

変形・圧気型係留浮体の消波特性に関する実験的研究

Experimental Study of Wave Transformations by Flexible-Type Submerged Floating Breakwater

和田 清*・中村俊六*・松岡昌久**

Kiyoshi Wada, Shunroku Nakamura and Yoshihisa Matuzono

Wave transformations by flexible-type submerged floating breakwater have been investigated in correlation with the variation of air depth in the air-chamber and submerged water depth experimentally. As a result, it can be pointed out that the wave reflection tends to be larger, the wave transmission smaller in order to generate radiation waves by dynamic behavior of the floating and membrane movement as the air depth and the submerged water depth decrease. This type of floating breakwater can control the wave reflection and transmission.

(Keywords): Wave transformation, Flexible-type floating breakwater, Pressurized air-chamber, Radiation wave

1. はじめに

近年、沿岸海域有効利用の観点から、汚染された海域環境の回復や美しい海岸環境の保全という機能も備えた新しい形式の海岸構造物の開発・研究が盛んに行われている。特に没水型の浮体構造物は、水面上に出ないという景観上の利点や、浮体上下面に遊水部をもつため岸側と沖側の海水交換性などの点で有利な機能を有している。没水型の浮体構造物は、波の作用を受けても浮体形状が変形しない不変形型と、逆に波動運動に順応して形状を変える変形型に大別される。たとえば、前者は、矩形あるいは円形断面などの単純な浮体の他に、浮体中央部に圧気室をもつ構造からなる圧気型の浮体構造物があり、圧気室内の空気圧を調整するだけで、浮体の固有振動周期を変化させるという特徴をもっている¹⁾。後者は、シート状あるいは膜状のものなどがあり、最近では膜面の運動を積極的に消波構造物として利用するタイプのものもいくつか提案されている²⁾。とりわけ浮体形式ではないが、ゴム製の半円筒状の袋体に周囲水よりも若干圧力が高くなるように水を充填して水底に設置した、柔構造の潜堤(フレキシブル・マウンド)は、変形可能なマウンドの運動によって発生する発散波の影響で高い消波効果を発揮する可能性が検討されている。このような柔な構造物はその運動の多自由度性によって、広い周波数帯にわたって消波ができることを示唆しており、有効な消波構造物となる可能性を有している³⁾。

本研究は、圧気型係留浮体とフレキシブルマウンドの利点を合わせもつ没水型の浮体構造物、すなわちワイヤーで緊張係留され、しかも波動運動に順応して浮体形状が変形可能な圧気型浮体を取り上げ、その浮体条件(没水深、圧気室高さの変化)に伴う波の反射・透過特性および構造物通過後の倍周波数成分の特性を水理模型実験で明らかにするとともに、不変形な剛体固定模型との差異を比較検討しながら、本モデルの消波構造物としての可能性を見い出そ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一部両面ガラス張りの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。水槽の一端にはA/Cサーボモータによる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消波用ブロックで形成された消波装置が設置されている。使用した模型は、図-1に示すように円弧状断面の2次元模型(浮体長B:1m)で、変形浮体模型(柔モデル)と剛体固定模型(剛モデル)の2種類である。柔モデルは、市販の透明ビニール(厚さ:2mm)で覆われた円弧状の柔部分とアルミ製のアングルで囲まれた長方形のフレームから構成されている。なお、柔モデルの場合、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が、今回は剛体モデルとの比較検討を重視した観点から膜材の剛性は1種類とし、空気量の変化に付随する柔らかさの変化が消波特性に与える影響を見ることとした。さらに、模型の運動の2次元性が保たれるように、柔モデルの膜面内側には水槽幅方向にアルミ製のロッドを配置した。係留索として4本のステンレス製ワイヤーロープ(直径:3mm、ヤング率:1.8×10⁶ kg/mm²)を使用し、水平床と係留索のなす角度(θ)が約45度に固定されるよう緊張係留した。一方、剛モデルは厚さ3mmの鉄板で加工した1種類で、柔モデルの設置条件と一致する位置に剛モデルを

* 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)

** 学生員 豊橋技術科学大学大学院

表-1 実験条件

(unit:cm)					
case	model	h	qh	ah	D
R-A-0	rigid	45	4.5	12.5	18.0
R-B-0			10.9	12.5	11.5
R-C-0			21.9	23.0	0.0
F-A-1	flexible		4.3	12.5	19.5
F-A-2			4.3	7.8	19.3
F-B-1			10.8	12.3	12.9
F-B-2			10.9	7.8	12.7

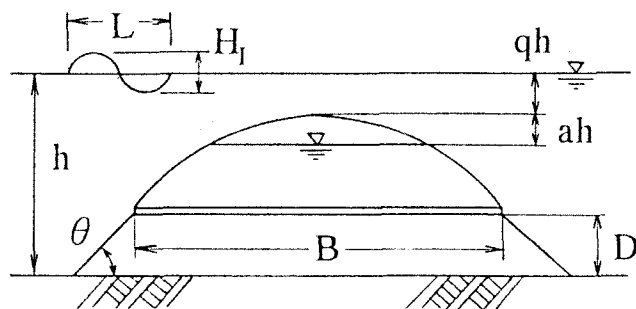


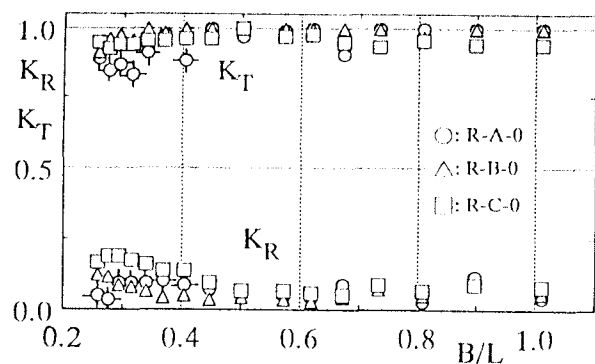
図-1 模型浮体

台座上に固定した。したがって、柔モデルは変形可能な浮体が係留されている状態に対して、剛モデルは構造物自体が変形・移動しない固定式である。

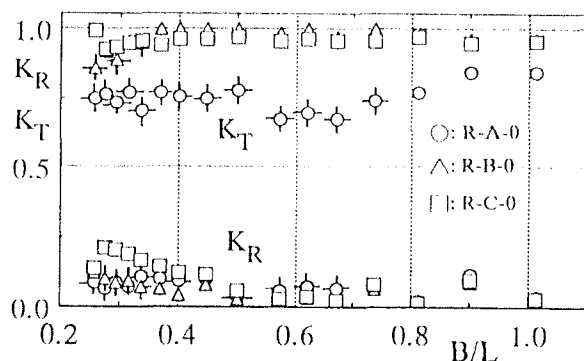
実験条件は、表-1に示すように、静水深(h)を45cmで一定とし、柔モデルの場合、圧気室高さ(ah)を2種類、没水深(qh)を2種類変化させた。ただし、予備実験の結果、剛モデルにおけるaが消波特性に与える影響はほとんど見られなかったので、剛モデルはqの変化(3種類)による実験のみとした。また、柔モデルはaによって形状が若干異なるが、条件設定に際しqを優先させることとした。実験波は規則波のみに限定し、入射波の波形勾配(H_1/L)を1/100、1/50の2種類採用した。発生波の周期は、原則として0.8~2.0秒の範囲で0.1秒間隔で変化させた13種類である。また、模型の設置位置は水槽の中央付近に設定し、反射率を模型沖側および透過率を岸側のそれぞれ3地点で計測された水位変動を用いて分離推定法で算定した⁴⁾。なお、浮体の動揺および碎波状況などは、ビデオカメラで撮影した。

3. 実験結果および考察

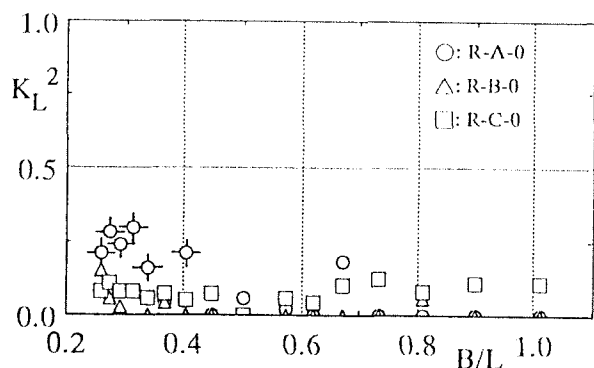
本節では、まず柔、剛両モデルにおける波の反射率・透過率・エネルギー損失について考察し、ついで構造物通過後の波動の特性、具体的には透過波における基本周波数成分と倍周波数成分の振幅比について検討する。



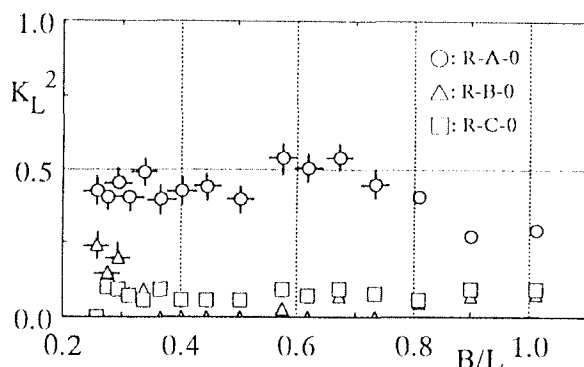
(a) 反射率: K_R 、透過率: K_T



(a) 反射率: K_R 、透過率: K_T



(b) エネルギー損失: K_L^2



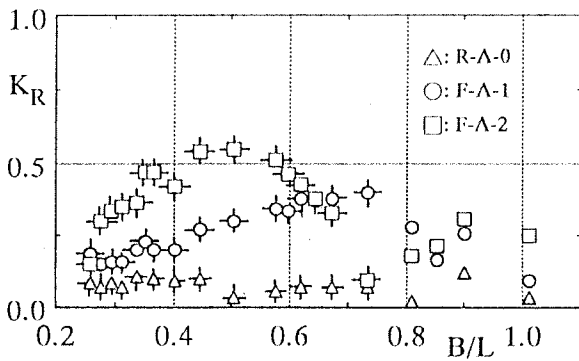
(b) エネルギー損失: K_L^2

図-2 剛モデルの反射・透過特性 ($H_1/L=1/100$)

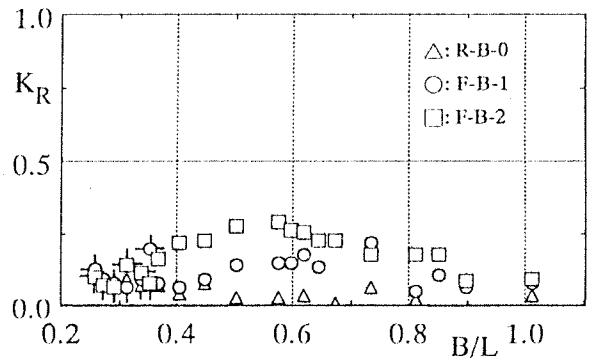
図-3 剛モデルの反射・透過特性 ($H_1/L=1/50$)

(1) 透過率、反射率およびエネルギー損失

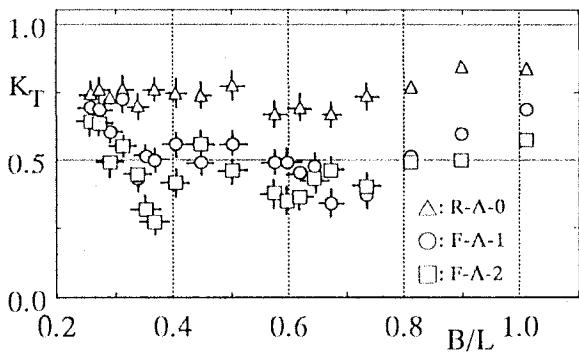
図-2、3は、没水率 q の異なる剛モデルの反射率 K_R 、透過率 K_T [図(a)] およびエネルギー損失 K_L^2 [図(b)] を無次元浮体長 B/L との関係で表したものである。ただし、図中十字バー ($\oplus$ など) は砕波が生じたことを示す。両図(a)から、 $0.25 < B/L < 1$ の範囲で周期が長く q が大きいほど K_R は若干増加するものの $K_R \leq 0.2$ であり、波形勾配による差異は見られない。一方、透過率は波形勾配による影響が見られ、特にほとんどの範囲で砕波が生じている case R-A-0 ($H_1/L=1/50$ 、 $q=0.1$ 、相対先端水深 $H_1/qh=0.6\sim 2.3$) の場合 [図-3(a)]、透過率は他に比べて小さく $K_T=0.7\sim 0.8$ 程度に低減される。他の場合は砕波が生じれば K_T は小さくなる傾向を示すが、非砕波の場合には $K_T \approx 1$ であり消波効果は得られない。また、エネルギー損失 $K_L^2 (=1 - K_R^2 - K_T^2)$ を求めた結果によれば、上記のcaseの場合、若干のばらつきはあるが、 $B/L=0.25\sim 1$ で30~50%のエネルギー損失を生じている。この損失は、砕波および砕波後の渦による擾乱が主原因と考えられる。また、 q が小さくなる、つまり浮体が静水面に接近するほど静水面近傍に集中している波のエネルギーの伝達域が狭くなると、波は透過しにくく反射しやすくなると同時に砕波しやすくなり、砕波によるエネルギー損失が透過率を減少させることに大きく寄与していると言えよう。したがって、剛モデルの場合、反射率がきわめて小さいため



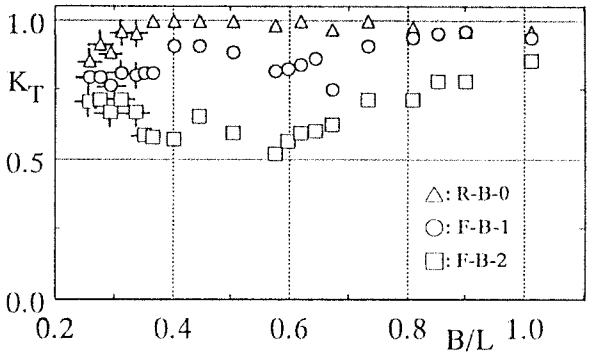
(a) 反射率: K_R



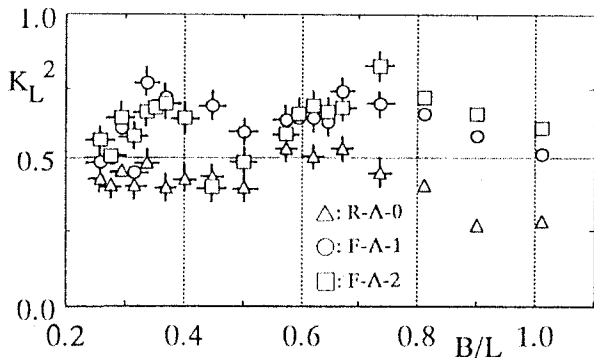
(a) 反射率: K_R



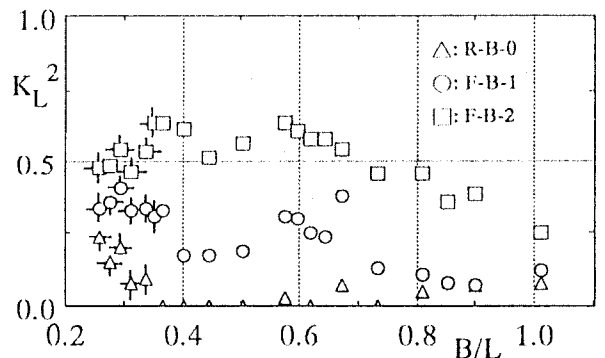
(b) 透過率: K_T



(b) 透過率: K_T



(c) エネルギー損失: K_L^2



(c) エネルギー損失: K_L^2

図-4 柔モデルの反射・透過特性 ($q=0.10$)

図-5 柔モデルの反射・透過特性 ($q=0.24$)

に透過率の低下がエネルギー損失の増加に対応していることがうかがえる。従来の剛構造潜堤における消波特性の知見によれば⁵⁾、天端幅が一定の場合、透過率 K_T は砕波条件と密接に関連する相対天端水深(H_1/qh)によってほぼ一義的に定まることが指摘されており、本モデルのような円弧状断面の剛潜堤の場合にも、相対天端水深が透過特性を支配する最も重要な指標であることがわかる。

一方、柔モデルの場合、圧気室高さの変化は浮体の固有振動周期および構造物としての柔軟性の変化と捉えることができる。すなわち、浮体内の空気が占める割合が小さい場合($a \rightarrow$ 小)、浮体は柔らかく動き易くなるため浮体全体の rolling の固有周期は長く、可撓性の膜体運動が発揮され易くなる。逆に、 a が大きくなると浮体は内部圧力の増加によって硬くなるので rolling の固有周期は短くなり、膜体運動が拘束される⁶⁾。換言すれば、 a を最小にして空気量を0とすれば、もはや構造物としてバランスできなくなり浮体の機能を失うことになり、逆に a を最大にすれば、可撓性の膜体運動が低下し浮体動揺による消波機能が卓越することになるので、浮体全体の動揺と膜体運動の両者による消波機能が最大限発揮される適正な空気室高さが存在することになる。

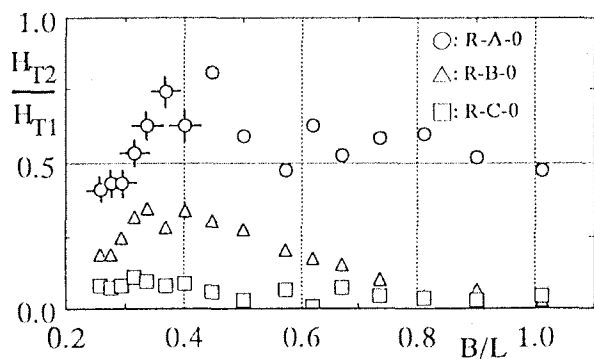
図-4、5は、没水率 q および無次元圧気室高さ a の違いによる剛モデルおよび柔モデルの消波特性をそれぞれ併記して表したものである。ただし、 $H_1/L=1/50$ であり、図-4は全体的に砕波が卓越する $q=0.1$ 、図-5はほとんど非砕波の $q=0.24$ の場合である。没水率が小さい場合[図-4(a)]、反射率は柔モデルの方が剛モデルよりも全般に大きくなっているが、 $K_R \leq 0.5$ であるので実用上特に問題はないと考える。 a の差異による K_R の変化は、それぞれの最大値が生じる B/L の値が異なり、case F-A-1の場合： $B/L \approx 0.7$ 、case F-A-2： $B/L \approx 0.5$ というように、 a が小さくなると K_R の最大値は長周期側に移動すること、また $B/L < 0.65$ の範囲では、 a が小さい場合の K_R の方が、大きい場合よりも明らかに大きいことなどがうかがえる。これらのことは、上述した浮体全体の rolling の固有周期の変化による影響が主に考えられる。また、没水率 q が大きい場合[図-5(a)]、 $K_R < 0.3$ のより小さな値となると同時に、図-4(a)で見られた同様な傾向が認められる。

さらに、柔モデルの透過率は、両図(b)のように没水率 q の違いに係わらず $B/L=0.25 \sim 1$ の範囲で剛モデルよりも全て小さくなっている。 q および a による変化を見てみると、 q が大きい場合[図-5(b)]、明らかに a の小さい方が K_T は低く、 q が小さい場合[図-4(b)]でも詳細にみれば、 a が小さい場合の方が全体的に K_T は小さい傾向にあり、透過率は剛モデル $>$ 柔モデル(a :大) $>$ 柔モデル(a :小)の順に低減している。このように、圧気室高さ a を調整することによって、実験範囲内では K_T を各々0.5~0.8および0.3~0.6にまで低減することが可能である。つまり、砕波・非砕波に関係なく、圧気室高さを小さくして空気量をある程度減少させると、その高さが大きい場合よりもさらに透過率は低減され、変形圧気型係留浮体が波浪制御構造物として有効であることが認められる。

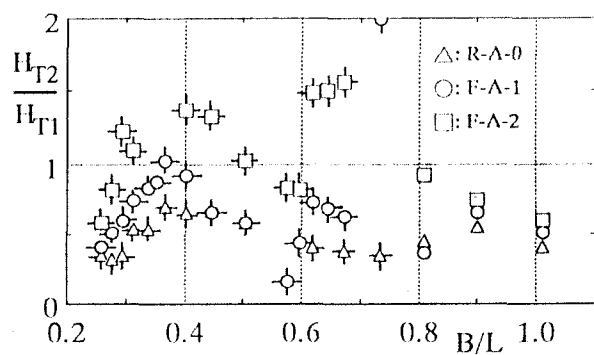
加えて、波のエネルギー損失 K_L を見てみると、 q が小さい場合[図-4(c)]、剛モデルとの比較からわかるように、砕波によって30~50%のエネルギー損失を生じているものの、柔モデルでは最大70~80%までのエネルギー減衰が可能である。また、 q が大きくなると図-5(c)のように、反射率が低くなるため透過率とエネルギー損失の対応関係が強く、透過率が低いときエネルギー損失は大きくなっている。ここで注目すべき点は、非砕波でも最大50~60%のエネルギー損失が生じるということである。このエネルギー損失の要因としては、膜材の構造減衰³⁾、浮体周辺で生じる渦の発生、水の粘性効果などが考えられるが、それらの検討は今後の課題である。また、砕波が生じていない領域でも透過率が著しく低下する[図-5(b)参照]ということは、本浮体による消波原理が浮体全体としての動揺および膜面の運動によって発生する発散波と運動を拘束した場合の透過波との位相干渉効果²⁾が大きな役割を果たしているものと考えられ、構造物透過後の波動の特性について以下検討する。

(2) 構造物通過後の波動の倍周波数特性

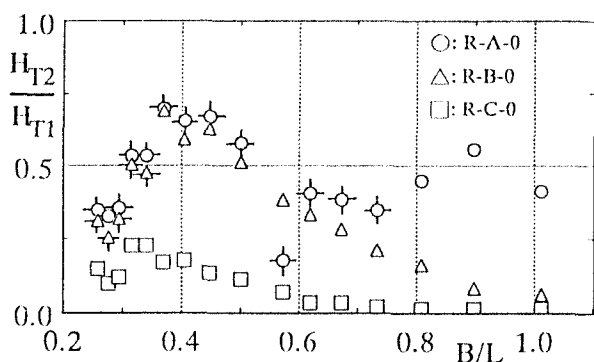
波の進行方向にある長さの没水水平版を設けることによって強制的に波を分裂させる方法が、小島ら²⁾によって検討されている。これは分裂によって励起された倍周波数成分の振幅がある大きさに成長することによって、通過波の見かけの周期が入射波のそれよりも不規則に短縮される、すなわち入射波を短波長の有義波に変換する機能を利用した消波の方法である。具体的には、水深の深い海域を進行する規則波が水深の浅い没水水平版に入射すると、それが微小振幅波であっても水深の急激な減少による自由表面条件の非線形性によって波が変形し波峰分裂を生じる。さらに、水平版上で砕波すると否にかかわらず、通過した波が再び深い海域を進むとともに、基本周波数の n 倍の周波数をもつ成分波に分裂し、各成分波がそれぞれの周波数に対応する位相速度で相互に作用することなく進行する現象と理解される。本モデルのように、構造物形状が曲面かつ変形可能な係留浮体については、没水物体自身の動揺と変形によって新たに発散波(radiation wave)が生じ波の変形はより複雑な現象となる。このため、没水物体の運動を拘束した剛モデルと比較することによってその影響を考察することとした。



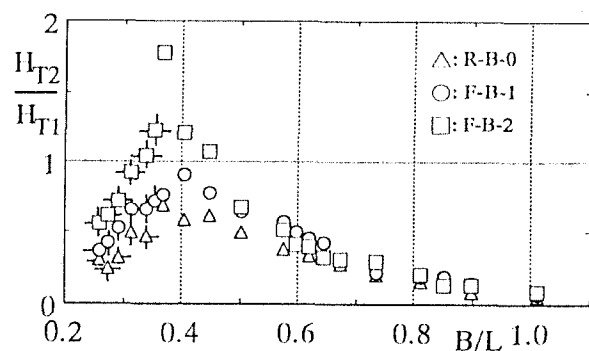
(a) $H_1/L = 1/100$



(a) $q = 0.10, H_1/L = 1/50$



(b) $H_1/L = 1/50$



(b) $q = 0.24, H_1/L = 1/50$

図-6 透過波の2倍周波数成分(剛モデル)

図-7 透過波の2倍周波数成分(柔モデル)

図-6は、剛モデルの透過波における基本周波数と2倍周波数の波高比(H_{T2}/H_{T1})を表したものである。ただし、図(a)は $H_1/L = 1/100$ 、図(b)は $1/50$ の場合である。両者の共通点は、没水率 q が大きいほど2倍周波数成分の発生比率は低く、 q の減少とともにその発生比率が増大することである。一般に、没水深が浅くなると、構造物上部を通過する波の非線形性が非常に大きくなる。事実、実験波形のビデオ解析によれば、モデル中心上では、非砕波の場合でも急峻な波峰が出現しやすく、水深が浅くなることによる波の非線形性が認められた。さらに、透過後の波形は基本周波数の波長よりは明らかに短い複数の波峰が伝搬し、モデル中心上に比べて波の分裂現象が明確に現れている。大山ら⁸⁾は没水構造物による非線形波の変形を数値解析によって明らかにし、潜堤上で新たに発生した倍周波数成分波は、潜堤背後の領域に進入すると自由波としての性質を強くもつため波峰分裂が顕在化することなどを指摘した。本モデルの場合、構造物形状が円弧状の曲面をし、入射波に対する実質水深が構造物範囲内で急減しているの、その浅水変形は矩形潜堤と全く同じではないが、いずれにせよ没水率が小さくてもほとんど砕波が生じない場合(図-6(a))、2倍周波数成分の発生は無視できない現象であるといえよう。ただし、その波高比が大きい割には透過率は1に近いので、剛モデルの場合2倍周波数の発生が前述した位相干渉としての消波効果は小さいものと推定できる。なお、全ケースにおいて、構造物沖側では部分重複波が形成されているが、反射波におけるその波高比(H_{R2}/H_{R1})は0.2以下であり、2倍周波数の混在はほとんどなく波の非線形性の影響は小さいことを付記する。

一方、柔モデルにおけるその波高比を示したものが図-7であり、図(a)は $q = 0.10$ 、図(b)は $q = 0.24$ の場合である($H_1/L = 1/50$)。両図とも、波高比は剛モデルよりも柔モデルの方が大きい。また柔モデルの場合、圧気室高さ a が小さいほど2倍周波数成分の発生は大きく、基本周波数のそれよりも大きくなる周波数帯も見られる。図(a)はほとんど砕波が生じているので2倍周波数発生傾向は捉えにくい、 $B/L = 0.4, 0.7$ 付近で2倍周波数の卓越状況がうかがえる。また図(b)の場合、 $B/L = 0.3 \sim 0.45$ で2倍周波数の波高が基本周波数のそれと同程度あるいはそれ以上の大きさになっている。これは、柔モデルによる透過率が $B/L = 0.3 \sim 0.5$ 付近で最小となるために H_{T1} が小さくなり、透過波のパワーとしては剛モデルの方が大きい値であるにも係わらず、 H_{T2} と H_{T1} の比としては柔モデルの方が大きい値を示すことになる。なお、波形勾配の差異における2倍周波数の発生は、絶対値は減少するものの類似の傾向があり、また3倍周波数の発生傾向も概ね同様である。

以上述べたように、柔モデルにおいて倍周波数成分を卓越させるためには、没水率に関係なく空気室高さをある程度小さくして空気量を減少させるほど効果的である。このように、発生した周波数成分は波峰分裂によって励起された透過波が、浮体の動揺や膜面運動などによって生じた発散波と干渉した結果であり、本モデルはそれらの位相干渉によって効果的に消波できる可能性を示唆している。

4. おわりに

本研究では、変形・圧気型係留浮体を取り上げその消波特性を実験的に検討してきた。得られた主要な結論を列挙すれば下記のようなものである。

- ①本浮体は、圧気室高さを大きくする（空気量、初期圧力の増加）と、同じ没水率では透過率は大きく反射率は小さくなる。逆にその高さを小さくすると、透過率は小さく反射率は大きくなる。このため圧気室内の空気量を少なくすると周期の長い波の透過率の低減に有効である。
- ②没水深が小さくなると、周期の長い波ほど砕波しやすくなるので透過率は小さくなり（0.3～0.5程度）、周期の長い波に対する伝達波高低減効果は大きい。
- ③本浮体は圧気室内の空気量を少なくすると、浮体の動揺（主に rolling）や膜面運動は大きくなり、それらによって励起された発散波と入射波の位相干渉の結果、浮体通過後の波動は倍周波数成分が無視できないほど卓越し、浮体周辺に発生する渦などによる減勢も加わって効果的な消波が行われうる。

本研究は、浮体動揺と膜面運動の両者による発散波を積極的に消波に利用しようとした試みであるが、剛体模型との比較によって消波特性の差異を検討したので、各々の消波機構については不十分であり予備実験の域を出ていない。今後、エネルギー損失を含め膜材の剛性による影響や消波機構について、実験・理論両面からの検討が必要不可欠である。

謝 辞： 本研究に際して、有益な助言を賜った名古屋大学岩田好一朗教授、水谷法美助教授および同大学院生金 度参氏に謝意を表する次第である。

【参考文献】

- 1) 岩田好一朗他：潜水圧気型浮防波堤の消波効果と波浪動揺特性、第35回海工論文集、pp. 567～571、1988.
- 2) 樺木 亨編：波と漂砂と構造物、技報堂出版、482p.、1991.
- 3) 田中正博他：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回海工論文集、pp. 492～496、1987.
- 4) 岩田好一朗他：3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、第38回年次学術講演会概要集、pp. 343～344、1982.
- 5) 永井莊七郎他：潜堤の消波特性に及ぼす天端幅の影響、第24回海工論文集、pp. 303～307、1987.
- 6) 金 度参：潜水圧気浮体の波浪動揺と波の変形に関する研究、名古屋大学工学部土木工学教室修士論文、pp. 16 1～16 25、1989.
- 7) 小島治幸他：没水水平版による波の分裂と波浪制御に関する研究、海工論文集、第36巻、pp. 529～533、1989.
- 8) 大山 巧他：数値波動水槽を用いた潜堤における波の分裂現象の解析、海工論文集、第38巻、pp. 16～20、1991.