

# ケーソン摩擦増大マットの滑動安定性寄与に関する実験的研究

柴田 学\*・岡田 享\*\*

## 1. ま え が き

近年、外洋に面して波浪条件の厳しく、かつ水深の大きい地点に港湾施設が整備されるのに伴い、防波堤や護岸用のケーソンはますます大型化する傾向にある。そのため、ケーソン断面の縮小によるコストダウンを目的として、滑動安定性に寄与する摩擦増大マットを採用する事例が多くなってきている。

摩擦増大マットには、代表的なものとして次の3つが挙げられる。

摩擦増大マットの効果に関する研究は、従来からなされているが、マットを使用することにより摩擦係数をいくらまで増大できるかに主体性をおいたものがほとんどで、マットと捨石間の摩擦発生メカニズムについては十分に解明されていない。また設計上も「港湾の施設の技術上の基準・同解説」において適用に関する統一された規定がないため、現地の設計及び施工条件を十分考慮した上で、事業者の独自の判断により摩擦増大マットを選定し、摩擦係数を設定しているのが現状である。

そこで今回、常陸那珂港第4ふ頭東護岸のケーソン混成堤において、代表的な摩擦増大マットの中から天然ゴムマットの適用を検討するに当たり、設計レベルの応力を再現した水中での摩擦実験を実施し、その結果からマットと捨石間の摩擦発生メカニズムを推定し、またマットを敷設したケーソンと捨石間の摩擦係数についての合理的な算出法について考察を行ったので、その成果をとりまとめて報告する。

表-1 摩擦増大マットの種類

マット名称	力学性質	摩擦抵抗機能
アスファルトマット	粘弾性体	アスファルトが捨石になじみ塑性変形
再生ゴムマット	弾性体	捨石に弾性変形によりなじむ
天然ゴムマット	弾性体	捨石に弾性変形によりなじむ

\* 正会員 工修 東京電力(株)  
 \*\* (株)明治ゴム化成

## 2. 天然ゴムマットに関する考え方と問題点

摩擦増大マットとしての天然ゴムマットの現状における考え方とその問題点は次のとおりである。

### (1) マットの敷設方法

天然ゴムマットは、図-1に示すように、設計波がケーソン作用時に捨石から地盤反力の発生する部分及びケーソンロッキングによる揺れ戻しに対するケーソン港外側の一部にのみ敷設することとしている。地盤反力の発生

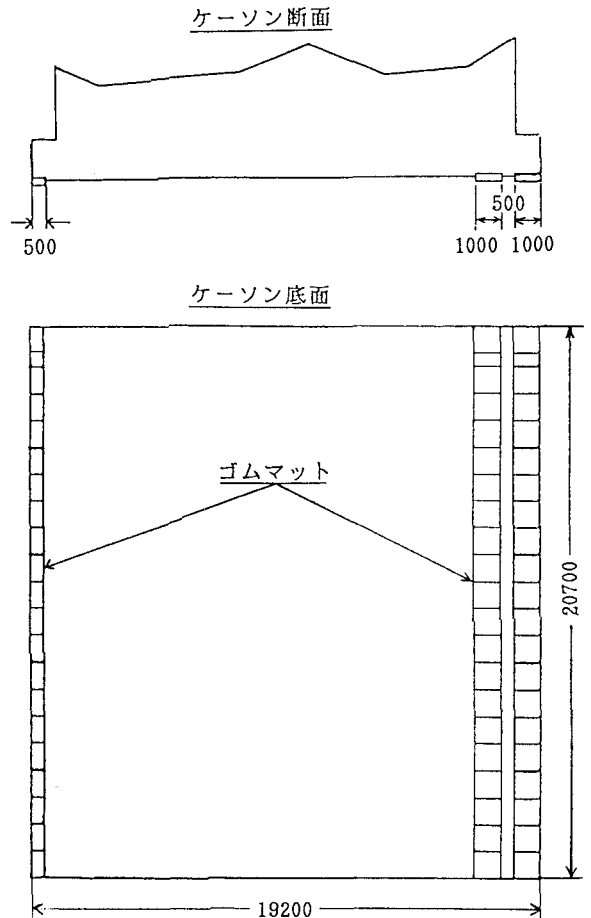


図-1 天然ゴムマットの敷設一例 (単位: mm)

する部分については、港内側へ集中配置するのではなく、ゴムマット0.5~1.0mごとに捨石1個分以上的の間隔をとり、ゴムマットと捨石のかみあわせ効果を考慮しているが、その定量的評価はされていない。

(2) 摩擦係数

ゴムマットを敷設したケーソンと捨石の摩擦係数については、ゴムマットと捨石及びケーソンコンクリートと捨石の摩擦係数を別々に設定した上で、両者をマットの配置と荷重から算出した複合摩擦係数を用いている。

a) ゴムマットと捨石の摩擦係数

ゴムマットと捨石の摩擦抵抗力は、図-2に示すように、コンクリートと捨石の場合のような摩擦特性と異なり、ゴムマットと捨石間の相対変位の発生に対し、増加傾向を示した後に一定となる性質がある。しかし剛体場における考え方と同様に、静止摩擦係数が動摩擦係数より大きいものと仮定することにより、相対変位が無限大すなわち摩擦抵抗力が一定となったときの値で摩擦係数を設定している。その値はゴムマットに作用する鉛直圧により異なり、鉛直圧が増加するほど摩擦係数が低下し、図-3に示すように摩擦係数と鉛直圧の両対数グラフにおいて直線関係が実験的に確認されており(酒井秀男, 1962)、以下のような実験式が成立する。

$$\mu_{gs} = cp^{-a}$$

ここに、 $p$ はゴムマット中心に作用する鉛直圧、 $a, c$ は実験により求められる定数である。上式を各ゴムマットごとに適用し、摩擦係数を設定している。なお既往の研究

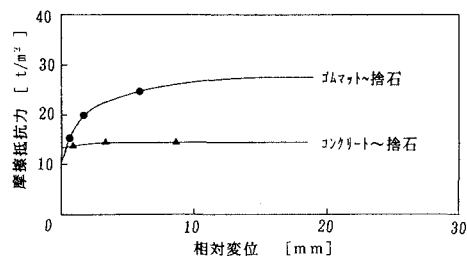


図-2 摩擦抵抗力と相対変位の関係

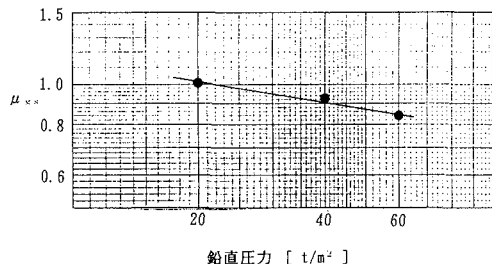


図-3 摩擦係数と鉛直圧の関係

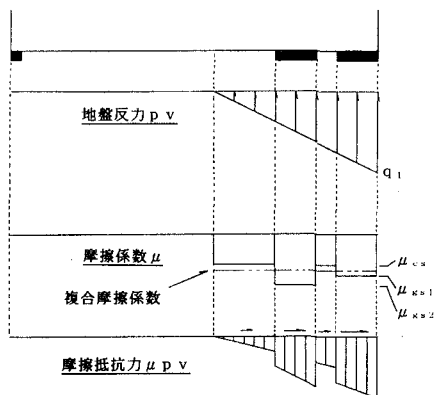


図-4 複合摩擦係数の考え方

では、鉛直圧 60 t/m<sup>2</sup> (0.59 MPa) までの摩擦係数が実験的に確認されている(明治ゴム化成, 1985)が、ケーソンの大型化に伴う鉛直圧の増大に対応するため、75 t/m<sup>2</sup> (0.74 MPa) 程度の高鉛直圧について検証する。

b) ケーソンコンクリートと捨石の摩擦係数

ゴムマット敷設部分はケーソンコンクリート底面より約3cm突出しているが(マット厚5cm適用時)、ゴムマットがないときと同様にケーソンコンクリート部分は捨石と接地しているものとして、ケーソンコンクリートと捨石の摩擦係数  $\mu_{cs}$  は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に規定されている0.6を設定する。

c) 複合摩擦係数

ゴムマットを敷設したケーソンと捨石の摩擦係数  $\mu$  は、図-4に示すように、上記で設定されたゴムマットと捨石及びケーソンコンクリートと捨石の摩擦係数を線形たしあわせすることにより、設計荷重に対し以下の式により算出される。

$$\mu = \frac{\sum(\mu_{gs}w_g) + \mu_{cs}(W - \sum w_g)}{W}$$

ここに、 $w_g$ は各ゴムマットに作用する鉛直力、 $W$ はケーソン全重量である。なお、既往の研究においては、線形たしあわせによる上述の複合摩擦係数が、どの程度実験値と適合しているかについては比較検討がなされていない。

3. 実験概要

上述したように、ゴムマットと捨石及びゴムマットを敷設したケーソンと捨石の摩擦特性については、現地への適用を検討する上で、解明すべき課題が残されているため、次の3点に着目して実験を行った。

- ① ゴムマットと捨石の相対変位発生に伴う摩擦抵抗力の増大について

- ② 鉛直圧が 75 tf/m<sup>2</sup> (0.74 MPa) までにおける摩擦係数の変化について
- ③ ゴムマットを敷設したケーソンと捨石の摩擦係数に関する計算式の妥当性について

なお実験は、以下に示すような2種類の小型モデルで実施することとした。

(1) ゴムマットと捨石の摩擦特性に関する実験

図-5に示すような実験装置により、ゴムマットに作用する鉛直圧を 20 tf/m<sup>2</sup> (0.20 MPa) から 75 tf/m<sup>2</sup> (0.74 MPa) までの範囲で変化させたときのゴムマットと捨石の摩擦特性を把握した。

実験は、図-6に示すように、実施工を再現して積み上げた捨石マウンドとゴムマット、次にゴムマットと捨石の摩擦が大きいことから捨石内部でのすべりが懸念されたためこれを抑えるためコンクリートで固めた捨石マウンドとゴムマット、そして比較のためゴムマットを使用せず積み上げた捨石マウンドとコンクリート方塊の3ケースについて行った。

実験方法としては、図-7に示すように、まずゴムマットをコンクリート荷重ブロック底面 (0.5m×0.5m) に実施工と同一方法で接着した荷重体を、上面を整形し水

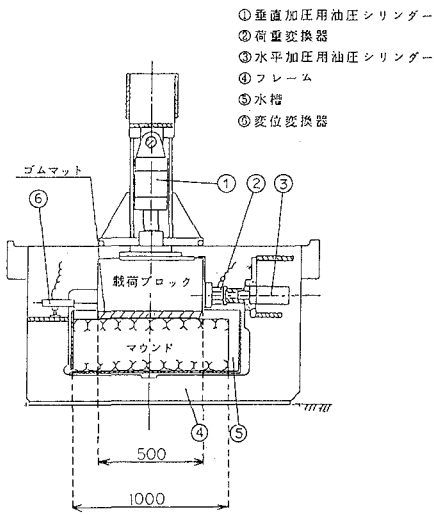


図-5 実験装置 (単位: mm)

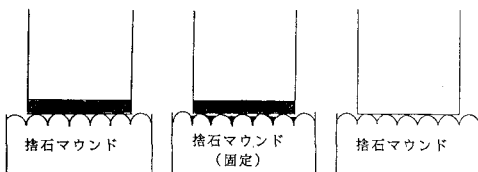


図-6 捨石マウンドの状態と荷重体の組み合わせ

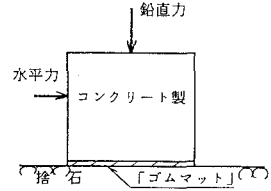


図-7 実験概念図

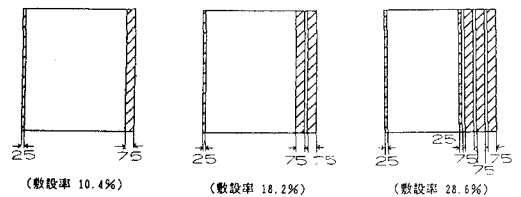
張りした捨石上へ配置し、その荷重体に鉛直圧を作用させながら水平圧力を段階的に荷重することにより、荷重体の変位量、水平圧力除荷時の変位の戻り量を計測し、その差として相対変位量を算出した。

(2) 複合摩擦特性に関する実験

ゴムマットと捨石の摩擦特性の場合と同じ実験装置を用いることにより、コンクリート底面に部分敷きしたゴムマットと捨石の摩擦係数を求め、計算上得られる値との比較検討を行った。

実験は現地スケールの 1/20 の縮尺とし、図-8に示すように、コンクリート荷重ブロック底面 (1.0m×1.0m) にゴムマットを各敷設率ごとに張り付けた5つの荷重体について、これらを図-9に示すような、設計波がケーソンに作用したときの偏心荷重条件を再現した2種類の地盤反力分布で行った。このときの荷重方法を図-10の実験概念図に示す。

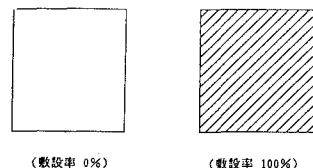
実験方法としては、ゴムマットを配置した荷重体を上面を整形し水張りした捨石上へ配置し、その荷重体に上述したような偏心荷重条件とした鉛直圧を作用させながら水平圧力を段階的に荷重することにより、荷重体の変位量、水平圧力除荷時の変位の戻り量を計測し、摩擦抵抗力及び摩擦係数 (動摩擦係数) を算出することとした。



(敷設率 10.4%)

(敷設率 18.2%)

(敷設率 28.6%)



(敷設率 0%)

(敷設率 100%)

図-8 ゴムマットの敷設パターン (単位: mm)

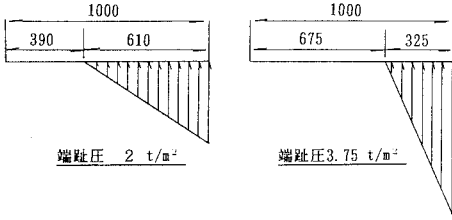


図-9 実験における地盤反力分布 (単位: mm)

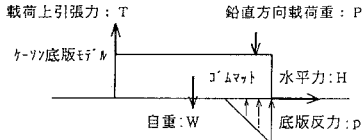


図-10 実験概念図

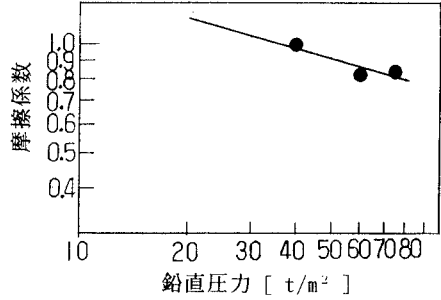


図-12 鉛直圧と摩擦係数の関係

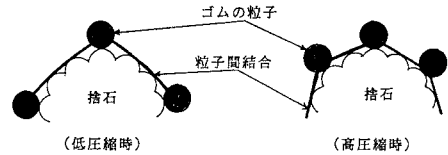


図-13 ゴムと接触体との微粒子構造模式図

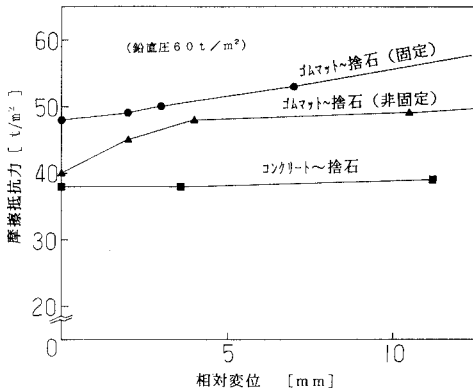


図-11 摩擦抵抗力と相対変位の関係

#### 4. 実験結果及び考察

##### (1) ゴムマットと捨石の摩擦特性に関する実験

###### a) ゴムマットと捨石の摩擦特性

結果の一例として、図-11に鉛直圧  $60 \text{ tf/m}^2$  ( $0.59 \text{ MPa}$ )のデータを示す。コンクリートと捨石については、水平圧力  $38 \text{ tf/m}^2$  ( $0.37 \text{ MPa}$ ,  $\mu=0.63$ )において一気にすべりが生じているが、ゴムマットと固定しない捨石については、水平圧力  $40 \text{ tf/m}^2$  ( $0.39 \text{ MPa}$ ,  $\mu=0.67$ )より相対変位が徐々に生じて  $49 \text{ tf/m}^2$  ( $0.48 \text{ MPa}$ ,  $\mu=0.82$ )で無限大となっており、相対変位量の設定により摩擦係数が大きく異なる。一方、ゴムマットと固定した捨石については、水平圧力  $48 \text{ tf/m}^2$  ( $0.47 \text{ MPa}$ ,  $\mu=0.80$ )ですべりが生じていることから、捨石を固定しない場合の水平圧力  $40 \text{ tf/m}^2$  ( $0.39 \text{ MPa}$ )から  $48 \text{ tf/m}^2$  ( $0.47 \text{ MPa}$ )の間における初期相対変位の区間は、捨石マウンドの締め固めに相当するものと考えてもよいと思わ

れる。従って、摩擦増大マットとしてゴムマットを適用するに当たっては不可避な変位であるため、従来からの剛体場における摩擦の考え方として、コンクリートと捨石の摩擦と同様、相対変位無限大における摩擦係数を設定してもよいものと考えられる。

###### b) ゴムマットに作用する鉛直圧と摩擦係数の関係

図-12に示すように、 $60 \text{ tf/m}^2$  ( $0.59 \text{ MPa}$ )を超え  $75 \text{ tf/m}^2$  ( $0.74 \text{ MPa}$ )までの鉛直圧についても鉛直圧の増加に伴い、鉛直圧と摩擦係数との両対数グラフにおいて従来から提示されている負の傾きをもつ直線関係が得られ、また摩擦係数として捨石と捨石の摩擦係数である  $0.8$ 以上を示すことが確認された。鉛直圧の増大に対する摩擦係数の減少は、ゴムの材料的性質に起因するものであり、次のような説明が化学的に明らかにされている。ゴムのような高弾性物質は、金属のような弾性と異なり、外力を受け変形を生じると粒子間結合距離が変化する。そのため図-13に示すように、低圧縮状態では捨石との接触部分において引張りを受けて粒子間結合距離が長くなり、その結合間に接触部分が多く入り込むことにより高摩擦を得ているが、高鉛直圧による圧縮を受けると、粒子間結合距離が低圧縮状態より短く、結合間の接触部分が少なくなることにより、摩擦係数が小さくなるという性質である。そしてさらに、このゴムの材料的性質による要因は、鉛直圧の増大に対しゴムの捨石への食い込み量が增大することは相反するものであるが、それよりも影響度が大きいことを表すものと考えられる。

###### (2) 複合摩擦特性に関する実験

敷設率と摩擦係数の関係では、図-14に示すように、

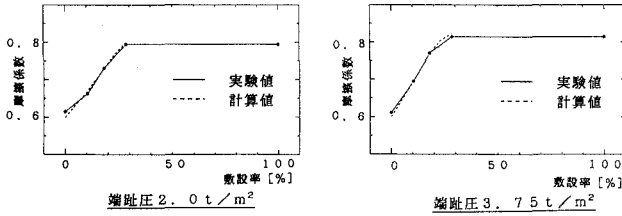


図-14 敷設パターンによる摩擦係数

地盤反力が発生する部分に選択的にマットを敷設することで摩擦係数を様々に設定可能であり、敷設率約30%で摩擦係数の最大値となっている。また、地盤反力分布以上に敷設しても効果が上がらないことがわかる。

また実験値と計算式による摩擦係数とは、鉛直圧の大小及び敷設パターンによらず、非常によく一致しており、ゴムマットと捨石及びコンクリートと捨石の各摩擦係数を線形たしあわせした計算式による摩擦係数は、実用上有効であることが検証された。

## 5. 結 論

本研究の成果を要約すると以下のとおりである。

(1) 天然ゴムマットと捨石間の初期相対変位における摩擦抵抗力の増大は、捨石と捨石の間の締め固めによるものと考えられ、摩擦増大マットを適用する場合は不可避な変位である。従って、摩擦係数としては従来と同様に、相対変位無限大における値すなわち動摩擦係数を設定することができる。

(2) 従来検証されていなかった  $60 \text{ tf/m}^2$  ( $0.59 \text{ MPa}$ ) から  $75 \text{ tf/m}^2$  ( $0.74 \text{ MPa}$ ) の高鉛直圧におけるゴムマットと捨石の摩擦特性については、摩擦係数と鉛直圧との両対数グラフで鉛直圧  $60 \text{ tf/m}^2$  ( $0.59 \text{ MPa}$ ) 以下での直線の延長上に位置し、摩擦係数は捨石と捨石の摩擦係数である0.8以上を示すことが確認された。

(3) 複合摩擦係数の計算式は、実験値とほとんど一致しており、実用上有効であることが確認された。従って、ゴムマットのケーソンへの敷設パターンは、大きな地盤反力の生じる部分に敷設するのが最も効果的である。

なお、天然ゴムマットと捨石の摩擦発生メカニズムについては、マット間隔の確保に関する理論的根拠の解明など今後の課題も残されており、これを機に摩擦増大マット全体についてさらなる議論を期待するものである。

## 参 考 文 献

- 岡田寿夫他 (1989): ケーソンの滑動に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 5, pp. 291-295.
- 港湾環境エンジニアリング編 (1979): 重力式建造物の摩擦抵抗増大用ゴム, pp. 14-21.
- 酒井秀男 (1962): ゴムのガラス平面上での摩擦, 日本ゴム協会誌, 第35巻, 第3号, pp. 59-66.
- 日本港湾協会編 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 228.
- 明治ゴム化成 (1985): ケーソンラバー実用化に伴う応用研究, 作業船, 第157号, pp. 73-80.