

# ゴムフラップ消波堤による波高減衰

中野 晋\*・三島豊秋\*\*・鈴木直人\*\*\*・三井 宏\*\*\*\*

## 1. 緒 言

揺動型の波浪制御構造物は、景観および海水交流に関する利点に加え、柔構造であるために船舶の航行の妨げにならないなどの利点も併せ持っている。ゴムフラップ消波堤は、強度、耐久性および経済性の点で他の材料より優れているゴムを素材とするフラップを揺動材に用いているため、耐久性および耐候性の点でも揺動型波浪制御構造物としては優れている。

揺動型の消波構造物に関する研究は、これまであまり行われなかったが、近年になってその有用性が認識されることにより盛んに行われだした。Kobayashiら(1991)および浅野ら(1991)は、海藻が繁茂する流体場を海藻群落を有する領域とその上部の領域の二層として扱うことにより、海藻が繁茂する場での波高減衰特性の解析を行っている。しかしながら、彼らが対象とする揺動材は、ゴムフラップに比べずっと剛性が小さな柔らかい材料である。そのため、現在運輸省第三港湾建設局においてゴムフラップ消波堤の消波機構を解明するための模型実験が行われている(小島ら, 1993)。

本研究では、ゴムフラップ消波堤による消波機構の解明および諸量の定量化を目的に、波高減衰特性など諸特性に関する模型実験を行う。ついで、現地での利便性や実務性を考慮した波高減衰理論を提案し、その理論および線形近似に基づく他の2つの理論を用いた実験結果の解析を通して波高減衰特性の解明を試みる。

## 2. ゴムフラップ消波堤による波高減衰の理論

### 2.1 基礎方程式

流体中に揺動する板状の物体が海底に多数存在し、揺動している状況を考える。流体運動における外力として、圧力項、重力項、および流体と揺動する物体間の相互作用力項を仮定すると、流体運動に関する運動方程式は次式で表される。

$0 > z > -h + d$  において：

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_1 = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p_1 \dots\dots\dots (1)$$

$-h + d > z > -h$  において：

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u}_2 &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p_2 \\ &\quad - \frac{bN}{2} C_D \left[ u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right] \left( u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) \mathbf{i} \\ &\quad - C_M a N \left( \frac{\partial u_2}{\partial t} - \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) \mathbf{i} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $d$  および  $h$  はゴムフラップの長さおよび模型上水深、 $\mathbf{u}_1$  および  $\mathbf{u}_2$  は上層および下層の流速ベクトル、 $p_1$  および  $p_2$  は上層および下層の圧力、 $\xi$  はゴムフラップの水平変位、 $\sigma$  および  $\rho$  はゴムフラップおよび流体の密度、 $C_D$  および  $C_M$  は抗力および仮想質量力係数、 $N$  は単位面積当たりのゴムフラップの本数、 $a$  および  $b$  はゴムフラップの断面積および幅、 $\mathbf{i}$  は  $x$  方向の単位ベクトルである。

流体中で揺動する板状の物体として用いるゴムフラップは粘弾性体であり、また運動の変位は微小であると仮定する。ゴムフラップに作用する外力項として弾性力、粘性力、圧力および流体との相互作用力を仮定すると、一本のゴムフラップに対する運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma a \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + C \frac{\partial \xi}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 \xi}{\partial z^4} \\ = \frac{\rho}{2} b C_D \left[ u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right] \left( u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) \\ + \rho a C_M \left( \frac{\partial u_2}{\partial t} - \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) \\ - a \frac{\partial p_2}{\partial x} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 $I$  は断面二次モーメント、 $C$  および  $E$  はそれぞれゴムフラップの粘性係数およびヤング率である。

また、式(1)、(2)および(3)に対する境界条件は次式で与えられる。

$z = 0$  において：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = w_1, \quad p_1 = \rho g \eta \dots\dots\dots (4)$$

\* 正会員 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科  
 \*\* 正会員 工博 徳島大学助手 工学部建設工学科  
 \*\*\* 正会員 工修 香川県庁土木部高松事務所  
 \*\*\*\* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科

$z = -h + d$  において：

$$w_1 = w_2, \quad p_1 = p_2, \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{\partial^3 \xi}{\partial z^3} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$z = -h$  において：

$$w_2 = 0, \quad \xi = \frac{\partial \xi}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\eta$  は水位変動である。

**2.2 微小振幅波に基づく波高減衰の理論**

流体運動の基礎方程式(1)および(2)において、仮想質量力およびゴムフラップの揺動の影響は無視する。定常的な波動場を仮定するとき、これらの式より次式のような波のエネルギー式が導かれる。

$$\frac{\partial C_g E_w}{\partial x} = -\frac{\rho N b C_D}{2T} \int_{-h}^{-h+d} \int_0^T |u|^2 dt dz \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $u$  は流速、 $E_w$  は波のエネルギー、 $C_g$  は群速度、 $T$  は波の周期である。ついで、流速に微小振幅波の流速分布を仮定すると、式(7)で表される波のエネルギー式は次式のように書き換えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial x} &= -a_0 H^2 \\ a_0 &= \frac{N b C_D \omega^2}{3 \pi n g \sinh^3 k h} \\ &\quad \times \left( \sinh kd + \frac{1}{3} \sinh^3 kd \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $g$  は重力の加速度、 $H$  は波高、 $k$  および  $\omega$  は角波数および角周波数、 $n$  は群速度  $C_g$  と波速  $C$  の比  $C_g/C$  である。

式(8)はゴムフラップ消波堤上での抗力による波高減衰を表す式であり、 $x=0$  における初期波高を  $H_0$  とするとゴムフラップ上での波高変化を表す次式が導かれる。

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{a_0 H_0 x + 1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)における  $a_0$  は波高減衰を定める係数であることから、ここではこれを減衰係数と呼ぶことにする。

**2.3 ゴムフラップの揺動を考慮した波高減衰の理論**

Kobayashi らに従い、式(2)および(3)における抗力項を次式のように近似する。

$$\frac{b N C_D}{2} \left| u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right| \left( u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) \approx \epsilon \left( u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $\epsilon$  はゴムフラップの抗力係数に当る係数であり、次式で定義する。

$$\epsilon = \frac{b N}{2} C_D \frac{\int_{-h}^{-h+d} \left| u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right| \left( u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right)^2 dz}{\int_{-h}^{-h+d} \left( u_2 - \frac{\partial \xi}{\partial t} \right)^2 dz} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(10)で表される近似を用いると、式(1)、(2)および(3)は線形化されるため、変数分離法を用いることに

より解析的に解くことができる。このとき、ゴムフラップ消波堤上を伝播する波の分散関係式は次式のように導かれる。

$$\sum_{j=1}^3 \left[ \left( 1 + \frac{\epsilon}{\omega} i + C_{Ma} N \right) \left( \frac{EI}{\rho a \omega^2} \kappa_j^4 k^4 - \frac{\sigma}{\rho} - \frac{C}{\rho a \omega} i \right) - \frac{\epsilon}{\omega} i + C_{Ma} N \right] \times \kappa_j (C_{Sj} \cosh \kappa_j k_i d - C_{cj} \sinh \kappa_j k_i d) = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $k_i$  は複素角波数、 $i$  は  $\sqrt{-1}$  であり、また  $\kappa_j$ 、 $C_{cj}$  および  $C_{Sj}$  はヤング率などによって定まる定数である。式(12)における複素角波数  $k_i$  の虚数部は波高減衰率を定める係数であることから、ここではこれを減衰係数と定義する。

**3. 模型実験の概要**

実験用のゴムフラップ消波堤の模型には、形状、剛性および粘性の異なる Hard タイプおよび Soft タイプの2種類のゴムフラップを使用した。Hard タイプの剛性  $EI$  および粘性係数はそれぞれ  $550 \times 10^{-4} \text{ kgf} \cdot \text{m}^2$  および  $5.08 \text{ kgf} \cdot \text{s/m}^2$  である。また、Soft タイプの剛性および粘性係数はそれぞれ  $76.60 \times 10^{-4} \text{ kgf} \cdot \text{m}^2$  および  $1.35 \text{ kgf} \cdot \text{s/m}^2$  である。Hard タイプに対しては、ゴムフラップ75枚を縦330cm横72cmの鉄製固定板に16列千鳥状に配置した。また、Soft タイプに対しては、ゴムフラップ135枚を鉄製固定板に16列千鳥状に配置した。ゴムフラップの設置密度は、Hard タイプにおいて  $31.25 \text{ 本/m}^2$ 、および Soft タイプにおいて  $56.25 \text{ 本/m}^2$  である。

実験に用いたガラス張り水槽は、長さ30m、幅0.8mおよび高さ1mであり、油圧サーボ式ピストン型造波機が設置されている。模型を設置したときの水槽の概形と波高の測定位置を図-1に示す。入射分離法を適用して模型上への入射波とそこからの透過波を推算するため、模型の前後すなわち図-1の点AとBおよび点HとIにそれぞれ容量式波高計を設置した。模型上での波高減衰を計測するための波高計は、模型先端より75cm間隔で5台、すなわち図-1に示す点C、D、E、FおよびGに設置した。模型下端からの模型上水深は、ゴムフラップの天端水深を0cm、5cmおよび10cmの3種類に設定し、25cm、30cmおよび35cmにした。それぞれの水深について周期を1から2sまで0.2s刻みで変化させ、同時におのおのの周期において5種類の波高に対して実験を行った。

同様の実験を不規則波に対しても行った。模型上水深は25cmおよび30cmの2種類を対象にし、模型を設置していない状態におけるそれぞれの水深での波形勾配には0.01、0.03および0.04の3種類を想定して造波した。

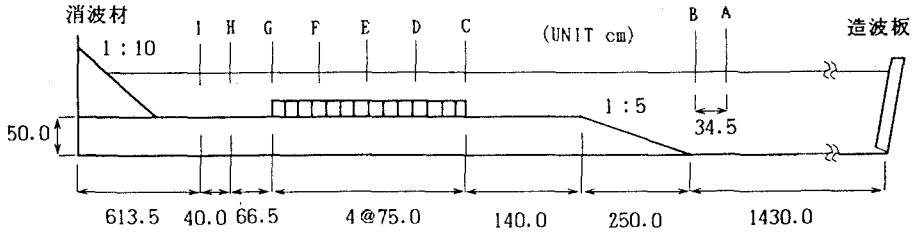


図-1 実験装置の概要

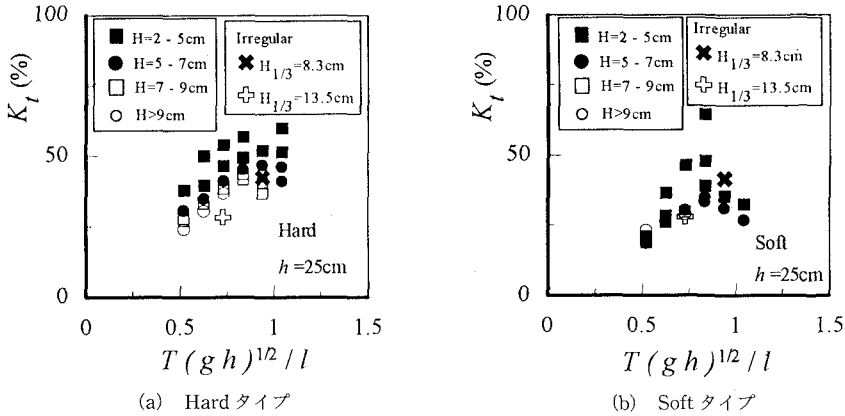


図-2 ゴムフラップ消波堤における波の透過率

#### 4. ゴムフラップ消波堤による波高減衰

##### 4.1 波浪特性

ゴムフラップ消波堤に入射してきた波は、消波堤の前面での波の反射と消波堤上を伝播するときの波高減衰によって消波される。図-2は、天端上水深が0cmのときの波の透過率である。図中において、 $l$ は模型の設置長さを表す。規則波および不規則波に対する透過率は、HardおよびSoftタイプの両者とも周期が長くなるほど、また入射波高が小さくなるほど大きくなる傾向が見られる。また、ここには示されていないが、天端上水深が浅いほど透過率は小さくなる傾向が見られた。Softタイプに比べHardタイプはより透過率が小さくなるが、Softタイプにおいても透過率は50%程度あり、ゴムフラップ消波堤による波の消波効率は高いことがわかる。

ついで、不規則波における模型上を伝播する波のエネルギースペクトル密度の変化に着目する。図-3は、ピークスペクトルを持つ周波数帯とその他の周波数帯における減衰係数の変化をピーク周波数 $f_{max}$ で無次元化した無次元周波数の関数として比較したものである。いずれの図においてもピークスペクトルを持つ周波数帯付近では減衰係数が他の周波数帯に比べて小さくなる傾向があ

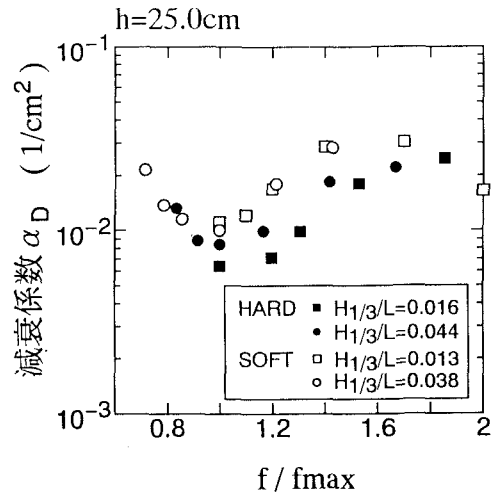


図-3 不規則波における減衰係数 $\alpha_D$ の周波数に対する変化

る。これは、不規則な波の減衰はピークスペクトルを持つ周波数帯付近よりも他の周波数帯でより効率的に行われていることを表している。

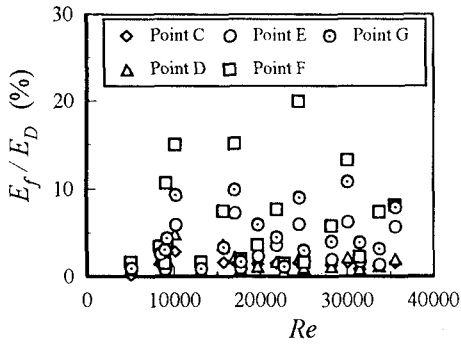


図-4 粘性および抗力によるエネルギー逸散量の比

4.2 波高減衰の評価

ゴムフラップ消波堤上での波高減衰は、伝播する波のエネルギーの一部が最終的にはゴムフラップの存在により生じる渦およびゴム材の粘性によって消費されるために起こる。図-4は、ゴムフラップの粘性と抗力による波のエネルギー逸散量の比を示したものである。粘性によるエネルギー逸散量  $E_f$  は、三角形分布荷重を載荷したときの変位曲線を仮定すると、次式で表される。

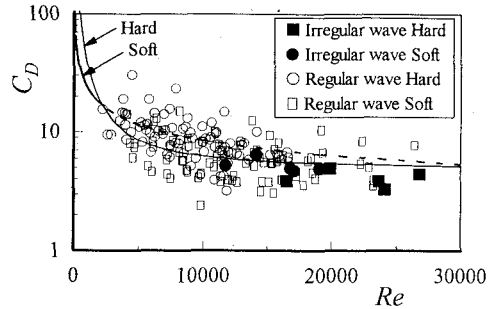
$$E_f = K C \omega^2 \xi^2 d N \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $\xi$ はゴムフラップ先端の振幅、また  $K$  は 0.132 で与えられる係数である。抗力によるエネルギー逸散量は、式(9)に基づいて波高減衰率より算定される抗力係数を用いて推算する。粘性によるエネルギー逸散量は、模型実験時に測定したゴムフラップ先端の振幅を用いて式(13)より推算する。また、図中における Reynolds 数  $Re$  は、ゴムフラップ先端での流速振幅  $u_a$  を用いて  $u_a \sqrt{N} b d / \nu$  で定義されている。この図より、ゴムフラップの粘性によるエネルギー逸散量は、大きくても抗力によるその 20% 程度であり、多くは 10% 以下であることから、無視して良いと思われる。

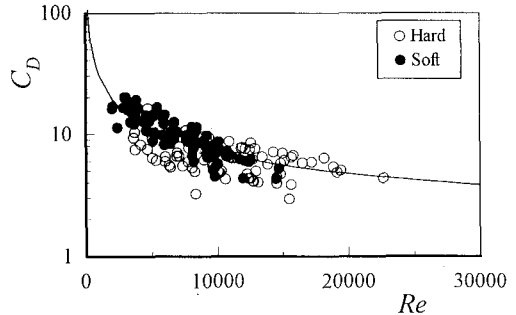
ゴムフラップの粘性によるエネルギー逸散量は小さいことから、透過率の予測においてはゴムフラップの抗力係数の算定が最も重要であると考えられる。ゴムフラップの抗力係数は、式(9)、Kobayashi らの理論および式(13)の3種類の波高減衰の理論に基づいて波高減衰率より推算した。図-5にこれらの方法より算定された抗力係数を示す。図中に示されている曲線は、抗力係数の補間曲線であり、ここでは、次式の関数形を仮定している。

$$C_D = c_1 / Re^n + c_2 \dots\dots\dots (14)$$

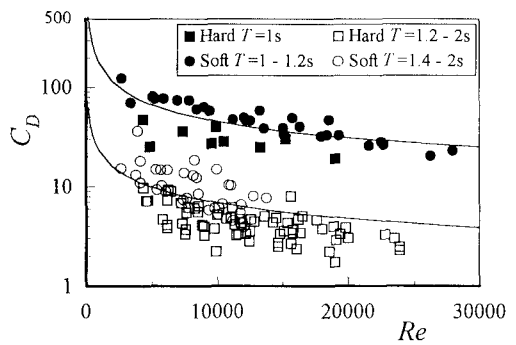
ここに、 $c_1$ 、 $c_2$  および  $n$  は定数であり、(a)の Hard タイプにおいては  $c_1=594000$ 、 $c_2=4.89$  および  $n=1.409$ 、Soft タイプにおいては  $c_1=645$ 、 $c_2=1$  および  $n=0.483$ 、(b)においては  $c_1=3260$ 、 $c_2=1$  および  $n=0.685$  である。また、(c)においては、 $c_1=15900$ 、 $c_2=6.55$  および  $n=$



(a) 微小振幅波を用いた理論に基づく場合



(b) Kobayashi らの理論に基づく場合



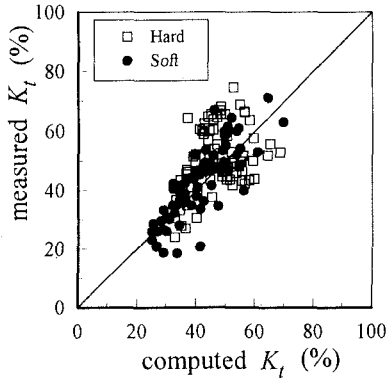
(c) ゴムフラップの揺動を考慮した理論に基づく場合

図-5 波高減衰の理論より推算された抗力係数

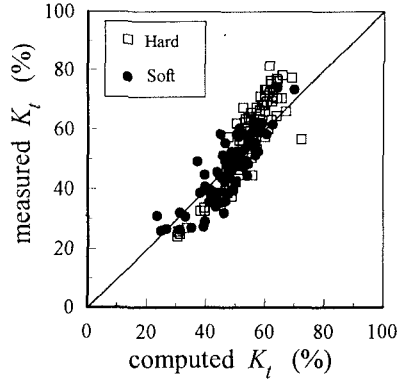
0.654 と  $c_1=865$ 、 $c_2=0$  および  $n=0.524$  の2種類の補間曲線が描かれている。

図-5(c)に示されたゴムフラップの揺動を考慮したときの抗力係数は、Hard タイプおよび Soft タイプのそれぞれにおいて1から1.2秒および1.2から1.4秒の間の周期を境にして傾向の異なる2つのグループに分かれている。揺動の影響を取り入れるとこのような違いが現れる原因は、一つには揺動により発生する固有周期の影響が考えられる。

その他の2つの理論に基づいて推算された抗力係数はほぼ同様の傾向を示しているが、Kobayashi らの理論に



(a) 微小振幅波を用いた理論に基づく場合



(b) Kobayashi らの理論に基づく場合

図-6 波高減衰の理論の予測精度

基づくものが最もばらつきが小さくなっている。また、図-5(a) に示された式(9)に基づいて推算された抗力係数には不規則波に対する抗力係数も示されており、有義波を用いれば規則波によって算定された抗力係数がそのまま適用できることがわかる。

図-6 は、式(9)および Kobayashi らの理論に基づいて波高減衰率から算定された抗力係数を用いたときの透過率の予測精度を比較したものである。予測精度としては Kobayashi らの理論に基づくものが最も良いが、式(9)に基づいても実用上問題は無いと思われる。

### 5. 結 語

ゴムフラップ消波堤の消波特性の解明を目的に、模型実験および理論の両面から検討した。その結果、推算された抗力係数の補間曲線より予測される透過率は、実用上十分な精度であることが確認された。また、ゴムフラップ消波堤は、波長の 1/2 程度の設置長さで 50 % 程度の

消波効率であり、消波効率が高いことがわかった。

最後に、本研究は、運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所による新形式波浪制御構造物開発検討調査の一環として行われたものであり、開発検討調査委員会(委員長 入江 功)において有益なるご検討およびご助言を得た。ここに記して謝意を表す。

### 参 考 文 献

浅野敏之・出口 浩・間瀬 肇・小林信久 (1991): 揺動する海藻群落上を伝播する波の特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 26-30.  
 小島朗史・西村直信・宇戸寿一 (1993): 波エネルギー吸収型波浪制御構造物の開発について, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp. 247-252.  
 Kobayashi N., A. W. Raichle and T. Asano (1991): Prediction of wave attenuation by vegetation and seaweed, Research Report. CACR-91-07, University of Delaware, Newark, pp. 175-213.