

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

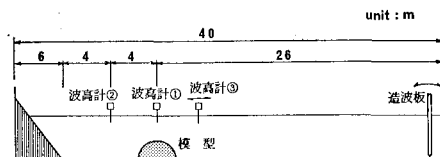
田中正博*・三俣正和**・大山 巧*・清川哲志***
宇多高明****・村井禎美*****

1. はじめに

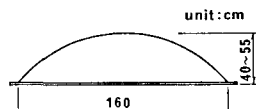
最近、海洋空間の有効利用、特に海洋レクリエーションのための沿岸域整備に大きな期待が寄せられている。このような空間を創出するためには、従来の波浪制御機能に加えて、美観を損なわない、利用する人の安全性が高いなどの機能を有する海域制御構造物が必要である。没水型構造物は美観を損なわず、ボートなどの航行を妨げず（デッドスペースをつくらない）、また海水交換の機能にすぐれているなどの利点を有している反面、頭出しの構造物と同等の消波性能を得るためには、構造物の天端幅を広くし、天端を水面近くにもってこなければならぬため構造物の断面寸法が非常に大きくなるという欠点がある。著者らは没水型構造物のすぐれた機能を継承し、かつ欠点を克服する新しい海域制御構造物として、ゴム堰のような袋体に水を充填して形成される可撓性膜の潜堤（以下、フレキシブルマウンドと称する）を考案した。このような構造物はこれまで実構造物はもちろんのこと、基礎的研究も行われていないので、その水理特性は全く分かっていない。そこで、本研究は従来の潜堤を想定した剛モデルと本研究で提案する柔モデルを用いて水理模型実験を行い、その透過・反射特性を比較した。また、構造物が動くことによる波浪制御への影響と消波メカニズムについても検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた装置は、図—1 に示すような全長 40 m、幅 4 m、深さ 1.3 m の 2 次元造波水槽で、その一端には油圧式造波装置が、他端には 1/6 勾配の消波用斜面が設けられている。使用した模型は、図—2 に示すように剛モデルと柔モデルともに円弧状断面の 2 次元模型で、柔モデルは膜材料の剛性の異なる 3 つのタイプを用意した。各柔モデルには、注排水用のチューブと空気を抜くための口を取り付けた。また、模型の運動の 2 次元性が



図—1 実験装置全体図



図—2 模型の断面形状

保たれるように、柔モデルの膜面に水槽の側壁と直交するようにロッドを配した。柔モデルはゴム製の袋体に水を注入して円弧状の潜堤を形成し、構造物の柔らかさは注入する水量で調整した。したがって、柔モデルは膜材の剛性および注入する水の量によって形状が若干異なる。

入射波高および透過波高は、図—1 で示した位置（それぞれ波高計①および波高計②）での波形が定常になった後の 10 波を平均して求められたものを用いた。また、反射率は模型より 2 m 離れた位置から波高計③を造波装置側にゆっくり移動測定させて得られた波高を Healey の方法で求めた値を用いた。

柔モデルの場合、構造物の柔らかさ・動き易さが重要なパラメータになるが、本研究では模型の中に過剰に付加した水圧 $4p$ （以下、付加水圧という）、膜材料の弾性係数 E および初期の膜の長さ l で表した。なお、付加水圧は模型の注排水口に取り付けたマンメータで測定した。

本実験で用いた模型および波浪の条件を表—1 および表—2 に、また、本報告に用いている記号を図—3 に示す。模型および波浪の条件からわかるように、実験は天端水深の小さい砕波を伴う場合と天端水深の大きい非砕波の場合について行った。写真—1 は、非砕波時の実験状況の例である。

* 正会員 清水建設(株) 技術研究所

** 清水建設(株) 技術研究所

*** 正会員 工博 清水建設(株) 大崎研究室

**** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室

***** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室

表-1 模 型 条 件

模型タイプ	堤体幅 D (cm)	堤 体 高 e (cm)	天端水深 R (cm)	非注水時の膜長 l (cm)	膜材の弾性定数 (kg/cm^2 , $\langle \text{MPa} \rangle$)	付加水圧 Δp (gr/cm^2)
剛 モ デ ル	160	40	10	—	—	—
柔 モ デ ル	タイプA	160	40	13, 40	21.8 (2.14)	1, 2.5, 5
	タイプB	160	41~47	16, 45~48	63.3 (6.20)	2.5
	タイプC	160	41~47	12, 46~49	1090 (107)	1, 2.5, 5

表-2 波 浪 条 件

水 深 h (cm)	50, 55, 80, 90, 95
周 期 T (sec)	0.7~2.1, 1.0~4.0
波 高 H_i (cm)	4, 8, 12, 16

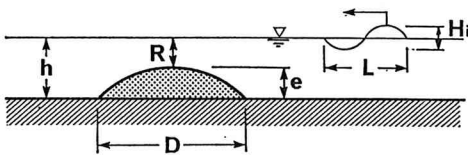


図-3 記号の定義

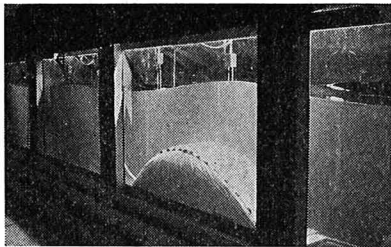
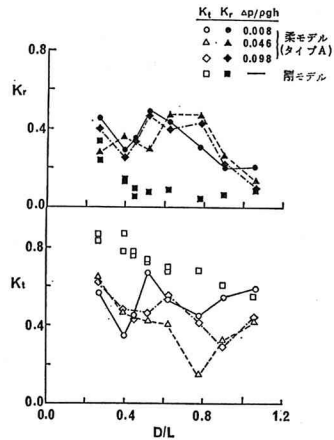


写真-1 非碎波時の実験状況の例

図-4 Δp の K_t , K_r への影響

大きくなっているが、 $K_r < 0.5$ であるので実用上特に問題はないと考える。

図-5 および 図-6 は、相対天端水深 R/H_i の違いによるそれぞれ剛モデルと柔モデルのタイプAの透過特性を示したものである。剛モデルの透過率は R/H_i の増加に伴って大きくなり、 $R/H_i = 2.3$ では D/L にかかわらず $K_t \geq 1.0$ となり、まったく消波効果が得られない。すなわち、本実験で取扱ったような円弧状断面の剛潜堤の場合も、従来から言われているように^{1),2)}、 R/H_i が透過特性を支配する最も重要なパラメータである。

一方、柔モデルの K_t は R/H_i に必ずしも依存せず、剛モデルではまったく消波効果が得られない $R/H_i = 2.0 \sim 4.0$ でも $K_t \leq 0.4$ にすることが可能である。

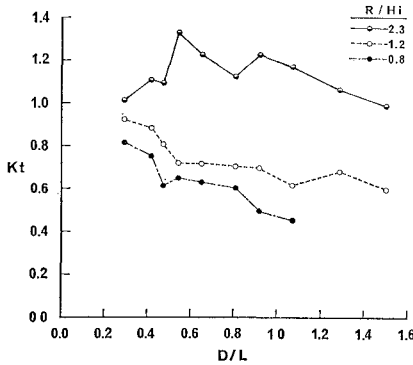
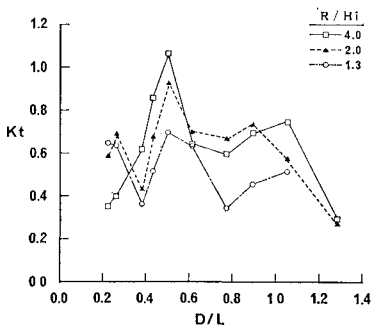
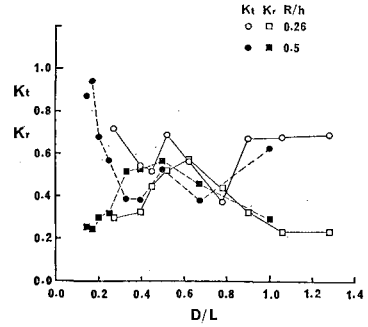
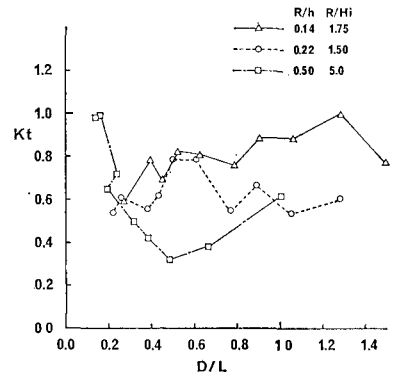
柔モデルの場合、碎波を全く生じない $R/H_i \geq 4.0$ で透過率が著しく低下するということは、フレキシブルマウンドによる消波の原理が従来の没水型構造物のように碎波と天端上でのエネルギー損失によるのではなく、構造物自身の動きによって発生する“radiation wave”と入射波との干渉が大きな役割を果しているものと考えられる。このように、フレキシブルマウンドは碎波しなくても消波することができるので、剛潜堤に比べて天端水深 R の大きい、かつ堤体幅 D の小さい構造物で大きな消波効果を得ることができることを意味している。

3. 実験結果および考察

(1) 碎波時の透過・反射特性

図-4 は、無次元付加水圧 $\Delta p/\rho gh$ (ρ : 水の密度, g : 重力加速度, h : 水深) の異なる柔モデルのタイプAと剛モデルの碎波時の透過率 K_t と反射率 K_r を示したものである。ただし、 $R/h = 0.24 \sim 0.26$, $R/H_i = 0.83 \sim 1.08$ である。柔モデルの透過率は堤体幅と波長との比 $D/L = 0.27 \sim 1.06$ の範囲で全て剛モデルよりも小さくなっており、フレキシブルマウンドが波浪制御構造物として有効であることがわかる。また、剛モデルの透過率が従来の剛構造潜堤（以下、剛潜堤と称する）と同じように D/L の増加に伴ってはば一様に減少するのに対し、柔モデルの透過率は D/L にあまり依存しない。したがって、フレキシブルマウンドは剛潜堤に比べて小さい堤体幅で消波できるものと考えられる。

一方、反射率は柔モデルの方が剛モデルよりも全般に

図-5 R/H_i の K_t への影響 (剛モデル)図-6 R/H_i の K_t への影響 (柔モデル)図-7 R/h の K_t, K_r への影響 (タイプ A)図-8 R/h の K_t への影響 (タイプ C)

(2) 非碎波時の透過・反射特性

図-7 は、柔モデルで最も膜材の剛性が高くほとんど伸びないタイプ A の没水率 R/h を変えたときの透過・反射特性を示したものである。ただし、 $\Delta p = 2.5 \text{ gr/cm}^2$ (245 Pa) ある。透過率 K_t は $D/L = 0.2 \sim 1.0$ のほぼ全域にわたって、 $R/h = 0.5$ の場合の方が $R/h = 0.26$ の場合よりも小さくなっている。一方、反射率 K_r は $D/L = 0.3 \sim 0.5$ の範囲で没水率の大きい場合の方が若干大きくなっている。

同様に、図-8 は柔モデルの中で最も伸びやすい膜材のタイプ C の R/h を 0.14, 0.22 および 0.5 に変えたときの透過率を比較したものである。ただし、 $\Delta p = 2.5 \text{ gr/cm}^2$ (245 Pa) である。弾性係数が小さく伸びの大きいタイプ C の場合も、 $D/L = 0.3 \sim 1.0$ の範囲で没水率 R/h が大きいほど透過率が小さくなっている。

これらの結果から、フレキシブルマウンドの消波特性は相対天端水深 R/H_i よりも没水率 R/h によって大きく左右され、剛構堤の場合とは逆に、 R/h を大きくした方が高い消波効果が得られることがわかる。特に、柔構造にすることによって没水率 $R/h \geq 0.5$ で透過率 $K_t < 0.5$ が得られるということは、きわめて注目すべき結果といえよう。

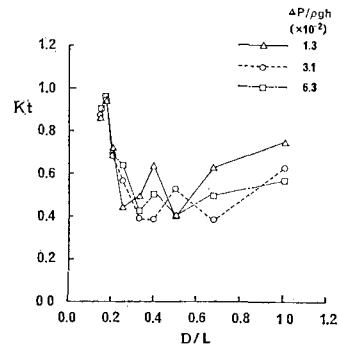
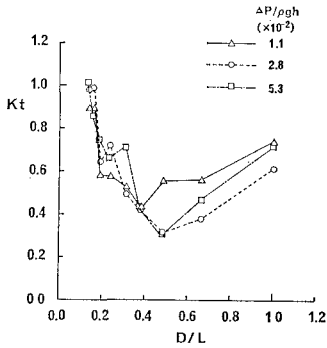
図-9 Δp の K_t への影響 (タイプ A)

図-9 および 図-10 は、それぞれ柔モデルのタイプ A および C の付加水圧 Δp を変えたときの透過特性を示したものである。

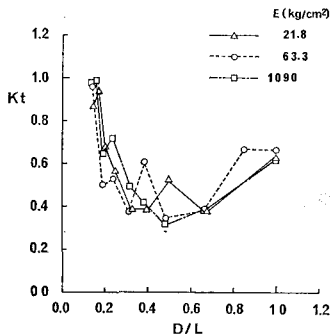
タイプ A および C ともに、 $\Delta p/pgh$ の最も小さした場合の透過率は $\Delta p/pgh$ の大きい場合に比べて若干ではあるが、 D/L の大きい (波の周期の短い) ときに大きく、 D/L の小さい (波の周期の長い) ときに小さくなっている。これは、 Δp が小さいと構造物は柔らかいのでその固有周期は長くなり、逆に Δp が大きいと構造物は硬くなるのでその固有周期は短くなるためと考えられる。しかし、

図-10 Δp の K_t への影響 (タイプ C)

本実験で扱った範囲では付加水压 Δp の違いによる透過特性への影響は小さい。ただし、 $\Delta p=0$ または袋体に十分な水が充填されていない場合には、構造物は水粒子とほぼ同じ動きになるので波浪制御効果は期待できない。また、逆に Δp を限りなく大きくすると剛体に近くなり、フレキシブルマウンドとしてのすぐれた特性は失われることになるので、適正な付加水压は存在する。

図-11 は、膜材料の剛性(弾性係数)の異なるタイプ A, B および C の透過率を比較したものである。ただし、 $\Delta p=2.5 \text{ gr/cm}^2$ (245 Pa), $R/h=0.50\sim0.51$ である。膜材料の剛性が大きいと構造物の動きが拘束されるので、構造物の固有周期は短くなり、逆に、膜材料の剛性が小さいと構造物の動きに対する拘束が小さくなるので、構造物の固有周期は長くなると考えられる。したがって、膜材の剛性の最も大きいタイプ A は周期の短い波(大きい D/L) に対して、逆に、膜材の剛性の最も小さいタイプ C は周期の長い波(小さい D/L) に対してそれぞれ消波効果が大きくなると予想される、しかし、若干バラツキはあるものの本実験で取扱った範囲では、膜材の剛性の違いによる消波効果への影響はほとんど認められない。

以上の結果から判断すると、ここで取扱ったような没水率の大きいフレキシブルマウンドの波浪制御特性は、没水率 R/h と相対堤体幅 D/L によって決まり、膜材料

図-11 膜材の剛性の K_t への影響

の剛性や付加水压の影響は小さいようである。しかし、各パラメータとフレキシブルマウンドの波浪制御特性に言及するためには、フレキシブルマウンドの固有周期を含めた消波のメカニズムに対する検討が必要である。

(3) 柔構造潜堤によるエネルギー損失

図-12 は、柔モデルタイプ C の周期 1.25 sec, 波高 8 cm の場合の入射波, 反射波および透過波の波形を示したものである。ただし、 $R/h=0.5$, $\Delta p=2.5 \text{ gr/cm}^2$ (245 Pa) である。 $R/h \geq 0.5$ の場合、フレキシブルマウンドを透過する波は全く碎波せず、透過後の波形もほとんど変形しない。したがって、透過時に分裂の生じる周期の長い波を除いて、透過率 K_t と反射率 K_r からエネルギー損失 K_l^2 を求めることができる。

図-13 は、柔モデルのタイプ A の付加水压を変えた(条件は図-9 に同じ)ときの波のエネルギー損失 K_l^2 を示したものである。若干のバラツキはあるが、付加水压に関係なく $D/L=0.2\sim1.0$ で 40~65% のエネルギー損失を生じている。剛モデルの場合、反射率が極めて低いため透過率の低下がエネルギー損失の増加に対応するが、柔モデルの場合、図-9 の透過率との比較からもわかるように、エネルギー損失は透過率によらずほぼ一定(約 50%) である。ただし、付加水压が小さく柔らかい場合には、透過率が低くなるとエネルギー損失が大きくなる。

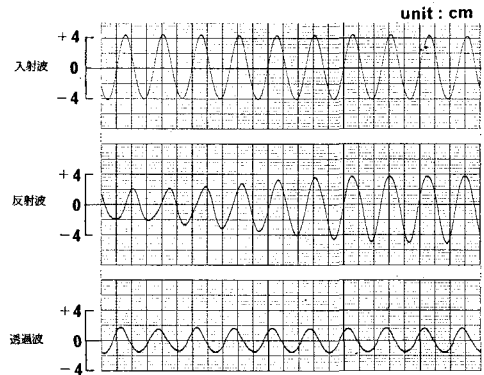


図-12 フレキシブルマウンドによる波形例

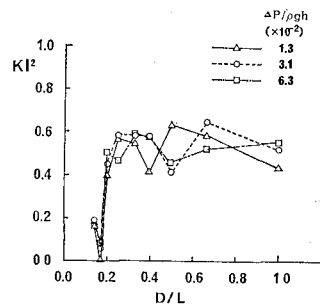


図-13 エネルギー損失 (タイプ A)

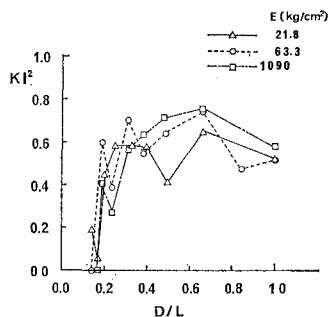


図-14 エネルギー損失(タイプ A, B, C)

なる傾向を示している。

図-14 は、タイプ A, B および C の $\Delta p = 2.5 \text{ gr/cm}^2$ (245 Pa) のとき(条件は図-11 に同じ)のエネルギー損失を示したものである。本ケースの場合、エネルギー損失は透過率とかなり対応している。すなわち、透過率が低いときエネルギー損失は大きくなっている。膜材の剛性や付加水圧のエネルギー損失への影響はまだよくわからないが、ここで注目すべき点は、非碎波で 40~70% 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の一つとしては膜材の構造減衰が考えられるが、今後そのメカニズムを明らかにする必要がある。

る。

4. おわりに

フレキシブルマウンドの消波メカニズムおよび波の透過・反射特性は従来の没水型構造物と全く異なることがわかった。すなわち、

①その消波原理は、剛潜堤のように碎波によるのではなく、構造物の動きによって発生する“radiation wave”と入射波との干渉および膜材の減衰効果によるものと考えられる。

②剛潜堤に比べて天端上水深が大きく ($R/h \leq 0.5$) かつ堤体幅が小さい ($D/L = 0.3 \sim 0.5$) 構造物ですぐれた消波性能を得ることができる。

今後、エネルギー損失を含め、消波のメカニズムを検討する予定である。

参考文献

- 1) 永井莊七郎・倉田克彦・長谷川恵一： 潜堤の消波効果におよぼす天端幅の影響，第 24 回海岸工学講演会論文集，pp. 303~307, 1977.
- 2) 田中則男： 天端の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について，第 23 回海岸工学講演会論文集，pp. 152~157, 1976.