

不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の所要重量

谷本勝利*・柳生忠彦**・村永 努***
柴田鋼三****・合田良実*****

1. ま え が き

混成堤の設計において、マウンド部の安定は防波堤全体の安定にかかわる重要な問題である。そのため、マウンドは波の作用に対し著しい散乱あるいは変形を生じないように十分大きな石又はコンクリートブロックで被覆するのが通常であり、設計においてこれら被覆材の重量を適切に決定することが必要である。

こうしたマウンド被覆材の安定性については、これまで Brebner・Donnelly¹⁾、鴻上・成田²⁾、鹿島・斎藤・長谷川³⁾ 等が実験的研究を行っており、それぞれ被覆石や各種ブロックの所要重量の算定法を提案している。また、稲垣・片山⁴⁾ は混成堤マウンド被覆石の現地被災例及び無被災例を調査解析し、被覆石の安定限界式を提案している。しかしながら、これらのうち実験的研究は規則波によって行われたものであり、不規則な波の作用に対してどのように適用していけばよいかについては明らかでない点が残されている。また、現地事例を解析した結果は実情を反映したものとして設計実務者に非常に有益な情報を与えるものであるが、被覆石の安定に及ぼす要因等必ずしも十分なデータで分析されているとはいえない。

そのため、現在マウンド被覆材の所要重量は上述の研究成果等を参照するとともに、類似の条件における既往設計例を参考にして、主として経験に基づいて決定されているのが実情であり、設計実務の面から被覆材所要重量算定法の確立が強く求められている。本研究は、この要請に対応して、不規則波を用いた模型実験により、マウンド被覆材の安定性を検討したものである。

2. 所要重量算定の基本式

本研究においては、マウンド被覆材の所要重量算定の

基本式として、前述の Brebner・Donnelly らが用いた式に準じて次式を考える、

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

ここに、 W , γ_r , S_r は被覆材の重量、空中単位体積重量、及び比重であり、 $H_{1/3}$ は有義波高、 N_s は安定数である。ただし、原式においては単に波高 H が用いられているが、不規則波に対する代表波高として有義波高を用いることとしたものである。

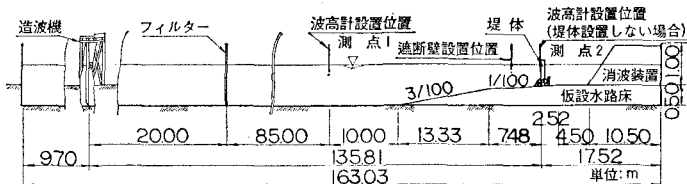
ここで問題となるのが安定数 N_s であり、実験によって検討しなければならない。一般に、 N_s の値は被覆材の特性によるほか、波の諸元、水深、マウンド形状等によって異なり、これら要因を適当な無次元量として、次のかたちで表わすことができる。

$$N_s = f(H_{1/3}/h, h/L, d/h, B_M/h, i_M, h_e/H_{1/3}) \dots (2)$$

ここに、 h は堤体前面での水深、 d , B_M , i_M はそれぞれマウンド被覆材天端上の水深、前肩幅、及び法勾配、 L は有義波の波長、 h_e は直立部の静水面上の天端高である。本研究においては、これら要因のうち $H_{1/3}/h$, h/L , 及び d/h について検討する。

3. 実験の方法

実験に用いた水路は 図—1 に示した幅 1 m, 深さ 1.5



図—1 実験水路

m, 長さ 163 m の長水路である。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン型で、入力信号に追随して不規則波を造波することができる。

本実験においては、比較的長時間連続して波を作用させるため、模型堤体からの反射波の造波板からの再反射波が問題となる。そのため、造波板前方 20 m の位置に直径 1 mm, 網目 4 mm のワイヤーメッシュ 10 枚を用いたフィルターを設置してその影響を緩和するととも

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長
** 正会員 運輸省港湾技術研究所設計基準部設計基準研究室長
*** 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室
**** 運輸省港湾技術研究所設計基準部設計基準研究室
***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部長

に、波高は堤体設置状態での沖側 2 点における測定波形から入・反射波の分離計算⁵⁾を行って堤体側に進行する波の波高を求め、これに基づいて堤体設置における入射有義波高を推定する方法によった。この沖側において波高を測定した地点は図-1 中の波高測点 1 であり、2 台の波高計の間隔はこれを中心として 20 cm である。測点 1 での分離波高から堤体設置位置での入射波高の推定は、堤体を設置する以前の状態で波高を測定して予め両者の相関図を作成しておき、その相関関係が堤体設置後もそのまま成り立つものと仮定して行った。

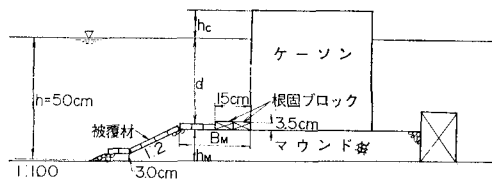
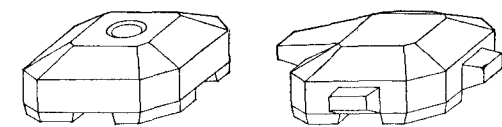


図-2 堤体模型

図-2 は堤体模型の断面図と諸元の記号を示したものである。堤体前面の水路床は 7.48 m にわたり、1/100 勾配としてあり、設置水深 h は 50 cm で一定である。マウンド形状については、今回の実験では高さの影響を把握することに主眼を置き、被覆材を除いたマウンドの厚さ h_M を 5~35 cm の範囲で 3~4 種類に変化させたが、法勾配は 1:2 で一定とした。また、マウンド肩幅 B_M 及び根固めブロックの敷幅についても、縮尺を 1/30 と想定したときの現地における標準的な幅を対象とし、模型でそれぞれ 30 cm 及び 15 cm と一定とした。したがって、 B_M/h は 0.6 の条件である。直立部の静水面上の天端高 h_c については、入射波の有義波高に応じて $0.6H_{1/3}$ とするのを原則とした。

今回の実験で対象とした被覆材の種類は石とコンクリートブロックの 2 種である。被覆石の模型には碎石を用いており、重量は平均重量が 15.0 gf (0.147 N)~250.0 gf (2.45 N) の範囲で 5 種について実験を行った。それぞれの平均重量に対する個々の石の重量の差は $\pm 20\%$ 内である。また、石の比重は 2.60~2.75 である。積み方はその表面に極端な凹凸ができないように軽く載せる程度に 2 層積みとした。層厚は重量別により、3.5~9.0 cm である。

被覆コンクリートブロックとしては、一般にコンクリート方塊あるいは各種の異形ブロックが用いられているが、本実験においては実験用に新たに考案したブロックを対象とした。これは基本的にはコンクリート方塊の四隅を切り落とし、単体としてあるときの抗力を小さくするように上部に斜面を付けた本体に脚を設けたものである。これを基本型と称するが、さらに図-3 に示しているように中央に縦孔を貫通させた有孔型、周辺に突起を



有孔型
(中央の孔のないものが基本型である) 突起型

図-3 被覆ブロック模型

設けた突起型についても実験を行った。これらの実験用ブロックは単位体積重量が 2.3 gf/cm^3 (0.0225 N/cm^3) となるように調整したモルタルで製作し、基本型については重さ 37.0 gf (0.363 N), 74.1 gf (0.726 N) 及び 148.2 gf (1.45 N) の 3 種、有孔型、突起型はそれぞれ 70.7 gf (0.693 N), 79.8 gf (0.782 N) の 1 種を対象とした。ブロックの積み方は 1 層で規則正しく敷き並べるものとし、その高さは基本型の場合重さによって 1.5~2.4 cm、有孔型及び突起型は 1.9 cm である。

実験に用いた不規則波は、Bretschneider・光易型のスペクトルを目標としたもので、有義波周期は 1.74~3.12 s の範囲で 4 種類、有義波高は各周期条件ごとに 8.3~21.4 cm の範囲で 4 種類に変化させた。ゼロアップクロス法によって求めた通過波の波高分布の例 ($H_{1/3}=10.3 \text{ cm}$) を図-4 に示してあるが、レーリー分布にかなりよく一致している。

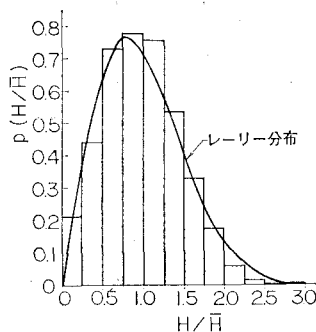


図-4 通過波の波高頻度分布の例
($H_{1/3}=10.3 \text{ cm}$ の場合)

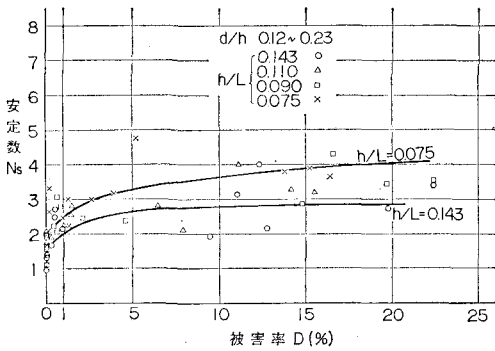
実験は、同一の被覆材に対して、各周期条件ごとに小さい波高の波群から順にほぼ定常状態の波を 900 秒間づつ作用させ、各波高群ごとの被害率を累積によって求める方法によった。造波機を停止した後に生じる大きな波の作用は前出の図-1 中に示している遮断壁を水中に下げることによって避けるようにした。被覆材の被害率は水路幅方向 1 m のうち中央 50 cm の部分を検査域とし、その被覆材の全個数に対する被害個数の比 (%) で定義した。被害の判定は石の場合はほぼ 1 個分以上移動したものを被害とし、ブロックの場合には下のマウンド石が吸い出されるおそれのある程度以上に移動したものを被害とするのを基準とした。しかし、実際にはブロックが

動揺の範囲を超える場合には、明らかに移動、転落する
場合が多く、この判定基準の差による結果への影響はそ
れほど大きくない。

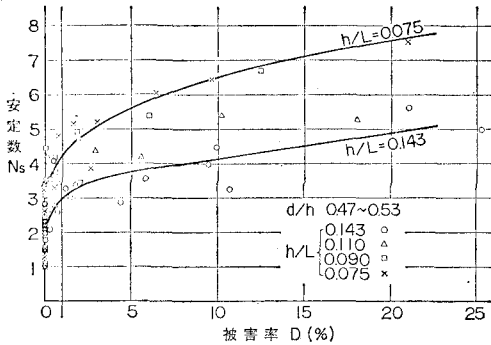
4. 実験結果及び考察

(1) 被 覆 石

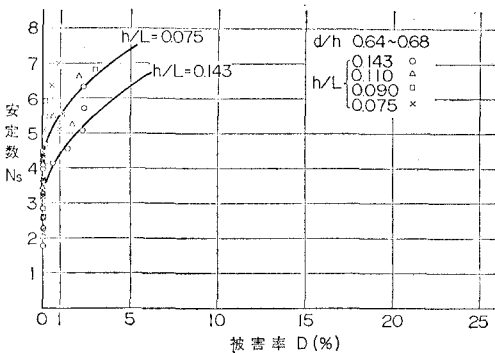
図一5~8は横軸に被害率をとって、そのときの実験条
件から式(1)によって求めた N_s の値をプロットした
ものである。それぞれ d/h のクラスごとに h/L をパラ
メーターとして示してある。これらのデータは種々の波



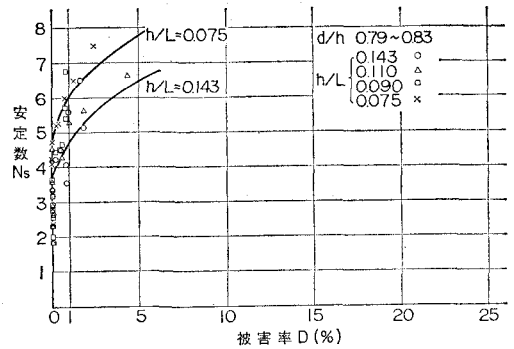
図一5 被覆石の被害率と安定数の関係 ($d/h=0.12\sim0.23$ の場合)



図一6 被覆石の被害率と安定数の関係 ($d/h=0.47\sim0.53$ の場合)



図一7 被覆石の被害率と安定数の関係 ($d/h=0.64\sim0.68$ の場合)

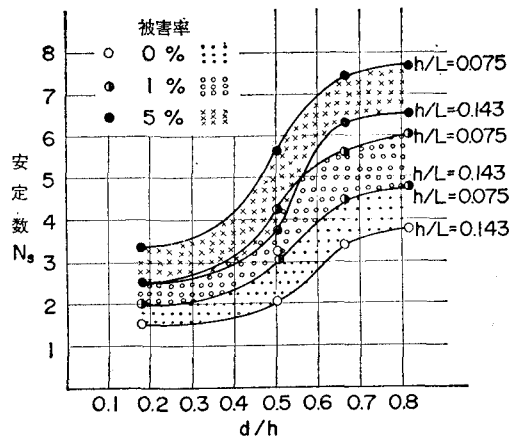


図一8 被覆石の被害率と安定数の関係 ($d/h=0.79\sim0.83$ の場合)

高条件の結果を合わせて示したものであり、図中これを
区別していないが、 $H_{1/3}/h$ の影響については明らかな傾
向的違いは認められなかった。

結果はばらついているが、いずれの場合にも h/L が
大きいほど、すなわち周期が短いほど N_s の値は小さく
なる傾向が認められる。これは方塊や異形ブロックを対
象とした鴻上・成田⁹⁾の規則波による実験結果でも認め
られるところであり、一般に B_M が $L/4$ より狭い条件に
あっては成り立つようである。図中の二つの曲線は h/L
が 0.075 と 0.143 の条件についてばらつきの平均的関
係を示している。

被害率が大きくなるにつれて、当然のことながら N_s
の値は大きくなる傾向を示している。設計においてどの
程度までの被害率を許容するかは構造物の重要性とも関
連してくるので、ここでは被害率 0%, 1%, 5% に対応
する N_s の値を調べてみる。図一9はこれらの被害率に
対応する N_s の値を前出の図一5~8の平均的関係から
読み取って d/h に対して示したものである。 N_s の値は
 d/h が大きいほどすなわち低マウンドであるほど大きな
値となる。たとえば、被害率 1% の N_s の値は $d/h=0.3$
のとき h/L によって 2.1~2.6 であるのに対して、 d/h



図一9 被覆石の安定数

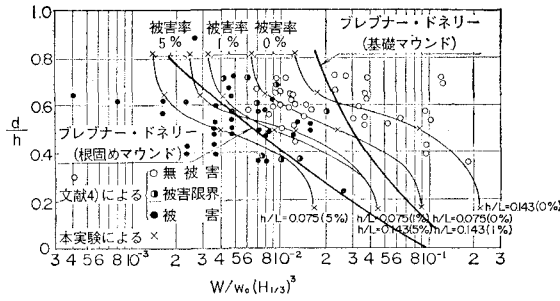


図-10 被覆石安定重量比較図

$d/h = 0.6$ では 3.9~5.3 の値となる。

次に本実験の結果と既往の被覆石の安定性に関する研究結果と比較してみる。図-10 は横軸に $W/w_0 H_{1/3}^3$ 、縦軸に d/h をとって、Brebner・Donnelly⁷⁾ による関係と今回の実験による関係を稲垣・片山⁸⁾ による現地事例の解析結果とあわせて対比したものである。ここに、横軸の w_0 は海水の単位体積重量で単に無次元量とするために導入したにすぎない。これによると今回の被害率 1% に対応する結果は Brebner・Donnelly の根固めマウンドと基礎マウンドのほぼ中間に位置し、現地事例の被害と無被害の境界によく一致しており、マウンド被覆石の所要重量は被害率 1% に対応する N_s の値を前出の図-9 から求めて、式 (1) により算定して大過ないといえそうである。

(2) 被覆ブロック

被覆ブロックの基本型についても被覆石と同様の検討を行った結果、図-11 のような d/h と N_s の関係を得た。ただし、この場合は 3 種類の d/h に対してしか実験を行っていない。この結果からわかるように被害率は石の場合ほどには変わらない。これはブロックの場合 1 層被覆で被害率算定の基準となる個数が少ないことも一因と考えられるが、ブロックの場合には形状が同じで重量のばらつきも非常に小さいことから、被害は比較的そ

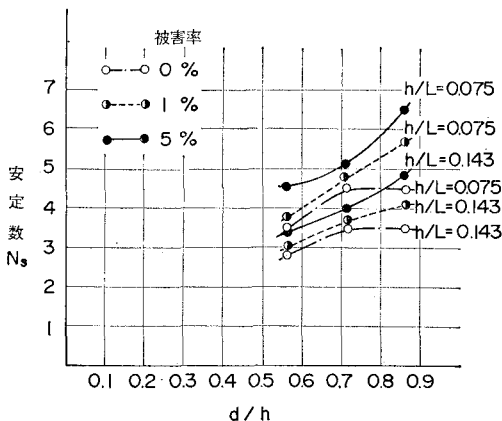


図-11 被覆ブロックの安定数

ろって生じ、かつ急激に進行しやすい特性を有しているためと推測される。事実、実験時の観察によってもマウンド天端沖側最前列の被覆ブロックがほとんど一度に浮き上がって転落することがしばしば認められた。被害率 1% に対応する $d/h = 0.6$ の場合の N_s の値は h/L によって 3.2~4.0 であり、被覆石の値よりやや小さい。

有孔型、突起型については今回の実験ではデータが少なく、 N_s の値は評価していない。そのため、同一高さの基本型、有孔型、突起型について、有義波高と被害率の関係を対比して示したのが図-12 である。 $d/h = 0.712$

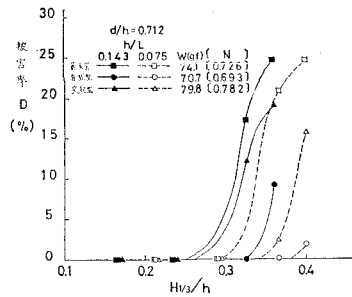


図-12 波高と被害率の関係 (被覆ブロックの場合)

の例であるが、有孔型の重量は孔の分だけ軽くなっているにもかかわらず基本型に比べて安定性が相当よいことが認められる。これは孔によってブロックに働く揚圧力が減じられることによるものと推測される。一方、突起型は重量が最も大きいにもかかわらず基本型と有孔型の中間にある。この結果は特に被覆ブロックに縦孔を設けることによって安定数が大きくなることを示唆しており、有孔型について引き続き系統的实验を継続しているところである。

6. あとがき

以上、主としてマウンド被覆材の安定性に対する不規則波による実験結果について述べたが、本実験条件の範囲内での主要な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 被覆材の安定数 N_s は代表波高として $H_{1/3}$ を用いても $H_{1/3}/h < 0.43$ の範囲では波高の影響は小さい。
- (2) 安定数 N_s は d/h , h/L によって異なり、 d/h が大きいほど、また h/L が小さいほど大きな値となる。
- (3) 被覆材の所要重量は図-9, 11 により被害率に応じた安定数 N_s を求め式 (1) により算定することができる。
- (4) 被覆石について本実験の結果と既往研究結果とを比較すると、本実験の被害率 1% に相当する結果は Brebner・Donnelly の基礎マウンドと根固め

マウンドのほぼ中間に位置し、稲垣・片山による現地事例解析結果の被害と無被害の境界によく一致している。

- (5) 被覆ブロックは形状が同じで、重量のばらつきも非常に小さいため、石に比較すると急激に被害が進行する傾向がある。
- (6) 被覆ブロックの基本型、有孔型、突起型を比較すると、有孔型の安定性が最もよく、突起型がこれに次ぐ。基本型の安定数は石の安定数よりも小さい。

参 考 文 献

1) Brebner, A. and D. Donnelly: Laboratory study of

rubble foundation for vertical breakwater, Proc. 8th Conf. Coastal Eng., New Mexico City, pp. 408~429, 1962.

- 2) 鴻上雄三・成田友弥: 消波ブロックを被覆層とした混成堤マウンドの安定について, 北海道開発局土木試験所月報, 第232号, pp. 1~13, 1972.
- 3) 鹿島遼一・斉藤昭三・長谷川寛: 混成式防波堤の基礎マウンドを被覆するコンクリート方塊の所要重量, 電研技術第二研究所報告, 研究報告 70022, 1971.
- 4) 稲垣紘史・片山猛雄: 被災例による混成堤マウンド被覆石の安定限界の検討, 港湾技研資料, No. 127, pp. 1~22, 1971.
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 28 p., 1976.
- 6) 前出 2) に同じ.
- 7) 前出 1) に同じ.
- 8) 前出 4) に同じ.