

外海養殖いけす施設の波による動的応答に関する研究

松原雄平*・野田英明**・西平福宏***

1. ま え が き

現在、わが国の沿岸域には数多くの養殖施設が係留設置されているが、海域汚染や漁業海域の拡大にともなうて、外海に係留する事例が増えつつある。従来、こうした水産施設は波浪条件の穏やかな内湾域を選んで設置されていたため、これまでの設計方法では、波浪と施設の応答現象については、とくに検討されていない。当然、このような設計法は沖合域の施設設計に適用できず、施設と波との動的応答現象を考慮した設計方法を確立する必要がある。また、各種の水産施設に見られるような網で構成された構造物が、波や流れに対してどのような挙動を呈するかについて研究された例としては、わずかに平面網地に作用する流体力ならびに流体力係数の評価について大沢ら（1982, 1983）が一連の模型実験から検討し、種々の条件に対する網地の抗力係数の算定法を明らかにした例が挙げられる。一方、中村ら（1988, 1989）は網地に作用する流体力ならびにいけす施設の応答計算モデルを提案している。

この研究では、沖合域に設置された養殖いけす施設の波浪による動的応答について、従来よりさらに広範な一方向流れ場あるいは波動場の条件下で網地に作用する流体力の測定を行うとともに、その結果に基づいて、波浪応答計算モデルを導き、応答計算ならびに模型実験の結

果等から、いけす施設の波浪応答特性を明らかにするものである。

2. 網地に作用する流体力特性

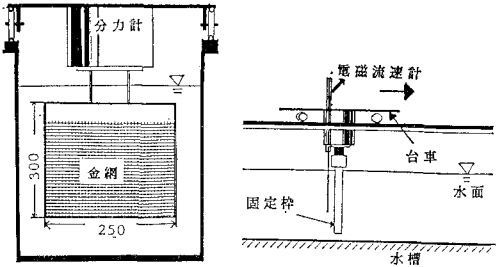
2.1 実験装置および方法

まず、いけす施設の主要構成材である網地の抗力係数ならびに慣性力係数を把握するため、静水中および波動場で流体力の測定実験を行った。実験に使用した水槽は、長さ 18m、幅 0.5m、高さ 0.6m の二次元波動水槽である。測定にあたっては、図一1 に示すように、台車から 3 分力計を懸架し、この受感部に強化プラスチックの支持棒を取り付けた流体力測定装置を用いた。実験に使用した網地は亜鉛製の金網で、表一1 に示すように種々の直径ならびに開口率を有している。

表一1 金網の特性

TYPE	直径(mm)	目合(mm)	射影面積(cm ²)	遮蔽率(%)
A	1.4	11.3	150.7	22.0
B	0.8	5.55	160.3	24.4
C	0.7	4.38	175.9	26.8
D	0.55	3.80	191.8	28.9
E	0.5	2.68	210.0	31.7
F	0.45	2.09	235.3	35.5
G	2.00	8.16	274.2	38.8
H	0.45	1.36	316.8	48.7
I	0.28	0.78	374.6	52.8
J	0.22	0.42	675.8	68.7

実験では、種々の条件で台車を引っ張り、まず支持棒のみに作用する流体力を測定し、その特性を求めた。その後、支持棒に金網を張り、台車を静水中および波動場中で運動させ、それにとまう流体力の変化を測定し、金網と支持棒両方に作用する流体力から前出の支持棒のみの成分を差し引いて網地に作用する流体力とした。静水中での台車速度ならびに波動場での水粒子速度を、台車に電磁流速計を設置して測定した。台車の運動速度は、5 cm/s～90 cm/s の範囲で設定した。台車の運動に



図一1 台車と測定装置

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工修 西松建設技術研究所

ともない、約 3 Hz の台車の固有振動が流体力の測定結果に混入したため、これを数値フィルターで除去した。一方、波動場での実験で設定した波浪条件は、水深を 45 cm と一定にし、波高 3.7 cm~9.4 cm、周期 1.1 s~1.5 s の範囲である。

2.2 実験結果

図-2 は、実験から得られた台車速度、3 方向の流体力の測定結果の一例を示したもので、台車速度の変化にともなって、直方向力も若干の変動はみられるが連動して変化している。一方、進行方向と直角方向の揚力成分の発生はほとんど見られない。

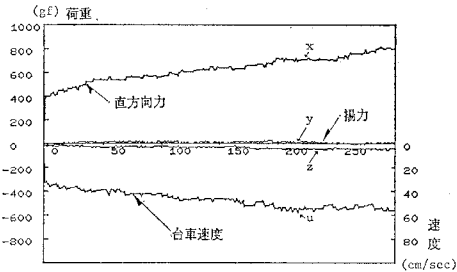


図-2 実験結果の一例

2.3 抗力係数、慣性力係数の算定法

静水中で網地を等速度運動させる場合、抗力係数は以下の式から計算される。

$$Cd = 2F / \rho AU_0^2 \quad (1)$$

ここに、 Cd : 抗力係数、 F : 測定流体力、 ρ : 水の密度、 U_0 : 台車速度である。一方、波動場における抗力係数、慣性力係数の算定は、両係数が時間的に変化しないものと仮定して測定波力と計算波力の差が最も小さくなるように係数を最小自乗法によって求めた。波力計算では、微小振幅理論を用いて、水粒子速度ならびに加速度を計算した。

2.4 実験結果

抗力係数は、二つの物理量すなわち網地の遮蔽率ならびに網地の径の関数と考えられるため、実験では、種々の開口率ならびに直径を持った網地を用いて、詳細に二つの物理量と抗力係数との関係を調べた。図-3 は、前述の方法から算定された遮蔽率 38.8%、網地径 2 mm のタイプ G の網地の抗力係数と網地のレイノルズ数 ($U_0 d / \nu$) との関係を示したものである。ここに U_0 : 台車速度、 d : 金網の直径、 ν : 動粘性係数である、図中の実線は実験結果から求められる回帰直線である。図より Re 数の値が 100 以下では、 Cd の値が変動しているが、 Re 数の値が 100 を越えると、 Cd は一定して減少する傾向を示している。同様の検討を他の網地にも加えたところ、抗力係数の値は、中村 (1989) が示したように

$$Cd = A Re^{-B}$$

で与えられ式中の A および B は、網地遮蔽率ならびに網地径の関数であり網地特性の変化とともにそれぞれ若干異なる値を示すことが明かとなった。しかしながら、今回の実験条件の範囲では、 A 、 B の変化が必ずしも明確でなく、関数関係を見いだすに至らなかった。そこですべての網地で測定された抗力係数の結果を Re 数の関係として、まとめて示したのが図-4 である。これより、網地の抗力係数は、レイノルズ数が 100 より小さい領域では、やや、変動幅がおおきいものの、レイノルズ数の増大とともに Cd の値が 2 から 0.6 程度までに直線的に減少することがわかる。また Re 数の小さい領域での Cd の値のばらつきの原因は、測定流体力の絶対値が小さいため、測定精度が低下することに起因しているものと考えられる。図中には、実験値から得られた回帰直線が示してあり、

$$Cd = 9.84 (Re)^{-0.36} \quad (2)$$

回帰式 (2) で、網地の抗力係数が算定されることになる。また、網地の KC 数と抗力係数との関係についても、同様の検討を行ったが、必ずしも両者の間に明確な関係を見いだすことはできなかった。

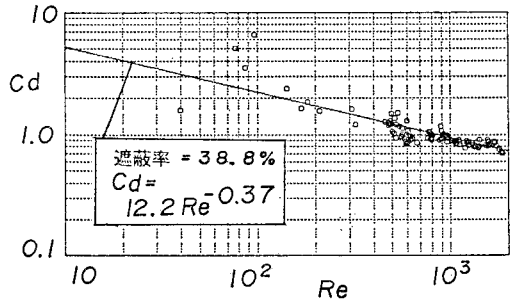


図-3 網地 G の抗力係数と Re 数

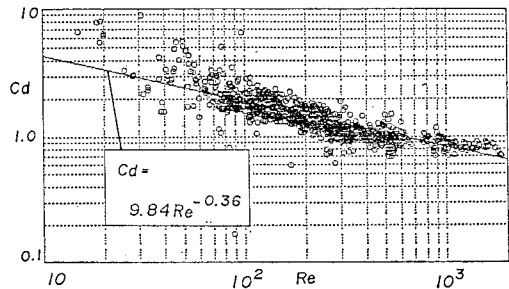


図-4 網地 G の抗力係数と Re 数

図-5 は、式 (2) から求められた抗力係数を用いて網地に作用する波力の時間的変化を計算し実験結果と比較したものであり、両者はよく一致していることがわかる。また、波力の時間的変化に関しては、水粒子速度の

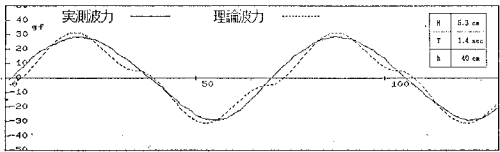


図-5 網地に作用する波力の計算値と実測値の比較

それとはほぼ同じ位相であることから、網地に作用する波力の成分としては、慣性力による寄与分は少なく、抗力成分が支配的であることを示している。

3. 養殖いけす施設の波浪応答特性

3.1 いけすの波浪応答に関する実験

図-6 に示すような、いけす模型を作製し、波動場での応答特性を測定した。この模型は、一辺が 20 cm の立方体形状をしており、その側面および底面を直径 0.45 mm、目合 2.1 cm の金網で覆ったものである。いけす模型の自重は、72.5 gf でそれ自身では、浮力を持たないため、上部の枠に直径 4 cm のプラスチック浮子を一辺に 3 個、計12個設置して浮力を与えている。

実験は、長さ 24 m、幅 0.6 m、高さ 1.1 m の二次元鋼製波動水槽にいけす施設模型を係留して行われた。この模型は、図-7 に示すように、水槽内に 2 点係留で係留されており、その係留索両端には、張力測定用の張力計が設置されている。表-2 に、模型の諸元を示す。緊張係留ならびに弛緩係留の 2 ケースの係留方法でいけす施設の波浪動揺特性を調べた。

模型係留索には伸縮のないステンレスワイヤーを使用した。

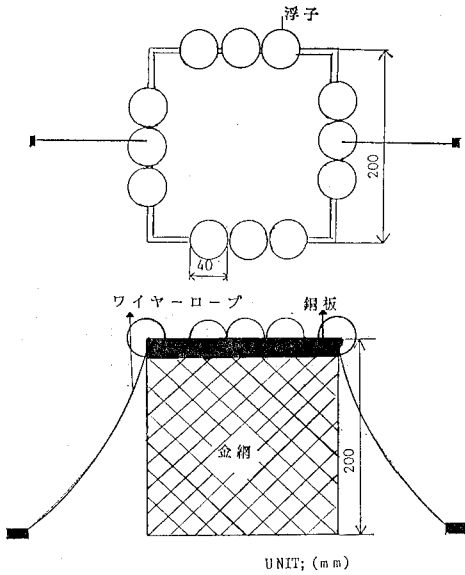


図-6 いけす施設模型

表-2 いけす施設模型の諸元

寸 法	20×20×20.	(mm)
網目の目合	2.09	(mm)
網目の部材直径	0.45	(mm)
重 量	291.05	(gf)
浮子の直径	4.01	(cm)
浮子の浮力	33.5×12=402	(gf)
浮子の重量	6.04×12=72.5	(gf)

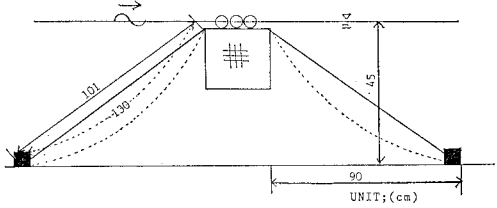


図-7 施設の設置状況

波浪中の施設の動揺を水槽外部からビデオカメラで撮影し、ビデオ解析システムで逐一読み取った。

波の条件は、水深を 45 cm と一定に保ち、波高を 2.2 cm～3.3 cm、周期を 1.0 s～2.5 s の範囲に設定した。

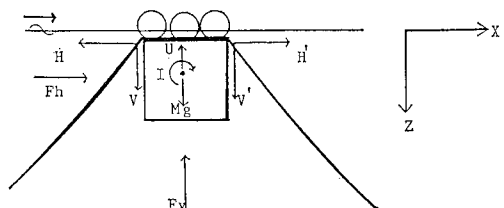


図-8 いけすに作用する外力と座標系

3.2 波浪応答計算

図-8 は、いけす施設の模式図ならびに施設に作用する外力と座標系を示したものである。いま、施設の X 方向に波が進行するものと考え、施設の運動は、以下のように水平 X 成分、ならびに鉛直 Z 成分の運動方程式ならびにいけすの重心回りの角運動方程式で表される。

X 方向; $M\ddot{X} = F_h + H_{A0} - H_A \dots\dots\dots (3)$

Y 方向; $M\ddot{Y} = F_v + U - V_A - V_{A0} - M_g \dots\dots\dots (4)$

回転; $I\ddot{\theta} = H_{A0} \cdot m - H_A \cdot h + F_H \cdot p \dots\dots\dots (5)$

ここに、 M は、いけす施設模型の水中重量、 U は、浮子の浮力、 F_h 、 F_v は、それぞれ模型に作用する水平方向の流体力である。 H_a および H_o は、それぞれ岸側および沖側の係留索張力の水平成分であり、 V_a 、 V_{a0} は、鉛直方向の係留索張力である。また、 θ はいけす施設の重心回りの回転量、 I は、いけす施設の慣性モーメント

であり, m , n および p は, それぞれ重心と, H_a , V_a および F_h までの距離である. また, $\cdot$ は, 時間に関する微分演算を示す. 流体力 F_h , F_v は, 相対速度および加速度を考慮したモリソン式で与えた.

すなわち,

$$F_h = C_m \rho V \left(\frac{du}{dt} - \ddot{x} \right) + C_a \frac{\rho}{2} A (u - \dot{x}) |u - \dot{x}|$$

$$F_v = C_m \rho V \left(\frac{dv}{dt} - \ddot{y} \right) + C_a \frac{\rho}{2} A (v - \dot{y}) |v - \dot{y}|$$

である. ここに, ρ : 水の密度, C_m : 慣性力係数, V : いけす容量, A : いけす投影面積, u , v : 水粒子速度の水平および鉛直方向成分である. 方程式 (3)~(5) の各項を差分化して数値計算によって緊張係留ならびに弛緩係留の 2 ケースについておのおの波浪応答量を計算した.

図-9 および 図-10 は, 数値計算から算定された, いけす施設の水平動揺量ならびに鉛直動揺量の時間的変化を示したものであって, それぞれ緊張係留ならびに弛緩係留の条件に対する結果である. 図中の実線, 破線が計算値を, また○印が実測結果を示している.

図-9 より, 緊張係留の場合, 係留ロープによって浮体の運動が拘束されるため水平変位ならびに垂直変位ともに入射波高の 25% 程度と小さく, ほぼ円運動を示している. また, この運動は, さらに波高が増大すると鉛直方向がより拘束を強く受けるために楕円運動となった. 実験値と計算値とを比較すると両者の位相ならびに最大最小値ともに, ほぼ一致しており, 実際の現象がよく再現されているといえよう. 一方, 図-10 から, ほぼ同じ入射波高の波に対し弛緩係留の場合は, その拘束が緩いために水平ならびに鉛直方向に相対的に大きな動

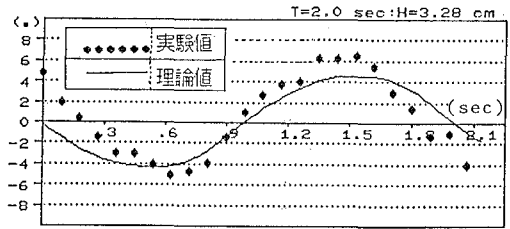


図-11 重心まわりの回転量の時間的変化 (緊張)

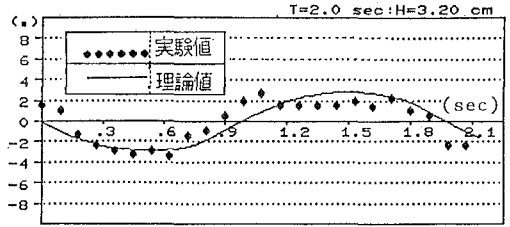


図-12 重心まわりの回転量の時間的変化 (弛緩)

揺量が生じており, ほぼ入射波高と同じ程度となっている. 数値計算結果と実測値とを比較すると両者の位相は一致しているものの, 変位振幅は実測値が 30% ほど大きくなっている.

図-11 および 図-12 は, 緊張および弛緩の 2 種類の係留法に対して得られる重心回りの浮体回転量の時間的変化について示したものである. 図-11 から, 緊張係留の場合, 浮体回転量が ± 6 度程度と大きく, 回転運動が顕著となっている. 一方弛緩係留の 図-12 の結果をみると, 回転量が ± 2 度程度, 緊張係留時の約 1/3 程に減少している. またいずれの結果にいても, 計算値は, 実測値の約 80% 程度と, 最大値に関しては, やや小さく現れているが, 位相もほぼ一致しており, この応答モデルではほぼ浮体の運動学的な諸量は算定できるとえよう.

図-13 は, 同様に緊張係留ならびに弛緩係留の各ケースにおける索張力の時間的変化について実験結果と計算値とを比較したものである. これより緊張係留の場合, 岸側索張力の変動が顕著であり沖側の変動量よりも大きくなっている. 計算結果にも, 同じ傾向が認められるが, 沖側張力の最大値は, 実験値が計算値を 40% 程上回っている. 弛緩係留に関しては, 沖側ならびに岸側張力とも同程度となっており, その変動幅も小さい. また実測値と計算値とは, ほぼ一致していることがわかる. 以上のことから, これまで述べてきた波浪応答モデルは, ほぼ, いけす施設の運動特性についてはほぼ予測し得るようであるが, 索張力等に代表される力学的な諸量についてはなお検討の余地がある.

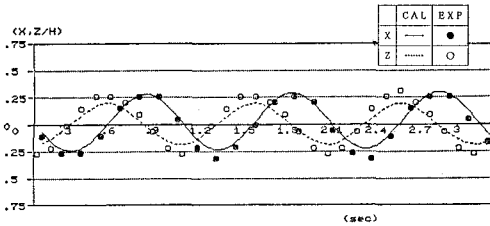


図-9 いけす施設の波浪動揺 (緊張係留)

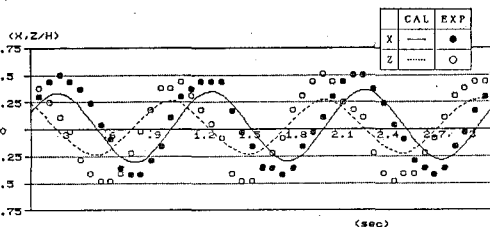


図-10 いけす施設の波浪動揺 (弛緩係留)

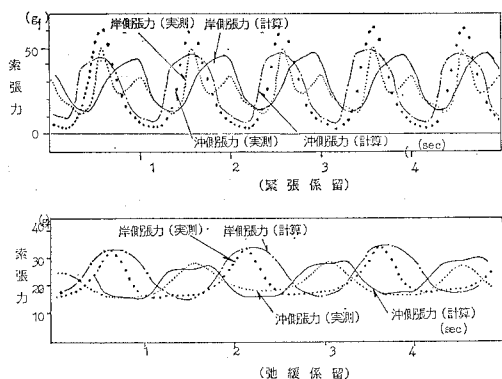


図-13 係留索張力の時間的変化

4. 結 論

本研究では、まず一方向流場ならびに波動場で平面網地の流体抵抗力を測定し、抗力係数ならびに慣性力係数の Re 数との関係を調べた。さらに、それらの結果に基づいて、同じ網地から構成される沖合いけす施設の波浪応答問題について検討を加えた。その結果、以下に示すことが明らかになった。

(1) 平面網地の抗力係数は、網地の遮蔽率ならびに網径により若干変化するものの、式(2)に示されるように網地のレイノルズ数の指数関数として与えられる。

(2) 網地に作用する波力は、抗力成分が卓越し、式(2)で算定される抗力係数でほぼ作用波力が見積られる。

(3) いけす施設を緊張係留した場合、その水平ならびに鉛直動揺は拘束を受けて、相対的に小さくなるが、浮体回転運動は、大きく現れる。一方、弛緩係留の場合、水平および鉛直動揺量が相対的に大きくなるが、回転運動は小さくなる。数値計算値と実験値の比較から、弛緩係留に対しては実験結果が計算値よりも約50%過大となったが、その他の場合は、両者ほぼ一致する。

(4) 係留索張力については、弛緩係留に関しては、計算値は実験値とほぼ一致したが、緊張係留に関しては、必ずしも一致するに至っていない。係留ラインの波との応答問題を含めてさらにモデルを改良する必要がある。

参 考 文 献

- 大沢要一・森 敬四郎・田原陽三 (1982): 平面網地の流水抵抗に関する研究Ⅰ, 水工研報告, 3号, pp. 227~238.
- 大沢要一・田原陽三・森 敬四郎 (1983): 平面網地の流水抵抗に関する研究Ⅱ, 水工研報告, 4号, pp. 183~196.
- 中村孝幸・佐伯信哉 (1988): 生簀網に作用する波力の特性について, 第39回土木学会中国四国支部研究発表会, pp. 159~160.
- 中村孝幸・松本博明 (1989): 海面いけすの波浪動揺の算定法について, 第40回土木学会中国四国支部研究発表会, pp. 142~143.