

パッシブ型波浪制御構造物の消波メカニズムとその評価

田中正博*・大山 巧*・清川哲志*

1. はじめに

近年、構造物の運動を積極的に利用して消波するいわゆるパッシブ型の消波堤が数多く提案され（例えば、上床ら，1983；田中ら，1987；渡会ら，1987；Evans・Linton，1989），現地に適用されている構造物もある（田中ら，1994）。パッシブ型構造物による消波は，1）構造物の運動に伴って発生する *Radiation Wave* と入射・散乱波との干渉，2）構造物の運動に伴って発生するエネルギー損失に依存している。前者についてはそのメカニズムが解明され消波効果に対する定量的評価が可能となっている（大山ら，1988；井島ら，1986）。後者については，清川ら（1987）が図-1 に示すようなバネとダンパーに支持された水平板による 1 自由度のモデル（水平可動板と称する）を用いて，ダンパーの減衰機能により波エネルギーが吸収され水平可動板による消波性能に大きく寄与することを理論的に明らかにしている。しかし，図-2 に示すような膜構造物（田中ら，1987）において，ダンパーが具体的に何であり，またどのようにモデル化するのかについては解明されていない。したがって，この構造物による波の透過率と反射率の定量的評価は模型実験により確認しなければならない。

本研究は，まず膜構造物の運動によって生じるエネルギー損失がどのような減衰機構に起因しているのかを模型実験により検討する。特に，エネルギーが構造物の内部で消費されているのか，それとも外部に逸散しているのかを明らかにする。そして，膜構造物のエネルギー損失を定量的に評価すると共にその要因について検討する。さらに，大山ら（1988）が先に開発した数値解析法に減衰機構を組み込み，膜構造物の反射・透過特性とエネルギー損失を計算し，実験結果と検証する。

2. 消波メカニズムに係わる減衰機構

（1）減衰機構の分類

振動学では，構造物の振動に伴って生じるエネルギー損失のメカニズムは減衰機構と呼ばれ，一般に以下に示すような 4 つに分類されている（例えば，山原，1974）。

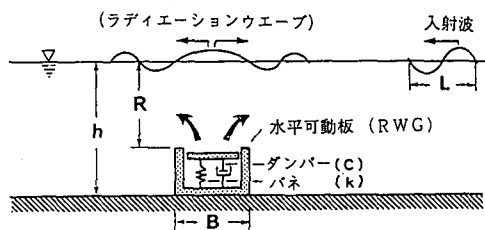


図-1 水平可動板式消波堤の概念

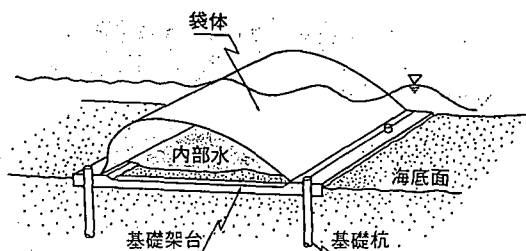


図-2 膜構造消波堤の概念

- 1) 粘性減衰：物体が空気，水，油のような流体中で運動するとき，振動速度に比例して流体から受ける減衰力
- 2) 履歴減衰：材料の非弾性（作用力と変位の非線形性）に起因するエネルギー消費
- 3) 摩擦減衰：振動する物体と他の物体との摩擦によるエネルギーの消費
- 4) 逸散減衰：物体から支持地盤へのエネルギー逸散

図-2 に示した膜構造物（以下，FLM と略称する）の場合，粘性減衰として，袋体内部の流体の乱れ，袋体と袋体内外の流体との相対速度に起因する減衰が，摩擦減衰として袋体側膜と水槽側壁との摩擦が，また，履歴減衰としては膜材料（ゴム）の減衰がそれぞれ考えられる。一方，FLM の逸散減衰として，地盤への逸散（ただし，実験では水槽の底板を介した水槽と基礎への逸散）と水中への逸散が考えられる。なお，構造物上での碎波によるエネルギー損失は構造物の運動に伴う減衰機構ではないので，ここでは取り扱わない。

実際の現象では，これらの減衰機構が混在して現れる

ので、個々の減衰を正確に把握することは難しい場合が多い。そこで、減衰力を構造物全体として捉え、その中で個々の減衰機構の影響を評価する方法がしばしば用いられる。ここでは、FLM 全体系としての減衰を構造減衰と称する。

(2) エネルギーの地盤逸散の検討

FLM によるエネルギー損失を考える場合、まずエネルギーが構造物の内部で消費されているのか、外部に逸散しているのかを明らかにする必要がある。FLM の運動エネルギーが地盤に逸散しているか否かを図-3 に示すような方法で実験した。すなわち、水を充填した袋体 (幅 $B=1.6$ m, 高さ $e=0.4$ m, 内部付加水圧 $p_0=2.5$ g/cm²) を架台を介して水の入っていない水槽および反力床に固定し、袋体の頂部および中間部に荷重を加えて初期変位 (図-3 の E, F の位置) を与えた後、袋体を自由振動させて膜表面 A, C 点での法線と接線方向の応答加速度 (図-3 参照) を測定した。頂部への荷重は、左右対称な変形となる偶数次の振動モードを、また、中間部への荷重は左右非対称な奇数次のモードを励起するためである。なお、自由振動と直交方向の振動を抑制するため袋体の側面を表面の滑らかな板 2 枚 (60 cm 間隔) で支持した。反力床は、大荷重を変形することなく支持できるほぼ剛体と見なすことができる床であり、振動エネルギーの地盤への逸散は生じないと考えてよい。したがって、水槽上と反力床での自由振動の減衰 (減衰定数で評価) がほぼ等しければ、振動エネルギーは構造物の内部で消費されてことになる。逆に、水槽床上での減衰の方が反力床のそれよりも大きければ、エネルギーが地盤に逸散していると判断できる。

FLM のような多自由度の振動系の減衰定数は、応答加速度のパワースペクトルから求めることができ、減衰定数は次式で与えられる (例えば、長松; 1990)。

$$h_c = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{f_n} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 f_n : 系の固有振動数、 Δf : パワースペクトルのピーク振幅の 1/2 での曲線の幅 (振動数幅) である。なお、自由振動に対する応答加速度のパワースペクトルは、同一条件で振動させた 10~20 回分の加速度波形をつなぎ合わせ求めた。

図-4 は、反力床および水槽内 (ただし、水槽内には水が入っていない) にそれぞれ設置した FLM 模型の自由振動 (模型円弧部の中間に初期変位を与えて場合) から求めた減衰定数 h_c を比較したものである。水槽床上に設置した場合と反力床上に設置した場合で減衰定数 h_c の特性にほとんど違いは認められない。したがって、FLM のエネルギー損失は全て系の内部で消費されており、地盤への逸散はほとんどないと考えてよい。図-4 で、減衰定数 h_c

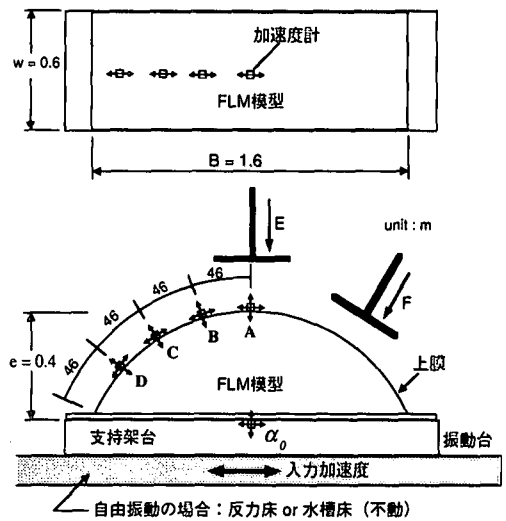


図-3 振動実験装置

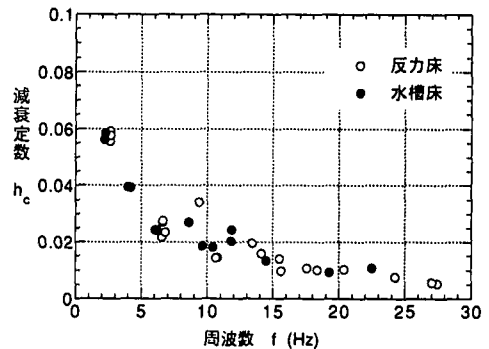


図-4 自由振動に対する減衰定数

は周波数が高くなるにしたがって減少しており、FLM の構造減衰の減衰定数は 1~10 % 程度と考えられる。

(3) 加振実験による減衰定数

FLM のような多自由度系の固有周期に対応した減衰定数を、図-4 に示した自由振動によるデータから正確に把握することは難しい。初期変位の与え方により自由振動時の励起される振動数とそのパワーにバラツキが生じる (ホワイトノイズになっていない) 可能性があるからである。そこで、図-3 に示した自由振動の場合と同じ模型を振動台に設置し、加速度を一定とし振動数を小刻みに変化させて加振 (スウィープ試験) して模型の膜上での応答加速度を測定し、FLM の減衰定数を求めた。加速度計は図-3 に示すように A~D 点にそれぞれ法線と接線方向に配置した。水平方向に 80 gal で加振したときの入力加速度 a_0 (模型架台に設置) に対する模型の A 点の接線方向と B, C 点での法線方向の応答加速度の振幅比 a/a_0 を図-5 に示す。計測する位置と方向によって応

答加速度振幅は異なるが、ピークの現れる振動数は一致しており、これらのピーク振動数がFLMモデルの固有周期に対応していると考えられる。減衰定数 h_c は、ピーク波形を形成する振動数の領域を指定し理想的なピーク波形にフィットするように補正した後、自由振動の場合と同様な手順で求めた。ただし、減衰定数の算定精度を高めるため、応答加速度振幅が5以上でかつ隣のピークの影響を受けていないピーク波形に対して h_c を求めた。

図-6 は、水平方向と鉛直方向にそれぞれ80 galで加振したときの模型上膜の4点での接線および法線方向の応答加速度振幅から求めた減衰定数の特性を示したものである。

加振実験から得られた減衰定数は自由振動で求めた結果(図-4)と同様に周波数の増加と共に指数関数的に減少しており、値も両者でほぼ一致している。図には区別して表示しなかったが計測の位置と方向による減衰係数の違いはなく、また、加振方向による係数の違いもほとんど認められない。図中の実線は実験結果から求めた回帰曲線で、回帰係数は0.9475であり、この回帰曲線でFLMの構造減衰を精度よく推定できると考えられる。

図-6 に示した減衰は地盤への逸散以外の減衰機構により生じていることになるが、袋体側膜と水槽側壁との摩擦による減衰は無視できることを確認した(図は省略するが、袋体の側膜を側板で支持した場合としない場合で減衰定数に差が認められなかった)。また、図-4および図-6 に示した減衰には袋体外部の流体へのエネルギー逸散および外部流体との摩擦は含まれていない。さらに、後述するようにゴム膜の粘性減衰(伸び速度に比例する)は無視できるくらい小さい。したがって、この減衰は袋体内部の流体の乱れや袋体と内部流体との相対速度に起因する粘性減衰およびゴム膜の履歴減衰が混在したものと考えられる。

3. 減衰のモデル化と検証

(1) 減衰のモデル化

パッシブ型波浪制御構造物FLMの反射・透過特性の解析は、膜構造体を図-7に示すように質点とバネ・ダンパー系に離散化し、線形理論に基づき膜の運動と流体運動を連成させて解くもので、その詳細は大山ら(1988)がすでに報告しているため、ここでは上で検討した構造減衰の解析法へのモデル化について説明する。

図-7に示した j 番目の質点の x, z 方向の運動方程式は次式のように表わせる。

$$\begin{aligned} & -m_0 \omega^2 \begin{pmatrix} (a_x)_j \\ (a_z)_j \end{pmatrix} e^{-i\omega t} \\ & = f_j \begin{pmatrix} \sin \theta_j \\ \cos \theta_j \end{pmatrix} - f_{j-1} \begin{pmatrix} \sin \theta_{j-1} \\ \cos \theta_{j-1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ f_0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

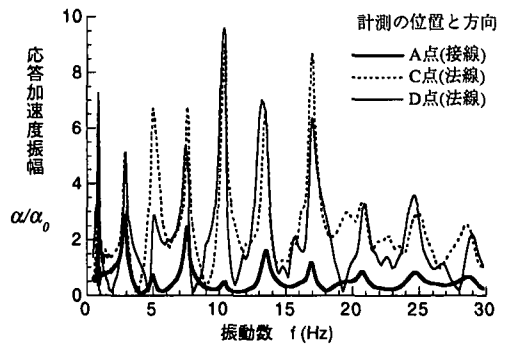


図-5 加振実験から求めた応答加速度振幅 (x 方向加振)

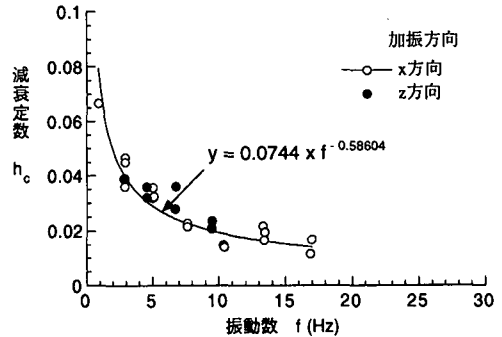


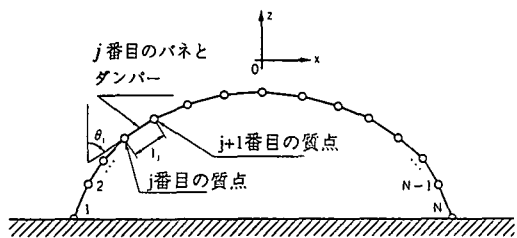
図-6 加振実験から求めた減衰定数 ($\omega=80$ gal)

$$+ \begin{pmatrix} (F_x)_j \\ (F_z)_j \end{pmatrix} \quad (j=2 \sim N-1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

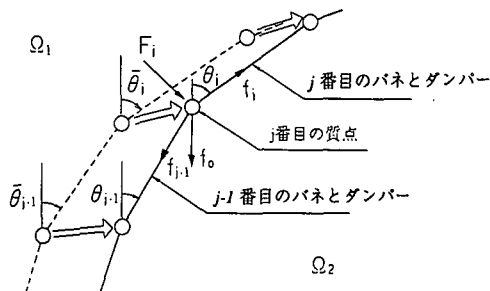
ただし、 m_0 : 質点の質量、 $(a_x)_j, (a_z)_j$: j 番目の質点の x, z 方向の変位、 θ_j : j 番目の要素と法線とのなす角度、 f_j, f_{j-1} : j 番目の質点の両側のバネに作用する張力、 f_0 : 質点の水中重量、 $(F_x)_j, (F_z)_j$: j 番目の質点に作用する x, z 方向の流体力 ($j-1$ 番目要素の中点から j 番目要素の中点に作用する流体力)、 ω : 角振動数、 t : 時間である。式(2)では、膜の伸び速度に比例する減衰力は考慮されている(バネに作用する張力項の中に取り込まれている)が、加振実験で求めた構造減衰は組み込まれていない。図-6に示した減衰係数は粘性減衰以外の減衰作用も含む等価粘性係数 h_c と考えられるから、式(2)に粘性減衰力 $-i\omega C(a_x)_j$ および $-i\omega C(a_z)_j$ を付加すれば構造減衰を考慮することができる。ここに、 C は粘性抵抗係数で次式で与えられる(例えば、岡本, 1970)。

$$C=2\omega h_c m_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、式(3)に図-6に示した減衰定数 h_c をそのまま用いることはできない。なぜなら、 h_c はFLMの膜および内部流体を質量とする振動に対する減衰定数であるが、式(3)は膜の質量 m_0 に対する振動方程式となって



(a) Lumped-mass 法による膜のモデル化



(b) j 番目の質点に作用する力

図-7 膜構造消波堤のモデル化と作用力

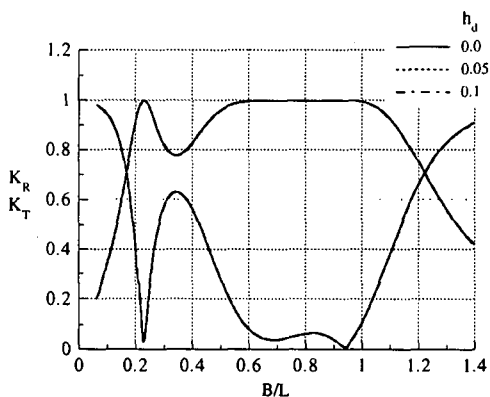
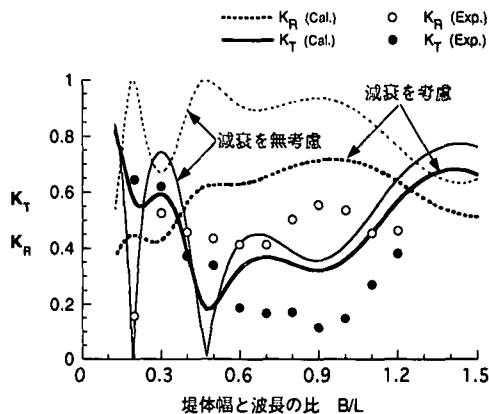


図-8 膜材の減衰定数が消波特性に及ぼす影響

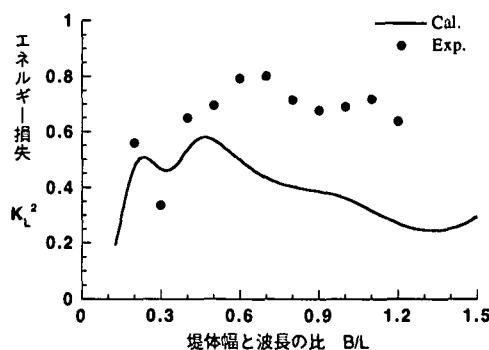
いるからである。加振実験における内部流体の質量が各振動モードにおいてどれくらい運動に寄与しているか(各振動モードにおける有効質量)については十分な検討が必要であるが、ここでは膜と内部流体すべてが加振実験での有効質量 M_0 として寄与するものと仮定する。実験に用いた模型は、膜長 $l_f = 1.84$ m、膜厚 $\varepsilon = 2.0$ mm、膜材の密度 $\rho_m = 1.15$ ton/m³、単位奥行き当りの内部流体の体積 $V_0 = 0.63$ m³ である。解析では膜を 60 の質点に離散化したので、膜と膜および流体の質量比を求めると、 $m_0/M_0 \approx 0.11 \times 10^{-4}$ となる。したがって、解析では等価粘性係数として $h_e = h_c \times 10^{-4}$ を用いた。

(2) 透過・反射率特性とエネルギー損失

初めに、膜の粘性減衰(膜の伸び速度に比例する)が



(a) 透過・反射率特性



(b) エネルギー損失

図-9 透過・反射率特性とエネルギー損失
($B/h=2.4$, $R/h=0.4$, $p_0/\rho gh=0.08$)

FLM のエネルギー損失に及ぼす影響について検討する。

図-8 は、膜材の減衰定数 h_d を 0.0, 0.05, 0.10 に変化させ数値計算により求めた透過率と反射率の周期特性を示したものである。ただし、計算条件は $B/h=2.39$, $R/h=0.4$, $p_0/\rho gh=0.10$, $E/\rho_m g B=3180$ (h : 水深, B : 堤体幅, R : 天端上水深, p_0 : 内部付加水圧, ρ : 水の密度, E : 膜の弾性定数, ρ_m : 膜の密度, L : 波長) である。

ゴムの粘性減衰による透過・反射率への影響は小さく、最も減衰定数の大きい $h_d=0.1$ の場合でもエネルギー損失は 1% 以下である。FLM の膜材として使用されるナイロン繊維で補強されたクロロプレンゴムの減衰定数は 0.02~0.04 であり、膜材の粘性減衰によるエネルギー損失は無視できると考えられる。なお、模型実験に用いた膜材(繊維補強した合成ゴム)の減衰定数は約 0.02 であるのでエネルギー損失を無視できる。

図-9 は、上記の構造減衰を組み込んだ数値解析法で計算した消波特性とエネルギー損失を模型実験による結果と比較して示したものである。ただし、実験および計

算共に、模型の設置条件は $h=67$ cm, $B/h=2.4$, $R/h=0.4$, $p_0/\rho gh=0.08$, $E/\rho mgB=3180$ (p_0 : 初期の内部付加水圧 p_0 に実験での波作用時に上昇した内部水圧の定常成分 Δp_0 を加えた実質的な内部水圧) である。また、実験における波浪条件は入射波高 H_I を 4 cm に固定し、周期は水深 $h=67$ cm に対する堤体幅と波長との比 B/L を 0.1 で刻みで 0.25~1.2 の範囲に対応するように与えた。なお、エネルギー損失 K_L^2 は実験および計算共に次式を用いて求めた値である。

$$K_L^2 = 1 - (K_T^2 + K_R^2) \dots \dots \dots (4)$$

図の (a) より、構造減衰を組み込んで計算した透過率 K_T と反射率 K_R の方がエネルギー減衰を考慮しない場合の結果よりも実験結果をよくシミュレートしており、特に反射率において顕著である。また、図の (b) のエネルギー損失より、構造減衰を取り込むことにより、 $B/L < 0.6$ (長周期領域) では膜構造物の運動に伴うエネルギー損失の 80 % 程度を、 $B/L > 0.6$ (短周期領域) では 50~70 % を考慮できることがわかる。

4. ま と め

構造物の運動を積極的に利用して消波するパッシブ型の波浪制御構造物は、構造物の運動に伴って発生する *Radiation Wave* と入射・散乱波との干渉、構造物の運動に伴って生ずるエネルギー損失の 2 つの機能によって消波する。これまで解決されていなかったエネルギーの減衰機構を解明するため、自由振動実験および加振実験 (スウィープ試験) を行い膜構造物の減衰特性を検討した。また、すでに開発していた線形理論に基づく数値解析法に減衰機構をモデル化して組み込み、膜構造の消波堤 (FLM) による波の反射・透過率およびエネルギー損失を計算し実験結果と照合した。本研究で得られた主な結果は以下のとおりである。

1) FLM の運動に伴うエネルギー損失は、地盤への

逸散ではなく、FLM の系の内部で消費されている。

2) FLM の運動に伴うエネルギー損失は、粘性減衰や履歴減衰の合成された構造減衰として捉えることができ、その減衰定数は周期に依存する。

3) 加振実験で得られた等価粘性減衰係数を用いて構造減衰として数値計算法に組み込めば、計算により FLM によるエネルギー損失の 50~80 % を考慮でき、透過率および反射率の定量的予測が可能である。

参 考 文 献

- 井島武士・上床隆彦・牛房幸光・小島治幸 (1986): 空気潜袋堤の波遮断効果の改善に関する実験的研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 387-391.
- 上床隆彦・井島武士・牛房幸光 (1983): 空気潜袋群による波の遮断一実験による考察一, 第 30 回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 385-389.
- 大山 巧・田中正博・清川哲志・宇多高明・村井慎美 (1988): フレキシブルマウンドによる反射・透過特性の理論的検討, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 562-566.
- 岡本舜三 (1970): 建設技術者のための振動学 (第 1 版), オーム社, pp. 11-38.
- 清川哲志・三俣正和・田中正博・大山 巧 (1987): 可動板型 Radiation Wave Generator による波浪制御, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 472-476.
- 田中正博・三俣正和・大山 巧・清川哲志・宇多高明・村井慎美 (1987): フレキシブルマウンドによる透過・反射特性の実験的検討, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 492-496.
- 田中正博・源波修一郎・堀 哲郎・佐藤 博 (1994): 港湾開口部に適用したフレキシブルマウンド (FLM) の消波効果と安定性, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 626-630.
- 長松昭夫 (1990): モード解析, 培風館, pp. 99-103.
- 山原 浩 (1974): 環境保全のための防振設計, 彰国社, pp. 79-95.
- 渡会英明・大橋康広・長崎作治 (1987): テキスタイルを利用した消波構造物の開発一消波特性に関する実験的研究一, 第 34 回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 502-506.
- D. V. Evans and C. M. Linton (1989): Active devices for the reduction of wave intensity, *Applied Ocean Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 26-32.