

消波型高基混成堤のマウンド被覆材の耐波安定性

森 昌也* ・梅沢 信敏** ・早川 哲也***
木村 克俊**** ・菊池 博明***** ・遠藤 強*****

1. ま え が き

現在, 新たな低天端型の防波護岸として図-1 に示すような消波型高基混成堤の開発が行われている。この構造形式は, 通常の混成堤よりも高い基礎マウンド上での碎波により波のエネルギーを減衰させるとともに, 直立部を円筒形のスリット構造にすることで, 波力および越波量を低減させることができる。さらに, 水深の浅いマウンド上は, 海藻類に必要な光環境が良好であることから, 水産生物の生息場としても期待できる。

これまでに, 消波型高基混成堤の水理特性についてはいくつかの研究が行われている。例えば下迫ら (1996) は系統的な実験を行って, 直立部に作用する波力特性を明らかにしている。また, 木村ら (1999) は, 大型の水理模型実験を行い, 越波流量の算定法を提案するとともに, 波の打ち上げ特性についても検討している。しかしながら, 基礎マウンド部の設計法については十分な検討がなされておらず, 未解明な部分が残されている。

そこで本研究では, マウンド被覆ブロックと根固方塊を対象として二次元および三次元的な水理模型実験を行い, 堤体の断面形状や波向きが安定性に及ぼす影響について検討するものである。

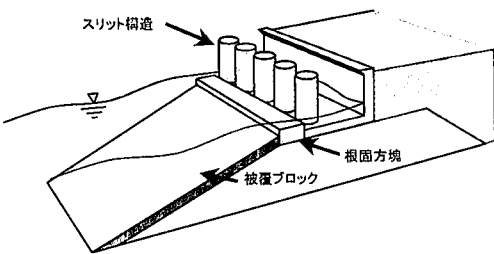


図-1 消波型高基混成堤

2. マウンド被覆材の安定質量算定式

マウンド被覆材の安定質量 M を算定する場合には, 一般に次式で示されるようなハドソン式が用いられている。

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

ここで, $H_{1/3}$ は有義波高, S_r は被覆材の海水に対する比重, γ_r はコンクリートの単位体積質量である。 N_s は被覆材の安定数であり波浪条件, 水深, 堤体構造, 被覆材形状などの関数である。

混成堤マウンド被覆石については, 谷本ら (1982) が不規則波による系統的な安定実験を実施して, マウンド近傍無次元流速 κ に基づいて被覆石の安定数 N_s を算定する方法を提案している。

藤池ら (1999) は, 消波ブロック被覆堤を対象に前面マウンド被覆ブロックの安定数について検討を行い, 無次元流速 κ の算定に消波工の効果を考慮するための堤体形状係数 C_R を導入した。また, 被覆ブロック固有の安定数である基準安定数 N_{s0} を基本式から分離して, 次式のように定式化した。

$$N_s = N_{s0} \max \left\{ 1.0, 0.525 \frac{(1-\kappa)}{\kappa^{1/2}} \frac{h'}{H_{1/3}} + \exp \left[-0.9 \frac{(1-\kappa)^2}{\kappa^{1/2}} \frac{h'}{H_{1/3}} \right] \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, h' はマウンド水深である。

さらに, 松田ら (2000) は, 高マウンド条件における混成堤マウンド被覆ブロックの安定性の検討を行い, 衝撃波圧成分を表す無次元量 α_l と安定数 N_s の関係を明らかにし, 無次元流速 κ を修正している。

ここでは, 消波型高基混成堤におけるマウンド被覆材の安定数の算定に, 松田ら (2000) の方法を拡張することとし, スリット構造による消波効果を藤池ら (1999) と同様に堤体形状係数 C_R により考慮する方法を用いる。すなわち, 無次元流速 κ の算定式を次式に示すように堤体形状係数 C_R と衝撃波力係数 α_l を考慮するように修正する。

* (独)北海道開発土木研究所 港湾研究室
** 正会員 (独)北海道開発土木研究所 港湾研究室長
*** 正会員 北海道開発局 港湾計画課
**** 正会員 博(工) 室蘭工業大学助教授 建設システム工学科
***** (株)西村組
***** 日本データサービス(株)

$$\kappa = \begin{cases} C_R \cdot \kappa_1 (\kappa_2)_B & (\alpha_l \leq 0.05) \\ C_R \cdot \max\{\kappa_1 (\kappa_2)_B, \kappa_m\} & (\alpha_l > 0.05) \end{cases} \quad \dots\dots (3)$$

$$\kappa_1 = \frac{4\pi h' / L'}{\sinh 4\pi h' / L'} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$(\kappa_2)_B = \max\{\alpha_s \sin^2 \beta \cos^2(kl \cos \beta), \cos^2 \beta \sin^2(kl \cos \beta)\} \quad \dots\dots (5)$$

$$\kappa_m = \begin{cases} 0.2 & (0.05 < \alpha_l \leq 0.2) \\ 0.3 & (0.2 < \alpha_l \leq 0.4) \\ 0.4 & (0.4 < \alpha_l) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 L' はマウンド水深 h' における波長、 k は波数 ($2\pi/L'$)、 l はマウンド前肩幅、 β は波浪入射角、 α_s は補正係数である。また、式 (5) は、谷本ら (1982) の式を高橋ら (1991) が波向きを考慮できる形に拡張したものである。

以下、水理模型実験に基づき本算定法の妥当性について検討を加える。

3. 実験方法

(1) 断面実験

断面実験には、長さ 28.0 m、高さ 1.0 m、幅 0.8 m の二次元造波水路を用い、海底勾配 1/30 の斜面から続く水平床面に図-2 に示す実験模型を設置した。堤体の設置水深は $h=26.0$ cm で一定とし、マウンド水深 h' を 0、4.0 および 8.0 cm の 3 種類に変化させた。また、直立部の形状は、スリット部を有する消波型および通常の直立壁を有する直立型を用い、構造条件の違いによる被覆材の安定性の違いを検討した。消波型の模型については、前面から見たときの開口率が 30% の円筒形スリット構造とし、遊水室の幅を 22.0 cm とした。

安定実験に用いた波浪は、すべて不規則波で波高 $H_{1/3}=5\sim 15$ cm、周期 $T_{1/3}=1.4, 2.0$ および 2.6 s の 3 種類を用いた。今回の検討では、波浪を連続的に 3000 波作用させて被害の進行を調べる実験および一波群 500 波で波高を段階的に大きくして安定限界波高を求める実験の 2 種類実施した。また、実験の途中で被覆材が被害を受けた場合にも、並べ替えは行わないものとした。

被覆ブロックの安定実験には、平型のブロックを用い、質量を 3 種類 (66, 100 および 140 g) に変化させた。被覆ブロックの安定実験については、被害率 1% に着目して安定数 N_s を求めており、被害の定義は、抜け出しおよびブロック半個長以上の移動とした。被害率は次式で表される。

$$D(\%) = \frac{n(\text{被害の個数})}{N(\text{被覆ブロックの総数})} \times 100 \quad \dots (7)$$

(2) 平面実験

平面実験は、長さ 23.3 m、幅 28.2 m、深さ 1.0 m の平面水槽において実施した。水槽内には、図-3 に示すよう

に全長 6.8 m の島堤を設置し、造波板との角度が 0° と 45° となるようにした。平面実験では、マウンド水深比 $h'/h=0.2$ で一定とし、その他の実験条件は、断面実験と同じとした。

根固め方塊の安定実験では、方塊の平面的な形状を縦 10 cm、横 5.0 cm で一定とし、方塊の厚さ t を 1.0 および 2.4 cm に変化させた。ここでは方塊が 5.0 mm 以上水平移動した場合を安定限界とし、牛嶋ら (1986) と同様に根固め方塊の厚さ t と波高 $H_{1/3}$ の無次元量 $t/H_{1/3}$ を用いて整理した。

4. 被覆ブロックの安定性

(1) マウンド水深の影響

図-4 は、波高 $H_{1/3}=11.2$ cm、周期 $T_{1/3}=1.4$ s で一定とし、マウンド水深比 h'/h を 3 種類に変化させたときの作用波数 N と被覆ブロックの被害率 D の関係を示している。すべての条件において最初の 500 波を作用させた後に被害の進行が頭打ちになっている。また、 h'/h が 0.15 の条件において被害率が最も大きくなっており、必ずしもマウンド水深 h' が小さいほど被害が大きくなることがわかる。写真-1 は、3000 波作用させた後の被害の

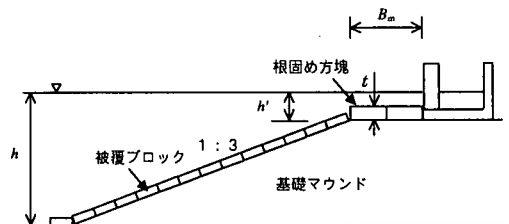


図-2 実験断面図

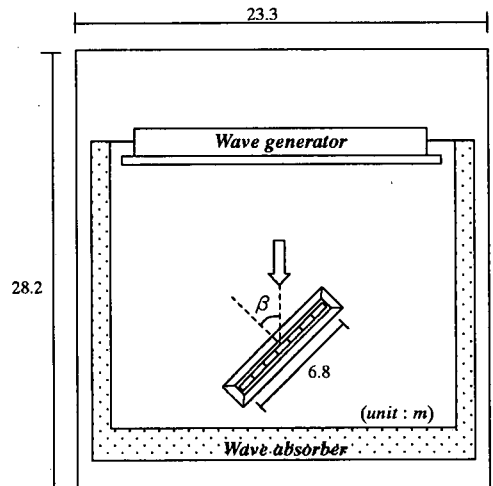


図-3 模型の平面配置

状況を示している。左側の写真が $h'/h=0$ 、右側が $h'/h=0.15$ の被害の状況であり、どちらの条件においても、マウンド斜面上のほぼ同じ位置でブロックの抜け出し等の被害が発生している。

高マウンド条件における被覆ブロックの被害発生箇所を明らかにするため、1:3 の様な斜面上に被覆ブロックを並べて、波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ と被害の発生箇所の関係を調べた。実験波の波形勾配は、0.045 および 0.025 の 2

種類とし、それぞれの波形勾配において波高水深比 $H_{1/3}/h$ を 0.3 と 0.5 に変化させた。

図-5 は、横軸に静水面を原点とする斜面の距離と波長の無次元量 $x/L_{1/3}$ 、縦軸に被害率の相対度数分布の関係を示している。その結果、静水面の少し下の位置で被害がピークとなり、そのピークの位置は、波高によらず波形勾配により一定となっている。また、波形勾配が大きいほど静水面に近い位置で被害が発生することが明らかになった。

基礎マウンド上において最も被害を受けやすく不安定な場所は、マウンド法肩部である。そのため、図-5 における被害のピーク位置にマウンド法肩を設けると安定性は低下する。前出の図-4 に示した $h'/h=0.15$ の条件における被害が大きくなった原因は、被害のピーク水深と法肩が同じ位置となったことが原因と考えられる。

(2) 直立型堤体との比較

図-6(1), (2) は、マウンド水深比 h'/h が 0.3 および 0.15 の条件における、直立型および消波型の波高 $H_{1/3}$ と被害率 D の関係を示している。 h'/h が 0.3 の条件においては、消波型の直立部により、反射波が低減することによって、被覆ブロックに作用する流体力が低減し、消波型の安定性の方が良くなっている。これに対して、 h'/h が

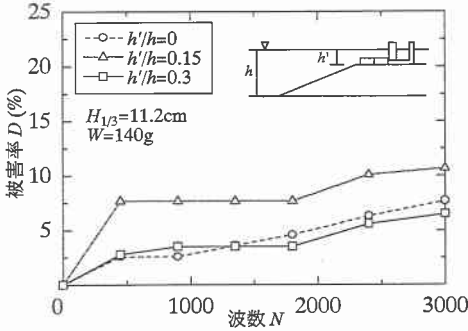


図-4 被覆ブロックの被害の進行

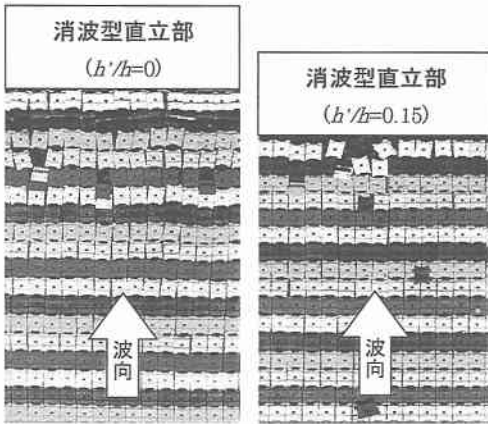


写真-1 被害の状況

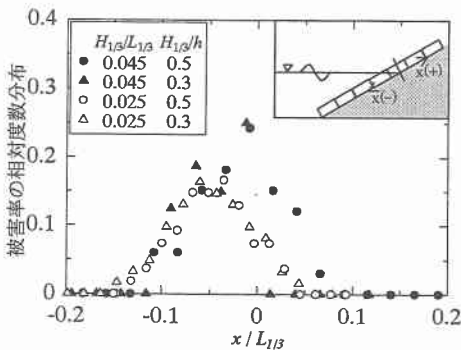


図-5 被覆材の被害の発生箇所

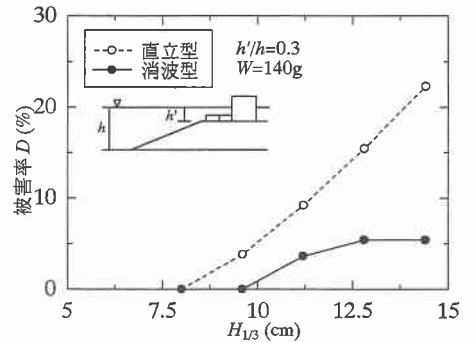


図-6(1) $h'/h=0.3$ 被覆ブロックの被害の進行

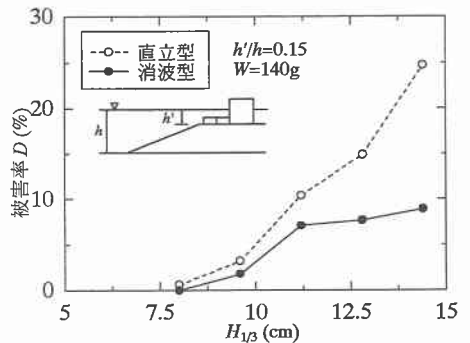


図-6(2) $h'/h=0.15$ 被覆ブロックの被害の進行

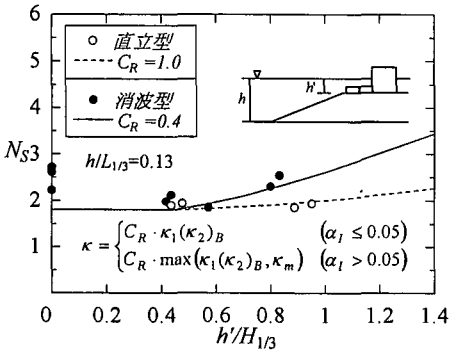


図-7 被覆ブロックの安定数

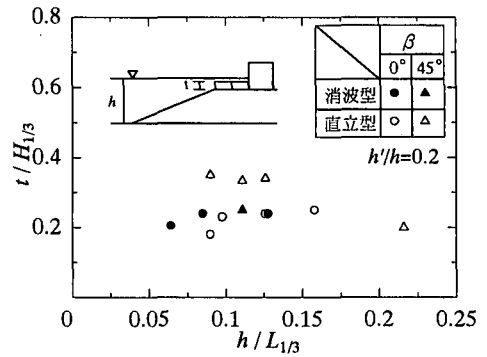


図-9 根固め方塊の所要厚さ

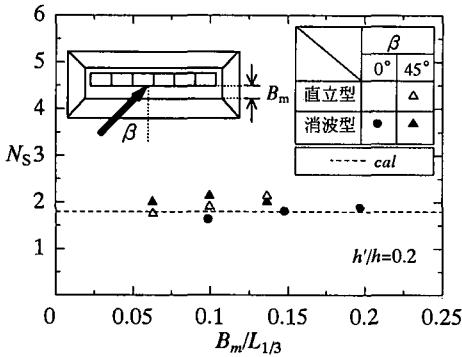


図-8 マウンド前肩幅の影響

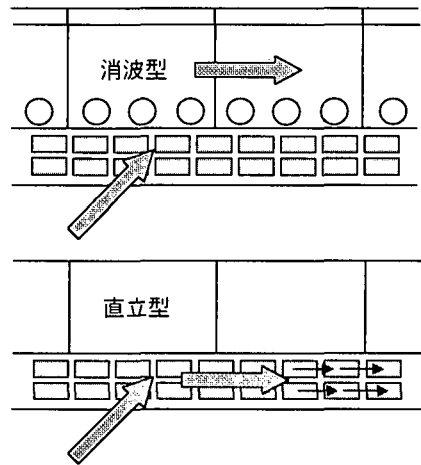


図-10 根固め方塊の被災パターン

0.15 の条件では、高いマウンド上での碎波の影響が大きくなるため、被害率 1% に着目すると安定限界波高に大きな差は見られない。

図-7 は、マウンド水深波高比 $h/H_{1/3}$ と被覆ブロックの安定数 N_s の関係を示している。図中の破線は、松田らによる高基混成堤の N_s 算定結果を示しており、今回の直立型の実験結果と良く一致している。実線は、今回提案した算定値であり、堤体形状係数 C_R を 0.4 とすると消波型高基混成堤における安定数 N_s の傾向を良く表すことができる。

なお、マウンド水深 h が 0 のときの N_s が計算値より大きくなっているのは、4. (1) 節で述べた理由によるものである。

(3) 斜め入射波作用時の検討

図-8 は、マウンド水深比 h/h を 0.2 で一定とし、波の入射角 β を 0° および 45° に変化させたときの直立型および消波型の安定数 N_s と無次元マウンド前肩幅 $B_m/L_{1/3}$ の関係を示している。入射角 β を 0° および 45° に変化させても、安定数に大きな差は見られない。図中の破線は式 (2)～(6) により計算した安定数 N_s であるが、入射角 β やマウンド前肩幅 B_m によらず一定となり、実験値の傾向を良く表している。

5. 根固め方塊の安定性

図-9 は、マウンド水深比 h/h が 0.2 の条件において、入射角 β を 0° および 45° に変化させたときの根固め方塊の無次元必要厚さ $t/H_{1/3}$ と相対水深 $h/L_{1/3}$ の関係を示している。入射角 $\beta=0^\circ$ の条件では、マウンド上の碎波の影響が大きくなるためブロックの安定性と同様、消波型および直立型の差は見られない。これに対して、入射角 $\beta=45^\circ$ の条件では、直立型における所要厚さが増大している。これは、図-10 に示すように高マウンド斜め入射時には、根固め方塊上で堤体の法線方向に沿った流れが発生し、法線方向への方塊のスライドが起るためである。消波型の堤体を用いると、 $\beta=45^\circ$ の条件であっても、強い流れが遊水室内において発生するため、直立型のような所要厚さの増大は起こらない。

6. マウンド被覆材の設計例

図-11 に示すような現地での適用を想定した断面を対象として、マウンド被覆ブロックの所要質量を計算し

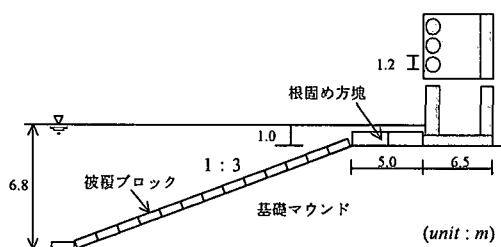


図-11 設計対象の断面

た。設計波浪は入射角 $\beta=0^\circ$ 、波高 $H_{1/3}=2.8\text{ m}$ 、周期 $T_{1/3}=7.0\text{ s}$ 、水深 $h=6.8\text{ m}$ 、マウンド水深 $h'=1.0\text{ m}$ である。計算の結果、消波型高基混成堤のマウンド被覆ブロックの所要質量は 3.8 t と求まる。

本算定法の検証を行うため、 3.9 t 型の被覆ブロックを用いて断面実験を実施したところ、上記設計波を連続 3000 波作用させても被害は確認されず、本算定法の妥当性が確認された。

7. まとめ

本報告の主要な結論をまとめると以下ようになる。

- ① マウンド被覆ブロックは、静水面よりやや下側で最も被害を受けやすい。
- ② 直立部の構造を消波型にすることにより、マウンド被覆ブロックの安定質量は低減する。しかしながら、マウンド水深波高比 $h/H_{1/3}$ が 0.4 程度より小さくなると、マウンド上での碎波の影響により消波型と直立型の差はなくなる。
- ③ スリット構造による消波効果を、藤池ら (1999) と同様に堤体形状係数 C_R により考慮することにより、松田ら (2000) の方法を拡張して消波型高基混成堤の被覆ブロックの安定質量算定法を提案した。

- ④ 直立型の高基混成堤では、斜め入射波条件において、堤体法線に沿った流れが発生するため、直角入射と比較して根固め方塊の所要厚さは増大する。しかしながら、消波型高基混成堤では、速い流れは遊水室内に発生するため、所要厚さの増大は起こらない。

本報告では、二次元および三次元の水利模型実験により、消波型高基混成堤のマウンド被覆材および根固め方塊の安定性を検討した。既往の報告と合わせて消波型高基混成堤の基本設計に必要な一連の検討を終えることができたことから、今後は実用化事例の蓄積を望みたい。

最後に、本研究の実施にあたり独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部の高橋重雄部長、耐波研究室の下迫健一郎室長には貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 牛嶋龍一郎・水野雄三・井元忠博 (1986): 根固め方塊の安定性に関する実験的研究, 開発土木研究所月報, No. 424, pp. 1-14.
- 木村克俊・早川哲也・高橋重雄・下迫健一郎・H. Oumeraci (1999): 消波型高基混成堤の越波特性に関する大型模型実験, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 756-760.
- 下迫健一郎・高橋重雄・齊藤祐一・三浦裕信・H. Oumeraci (1996): 消波型直立部を用いた高基混成堤の開発, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 851-855.
- 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利 (1991): 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 33 巻, pp. 596-600.
- 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鶴三・合田良寛 (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, 港研報告, 第 21 巻, 第 3 号, pp. 3-42.
- 藤池貴史・木村克俊・林忠志・土井善和 (1999): 消波ブロック被覆堤前面マウンド被覆材の耐波安定性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 881-885.
- 松田節男・錦織和紀郎・松本 朗・齋藤正文 (2000): 循環的な波作用を考慮した混成堤マウンド被覆ブロックの安定質量算定法, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 896-900.