

# 津波来襲時における超大型弾性浮体の係留力に関する水理実験

岩手大学工学部 学生員○安倍 徹 正 員 堺 茂樹  
正 員 小笠原敏記 正 員 笹本 誠

## 1. 序論

国土の狭いわが国において、空港や石油備蓄基地といった大型施設の建設用地として浮体式人工島が注目されている。浮体式が注目される理由としては、従来の埋め立て式に比べ、耐震性に優れ、周辺の海域環境への影響が少ないということなどが挙げられる。しかし、その浮体式という特性ゆえに、たえず波や潮流の影響を受け、浮体をつなぎとめる係留装置には強大な力がかかる。係留装置が損壊した場合、浮体の漂流につながり、港湾などの海洋構造物へ衝突する恐れもある。特に、わが国は世界有数の地震国であり、頻繁に津波が来襲していることを考えると、浮体の安全性を確保する上で、津波来襲時の係留力の算定が重要な課題となる。本研究では、孤立波を津波の第一波とみなし、津波来襲時における超大型弾性浮体構造物の係留力のモデル化を試みた。

## 2. 実験装置及び実験方法

実験は、図-1に示すように長さ26m、幅0.8m、深さ1mの二次元造波水路を用いて行った。孤立波の造波には、吸収式造波装置を用いたが、これと同一の装置が水路後端にも設置されており、反射波の発生を抑制している。模型浮体として、長さ6m、厚さ3mmのアルミ板の下面に浮力体(発泡ポリエチレン)30mmを貼り合わせたものを用いた。模型浮体の密度及び曲げ剛性は $288\text{kg/m}^3$ 、 $102\text{N}\cdot\text{m}^2$ であった。係留装置はドルフィン係留方式を採用し、ステンレス棒を水槽上部に固定し、固定部の下方5cmの位置に貼られた歪ゲージにより棒の曲げ歪を測定することで係留装置に作用する力を求めた(図-2)。係留装置の剛性の影響を検討するため、断面が $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 、 $5\text{mm}\times 10\text{mm}$ の2種類のステンレス棒を用いた。予め、モーメントと歪の関係を求めておき、計測した歪をモーメントに変換し、求めたモーメントを歪ゲージから力の作用点までの距離で割り、係留力を算出した。孤立波の条件は、水深30cm、40cm、50cm、60cmの4種類、波高2cm、3cm、4cm、5cm、6cmの5種類として、合計20ケースの実験を行った。浮体前後の開水域での水位変動を容量線式波高計により測定し、浮体の鉛直変位は超音波式変位計を用いて測定した。

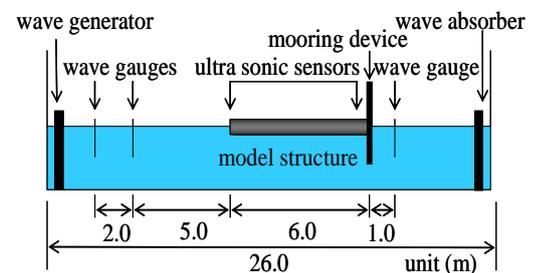


図-1 実験装置

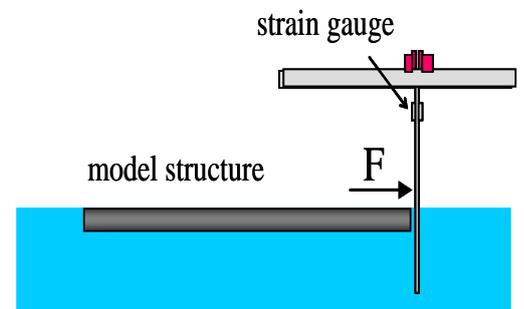


図-2 係留装置

## 3. 実験結果及び考察

まず、各水深下で、係留力に及ぼす孤立波の波高の影響を検討した。図-3に各水深における係留力の最大値と波高との関係を示す。係留力は波高の増加に伴い増加しているが、その増加傾向は水深ごとに異なっている。例えば、波高が小さい場合には水深が浅いほど係留力は大きい、波高が大きくなると前述の傾向が逆転する場合も現れる。このことから、水深及び波高によって系統的に係留力を求めることは困難である。

そこで、浮体に作用する流体力を検討した。浮体の水平方向の運動方程式は、以下のように表される。

$$F_w = m \frac{d^2x}{dt^2} + kx \dots \dots (1)$$

ここで、 $F_w$ は流体力、 $m$ は浮体の質量、 $k$ は係留装置のバネ定数、 $x$ は浮体の水平方向変位を表す。上式を用いて、実験で得られた係留力から流体力を求めた。図-4は、2種類のステンレス棒で計測した係留力と、その係留

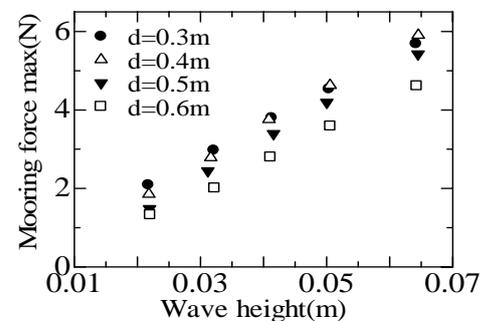


図-3 各水深における係留力と波高の関係

力から算出された流体力の時間的変化を示している。上図の係留力は、バネ定数が異なると値も異なるが、下図の流体力は、バネ定数によらずほぼ一致している。よって、波浪条件及び浮体条件が一定であれば、浮体に作用する流体力は一定であるといえる。

次に、流体力の最大値について検討した。その結果、各水深における流体力の最大値と波高との間には比例関係があることがわかった。そこで、流体力は孤立波の波高に比例すると考え、流体力の最大値を以下のパラメータで定義する。

$$F_{w\max} = \rho_w g h_s B H \dots\dots(2)$$

ここで、 $\rho_w$  は流体(水)の密度、 $g$  は重力加速度、 $h_s$  は喫水深、 $B$  は浮体の幅、 $H$  は孤立波の波高を表す。

図-5 は、 $\rho_w g h_s B H$  と、実験により得られた流体力の最大値との関係を、全ての波浪条件において示したものである。多少のバラつきはあるが、両者はほぼ一致する。このことから、浮体に作用する流体力の最大値は式(2)により定義できる。さらに、流体力の時間的変化  $F_w(t)$  と孤立波の波形の振幅を式(3)に置き換えたものと比較したのが図-6 である。流体力の発生時から最大値までの波形はよく一致していることから、流体力の時間波形を以下のように定義する。

$$F_w(t) = \rho_w g h_s B \eta(t) \dots\dots(3)$$

ただし、 $\eta(t) = H \operatorname{sech}^2(\alpha ct)$       $\alpha = \left(\frac{3H}{4d^3}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{5H}{8d}\right)$       $c = \sqrt{g(d+H)}$  ( $d$ は水深)

したがって、式(1)は式(4)に変換できる。

$$\rho_w g h_s B H \operatorname{sech}^2(\alpha ct) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx(t) \dots\dots(4)$$

図-7 は、水深 60cm、波高 6cm における係留力の実験値と計算値を比較したものである。計算結果は、実験値とほぼ一致しており、波浪条件、浮体条件、係留装置のバネ定数の影響を含めよく再現できているといえる。

最後に、係留力に及ぼす諸条件の影響を統一的に表現するために、式(4)の両辺を流体力の最大値  $\rho_w g h_s B H$  で割り、次のように無次元化した。

$$\operatorname{sech}^2 t' = \beta^2 \frac{d^2 x^*}{dt'^2} + x^* \dots\dots(5)$$

ただし、 $t' = \alpha ct$       $x^* = \frac{kx}{\rho_w g h_s B H}$       $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$       $\beta = \frac{\alpha c}{\omega}$

式(5)中の  $\beta$  を変化させ、それぞれの  $\beta$  に対して  $x^*$  の最大値を求めた。 $x^*$  の最大値とは、流体力の最大値に対する係留力の最大値の大きさを意味する。図-8 に、 $x^*$  の最大値と  $\beta$  の関係を示す。実験値は計算値とほぼ一致しており、無次元量  $\beta$  により係留力に及ぼす波浪条件、浮体条件及び係留装置のバネ定数の影響を、統一的に表現できる。

#### 4. 結論

本研究では、孤立波による超大型弾性浮体の係留力に関する模型実験を行った。その結果、流体力に対する係留力の大きさは、本研究で定義した無次元量  $\beta$  により、ほぼ統一的に表現できる。しかし、本実験では浮体の長さが種類であったが、上記の無次元解析の精度に対する浮体長の影響や、さらには浮体の剛性の影響を検討することが、今後の課題である。

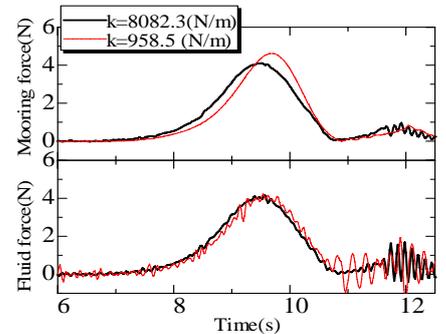


図-4 係留力と流体力の時間的変化

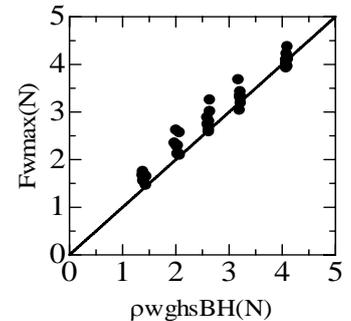


図-5 流体力の最大値  $F_{w\max}$  と  $\rho_w g h_s B H$  との関係

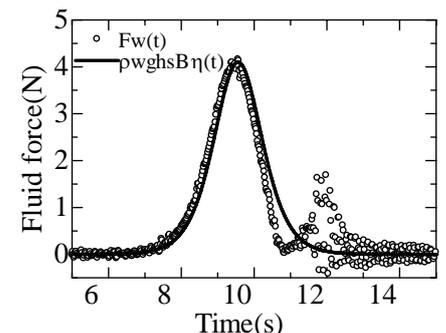


図-6  $F_w(t)$  と  $\rho_w g h_s B \eta(t)$  の時間的変化

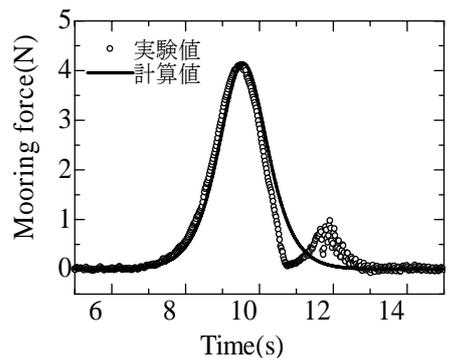


図-7 係留力の実験値と計算値との比較

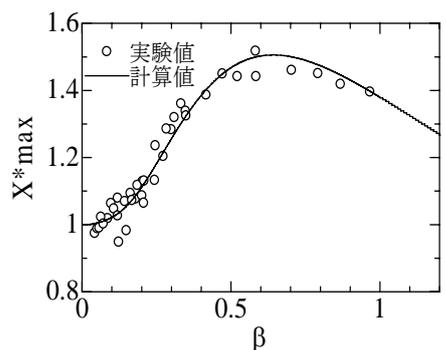


図-8  $x^*$  と  $\beta$  との関係