

混成防波堤の滑動時における捨石マウンドの 挙動に関する基礎実験

下迫健一郎*・増田慎太郎**・宮間俊一***

1. ま え が き

混成防波堤直立部の耐波設計においては、計算される波力に対して、滑動、転倒、マウンドの支持力等に関する安定性の検討を行っており、一般的な設計条件では、滑動が支配的となる場合が多い。

滑動に対する安定性は、摩擦抵抗力と水平波力の比で定義される滑動安全率で表され、摩擦抵抗力はケーソン底面と捨石マウンド間の摩擦係数とケーソンの有効重量の積で表される。一般に、設計において用いられる摩擦係数は、ケーソンが動き出す直前の静止摩擦係数と考えられているが、実際に滑動が生じる場合にはマウンドの石も変形するはずであり、そのメカニズムは必ずしも単純ではない。

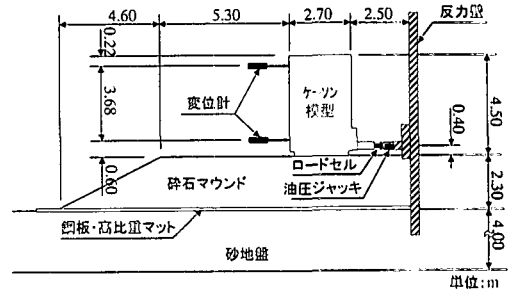
混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数に関して、森平ら(1978; 1979)は、現地とほぼ同じ大きさの石で作成したマウンドとコンクリートブロックを用いて、陸上において引っ張り試験を行い、マウンドの均し方法と摩擦係数の関係、堤体底面の凹凸による摩擦係数の変化、マウンドの締め度と摩擦係数の関係等について検討を行っている。その結果、現行の設計において用いられている摩擦係数 0.6 が妥当であることを確認している。また、加川(1964)は、摩擦抵抗力を高める摩擦増大マットについて模型実験を行っており、その効果や滑動特性について検討している。

本研究では、森平らと同様に、現地スケールに近い大型模型を用いて静的荷重を作用させる実験を行った。ただし、今回の実験は水路内で実施しており、マウンド全体が水中にある状態でやっている。また、近年多く用いられるようになっている摩擦増大マットを使用した場合における滑動現象の特性についても検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験断面

実験は、幅 3.5 m、深さ 12 m の水路内で実施した。図一



図一 実験断面

1 は実験断面を示したものである。水路内には深さ 4 m の砂地盤が設けてあり、その上に高さ 2.3 m のマウンドを製作している。石が砂地盤内へ沈下することによってマウンドが変形するのを防ぐため、砂地盤の表面に比重約 4.0 の高比重ゴムマットを敷設し、その上に厚さ 9 mm の鋼板を載せ、さらにその上にもう 1 枚高比重ゴムマットを敷設した。マウンドに用いた石の質量は 10~100 kg 程度で、現地のものとほぼ同じである。マウンドの表面は、比較的大きい石の間に小さい石を詰める間詰りとし、±5 cm 程度の精度に仕上げた。

ケーソン模型の形状は、幅 2.7 m、長さ 2.3 m、高さ 4.5 m で、底面は接地圧を大きくするため、幅 2.4 m、長さ 2.0 m と若干縮小している。なお、ケーソンの大きさは、実験スペース等の制約のため、現地に比べて小さくなっているが、今回の実験はほぼ現地スケールの実験を想定しており、ケーソン模型は現地を縮小したものではなく、実際のケーソンの一部分を取り出したものと考えている。そのため、ケーソンの接地圧が現地に近くなるよう、ケーソン内には比重 4.0 の高比重コンクリートブロックを入れて重量を調整しており、実験時におけるケーソン全体の重量は約 875 kN、接地圧は約 182 kN/m²である。

摩擦増大マット（アスファルトマット）使用時には、マウンドの上にマットを設置し、その上にケーソンを載せている。なお、摩擦増大マット使用時には、マウンドとのなじみをよくするため、ケーソンの上にさらにコンクリートブロックを載せ、接地圧を約 247 kN/m²とした状態で一昼夜放置してから実験を行った。

* 正会員 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部耐波研究室長

** (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部耐波研究室

*** (財) 沿岸開発技術研究センター(前 国土交通省関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所長)

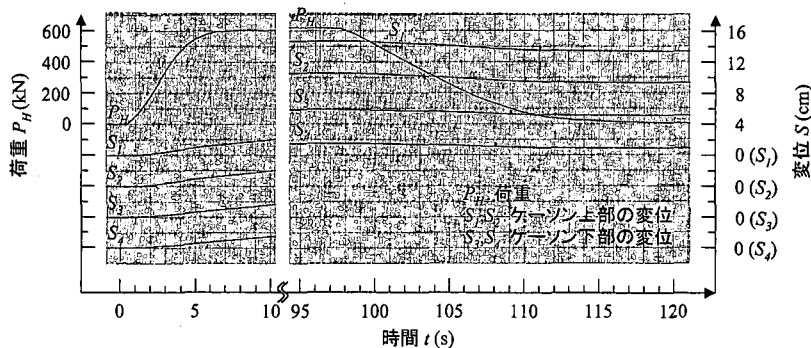


図-2 水平荷重および変位の時間変化の例

2.2 実験方法

図-1に示したように、水路内に設置した反力壁に取り付けた油圧ジャッキでケーソンに水平荷重を作用させ、ジャッキとケーソンの間に取り付けたロードセルを用いて水平荷重を測定するとともに、上下2箇所ずつ取り付けた変位計を用いてケーソンの変形量を計測した。

実験では、1回当たりの滑動量が15 cm程度となった段階でいったん荷重の作用を中断し、ケーソンの据え直しは行わずに、変位計およびロードセルのみを調整して再び荷重を作用させるという手順を繰り返し、3回連続して実験を行った。これを1ケースとして、マウンド上に直接ケーソンを設置した通常の断面については、1ケース目終了後、いったんケーソンを据え直し、さらに3回連続して実験を行った。一方、アスファルトマットを使用した断面については、一度滑動させるとマットが塑性変形してしまうため、据え直しは行わず、3回連続の実験を1ケースだけ行った。

なお、実験はマウンド表面から約10 cm上まで水を入れた状態で行った。また、水平荷重載荷実験のほかに、地盤係数を求めるため、ケーソン下部の4箇所にダイヤルゲージを取り付け、ケーソンの重量を増加させるときの鉛直変位を測定する鉛直荷重載荷実験も行った。

3. 通常断面の実験結果

3.1 荷重と変位の時間変化

図-2は、荷重および変位の時間変化の一例を示したもので、2ケース目の2回目の波形である。荷重の作用とほぼ同時に変位が始まっており、静止していたケーソンが急に動き出して荷重が減少する、いわゆる静止摩擦から動摩擦へ変化するような状況は見られない。

このケースでは変位が1 cm程度になると荷重の急激な増加はなくなり、ほぼ一定となっている。このような荷重がほぼ一定となるときの変位は、1~6 cm程度までばらつきがある。一般に、ケーソンを設置して最初の場

合は変位が大きく、荷重の作用を繰り返すにしたがって変位は小さくなる。これは、設置直後はマウンドの締め固まりが緩く、マウンド表面にある石が比較的動きやすいためと考えられる。また、この図ではわかりにくいですが、ロードセルによる荷重は、ほぼ一定となったあとでも、ときどき10~30 kN程度減少することがある。これは、石が割れることによってマウンドからの反力が減少することによるものである。

荷重の作用をやめると水平荷重はほぼ0に戻り、ケーソンの水平変位も5~10 mm程度戻っている。これは、マウンドおよび砂地盤が弾性変形していることによるものである。これについては5章で述べる。

3.2 ケーソン滑動時のマウンドの挙動

図-3は、ケーソン滑動時におけるマウンドの状況を模式的に示したものである。わかりやすくするためにやや誇張しており、石やケーソンのスケールは必ずしも正確ではない。

上段はケーソンをマウンドに設置した直後の状態であり、3.1でも述べたように、マウンドの締め固まりが緩く、石の間に空隙が見られる。そのため、ケーソンに水平荷重を作用させると、ケーソンの変位に伴って、マウンド表面の石はある程度動きながら締め固められる。

一方、下段はマウンドが締め固まった状態である。この場合、マウンド表面の石はほとんど動くことができないため、これ以上外力が作用すると、ケーソンは石の上を滑るように動く。

なお、マウンド表面の石には、限られた数の石に対してかなり大きな荷重が集中して作用することが知られている。田中ら(2001)は、著者らと同様にほぼ現地スケールの石を用いたマウンド上に、マウンドとの接触面に625個のロードセルを取り付けた2.5 m四方のコンクリートブロックを設置し、油圧ジャッキで鉛直載荷を行い、接触点の荷重を測定している。それによると、上載荷重が200 kN/m²のときで約80個のロードセルしか接触しておらず、そのうちのわずか17個で全体荷重の約

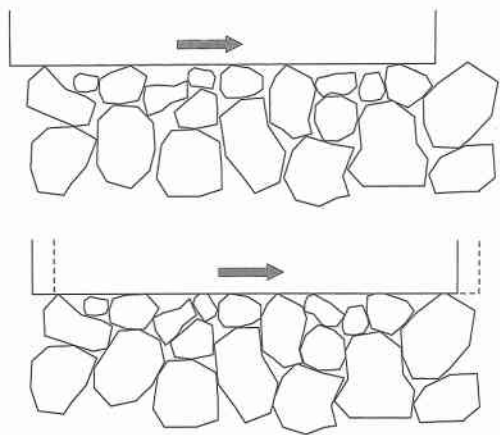


図-3 ケーソン滑動時のマウンドの状況



写真-1 実験後のマウンド表面

表-1 通常断面における摩擦係数

ケース番号	摩擦係数 μ
1-1	0.58
1-2	0.64
1-3	0.69
2-1	0.64
2-2	0.69
2-3	0.73

表-1 は今回の実験結果を示したもので、摩擦係数の値は、実験を繰り返すにしたがって大きくなっている。これは、前述したとおり、ケーソンが変位する際にマウンドが締め固まり、ケーソンと石との接触点が多くなり、摩擦抵抗力が増大するためと考えられる。

現地においては、ケーソンは設置直後から波の作用によって繰り返し荷重を受け、これによってマウンドの締め固まりが進行するものと考えられる。今回の実験結果では、最初のデータを除いてすべて現行の設計で用いられている摩擦係数 0.60 よりも大きくなっており、現行の設計値がやや安全側の妥当な値であることがわかる。

4. アスファルトマットを使用した断面の実験結果

4.1 荷重と変位の時間変化

図-4 は、アスファルトマットを使用した場合の荷重および変位の時間変化を示したもので、2 回目の波形である。マット無しの場合と同様に、荷重の作用とほぼ同時に変位が始まっている。ただし、マット無しの場合には、ケーソンの変位は上端と下端でほとんど同じであったが、マット有りの場合、上端のほうが下端よりも 2 cm 程度変位が大きく、ケーソンがやや前傾しながら動いている。また、荷重の波形において 10~30 kN 程度の小刻みな減少があまり見られないことからわかるように、マット無しの場合に比べて石が割れる現象は比較的少なかった。これは、マットの塑性変形によって石がマット内へくい込むため、石への荷重の集中が緩和されたためと考えられる。

この例では、変位が上端で 4 cm 程度になったところで荷重がやや減少している。この現象については、次節で詳しく述べるが、ケーソンとマットの接触面で滑動が生じると同時に荷重が減少しており、いわゆる静止摩擦から動摩擦へ変化したものと考えられる。ここには示していないが、1 回目の場合、荷重が減少するまでに 1 分以上かかっており、その間に上端で約 10 cm の変位が生じていた。これは、最初のケースではマウンドの締め固まりに加えてアスファルトマットの塑性変形も生じるため、滑動が始まるまでに時間がかかり、変位も大きくなったと考えられる。

68%を支持しているという結果になっている。

今回の実験では、これとほぼ同じ状態からさらに水平荷重を加えており、ケーソンと接触している石にはかなり大きな荷重が作用したと考えられる。そのため、載荷中に石の割れる音が聞こえ、ケーソンを撤去してみると、特に扁平な石で割れているものが多く見られた。写真-1 は、実験後のマウンド表面の状況を示したもので、一部の石が割れていることがわかる。

3.3 摩擦係数

森平ら (1978 ; 1979) は、捨石マウンドとケーソン底面間の摩擦係数の定義として、①水平荷重の最大値を用いる方法 (μ_{max})、②水平荷重の極大値の平均を用いる方法 (μ_{mean})、③一定値となる水平荷重を用いる方法 (μ_{const})、④一定変位時の水平荷重を用いる方法 (μ_s) の 4 つを示しており、詳細な検討においてはおもに μ_{const} を用いている。今回の実験においては、ほぼ一定値となるときに水平荷重を用いて摩擦係数を求めることとする。

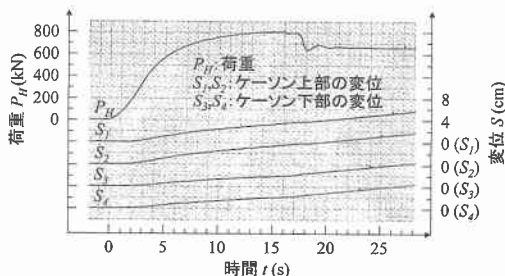


図-4 水平荷重および変位の時間変化（マット有り）

なお、3回目については、荷重が十分に増加する前に滑動が生じ、滑動後一時的に荷重が0近くまで低下するという現象を繰り返した。これは、1回目と2回目の滑動によって、マットとケーソンの間に20 cm程度のずれが生じたことが原因と思われる。すなわち、ケーソンの端部では下にマットがなく、マウンドとの間に隙間が生じ、水平荷重を受けたケーソンが前傾しては滑動するという現象を繰り返したものと考えられる。

4.2 マット使用時におけるケーソン滑動時のマウンドの挙動

図-5は、アスファルトマットを使用した場合のケーソン滑動時におけるマウンドの状況を模式的に示したものである。上段はケーソンをマウンドに設置した直後の状態を示したもので、マウンドの締め固まりは緩く、また、マットの内部へ石がくい込んでいる。この状態でケーソンに水平荷重を作用させると、ケーソンの変位に伴い、マットが塑性変形し、その際、マットにくい込んでいる石は、マットと一体となって動く。また、マットにくい込んでいないマウンド表面の石は、ある程度動きながら締め固められる。

一方、下段はマウンドが締め固まった状態であり、マウンド表面の石はほとんど動くことができない。この状態では、くい込んだ石を含めたマット底面とマウンド表面の石との摩擦係数や、捨石どうしの摩擦係数よりも、ケーソン底面とマット上面との摩擦係数のほうが小さいため、ケーソンはマットの上を滑るように動く。

なお、捨石どうしの摩擦係数は通常0.8程度といわれているが、今回の実験においては捨石内部での滑動は生じなかった。次節で述べるように、ケーソンとマットの静止摩擦係数は0.9以上であったことから、実際には捨石マウンドの内部摩擦角がかなり大きいと考えられる。

写真-2は、実験終了後における、マウンドと接していた側のアスファルトマット表面の様子であり、石のくい込んでいた跡がはっきり見られる。白い筋のようなものが見えるのは、施工時にできていた模様であり、石が引きずられることによって生じた跡は見られない。このこ

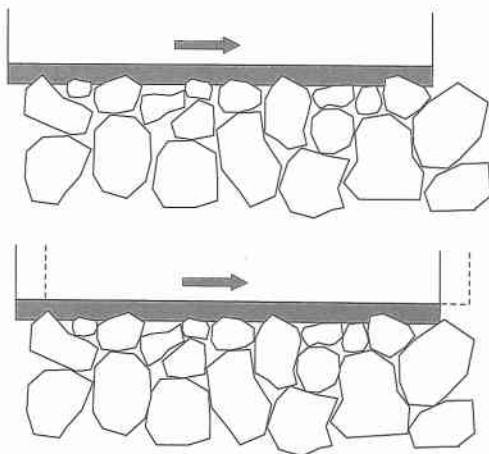


図-5 ケーソン滑動時のマウンドの状況（マット有り）



写真-2 実験後のアスファルトマット

とからも、滑動がマットとマウンドの間ではなく、ケーソンとマットの間で生じたことがわかる。

なお、荷重の時間変化の波形から明らかなように、マットを使用した場合には静止摩擦から動摩擦への変化がはっきり現れているのに対して、マット無しの場合にはその境界がはっきりせず、荷重の低下がほとんど見られない。これは、マット有りの場合、ケーソンとマットは面と面で接しているのに対して、マット無しの場合、ケーソンとマウンドは有限個の点で接しており、マウンドの石の変位が完全には拘束されていないことが、主な原因と考えられる。

4.3 摩擦係数

今回の実験においては、ケーソンとマットの間で滑動が生じる直前の静止摩擦係数が、ケース1で0.93、ケース2で0.90であり、滑動が生じてからの動摩擦係数は、ケース1で0.74、ケース2で0.73であった。

現行の設計においては、摩擦増大マットを用いた場合の摩擦係数としては、0.7～0.8が用いられている。実験結果はわずか2ケースしかなく、一般的な結論としては

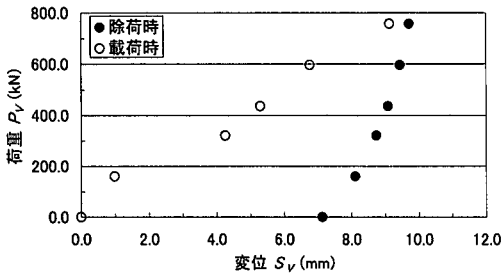


図-6 鉛直荷重とケーソンの変位の関係

不十分ではあるが、少なくとも今回の実験においては設計値以上の静止摩擦係数となっている。ただし、今回の結果からも明かなように、いったん滑動が生じると摩擦係数が小さくなることや、ケーソンとマットの間で滑動が生じるため、滑動量が大きくなるとケーソンとマットとのずれが生じ、十分な摩擦抵抗が期待できなくなる危険性がある。したがって、近年になって盛んに検討が進められている変形を許容した設計法を適用する場合などにおいては、変形後の挙動について十分検討する必要がある。

5. 地盤係数の検討

すでに述べたように、ケーソンに荷重が作用するとマウンドおよび砂地盤は弾性変形する。マット無しの場合を対象として、水平荷重の作用を終了させた後のケーソンの戻りについて、ケーソンの上部と下部に設置した変位計の値を用いて、水平変位とケーソン下端を中心とした回転変位を求めた。その結果、600 kN 程度の荷重に対して、いずれも 5 mm 程度の変位であり、水平および回転に関する地盤係数 k_x 、 k_θ を計算すると、それぞれ $k_x = 1.9 \times 10^4$ kN/m³、 $k_\theta = 2.0 \times 10^4$ kN/m³ となった。

一方、鉛直地盤係数に関しては、別途、鉛直荷重載荷実験を行って求めた。図-6 は、鉛直荷重と変位の関係を示したものである。荷重増加時と減少時では傾向が大きく異なっているが、これは、荷重増加時には石の移動や破壊によって弾性変位以外の変形が生じており、これらの変形量を含んだデータとなってしまったためである。したがって、減少時の結果を用いて鉛直地盤係数を求めると、 $k_z = 6.1 \times 10^4$ kN/m³ となった。

地盤係数の値は、地盤条件や作用する波力のオーダーによって大きく変化するが、高橋ら (1994) の計算結果と比較すると、今回の実験結果は、水平および回転地盤係数に関しては、現地において比較的地盤が固い場合の値とほぼオーダーが一致している。一方、鉛直地盤係数

に関しては、現地に比べてやや大きい値となっているが、これは、砂地盤層が 4 m しかなく、水路底面のコンクリート部の影響が現れたものと思われる。

6. まとめ

今回の研究によって、以下のことが明らかになった。

- 1) ケーソン設置直後で、マウンドの石の空隙が比較的大きい場合、ケーソンと接触している石は、ケーソンの動きに追従して移動または回転し、それに伴ってマウンドが締め固められる。
- 2) マウンドが締め固まると、ケーソンは石の上を滑るように動き、その際、石の形状によっては集中荷重が作用して石が割れることもある。また、マウンドが締め固まることによってケーソンと接触する石の点数が増加し、摩擦抵抗が増大する。
- 3) アスファルトマットを使用した場合、ケーソンの滑動はマットとケーソンの間で生じる。また、マットの無い場合に比べて静止摩擦係数は大きい、いったん滑動が生じると、動摩擦状態となり、摩擦抵抗が小さくなる場合がある。

実際に波によってケーソンが滑動する場合の波力の作用時間はたかだか数秒程度であり、静的載荷の場合とはその挙動に多少の違いがあることが予想される。今後は実際に波を作用させた場合の滑動現象やマウンドの破壊機構についても、さらに検討を進める予定である。

なお、本研究の実施に当たっては、港湾空港技術研究所の高橋海洋・水工部長から貴重な助言をいただいている。また、実験の実施に当たっては、国土交通省関東地方整備局横浜技術調査事務所の中村設計室長ほか多数の方々のご協力を得ている。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 加川道男 (1964): 重力式構造物の摩擦抵抗増大について, 第 11 回海岸工学講演会論文集, pp. 217-221.
- 高橋重雄・下迫健一郎・上部達生 (1994): 衝撃砕波力に対する防波堤ケーソンの動的挙動, 港研報告, 第 33 巻, 第 2 号, pp. 59-86.
- 田中 剛・菅野高弘・宮田正史・菊池信夫・佐野幸保 (2001): 捨石マウンドの支持機構に関する大型模型載荷実験, 土木学会第 56 回年次学術講演会 (投稿中).
- 森平倫生・木原 力・堀川 洋 (1978): 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 337-341.
- 森平倫生・足立一美 (1979): 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について (第 2 報), 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 446-450.