

混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について

森 平 倫 生*・木 原 力**・堀 川 洋***

1. ま え が き

我が国における防波堤の構造型式は、捨石マウンド上に堤体を設置する混成堤型式が多い。混成堤が波力の作用下で滑動しないためには、次のような条件が満たされる必要がある。

$$(W-U) \cdot \mu \geq P$$

ここで W は水中での堤体重量、 U は波による揚圧合力、 μ は堤体と捨石間の摩擦係数、 P は堤体に作用する水平波力合力である。

設計において、堤体と捨石間の摩擦係数は、コンクリートと捨石の間の摩擦係数 0.6 が用いられている¹⁾。この値については、各種の試験がなされてきており、その結果、ある程度のバラツキはあるものの、ほぼ妥当との結論に達しているように見受けられる。捨石と堤体間の摩擦係数を増大させると、結果的には、同一波力に対し堤体重量が少なく済むし、同一重量ではより安定となる。こうした、より安定化を目指し、実際の防波堤においても幾つかの試みがなされてきた。例えば、鼠が関港や酒田港では、滑動抵抗力を増すため、堤体下端に突起ないしは段を設けた事例がある²⁾。

また、加川³⁾は、堤体と捨石間にアスファルトマットを敷設した場合の摩擦係数について実験的研究を行い、マット敷設により摩擦係数はかなり大きくなること等を明らかにした。そして、この結果をもとに、有田港防波堤に本工法を適用したが、その設計には、摩擦係数 0.7 を採用した。

本研究は、実物に近い捨石マウンドおよび堤体を用い、陸上に引張試験を行ったもので以下の3つの目的から成る。

- ① 捨石マウンドの均し方法与摩擦係数の関係を把握すること。
- ② 堤体底面に凹凸を付ける等の異型底面の採用で、摩擦係数が上がるかどうか探ること。
- ③ 堤体の振動等によるマウンドの締まり具合と、摩

擦係数の関係を調べること。

2. 試 験 方 法

(1) 捨石マウンド

基礎捨石マウンドは、地盤を掘削整地後、現地防波堤と同様帆布を敷き、その上に 50~200 kg/個の捨石と 10 kg/個内外の均し石を用いて、長さ 12 m、幅 5 m、高さ 1.5 m に造成した。

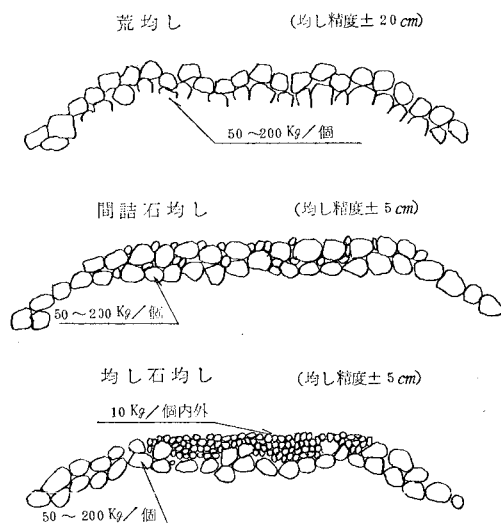
マウンド表面の均しは、図—1 に示す3種類であり、これはそれぞれ次の意味をもっている。

荒均し：本均しを省略してケーソンを据付けることを考えた場合の均し

間詰石均し：マウンド天端を張り石でほぼ 5 cm の精度に造成し、張り石間の隙間に 10 kg 内外の間詰石を詰めたもの

均し石均し：50~200 kg 石で ±30 cm 程度に均した上に 10 kg 内外の均し石で ±5 cm の精度に仕上げたもの

均し石均しについては、この外、引張試験を行う前にバイブロハンマーで締固めたもの(均し石均し(締))と、逆にほぐして、均し石の刻み合せを悪くしたもの(均し石均し(緩))についても試験を行っている。なお、マウ



図—1 均 し

* 正会員 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所長

** 正会員 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所次長

*** 正会員 元運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所

ンド均しに当っては、現地マウンドとの類似性を重んじ、石工が潜水夫の指示の下に成型した。

(2) 堤体の底面形状

試験堤体は鉄筋コンクリート製で、1個12~15tのブロック3~5個を積み重ね、試験体とした。最下端のブロックの底面形状は、図-2に示すように平坦を含め6種類である。突起は、堤体4隅についている。

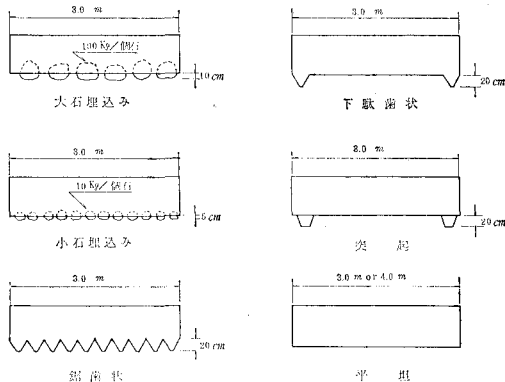


図-2 ブロック底面形状(断面形)

(3) 試験装置

試験堤体の引張りは、図-3に示すように、反力方塊背後に50t用油圧ジャッキ2台を直列に配置し、方塊をアンカーに試験堤体最下端を引張った。

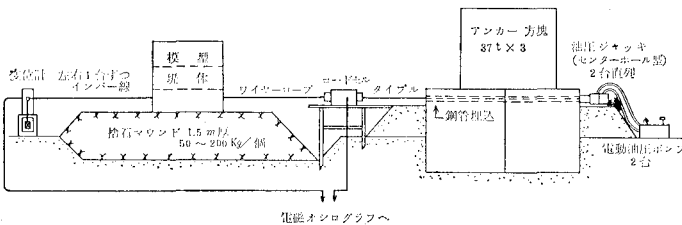


図-3 測定系

水平引張力、ブロックの水平移動量は、ロードセル及び変位計を用い、電磁オシログラフに出力した。この外、マウンド不陸状態と堤体沈下量を測定した。

(4) 試験ケース

試験ケースは表-1に示すように、異型底面については荒均しおよび均し石均しについて行い、底面形状の特性を把握した。また、平坦底面については、均しの影響、単位面積当りの堤体荷重の影響等を調べるため、各種の均しマウンドのもとで実施した。なお、測定は同一ケースにつき2回ずつ行った。

3. 試験結果

(1) 堤体の滑動状況

堤体の滑動は、一般に、滑らかな変位と急激な変位の繰返して、連続的に滑動していった。

荒均しにおいては、全般に滑らかな変位が多かった。

表-1 試験ケース

底面形状 および接地圧	マウンド均し	荒均し	間詰 石均し	均し石 均し	均し石 均し(締)	均し石 均し(緩)
平 坦	2.48t/m ²		○	○	○	
	4.55		○	○	○	
	7.56	○	○	○	○	○
大石埋込み	7.65	○		○		
小石埋込み	7.58	○		○		
鋸 歯 状	7.61	○		○		
下駄歯状	7.61	○		○		
突 起	7.62	○		○		

急激な変位の場合、堤体の沈下を伴っている場合が多く、捨石の破損の音がすることもあった。

間詰石均しについては、平坦底面の場合しか試験を行っていないが、それでも荒均しに比べ不陸の度合いが小さいためか、滑動状況は連続的で滑らかであった。

均し石均しにおいては、平坦および異型底面とも他の2つの均しに比べ、急速な変位を小刻みに繰返す傾向が強かった。急速で大きな変位は、平坦より異型底面の方が多く、異型の場合、一般に大きな沈下を伴っていた。

(2) マウンドの変形

マウンドの変形で各ケースに共通な現象は、堤体前面石の盛り上りである。この盛り上りは、堤体の沈下、マウンド内への食い込み現象の著しい下駄状、突起底面において顕著であった。捨石盛り上りの影響範囲は、堤体前面1~2m程度であった。均し石均しにおける異型底面の場合、下駄状および突起底面では、石の移動量は概ね10cm前後であるが、大石埋込み、小石埋込み、鋸歯状底面では40cm程度と大きかった。これは、凹凸部に石がはさまり、堤体と一緒に移動するためと思われる。捨石がコロのように回転する現象は、ほとんど見られなかった。

(3) 引張荷重と変位の関係

図-4は、平坦底面(堤体重量68t)において、均し石均しおよび間詰石均しマウンドの引張荷重と堤体の変位量の関係を示したものである。

図に示してあるように荷重・変位の履歴関係を探るため、途中数回引張荷重を0にした。堤体の最終変位量は30cm、場合によって50cmを目途にした。

(4) 摩擦係数算定法

図-4に示すような、荷重・変位の関係から、摩擦に対する均し、底面形状の関係をj知るため、便宜的に以下に示す4種類の摩擦係数を求めた。但し、ここで摩擦係数 μ は、引張荷重 F を堤体重量 W で除した $\mu=F/W$

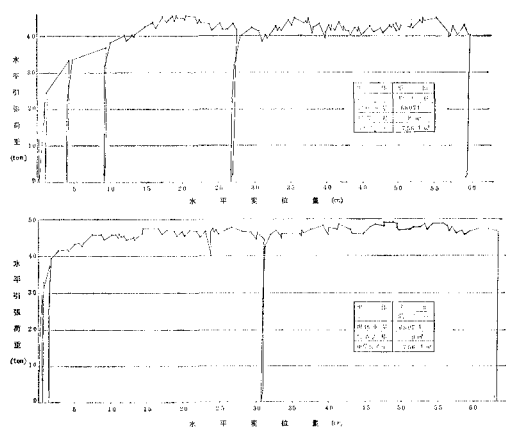


図-4 水平引張荷重-水平変位量

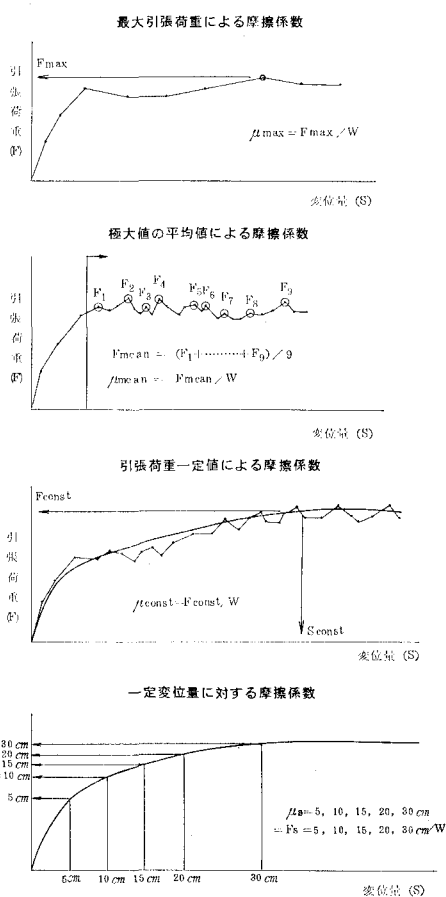


図-5 摩擦係数算定法

で定義することにする(図-5)。

① 最大引張荷重による方法($\mu_{\max}$): 荷重・変位曲線のうち、最大の引張力を採用したもの

② 極大値の平均による方法(μ_{mean}): 荷重・変位曲線がほぼ横ばいになって以降の荷重極大値の平均を採用したもの

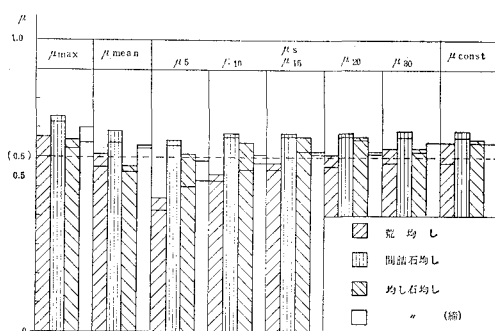


図-6 均しの相違による摩擦係数の比較

③ 引張荷重一定値による方法(μ_{const}): 試験によって得られた荷重・変位の関係を適切な平滑曲線で代表し、その曲線がほぼ横ばいになる荷重を採用したもの

④ 一定変位量による方法(μ_s): 変位量が一定値に達したときの荷重から求めたもの

各ケースの堤体沈下量、摩擦係数の一覧表については紙面の都合上割愛せざるを得なかった。詳細については文献 4) を参照されたい。

4. 考 察

(1) 均しと摩擦係数

単位面積当り重量 7.56 t/m^2 の平坦底面の堤体における荒均し、間詰石均し、均し石均しおよび同(締)の摩擦係数を比較したのが 図-6 である。

図から次のようなことが言える。

① 最大の摩擦を示すのは、間詰石均しである。次いで均し石均しおよび同(締)がほぼ同じ程度で、最低が荒均しである。

② 係数値そのものは、荒均しを除いてほぼ 0.6 以上ある。

また、単位面積当り重量 $4.55, 2.48 \text{ t/m}^2$ の平坦底面の摩擦係数については、間詰石均し、均し石均し(締)、均し石均し、荒均しの順となっている。

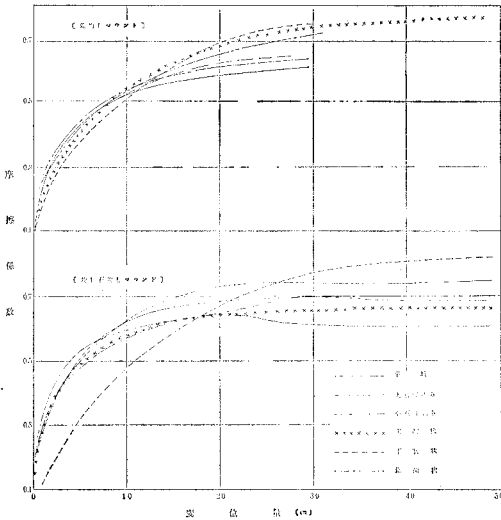
(2) ブロックの底面形状と摩擦係数

荒均しおよび均し石均しについて、各種の異型底面形状と摩擦の関係をみる。ここで、簡単のため、各ケース 2 回ずつ行った張力・変位の関係をその中間の平滑曲線で代表し、均し別に図に表わしたのが 図-7 である。

ただし、縦軸は、荷重を堤体重量で割った摩擦係数で示している。

荒均しマウンドについては、堤体変位が小さい限りでは、底面の異型効果はほとんど現われていないが、かなりの変位をしたあと(ほぼ 10 cm 程度)では、異型底面は平坦より摩擦係数が大きくなる。

均し石均しマウンドにおいて、特に顕著なことは、変位が小さい場合の下駄状底面の摩擦係数が他と比べかな



図—7 底面形状と摩擦係数の関係

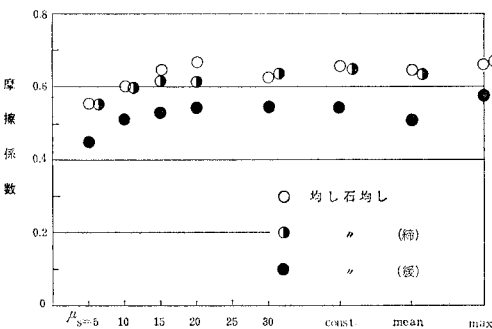
り小さいことである。しかし、かなり変位したあとでは一番大きい係数を示している。

ここで一般に言えることは、異型底面の場合、かなり堤体の変位しなければ摩擦係数増大効果が現れないということである。これは、前節で記述したように、堤体がある程度、滑動、沈下してのち、堤体と捨石の一体化が進み、捨石変位が堤体滑動の抵抗力として働くことに起因するものと思われる。

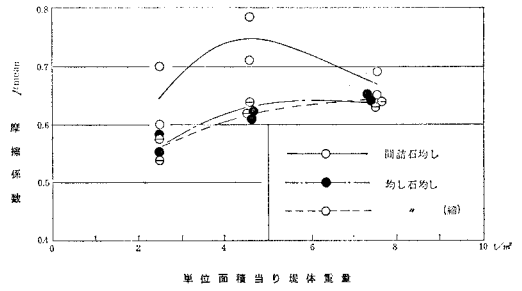
両ケースを通じ、比較的摩擦係数の大きいのは鋸歯状底面であった。堤体がかなり変位したあとでは、下駄状底面が有利と言えよう。

(3) マウンドの締め固め効果

今回の引張試験結果から判断すると、堤体は僅かな引張力で変位することが示されている。逆に言えば、10～20 cm の堤体変位があって始めて設計摩擦係数 0.6 に近い値が得られている。しかしながら、現地の防波堤ではこうした微小変位は生じてないように思われる。実験と現地の相違の一つとして、波浪作用下で堤体が振動(ロッキング)することにより、結果としてマウンドを締め



図—8 摩擦係数に及ぼすマウンド締め固め効果



図—9 単位面積当りの堤体重量と摩擦係数の関係

固め、摩擦係数を増大させ得るのではないかと考えた。

平坦底面について、均し石均し、同(締)、同(緩)の摩擦係数を比較すると、図—8 のようになる。図から、均し石均しと同(締)の間にはさ程明瞭な差が現われなかったが、他のケースでは明らかに(締)が大きかったこと、パイロによる締め固めは実験実施上完全になし得なかったこと、(緩)と他とで明らかな差があることを考えると、締め固め効果はあるものと推定し得る。

(4) 堤体単位面積重量と摩擦係数

既述のように、摩擦係数は、 $\mu = F/W$ で表わされており、堤体単位面積当りの重量(w)の要素は含まれていない。今回平坦底面において、 w を3種類に変えた実験を行っているので、この影響を把握してみる。

図—9 は試験結果を描いたもので、間詰石均しでは 4.55 t/m² に摩擦係数の極大値が見られる。均し石均しおよび同(締)では、単位面積当りの堤体重量の増加と共に摩擦係数も増大する傾向が見られる。

5. ま と め

以上をまとめると次のようになる。

① 平坦底面の堤体において、摩擦係数の大きい均しは間詰石均し、次いで均し石均しである。荒均しは、これらに比べると、摩擦係数は小さい。

② 底面に凹凸を付けると、平坦底面に比べ沈下は大きく、摩擦係数は、変位小の場合平坦と同程度かやや小さいが、ある程度変位をした後では、平坦より大きくなる。

③ マウンドが堤体のロッキング等によって締め固められると、捨石間の一体化が図られるためか、摩擦係数は大きくなるようである。均し石均しにおいては、堤体の単位面積当りの重量が大きくなると、摩擦係数も増大する傾向が認められた。

一方、今回の引張試験による滑動と現地防波堤の滑動現象を比較すると、次のような点で異なる。

① 堤体への荷重の仕方：現地防波堤に作用する荷重は、波による繰返し荷重で、荷重のピークは作用時間も短かく、その分布は静水面付近で最大を示す台形分布で

ある。一方、引張の試験においては、荷重は連続荷重で作用時間も長く分布も底面付近への集中荷重である。

② 外的条件の違い：現地は水中、試験は空中における事象である。

③ 堤体重量、捨石の大きさ：現地防波堤は200~500 kg/個の捨石を使用しているが、引張試験では50~200 kg/個の石を使用している。単位面積当りの堤体重量についても今回の試験が約 $2.5 \sim 7.6 \text{ t/m}^2$ に対し、現地防波堤では最大約 20 t/m^2 とかなり大きい。

以上、現地の防波堤と、今回試験を行った防波堤では条件が異なり、特に異型底面を現地適用する場合どの程度の摩擦係数を採用するかについては、試験間のバラツキと共に、こうした条件の違いがどう影響するか見極め

ることが必要となってくる。

最後に、本調査は、昭和52年度に当事務所が行ったもので、多数の関係者一同に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 港湾構造物設計基準，日本港湾協会。
- 2) 伊藤喜行：特殊防波堤論，1968年度水工学に関する夏期研修会講義集（Bコース），pp. 6-1~21。
- 3) 加川道男：重力式構造物（防波堤）の摩擦抵抗の増大について，第11回海講講演集，pp. 217~221，昭39。
- 4) 摩擦係数測定実験結果について，運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所，第16回管内工事報告会，昭53。