作用波数を考慮した算定式の提案

作用波数 N と基準被害率 D_N をパラメーターとした安定数 N_s^* を以下のように定式化する。

$$N_s^* = N_s \cdot f_{ND} \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで、 N_s は式(2)、(3)により求められる現設計法による安定数で、 β は主に波の作用状況に依存する係数である。 f_{ND} は変形パラメーターで、式(5)に基づいて次式のように定義する。

$$f_{ND} = D_N / \exp \{ \alpha(1-500/N) \} \quad \cdots \cdots (7)$$

図-8は低マウンドの非碎波条件に対する f_{ND} と N_s^*/N_s の関係を示している。スペクトル形状と周期の影響は小さく、実線で示した $\beta=0.25$ を適用した計算曲線が実験値の平均的な傾向を表している。

図-9は、マウンド高さや水深波高比の異なる条件に対して図-8と同様の検討を行った結果である。ややマウンドの高い $h'/h=0.50$ の条件でも、今回対象とした低

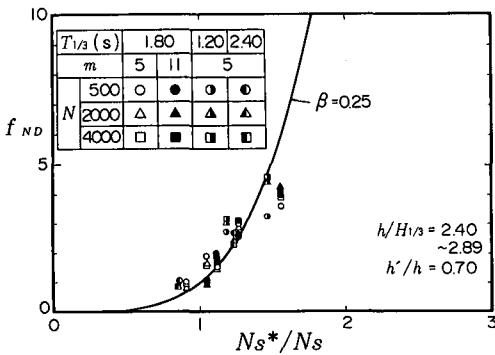


図-8 f_{ND} に及ぼす周期およびスペクトル形状の影響

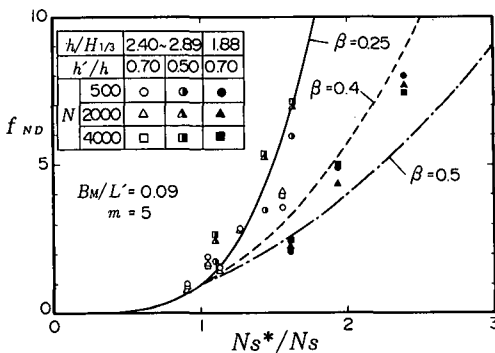


図-9 f_{ND} に及ぼす碎波および構造条件の影響

マウンド条件($h'/h=0.70$)との差は小さい。碎波が作用する $h/H_{1/3}=1.88$ の条件では、非碎波条件に比べて相対的に変形量が小さくなる傾向があり、計算曲線の係数 β は0.4~0.5となる。碎波条件に対しては、現行の算定式による安定重量がやや大きく計算されることが理由の一つと考えられる。ただし碎波条件に対しては、マウンド部の変形機構が十分明らかではないため、式(6)、(7)の適用に際しては別途実験等による確認を行う必要がある。

6. 算定式の適用性

(1) 現地被災例による検討

図-10は比較的低マウンド条件の混成堤を対象とした場合の、1966~1980年のマウンド被覆材の被災状況(北島ら, 1968; 武山・中山, 1975; 服部ら, 1984)を示している。縦軸を被害率 D とし、横軸を式(1)~(3)による必要重量の計算値 W_c に対する現地の被覆材重量 W の比としている。 W/W_c が小さいほど被害率が大きくなる傾向があるが、計算重量の1/2程度以上の被覆材では被害は生じていない。図中の曲線は式(1)、(6)および(7)による計算値を示しているが、現地の被災状況を傾向的によく表している。 W/W_c が極端に小さくなると被害率の急激な増大が見られるため、実際の設計に対する算定式の適用限界は $W/W_c=0.2\sim0.3$ であると考えられる。

(2) 設計例

図-11に示す構造条件の混成堤を対象として、設計波浪条件を $H_{1/3}=3.5$ m, $T_{1/3}=10.0$ s, $N=1000$ とすると、現設計法では被覆材の必要重量は $W=1.7$ tfと計算される。図-12は、同じ設計条件に対して今回提案した方法を用いて計算した必要重量 W と被害率 D の関係を示している。被害率が大きいほど必要重量が小さくなる傾向があり、たとえば被害率を5%まで許容したとすれば、必要重量は0.5 tfとなる。ただし計算結果は堤幹部に直角入射波が作用することを仮定したものであり、斜め入射波あるいは防波堤端部については必要重量が大きくな

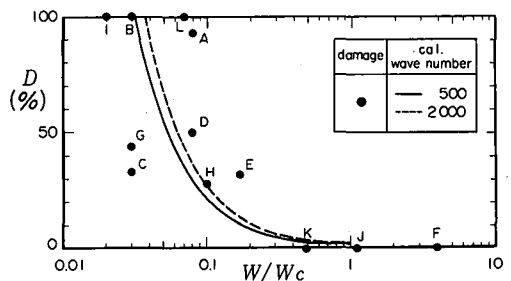


図-10 現地被災例と算定式の適用性

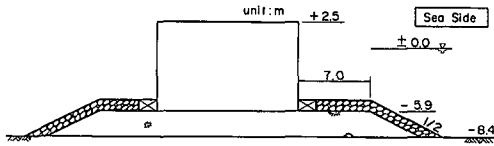


図-11 設計対象の混成堤断面

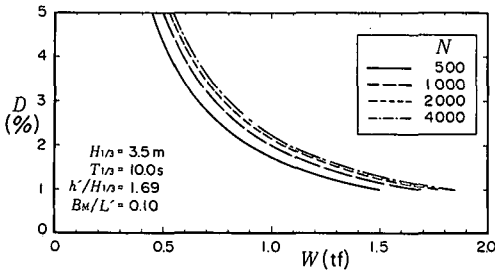


図-12 必要重量と被害率

る場合がある (高橋ら, 1990) ので注意を要する。

7. ま と め

本報告における結論をまとめると以下のようになる。

① 低マウンド条件において W/W_c が 0.3 程度に相当する波高が作用しても、ある作用波数を越えるとマウンド変形の進行が止まり、被害率が一定値に収束する。これはマウンド法肩部を中心とした被覆層の欠損により、局所的に法面勾配が緩やかになることが理由と考えられる。

② 変形が収束する性質を考慮し、谷本らの N_s に基づいて被害率および作用波数をパラメーターとした N_s の算定式 (6), (7) を提案した。算定式はスペクトル形状や周期によらず、低マウンドで非碎波条件のもとで適用可能である。

③ 提案した算定式を現地被災例で検証した結果、被害率の傾向を良くとらえていることがわかった。また、

マウンドの機能を損ねない程度の変形を許容することで、被覆材の必要重量を軽減して設計することが可能である。

本報告では 2 次元的な検討を行って、変形を許容した混成堤マウンド被覆材の必要重量算定法を提案した。今後は波向きや防波堤の平面形状を考慮した検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 鹿島遼一・榊山 勉・清水琢三・関本恒浩・国栖広志・京谷 修 (1993): 不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 795-799.
- 北島昭一・中野拓治・堀井修身・柿崎秀作・降旗健一・花木芳雄 (1968): 被災防波堤集覧, 港湾技研資料, No. 58, 239 p.
- 木村克俊・谷本勝利・高橋重雄 (1994): 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, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 189-194.
- 樫木 亨・柳 青魯・大西明徳 (1982): 捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 428-432.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1994): 混成防波堤の期待滑動量の計算法, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 756-760.
- 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利 (1990): 斜め入射波によ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, pp. 3-36.
- 武山秀夫・中山種清 (1975): 被災防波堤集覧 (その 2), 港湾技研資料, No. 200, 255 p.
- 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鋼三・合田良実 (1982): 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, pp. 3-42.
- 服部千佳志・柴田鋼三・大堀晃一 (1984): 被災防波堤集覧 (その 3), 港湾技研資料, No. 485, 281 p.
- Brebner, A. and P. Donnelly (1962): Laboratory study of rubble foundations for vertical breakwaters, Proc. 8th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 408-429.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, pp. 93-121.
- Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour layers-design formulae, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 219-239.