

フレキシブルマウンドに作用する波力

田中正博*・大山 巧*・清川哲志**
宇多高明***・村井禎美****

1. はじめに

いま、海岸整備には波浪や漂砂の制御機能のみでなく、人々が快適に集い遊ぶことができる機能が求められている。これらのニーズに応える海域制御構造物として、柔構造の潜堤フレキシブルマウンド（以下、FLMと称する）を考案した。そして、FLMの反射・透過特性を実験および理論的に検討してきた。その結果、田中ら(1987a, 1987b)はFLMが構造物の運動に伴って発生する radiation wave と入射・散乱波との干渉効果によって消波を行うこと、構造物の没水率が 0.4~0.6 でも透過率を 0.5 以下にできることを明らかにした。また、大山ら(1988)は FLM の反射・透過特性を線形ポテンシャル理論に基づく数値解析法で評価できることを明らかにした。

そこで本研究では、FLM に作用する波力を把握し、基礎の設計・施工法を確立するため、杭基礎の設計という観点から鉛直および水平波力を、また膜構造、アンカーの設計という観点から FLM 固定部膜材に働く張力を主として模型実験により検討する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置および模型

はじめに本論文で使用する記号の定義を図-1に示す。実験に用いた水槽は、図-2に示すように、全長 40m、幅 0.6m、深さ 1.3m の 2 次元水槽である。本実験では、波力を模型下部に取付けた荷重計で測定するため、造波板から 15m の地点より 33m までの区間、底面を 0.3m かさ上げた。使用した模型は、厚さ約 1.5 mm の布引きゴム膜による幅 80 cm、高さ 19 cm、奥行き 60 cm の袋体で、図-2に示すような断面形状である。模型の運動の 2 次元性が保たれるように、模型の上膜に水槽の側壁と直交するようにロッドを配した。なお、模型には初期付加水圧を測定するマンメータと、波作用時

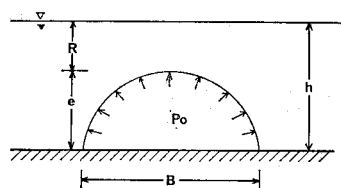


図-1 記号の定義

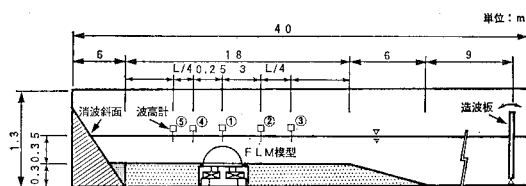


図-2 実験装置全体図

の内部の変動水圧を測定する圧力計を取付けた。

(2) 実験方法

本実験では次のような方法で波力、膜張力、波高等を測定した。

a) 鉛直波力および水平波力の測定方法

まず、ゴム製の模型底部を剛板に接着固定する。この剛板に防水加工したビーム型荷重計を取付け、さらに荷重計は水槽底板に固定する。鉛直波力を測定するときには、図-3(a)に示すように、ビーム型荷重計を模型剛板の両端近くにそれぞれ 2 基ずつ取付けた。これら 4 基の荷重計で測定された荷重を位相的に重ね合わせた合力をもって鉛直波力とした。一方、水平波力を測定するときには、図-3(b)に示すように、ビーム型荷重計を模型剛板の中央に 1 基取付けた。なお、測定方向と直交する方向の変位をできるだけ少なくするため、測定方向にのみ変位することが可能なリニアシャフトを剛板にそれぞれ取付けた。

b) 膜張力の測定方法

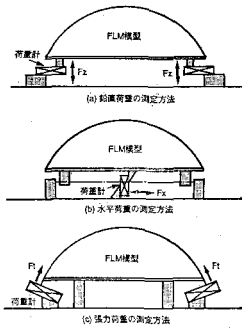
図-3(c)に示すように、模型両端の膜材にビーム型荷重計をそれぞれ 2 基ずつ取付けた。この時、荷重計はその測定方向が、静水時に模型端部に働く張力の作用方向と一致するように設置した。なお、模型は剛板上に載

* 正会員 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 海岸研究室長

**** 正会員 建設省河川局 海岸課



図—3 荷重の測定方法

せているだけで固定せず、模型に作用する外力はすべて荷重計で受持つようにした。

c) 波高および圧力の測定方法

初めに、模型を設置しないで図—2の波高計①で測定した波高をもって入射波とした。次に、造波板から25mの位置に模型を設置し、入射波の測定時と同一条件の波を作用させ、波力、波高などを測定した。

透過波は、図—2に示した波高計④と⑤で測定し、その平均値をもって透過波高とした。また、反射波は波高計②と③を移動させて測定した。なお、反射率は Healyの方法により求めた。

波が作用していないときの模型内部に加えた水圧 p_0 (以下、付加水圧と称す) は、模型の注排水口に取付けたマンメータで、波作用時の変動水圧は、小型水圧計でそれぞれ測定した。

なお、すべてのデータは波形が定常になった後の5～10波を平均した値を用いた。

(3) 実験条件

田中ら(1987b)、大山ら(1988)が明らかにしたように、FLMの消波特性に大きな影響を及ぼすパラメータは、堤体幅水深比 B/h 、堤体幅波長比 B/L 、没水率 R/h および付加水圧比 $p_0/\rho gh$ である(ただし、 R : FLMの天端上水深、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度)。そして、広い範囲の周期の波(すなわち、堤体幅 B を一定とするとき、広い範囲の B/L) に対して消波効果を得るための条件は、 $B/h=2.0\sim 3.0$ 、 $R/h=0.3\sim 0.5$ 、 $p_0/\rho gh=0.05\sim 0.1$ である。したがって、本実験では、 $B/h=2.3$ 、 $R/h=0.46$ ($B=80$ cm、 $h=35$ cm、 $R=15$ cm) で固定し、 $p_0/\rho gh$ を 0.05、0.1、入射波高を 4、8、12 cm に変化させた。また、周期 T は $B/L=0.15\sim 1.0$ に対応するように選んだ。表—1に主な実験条件を示す。

3. 実験結果および考察

本論文では、鉛直波力、水平波力および膜張力として、荷重計で計測された鉛直波力 F_z 、水平波力 F_x および膜張力 F_t をそれぞれ $\rho g B H_I$ で除して無次元化し

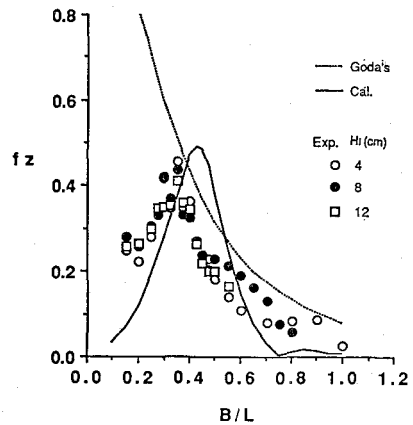
表—1 実験条件

p_0 (gf/cm ²)	1.7, 4.5
H_I (cm)	4, 8, 12
B/L	1.0 ~ 0.15 0.8 ~ 0.15 0.55 ~ 0.15
T (sec)	0.72 ~ 2.96

た値 f_z , f_x および f_t を用いる。

(1) 鉛直波力

図—4は、無次元鉛直波力 f_z と堤体幅波長比 B/L との関係を入射波高 H_I をパラメータとして示したものである。ただし、 f_z は上向きと下向きの波力の平均値であり、また、 $p_0/\rho gh=0.05$ である。なお、図中の実線は、線形ポテンシャル理論に基づく数値解析結果であり、破線は、合田(1977)による波力公式を適用して求めた結果である。また、図—5は図—4に示した波力実験における波の透過率 K_T の特性を示したものである。

図—4 鉛直波力 f_z の特性 ($p_0/\rho gh=0.05$)

図—4からわかるように、 f_z は B/L によって大きく変化し、いずれの波高の場合も $B/L=0.3\sim 0.35$ で顕著なピークが現われている。そして、 f_z のピークは、 K_T の小さくなる $B/L=0.6\sim 0.8$ ではなく、むしろ K_T の最も大きくなる $B/L=0.35$ で現われている。これは、 f_z が FLM の運動の振幅にほぼ比例するのに対し、 K_T の特性は FLM の運動振幅だけでなく、FLM の運動に伴って発生する radiation wave と入射波の波高および位相によって決まるためと考えられる。 H_I が大きくなるにしたがって、 f_z のピーク値は若干小さくなっているが、 H_I の違いによる f_z への影響は小さいことがわかる。

次に、実験結果と数値解析結果を比較すると、解析値のピークは実験値のそれよりも若干 B/L の大きい位置

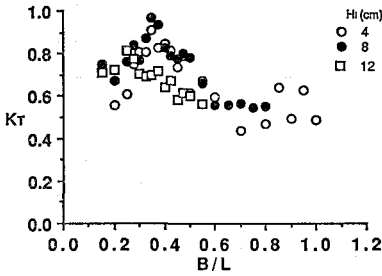


図-5 透過特性 ($p_0/\rho gh=0.05$)

で現われており、またピーク値も若干大きくなっている。本研究で実施した条件の範囲では、前述したように、入射波高が大きくなり碎波領域になっても、単位波高当たりの鉛直波力 f_z はあまり変わらないので、 f_z を線形理論による解析法で算定することも可能である。

次に、合田波力式による結果と実験結果を比較すると、 $B/L \geq 0.35$ の範囲では合田式の結果は実験結果の上限値の包絡線とほぼ一致している。しかし、 f_z がピークとなる $B/L=0.35$ を境に、合田式による f_z はさらに増大するが、実験結果は減少し、両者は逆の結果を示している。したがって、 f_z がピークとなる B/L を把握すれば、それよりも大きい B/L の範囲における鉛直波力を合田波力式により求めることができると思われる。

図-6 は、図-4 で示した $H_I=12$ cm の場合の無次元鉛直波力 f_z に加えて、上向きおよび下向き方向の波力を合わせて示したものである。 $B/L > 0.45$ においては、上向きの波力の方が、また、 $B/L \leq 0.20$ においては、下向きの波力の方がそれぞれ大きくなっているが、 f_z のピークの現われる $0.45 \geq B/L \geq 0.25$ の範囲では、上向きと下向きの波力はほぼ等しい。なお、図では示さなかったが、 $H_I=8$ cm および 4 cm の場合の場合にもほぼ同様な結果が得られた。

解析値のピーク値の方が実験値よりも若干大きくなること、波高の増加に伴って実験のピーク値はむしろ小さくなること、また、上向きと下向きの波力がほぼ等しいことなどから考えて、実用的には数値解析で求めた鉛直

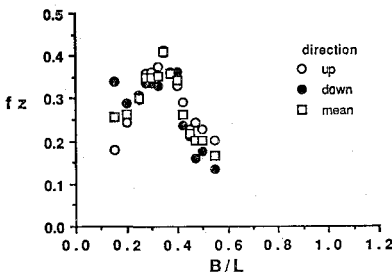


図-6 作用方向別鉛直波力 f_z の特性 ($p_0/\rho gh=0.05$, $H_I=12$ cm)

波力を設計に用いることができるものと思われる。

図-7 は、 $p_0/\rho gh=0.05$, 0.1 のときの f_z と B/L との関係を示したものである。ただし、 $H_I=12$ cm である。 $p_0/\rho gh=0.05$ の場合の方が $p_0/\rho gh=1.0$ の場合よりも $B/L=0.35$ の近傍で現われる f_z のピーク値が15%ほど大きい。これらの結果から判断すると、付加水圧 $p_0/\rho gh$ が波の透過・反射特性に及ぼす影響は大きい。鉛直波力に及ぼす影響は大きくないと考えられる。なお、 $p_0/\rho gh=0.05$ の場合に f_z のピーク値が大きくなるのは、 $B/L=0.35$ の近傍での K_T が $p_0/\rho gh=0.1$ の場合のそれよりも若干大きいと思われる。

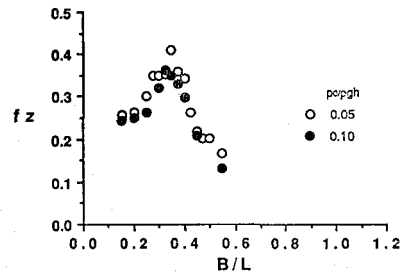


図-7 鉛直波力 f_z の特性 ($H_I=12$ cm)

(2) 水平波力

図-8 は、岸向き(+)方向(○印)および沖向き(-)方向(●印)の無次元水平波力 f_x 、両方向の f_x の平均値と B/L との関係を示したものである(以下、それぞれ $f_x(+)$, $f_x(-)$, $f_x(\text{mean})$ と記す)。ただし、 $H_I=8$ cm, $p_0/\rho gh=0.05$ である。 $f_x(-)$ と $f_x(+)$ の特性は大きく異なっており、特に、 $f_x(+)$ は、 $B/L < 0.7$ および $0.2 \leq B/L < 0.35$ で $f_x(-)$ よりも著しく大きくなっている。図には示さなかったが、 $H_I=12$ cm の場合も水平波力のピークは、 $f_x(+)$ で発生した。ただし、碎波しない $H_I=4$ cm の場合、 $f_x(+)$ と $f_x(-)$ はほとんど同じ結果となった。

したがって、設計上の観点からは、水平波力 f_x とし

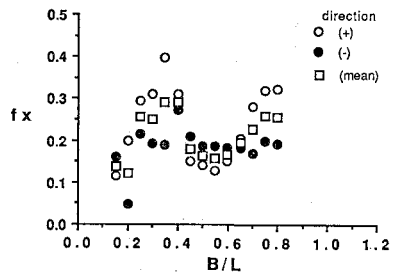


図-8 作用方向別水平波力 f_x の特性 ($p_0/\rho gh=0.05$, $H_I=8$ cm)

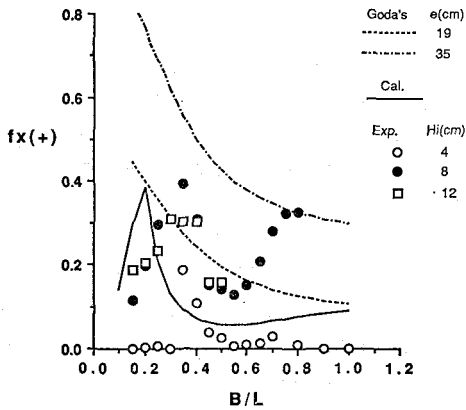


図-9 冲向き方向の水平波力 f_x の特性 ($p_0/\rho gh=0.05$)

て $f_x(+)$ を用いるのがよいと考えられるので、以下では、 $f_x(+)$ データを使用して考察する。

図-9 は、 $f_x(+)$ と B/L との関係を、入射波高 H_I をパラメータとして示したものである。ただし、 $p_0/\rho gh=0.05$ である。図中の実線は数値解析結果であり、また、破線および一点鎖線は、合田式で求めた水平方向の波圧分布を、高さ e がそれぞれ 19 cm, 35 cm の構造物に作用させたときの水平波力である。

無次元鉛直波力 J_z は、 H_I の影響を受けなかったが、 $f_x(+)$ は、 $H_I=8, 12$ cm の場合に、 $H_I=4$ cm の場合よりも B/L の全領域にわたって著しく大きくなっている。これは、 $H_I=8, 12$ cm の場合、FLM 上で入射波が碎波し、衝撃的な力が発生するためである。

そして、この衝撃力は通常の防波堤の場合と同様に主として水平成分に現われることがわかる。衝撃力を伴う水平波力 f_x は、 H_I が大きくなるに従って大きくなるものと予想されたが、 $H_I=12$ cm の場合の方が、 $H_I=8$ cm の場合よりも、 f_z のピーク値 ($B/L=0.35\sim 0.4$) が小さくなっており、予想とは逆の結果となった。これは以下のような理由によるものと考えられる。すなわち、FLM は多自由度の振動系であるので、運動の応答振幅は固有周期の近傍で急激に大きくなる。そして、波の分裂や碎波などを生じなければ、入射波高が異なっても単位波高当たりの応答振幅は等しくなる。 $H_I=4$ cm の場合、入射波は碎波しないので、FLM の運動は入射波の周期に対応した規則波としての応答を示す。一方、 $H_I=8, 12$ cm の場合、入射波は FLM の近傍で碎波するため、碎波後の波は入射波の周期のみならず、その 2 倍、3 倍の周期成分をもつ。したがって、規則波を入射したにもかかわらず、実際には不規則波を作用させたのと同じことになる。その結果、固有周期の近傍での応答振幅（ピーク値）は相対的に低下する（逆に、極小値近

傍での応答振幅は増大する）ことになる。そして、低下の割合は、激しく碎波する $H_I=12$ cm の場合に大きくなると考えられる。

(3) 膜張力

図-10 は、模型の沖側端部での無次元張力 $f_t(\text{front})$ (○印)、岸側端部での張力 $f_t(\text{back})$ (●印) およびその平均 $f_t(\text{mean})$ と B/L との関係を示したものである。ただし、 $H_I=8$ cm, $p_0/\rho gh=0.05$ である。

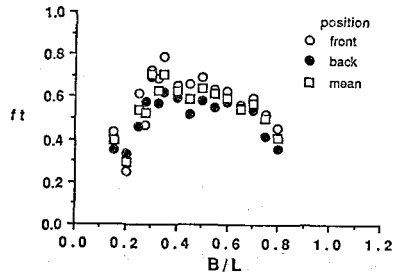


図-10 膜張力 f_t の特性 ($p_0/\rho gh=0.05$, $H_I=8$ cm)

先に検討した水平波力 f_x は、 $B/L=0.35$ 近傍でピークとなり、岸向き方向よりも冲向き方向の波力の方が大きかった。膜張力についても $B/L=0.35$ の近傍で最大となり、岸向きの力を受ける $f_t(\text{front})$ の方が、冲向きの力を受ける $f_t(\text{back})$ よりも大きくなっている。ただし、水平力が最大になると膜張力も最大になることを必ずしも意味しない。なぜなら、張力が模型の沖側端部および岸側端部各々の力であるのに対して、水平波力は両端部の力の合力（ただし、水平成分）であるためと考えられる。なお、図には示さなかったが、 $H_I=12$ cm の場合にも張力が最大となる $B/L=0.35$ 近傍において、 $f_t(\text{front})$ の方が $f_t(\text{back})$ よりも大きくなった。ただし、波形の変形しない $H_I=4$ cm の場合、 $f_t(\text{front})$ と $f_t(\text{back})$ はほとんど同じ値になった。したがって、FLM 端部の膜材やアンカーに働く張力は $f_t(\text{front})$ を用いて検討するのがよいと思われる。

図-11 は、FLM 袋体端部の膜材に働く張力 f_t と B/L との関係を、入射波高 H_I をパラメータとして示

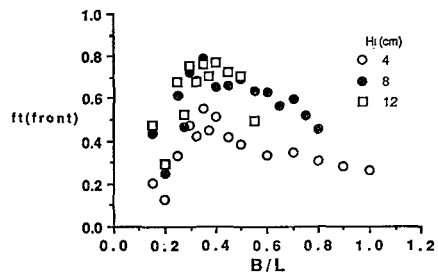
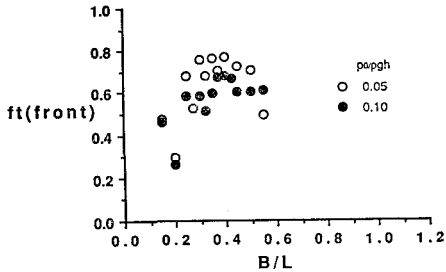


図-11 沖側固定部の膜張力 f_t の特性 ($p_0/\rho gh=0.05$)

したものである。ただし、 $p_0/\rho gh=0.05$ である。

$H_I=8$ cm および 12 cm の場合の $f_t(\text{front})$ はほとんど同じ特性になっているが、 $H_I=4$ cm の場合に比べて、 B/L の全領域にわたり大きくなっている。これはすでに述べたように、碎波によって大きな衝撃力が発生するためである。



図—12 沖側固定部の膜張力 f_t の特性 ($H_I=12$ cm)

図—12 は、 $p_0/\rho gh=0.05, 0.1$ のときの $f_t(\text{front})$ と B/L との関係を示したものである。ただし、 $H_I=12$ cm である。 $f_t(\text{front})$ は、 $p_0/\rho gh=0.05$ の場合に、 $p_0/\rho gh=1.0$ の場合よりも $B/L=0.3\sim 0.5$ の範囲で大きくなっており、両者の最大値の差は約 0.1 である。しかし顕著な差ではない。

4. おわりに

FLM に作用する鉛直波力、水平波力、膜張力に関し、以下のような点が明らかになった（ただし、以下に示す波力、張力は、本文中で定義した無次元化した波力 f_z 、 f_x および張力 f_t である）。

(1) 入射波高が増大しても、 f_z はほとんど変わらない。また、本研究で扱った範囲では、付加水圧比 $p_0/$

ρgh の違いによる鉛直波力への影響も小さい。

(2) 線形ポテンシャル理論に基づく数値解析で求めた鉛直波力は、実験値に比べて、ピークの出現する周期（または B/L ）が少しずつ、ピーク値は若干大くなる。しかし、設計上は最大波力が重要であるので、解析で求めた鉛直波力を設計に使用しても、実用上問題ないと思われる。

(3) 合田波力式により求めた鉛直波力は、実験値がピークとなる周期よりも短周期側では、実験値の上限値の包絡線とよく一致する。したがって、ピークの現われる周期がわかっている場合には、設計鉛直波力を、合田式により求めることができる。

(4) 水平波力 f_x と膜張力 f_t は、入射波が碎波すると著しく増大する。そして、 f_x の最大値は岸向き方向作用時に、また、 f_t の最大値は構造物の沖側端部膜材にそれぞれ発生する。したがって、 f_x および f_t は、模型実験によって得られた沖向き方向の力 $f_x(+)$ 、沖側端部での力 $f_t(\text{front})$ をそれぞれ設計外力とする必要がある。

今後、 f_x 、 f_t に関し、ピーク近傍における特性、さらに入射波高の大きい場合の特性について実験的に検討する予定である。

参考文献

- 大山 巧・田中正博・清川哲志・宇多高明・村井禎美 (1988): フレキシブルマウンドによる反射・透過特性の解析, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 562~566.
- 合田良実 (1977): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 85~88.
- 田中正博・三俣正和・大山 巧・清川哲志・宇多高明・村井禎美 (1987a): 可とう性膜人工礁による波浪の制御特性, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 534~535.
- 田中正博・三俣正和・大山 巧・清川哲志・宇多高明・村井禎美 (1987b): 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.