

圧気室をもつフレキシブルな潜水浮体の消波特性

Characteristics of Flexible-Type Submerged Floating Breakwater and Wave Transformation

和田 清*・松園昌久**・中村俊六*

Kiyoshi. Wada, Yoshihisa. Matsuzono and Shunroku. Nakamura

Characteristics of a flexible-type submerged floating breakwater with a pressurized air-chamber under wave action and wave transformations are investigated experimentally. As flexibility of the structure and floating motion depend on air pressure in the air-chamber, decreasing air pressure means to increase of membrane movement and floating motion. Since the dynamic motion generate radiation wave, wave transmission tends to be smaller in order to the interaction of the wave and incident wave. The type of the floating can decrease wave transmission relatively.

Keywords:(flexible-type floating structure, pressurized air chamber, radiation wave)

1. はじめに

近年、波浪制御機能に加えて景観や海水交換性などの機能を考慮した新しい形式の消波構造物が盛んに研究・開発されている¹⁾。構造物自体の運動によって発生する発散波 (radiation wave) を利用した波浪制御方法は、その発散波と入射・散乱波との位相干渉効果を利用したものであり、その消波が効果的に行われるためには、構造物が大きく運動し大きな発散波を発生させる必要がある。剛体の浮体構造物では、その運動モード数は6 (三次元運動の場合) であり、仮にそれぞれの固有周波数付近で運動、発散波が大きくなると考えても、位相干渉効果によって制御できる周波数帯は自ずと限定される。これに対して、波の作用を受けて形状が変形するフレキシブルな構造物は、膜面の運動・変形モードが多数あるために、発散波が大きくなる周波数が多く存在する可能性を有している。たとえば、空気潜袋堤²⁾やフレキシブル・マウンド³⁾などのように、ゴム膜面の運動を積極的に利用した消波用膜体構造物は、運動の多自由度性から広い周波数帯にわたっての消波が可能であり、また非砕波の状態でも剛の潜堤に比べて透過率を低減することなどが知られている。

著者らは、没水型構造物の優れた機能を継承しつつ、膜面の多自由度性を積極的に利用した新しい消波構造物として、圧気室をもつフレキシブルな潜水係留浮体を考案した。すなわち、ゴム製の袋体に水を充填して形成される可撓性膜体の運動と、係留浮体自体の動揺によって発生する発散波を積極的に利用する試みであるが、波動運動に順応して構造物形状が変形しながら浮体動揺を伴う複雑な現象であるため、その基本的な水理特性すら十分明らかにされていないのが現状である⁴⁾。そこで、本研究は、提案したフレキシブルな浮体を取り上げて、その浮体条件 (圧気室内圧力、没水深) の変化による波の反射・透過特性を、①緊張係留状態、②浮体動揺を拘束した固定状態、および③形状が変形しない剛体模型、との関係で比較検討しながら、可撓性膜面や袋体の運動と係留浮体の動揺による消波機構の差異を水理模型実験によって明らかにしようとするものである。

2. 実験の概要

実験は、豊橋技術科学大学環境防災実験棟の2次元鋼製造波水槽 (全長20m、幅0.8m、側壁高0.65m) で行われた。その一端にはピストン式の造波装置 (反射波吸収制御付) が、他端には約1/6勾配の消波用フレーム上にパンチングメタル、サンフレックスおよび六脚ブロックで形成された消波装置が設置されている。図-1に示すように、使用した模型は、円弧状断面の2次元模型で、構造物形状が波の作用によって変形するフレキシブルな模型 (変形模型) と、不変形な剛体模型の2種類である。変形模型は、上部材質がゴム製 (厚さ: 1.5mm)、下部のそれがビニール製 (厚さ: 2mm) によって囲まれた三日月状断面の袋体に水を充填した内部水部分と、その下側に浮力調整用の圧気室を設けた二重構造の膜体構造物である。なお、ゴム膜面の内側には、模型運動の2

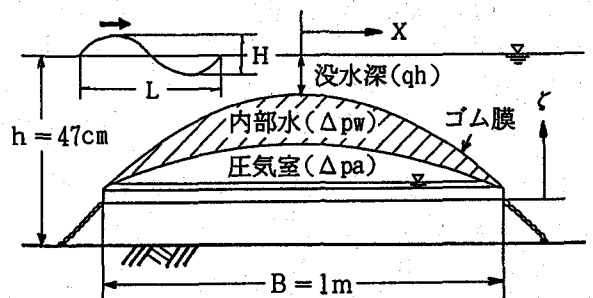


図-1 フレキシブルな浮体模型の構造

* 正会員 豊橋技術科学大学 工学部 建設工学系 (441 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

** 正会員 日本テトラポッド株式会社

次元性を保つために、水路幅方向にアルミ製のロッドが数本取り付けられている。予備実験の結果、袋体の内部水圧を若干高めても必ずしも高い消波効果が得られないなどの点から、初期内部水圧は、圧気室内空気量をゼロとした状態で外部の周辺圧力と同じ（初期付加水圧＝0）になるように設定した。また、変形模型の袋体および圧気室内部に組み込まれた注排水用、排気用ビニールパイプを外部に誘導し、マノメータによって内部水圧（pw）と圧気室内圧力（pa）が測定された。その結果の一例を示せば図-2のようであり、内部水圧の変化量（ Δpw ：初期水圧を基準）と圧気室内の圧力変化量（ Δpa ：空気量0を基準）が、構造物底部を基準にした鉛直上向きの圧気室内水位（ z ）との関係で示されている（没水深 $qh=6\text{cm}$ の場合）。同図から、水位 $z < 14\text{cm}$ の範囲では、圧気室内水位の増加（空気量の減少）とともに Δpa はほぼ線形的に減少し、それ以上では急激に0となること、また、内部水圧変化量 Δpw は、 Δpa の影響を受けて同様な変化をすることなどがうかがえる。構造物の柔軟性は消波特性を考える上で重要な因子と考えられる。

いまの場合、 Δpa の値は、浮力の増減を決定づけるとともに、内部水圧 Δpw の変化を通じて、ゴム膜面や袋体全体の多自由度な運動能力を支配している。なお、変形模型は可撓性であるので、 Δpa （あるいは Δpw ）の値によって若干形状が変化する。

実験条件は、表-1 に示すように、静水深を一定（ $h=47\text{cm}$ ）として行った。変形模型の場合、圧気室内圧力（ Δpa ）および没水深（ qh ）をそれぞれ3種類変化させ、変形模型をチェーンで緊張係留した浮体状態（変形係留模型）およびその浮体動揺を拘束した固定状態（変形固定模型）、の2種類の係留条件を設定した。実験波は規則波のみに限定し、入射波の波形勾配（ H/L ）を1/100、1/50の2種類採用した。発生波の周期は、0.8～2.0秒の範囲で変化させた20種類である。また、模型の設置位置は水槽のほぼ中央付近に設定し、模型沖側および岸側で同時計測された水位変動記録を用いて、反射率・透過率を3点法による分離推定法⁵⁾で算定した。なお、必要に応じて、模型前後の空間波形を約60cm間隔で計測し、スペクトル解析を行った。

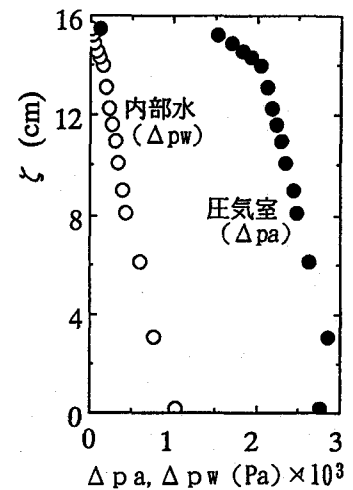


図-2 圧気室内の圧力変化

表-1 実験条件

case	模 型	係留方法	qh(cm)	$\Delta pa(\text{Pa})$
RA	剛体 (rigid)	固定 (fixed)	6.3	—
RB			11.1	—
RC			20.3	—
FFA0	変形 (flexible)	固定 (fixed)	6.0	0
FFA1			5.8	2430
FFA2			5.8	2773
FFB0			11.2	0
FFB1			11.0	2430
FFB2			11.0	2773
FFC0	変形 (flexible)	係留 (floating)	20.2	0
FFC1			20.3	2430
FMA1			6.1	2430
FMA2			5.6	2773
FMB1			10.8	2430
FMB2			10.0	2773

3. 実験結果および考察

3.1 変形固定（非係留）モデルにおける消波特性

図-3(a)(b)は、潜堤などのように構造物が着底した状態（没水率 $q=0.43$ ）において、剛体模型と変形固定模型の消波特性（反射率 K_R 、透過率 K_T およびエネルギー損失 E_L ）の差異を無次元模型長 B/L との関係で表したものである。ただし、波形勾配 $H/L=1/50$ の場合であり、すべて非碎波の状態である。なお、参考のために、 $\Delta pa=0$ とした FFC0 の場合についてのみ、 $H/L=1/100$ を併記した（図中：小丸印）。同図(a)から、変形模型の反射率 K_R は、全体的に剛体の場合よりも大きい傾向を示しているが、高々 $K_R < 0.2$

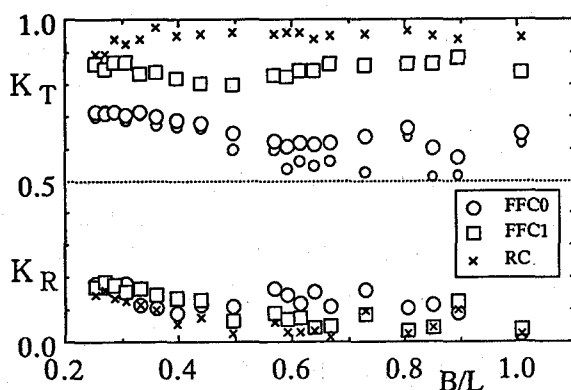


図-3(a) 変形固定模型の反射・透過特性

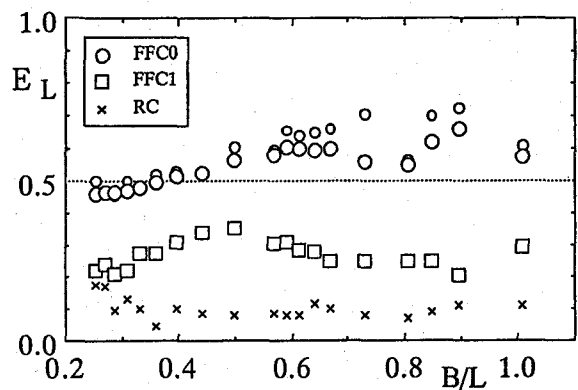


図-3(b) 変形固定模型のエネルギー損失

の範囲内であり、低反射であると言えよう。一方、透過率は、 $0.25 < B/L < 1$ の範囲で、それぞれほぼ一定値を示しており、 $FFC0 (\Delta pa = 0) < FFC1 < RC$ (剛体) の順に K_T が増加している。圧気室内に空気がない場合 ($FFC0$) では、 $K_T = 0.5 \sim 0.7$ の値となっていて、非碎波時でも模型をフレキシブルな構造とすることによって、透過波高を $2/3$ 程度にまで低減できることを示している。さらに、透過波形の周期特性は基本成分が卓越しておりほとんど変形しないので、近似的に入射波高比で得られた K_R 、 K_T からエネルギー損失 $E_L (= 1 - K_R^2 - K_T^2)$ を計算した結果を示せば、同図(b) のようである。剛体の場合には10%程度のエネルギー損失が生じているが、これは碎波以外の乱れ、たとえば構造物周辺の渦、摩擦などによるエネルギー損失が起因しているものと考えられる。一方、 $\Delta pa = 0$ とした $FFC0$ の場合 (図中○印)、50~70%のエネルギー損失が生じており、圧気室内の空気量をなくして構造物の柔軟性を増加させることによって、構造物のもつ波エネルギーの損失機能が高められることを示唆している。また、非碎波の条件下で、透過率が著しく低下するということは、消波原理が潜堤などの剛な構造物のように碎波や天端上での摩擦・渦によるエネルギー損失によるのではなく、膜体運動による消波機構が大きく関与しているものと考えられる。なお、 B/L の小さい長周期側において、剛体と $FFC1 (\Delta pa \neq 0)$ の K_T や E_L が同程度の値になる傾向は、 Δpa の値に依存する膜面や袋体の運動能力には上限があって、長周期波における制御効果が低減することを示唆しているものと考えられる。

図-4は、没水率が小さい場合 ($q = 0.13$) における透過率 K_T を B/L との関係で示したものである。ただし、 $H/L = 1/50$ の場合であり、碎波が生じた場合は図中十字印で示している。同図を見ると、変形固定模型の透過率は、 B/L の全領域で剛体の場合より明らかに小さく、また、 $B/L > 0.5$ の範囲において、 $FFA0 (\Delta pa = 0) < FFA1 < FFA2$ の順に透過率が低減しており、圧気室内圧力 Δpa の値によって異なる構造物の柔軟性 (膜面や袋体の運動) の影響が明瞭に現れている。特に、 $FFA0$ の変化は他者とは異なり、 $B/L > 0.7$ では、きわめて低い一定値 (0.2以下) となっており、 $B/L < 0.7$ の範囲では、 B/L の減少に伴って透過率がほぼ直線的に増加しているのが特徴的である。さらに、 $B/L < 0.4$ の範囲では三者の透過率に差異はほとんどなく、比較的長周期の波浪に対しては Δpa の値にかかわらず透過率が変化しないことがわかる。ただし、 $\Delta pa = 0$ とした場合には、他者に比べて碎波の発生を長周期側に移行させるなどから、圧気室内空気量を零とすることによる碎波エネルギーの吸収機能は無視できないものと考えられる。

このように、圧気室内圧力 Δpa の値によって透過率が大きく異なることが指摘された。これらがどのような消波機構によって波が減衰したのかを明らかにするために、まず構造物通過直後の地点における時間波形を比較してみよう。図-5は、定常波動状態になってからの、構造物中心から透過側の地点 ($X = 60\text{cm}$) における時間波形を、 Δpa の値ごとに併記した例であり、 $q = 0.13$ 、周期1秒 ($B/L = 0.67$ に相当)、 $H/L = 1/50$ の場合である。なお、同図は波の非線形性の影響が小さい反射側における波形を同位相に一致させることにより、透過側の波形の位相を整合させている。同図(a) からわかるように、剛体の場合において、波峰付近が非常に急峻となっており、水深が浅くなることによる波の非線形性の効果が認められる。この場合、大きな波峰の背後に小さな波峰が存在しているが、波の分裂現象はあまり顕著ではない。一方、同図(b) の $FFA0 (\Delta pa = 0)$ の時間波形は、剛体の場合のような大きな波峰は存在せず、二つの波峰が同程度の高さになり、しかも剛体に比べて波の高さが著しく減少している。また、圧気室内圧力の値によって $\Delta pa \rightarrow$ 大と

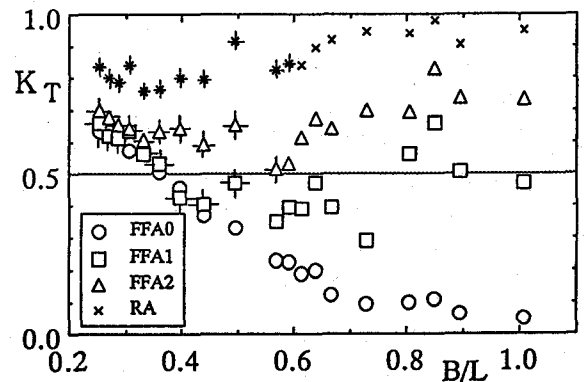


図-4 変形固定模型の透過率 ($q = 0.13$)

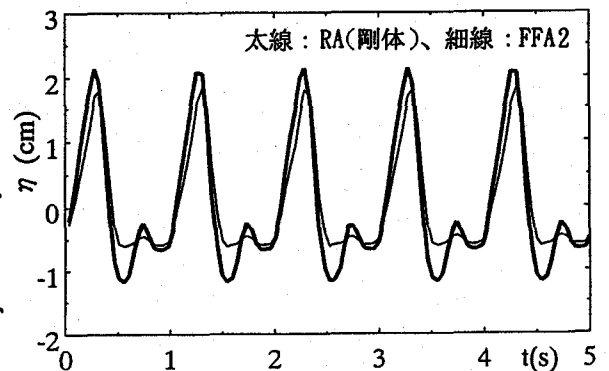


図-5(a) 剛体模型通過直後の時間波形

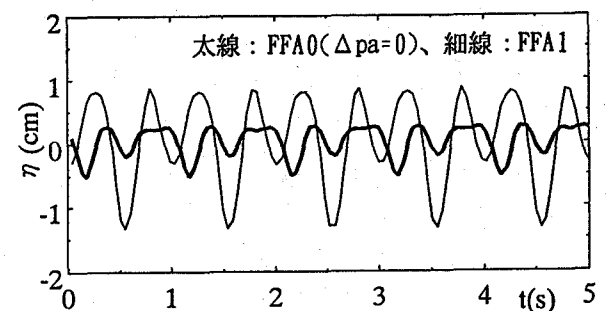


図-5(b) 変形模型通過直後の時間波形

したFFA2の時間波形は剛体(RA)のそれに類似し、 $\Delta pa \rightarrow$ 小としたFFA1はFFA0に近くなる傾向にあることがわかる。さらに、図-6は、図-5で得られた各々の時間波形をスペクトル解析した結果を示したものであり、横軸は、波形に含まれる各成分波の周波数 f を基本周波数 f_0 で除した無次元周波数、縦軸は各成分波のパワースペクトル P_n を基本周波数成分のそれ P_1 で除した無次元値である。同図から、 $\Delta pa = 0$ としたFFA0の場合(図中:黒塗り部分)、2および3倍周波数のスペクトル値が基本周波数のそれを上回っており、構造物通過直後において波形の特性が大きく異なっていることがわかる。一般に、潜堤などの構造物上を通過する波は顕著な波峰分裂を起こし、高周波数成分波を新たに生じさせ、潜堤通過後の波は、複数の成分波を含んだ非保存波として伝播することが知られている⁶⁾。本実験で取り扱ったような円弧状断面の構造物においても、通過後の空間波形を解析した結果、構造物天端上($X=0\text{cm}$)よりも波峰分裂現象が次第に顕在化する傾向がみられたが、構造物通過直後($X=60\text{cm}$)においてすでに各時間波形の変動幅自体が著しく異なっている点は、 Δpa の値に依存する膜面および袋体の運動のしやすさ、柔軟性が大きく関与していると考えられる。

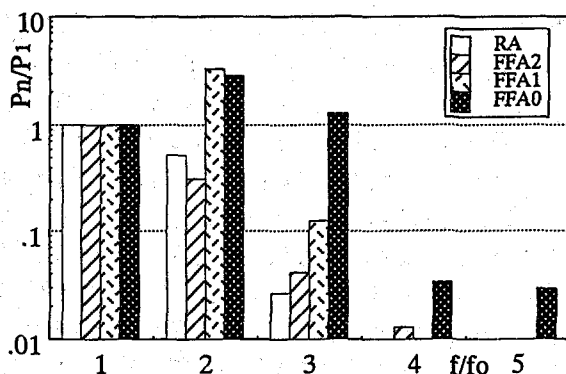


図-6 各成分波のパワースペクトルの比較

近年、周囲水よりも若干圧力が高くなるように水を充填したゴム製の袋体を用いた可撓性の潜堤(フレキシブル・マウンド、以下FLMと略す)が開発・実用化されている⁴⁾。その消波機構は、従来の剛潜堤のように「強制砕波励起型」ではなく、袋体の変形・運動(主に、水平運動)に伴って生じる発散波と入射波との位相干渉や、袋体の運動に伴う波エネルギーの消費、などによって透過波が減衰されるものである。この場合、付加水压 $\Delta pw \rightarrow$ 大にするほど剛体に近くなるので、袋体の変形・運動の効果が発揮されにくくなり、逆に $\Delta pw = 0$ の場合には、構造物が水粒子の動きに追随して運動し、位相干渉を利用した波浪制御効果が期待できなくなると言われている⁴⁾。本実験で取り扱った構造物は、①圧気室と水を充填した袋体をもつ二重構造であること、②付加水压 Δpw を減少させて膜面や袋体の運動を促進させた方が透過率を低減でき、 $\Delta pw = 0$ とした場合が最も透過率が低くすることができる、などFLMと大きく異なる点がある。FLMは適度に付加水压を高めることによって、たとえば波の入射に伴ってFLMが透過側に傾いた後、復元力(付加圧力によって変化する)により逆の反射側に変形・移動する、といった水平方向の膜体運動を利用している。一方、本構造物において付加水压 $\Delta pw = 0$ とした場合、入射波の峰が構造物を通過する時、ゴム膜面は下方に押されて変形して内部水压を高め、入射波の谷が通過時にその圧力増加分が復元力となってゴム膜面の上下運動を促進させる点が対照的である。その消波機構の模式図を示したものが図-7である。同図(a)のように、圧気室内に空気が多量にある場合($\Delta pa \rightarrow$ 大)は、上向きの浮力と内部水の付加圧力(Δpw)の増加によって、袋体の上下運動および膜面運動が拘束される。逆に圧気室の空気量を0とした場合(同図(b))には、浮力はなくなり袋体の上下運動が促進され、付加圧力の低減によって膜面運動および袋体自体の上下運動が増加する。このように、本構造物を波の谷が通過する時、袋体は下方に押されて変形し、波の峰の通過時に元の形状に戻ろうとする運動が繰り返し行われ、袋体や膜面の運動に波エネルギーが消費される。換言すれば、その運動が拘束された剛体に比べて波のエネルギーを一部吸収する、一種の「波エネルギー吸収体」として機能しているものと考えられる。したがって、周囲水と袋体の内部圧力がほとんど同じになっても、これらの膜面および袋体の変形・運動が生み出す発散波と入射・散乱波との位相干渉によって、透過波を低減できるといえよう。

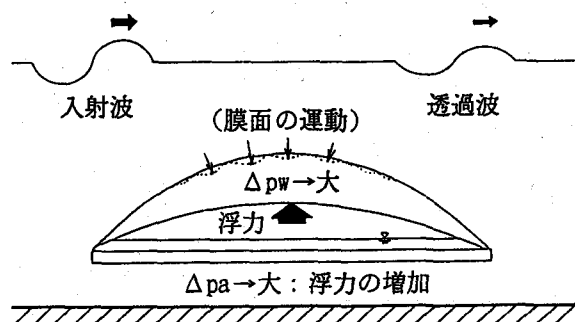


図-7(a) 消波機構の模式図 ($\Delta pa \rightarrow$ 大の場合)

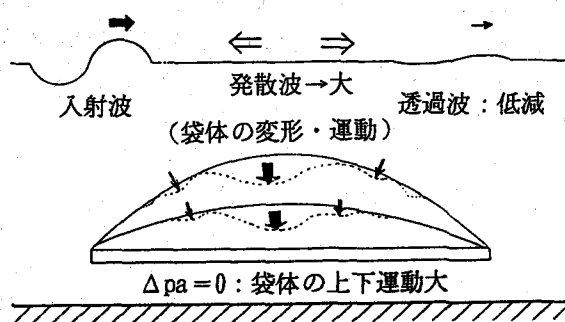


図-7(b) 消波機構の模式図 ($\Delta pa = 0$ の場合)

3. 2 変形係留モデルにおける消波特性

図-8は、圧気室内圧力(空気量)が小さい条件下において、模型の係留方法(固定・非係留、緊張係留)による透過率の差異を比較した一例である。ただし、没水率 $q=0.13$ 、 $H/L=1/50$ の場合であり、×印は非係留状態の $\Delta p_a=0$ とした場合である。同図より、係留方法の違いによって両者(FFA1とFMA1)は、 $B/L>0.5$ の比較的短周期側ではほぼ等しいものの、長周期側($B/L<0.5$)で有為な差異がみられ、緊張係留した方が透過率をより低減することができる($FFA1>FMA1$)。また、係留浮体は、 $B/L<0.5$ において、変形固定状態で最も透過率を低減できた空気量を0とした状態(FFA0)よりも明らかに透過率は低減しており、係留浮体の動揺によって生じる発散波の効果が表れている。すなわち、長周期波に対しては、同一空気量の場合、係留状態にして浮体動揺を促進させた方が効果的であることが指摘できる。図-9は、 $q=0.23$ の場合について図-8と同様の整理を試みたものである。同図より、両者(FFB1とFMB1)は、 B/L のすべての領域で透過率が $FFB1>FMB1$ の関係にあり、緊張係留の場合の方が透過率は低いことがわかる。特に、長周期側($B/L<0.5$)では、 $q=0.13$ の場合と同様、非係留・固定状態で最も透過率が低いFFB0(×印)よりもさらに低減でき、同一空気量の場合、緊張係留状態にして浮体動揺を促進させた方が消波効果は高いことを意味している。ただし、空気量が同じであっても、上述の透過率の差が、係留方式のみに起因するのではなく、膜面・袋体の運動と浮体動揺による発散波の発生が複雑に作用した結果とみることができる。すなわち、模型が非係留・固定された状態では、浮体動揺が拘束されているので膜面などの運動が最大限発揮されるが、緊張係留状態では、同じ波外力に対して浮体動揺に波エネルギーが消費されるため、浮体動揺を拘束した場合よりも膜面などの運動が発揮されにくくなる。このように考えると、本実験の場合、膜面や膜体の運動は比較的短周期波、浮体動揺は長周期波を消波するのに大きく貢献している。

図-10は、変形模型中心から透過側に $X=60\text{cm}$ および 3m 離れた2地点において同時計測された時間波形を、係留条件ごとに併記した一例であり、没水率 $q=0.13$ 、周期 1.5秒 ($B/L=0.36$)、 $H/L=1/50$ の場合である。同図(a)から、固定状態(FFA1)の場合には、模型通過直後(細線)の時間波形は波峰付近が非常に急峻となっており、波の分裂現象はあまり顕著ではない。しかし、模型中心から 3m 透過側の地点(太線)では、大きな波峰の背後に生じた小さな波峰が顕在化し、通過直後($X=60\text{cm}$)に比べて波の分裂現象が明瞭に現れている。一方、係留した場合(図(b):FMA1)、模型通過直後の時間波形には固定状態ほど大きな波峰はみられず、変動幅は固定状態に比べて小さい。また、 3m 離れた地点の時間波形(太線)には、基本成分はきわめて小さく、高周波数成分の混在が著しい。さらに、図-6で示したような各々の時間波形をスペクトル解析した結果を示せば、図-11のようであり、係留状態にしたFMA1の場合、2および3倍周波数のスペクトル値が基本周波数のそれを上回っており、浮体動揺によって生じた発散波は入射波と位相干渉した結果、基本成分が小さくなり高次の周波数成分が相対的に顕在化したものと思われる。

変形固定における消波機構は、前述したように、ゴム製の袋体の変形・運動によって生じる発散波と入射波

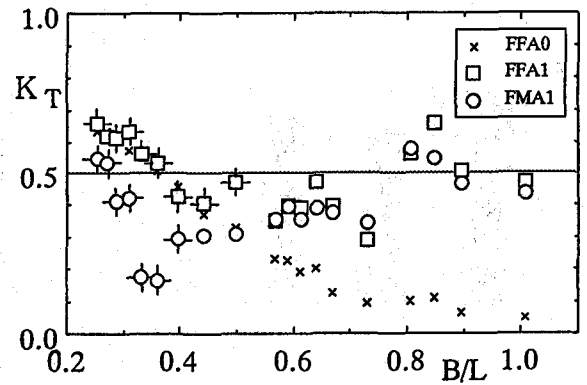


図-8 変形係留模型の透過率 ($q=0.13$)

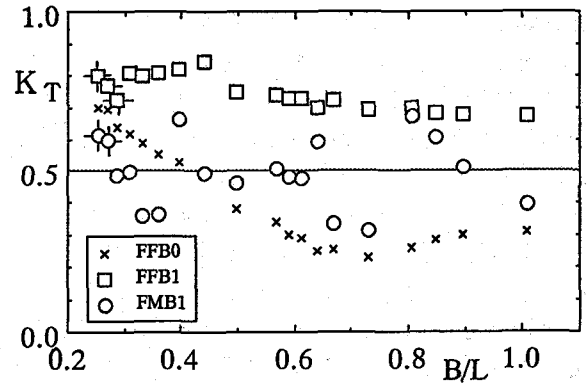


図-9 変形係留模型の透過率 ($q=0.23$)

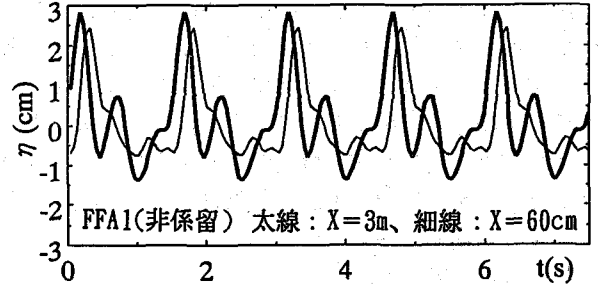


図-10(a) 変形固定模型通過後の時間波形

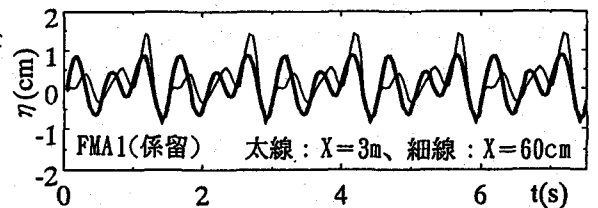


図-10(b) 変形係留模型通過後の時間波形

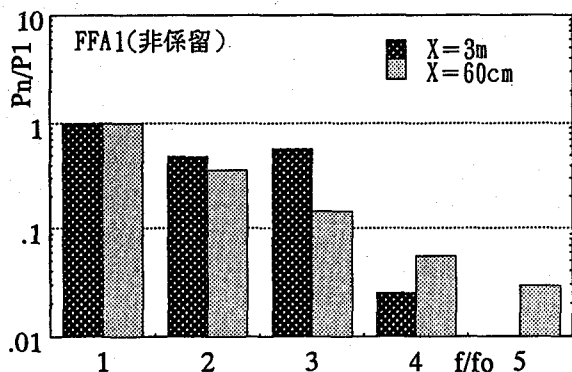


図-11(a) パワースペクトル (変形固定模型)

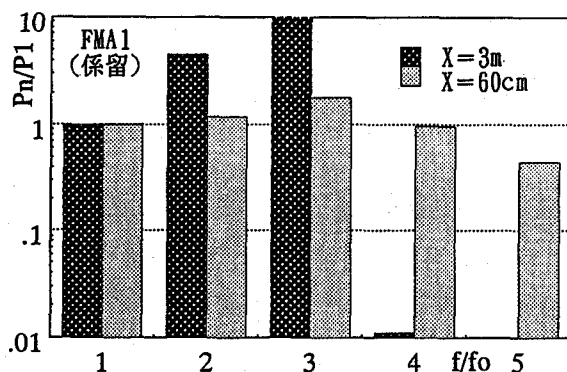


図-11(b) パワースペクトル (変形保留模型)

との位相干渉効果を含めた、一種の「波エネルギー吸収体」である。この発散波は 図-12 に示したように、浮体動揺によっても発生し、本保留模型の場合、この浮体動揺とゴム膜面の変形・運動の両者による消波効果によって透過波を低減しているものと思われる。これらのことから、本模型の消波機構は以下のように考えられる。短周期の波浪では、浮体運動による発散波を生み出すほどの波のエネルギーは供給されず、ゴム膜面の変形・運動による発散波によって透過波をある程度小さくしている。一方、長周期の波浪の場合、浮体動揺(特にrolling: 回転運動)が顕在化することによる発散波の発生が大きくなり、その波動と入射波との位相干渉効果によって、ゴム膜面の変形・運動による消波以上の効果が現れていると思われる。

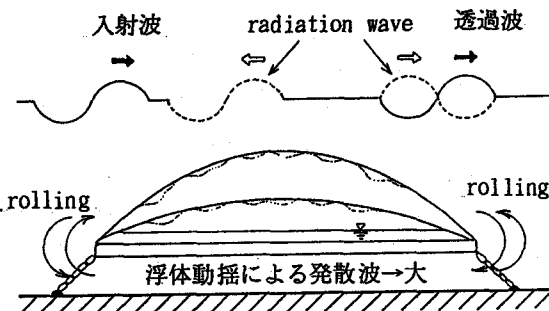


図-12 変形保留模型の消波機構の模式図

4. おわりに

以上、膜面の多自由度性を積極的に利用する観点から、水を充填したゴム製の袋体と圧気室をもつ二重構造のフレキシブルな潜水浮体を取り上げ、没水深、圧気室内空気量および保留方法によって、消波特性がどのように変化し、それらの消波機構を述べた。本研究で得られた主要な結論を列挙すれば以下のようなものである。

- ①剛体模型と変形模型の比較から、同一没水深 (qh) では圧気室内圧力 (Δp_a) や保留方法にかかわらず、変形模型の透過率は剛体模型の透過率より常に小さい。
- ②変形模型を非保留・固定した条件下では、付加水圧 $\Delta p_w = 0$ とした場合が最も透過率を低減でき、碎波の発生を長周期側に移行させることなどから、膜面や袋体の変形・運動による一種の「波エネルギー吸収体」として機能している。
- ③変形模型を緊張保留した場合、 Δp_w が同一条件下では、非保留・固定した状態よりも透過率をさらに低減でき、浮体動揺 (特にrolling) によって生じる発散波と入射波との位相干渉効果が消波機構として卓越する。
- ④変形保留模型は、比較的長周期の波浪 (波長 $L < 4B$) に対して、透過率を約 0.5 以下にまで低減することができ、長周期波の波浪制御の観点からはフレキシブルな保留浮体が構造形式として効果的である。

【参考文献】

- 1) たとえば、榎木 亨編：波と漂砂と構造物、482p.、1991.
- 2) 上床隆彦他：空気潜袋群による波の遮断、第30回海岸工学講演会論文集、pp. 385~389、1983.
- 3) 田中正博他：フレキシブルマウンドによる反射・透過特性の実験的検討、第34回海岸工学講演会論文集、pp. 492~496、1987.
- 4) 和田 清他：変形・圧気型保留浮体の消波特性に関する実験的研究、土木学会海洋開発論文集、vol. 8、pp. 283~288、1992.
- 5) 岩田好一朗他：三地点の水位記録を用いた不規則波の入・反射波の分離推定法、土木学会第38回年次講演会概要集、pp. 343~344、1982.
- 6) 大山 巧他：数値波動水槽を用いた潜堤による波の分裂現象の解析、海岸工学論文集、第38巻、pp. 16~20、1991.