

津波による超大型浮体の係留力について

堺 茂 樹*・牧 野 周 作**

海上空港などの建設用地として注目される浮体式人工島の実現には未だ多くの課題が残されており、海岸工学の分野に於ける主要なものの一つとして係留装置の設計法の確立があげられる。特に、津波によって発生する係留力は甚大なものであり、係留装置の設計上不可欠の要素である。津波を孤立波で近似した実験結果から、孤立波が浮体に及ぼす流体力の時間波形は孤立波の波形、浮体の厚さと幅の 3 者の積で表現できることが明らかとなった。さらに、流体力、係留力、浮体の水平方向加速度との間の関係をモデル化したところ、最大係留力が発生する条件が導かれ、浮体の質量と設置水深に対応して適当な係留装置を選定する際の定量的評価が可能となった。

1. 緒 言

近年、沿岸域に於ける空港あるいは大型公共施設の建設用地として、浮体式人工島が注目されており、現在その建設の可能性が活発に検討されているが、未だ解決すべき多くの課題が残されている。海岸工学の分野に於ける重要な課題としては係留施設の設計法の確立がある。特に、強大な係留力をもたらす原因として津波があり、我が国沿岸には頻繁に来襲することを考えると、津波によって発生する係留力の正確な算定が重要である。

津波を含め波浪による浮体の動揺に関する研究はこれまで数多く報告されているが、これに比べて係留力に関する研究は少ない。増田 (1996)、増田ら (1998) は比較的小型の浮体を対象として、津波によって発生する係留索張力の推定法を提案している。しかし、海上空港など超大型浮体の設置水深は大きく、大水深ではドルフィン型係留法が最も有利とされていることから、これらの結果を超大型浮体の係留装置を検討する際に直接用いることは難しい。また、不規則波中の長周期成分が浮体一係留系の水平方向振動の固有周期と同調し、大振幅の応答をもたらす可能性があることから、長周期動揺に関する理論解析及び実験が行われている (例えば、居駒ら, 1999; 難波ら, 1999)。これらの研究では、波動が浮体に及ぼす力が検討されているが、係留力に関しては議論されていない。

これまでの研究では、超大型浮体がドルフィンで係留されている場合の津波によって発生する係留力に関する知見が少ないため、本研究では系統的な水理模型実験を行った。津波の波形は発生原因及び海底地形の影響によって様々であり、典型的な波形を設定することは難しい。そこで、津波が極めて長い周期の波であることから、ここでは孤立波で近似した。入射波条件、浮体規模、係留装置特性を種々変化させ、これらと係留力との関連を調べた。

2. 実験装置及び実験方法

実験には長さ 26 m、幅 0.8 m、深さ 1 m の二次元造波水路を用いた。水路前端には吸収式造波装置があり、ほぼ任意な条件での造波が可能であり、また浮体からの反射波が造波面で吸収されるため、造波装置と浮体の間の多重反射が抑制できる。また、水路後端にも同一な性能を有する装置が消波装置として設置してあり、反射波の影響を極力除いた実験が可能である。

模型浮体としては、密度 914 kg/m^3 のポリエチレン板を用いた。板の厚さが 10, 20 mm の 2 種類を用意し、浮体質量及び喫水の影響を検討できるようにした。浮体長は 10 m であるが、板厚が 20 mm の場合には板長が 6 m と 8 m とした実験も行い、板長の影響も検討した。なお、市販のポリエチレン板の長さが 2 m であるため、数枚の板を接続して擬似的な連続板を作成した。

ドルフィン型係留装置としては、図-1 に示すようにステンレス棒を水路上部から下方に向けて鉛直に固定した。実際の係留装置は下部が固定されるのに対し、実験では逆になっているが、係留力を測定する上では本質的な問題はない。係留装置の剛性と発生する係留力との関係を検討するため、2 種類の厚さのステンレス棒を用いた。曲げ剛性はそれぞれ、17.2, 144.0 Nm^2 である。

浮体前後の開水域での波形はそれぞれ 2 台ずつの容量線式波高計により、また浮体の鉛直変位は 8 台の超音波式変位計を用いて約 25 cm 間隔で測定した。本研究では、係留装置に作用する力を直接測定するのではなく、以下のような方法で求めた。ステンレス棒の上部に貼つ

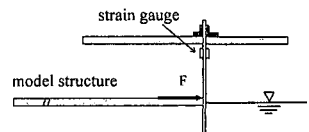


図-1 係留装置

* 正会員 工博 岩手大学助教授工学部建設環境工学科

** 正会員 工修 東洋建設(株)

た歪みゲージ(図-1)により歪みを測定し、線形弾性理論から曲げモーメントを計算する。さらに、力の作用点(ステンレス棒と浮体の接触点)から歪みゲージまでの距離で除し、係留力を求める。

孤立波の波高を2, 3, 4, 5, 6 cmの5種類、水深を30, 40, 50, 60 cmの4種類に変化させ、全ての組み合わせで実験を行った。また、係留装置の剛性、浮体の厚さ、浮体の長さをそれぞれ数種類変化させ、合計120ケースの実験を行った。

3. 係留力の測定結果

図-2は浮体前面での水位変動、浮体の鉛直変位及びステンレス棒の歪みの時系列の一例である。図中の5段目(歪み)と2段目(浮体前端から25 cm)を比較すると、波頂が浮体前端付近を通過した直後に歪みは最大となっていることが分かる。さらに、波頂が浮体中央に達した段階(3段目(浮体ほぼ中央))では歪みは既にほぼゼロとなっている。以上のように、孤立波が浮体に進入した直後の極めて短い時間内に係留力が発生し、浮体下を進行している間は係留力が発生していないことが分かる。

2.で述べたように、本研究では係留装置の歪みから係留力を求めるが、この計算に際しては係留力の作用点から歪みゲージまでの距離が必要であり、各時刻での浮体後端の鉛直変位を考慮に入れて計算しなければならない。しかし、図-2の4段目(浮体後端から5 cm)を見ると、係留力が発生している時点では後端は全く変形しておらず、歪みゲージからの距離は静水時のものと同一である。従って、以下の解析では、静水時に測定した距離を用いて係留力を計算する。

図-3は係留力の時間波形に対する孤立波の波高、水

深及び係留装置の剛性の影響を示した例である。波高が大きいほど係留力は大きく、最大係留力の発生時刻も早い。また、係留装置の剛性の影響は水深が異なると、逆に現れていることも分かる。なお、水深増大の影響は波高増加の影響と同様に現れるが、ここでの水深の影響には2つの要素が考えられる。第1は孤立波の波速を決定すると言う意味での入射波特性であり、第2は係留装置の特性を示す量でもある。つまり、本実験では係留装置を下方に向けて固定しており、その固定点是一定であるため、例えば水深が浅い場合には固定点から係留力の作用点までの距離が長く、変形しやすい構造となる。

図-4は最大係留力に対する波高、水深、板厚、係留装置の剛性の影響を示したものである。最大係留力は波高の増加に伴い線形的に増加しており、その増加率は水深が深く、浮体が厚いほど大きい。また、係留装置の剛性の影響は水深が深い場合と浅い場合とでは逆に現れている。また、図示はしていないが、波高と最大係留力の関係に対する板長の影響も、係留装置の剛性と同様、水深によって逆に現れた。

以上のように、孤立波によって発生する係留力は、波高、水深、浮体の厚さと長さ、係留装置の剛性の5つのファクターに依存していることが明らかとなった。しかし、これらのファクターの影響の仕方は複雑であり、図-4に示したような整理では、入射波特性、浮体規模、係留装置の剛性と係留力の関係を系統的に議論することは出来なかった。そこで、以下では流体力(波動が浮体に及ぼす力)と係留力の関係を明らかにし、さらに流体力

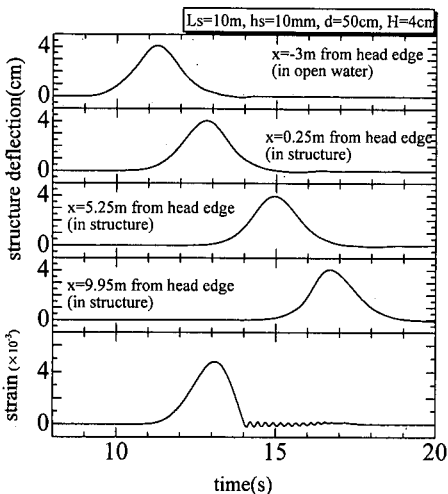


図-2 水位変動、浮体の鉛直変位、歪みの測定例

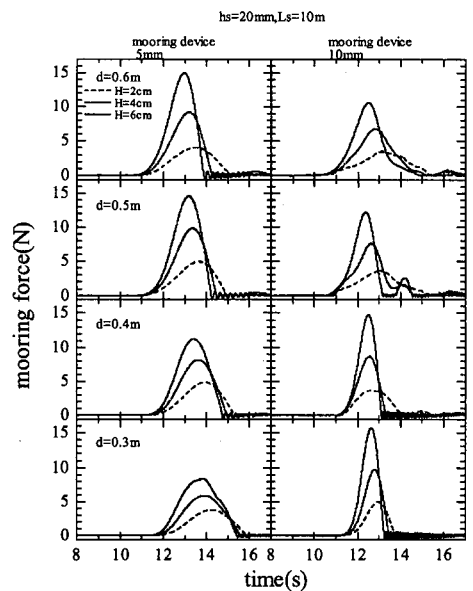


図-3 係留力に対する波高、水深、係留装置の剛性の影響

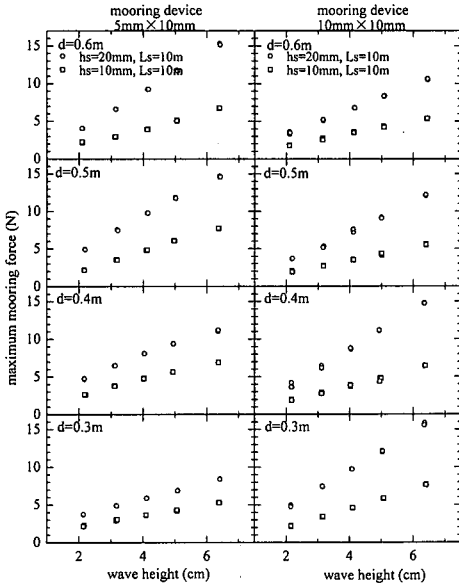


図-4 最大係留力に対する波高、水深、板厚、係留装置の剛性の影響

と入射波特性との関係を求め、最終的に入射波特性と係留力の関係を、浮体規模及び係留装置の剛性の影響も含めて、議論することとする。

4. 孤立波による係留力発生モデル化

4.1 係留力からの流体力の推定

津波の流体力を F_w 、係留装置のパネ定数を k 、浮体質量を m 、浮体の水平方向移動距離を x とすると、式(1)が成り立つ。なお、パネ定数は式(2)から求まる。

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

$$k = \frac{3EI}{l^3} \quad (2)$$

ここで、 EI は係留装置の曲げ剛性 l は係留装置の固定点から係留力の作用点までの距離である。なお、吉田ら(1998)は喫水が浅い超大型浮体に対する水平方向付加質量は極めて小さいことを示していることから、本研究でも付加質量の項を無視した。

係留力の測定値をパネ定数で除すと、水平方向移動距離が求まるので、この時系列から式(1)によって流体力を計算した。図-5の左欄には、水深と波高が一定で、パネ定数が異なる場合の係留力の測定値が示されている。水深及び波高が同一であっても係留装置のパネ定数が異なると、発生する係留力が全く異なっている。一方、右欄は式(1)によって計算された流体力であるが、係留力の波形が全く異なっているにも係わらず、流体力はよく一致している。なお、後半部分は係留装置の反力に

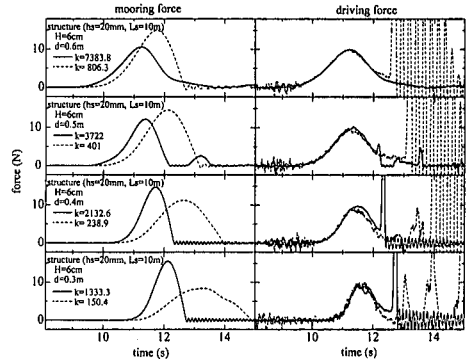


図-5 係留力からの流体力の推定

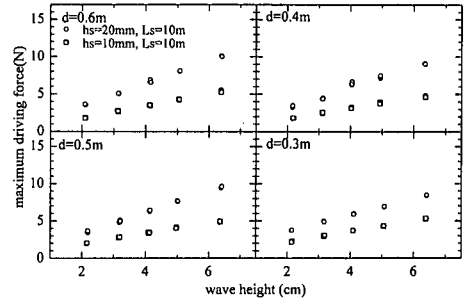


図-6 最大係留力に対する波高、水深、板厚の影響

より浮体が係留装置から離れ、ステンレス棒がわずかに振動している状態であり、流体力を示すものではない。他のケースでも、同様な一致が見られたことから、式(1)による流体力の推定が妥当であると言える。

以上のような方法により、全てのケースでの流体力を計算し、流体力の最大値と入射波特性及び浮体規模との関係を調べた。図-6は、最大流体力、波高、水深及び板厚の関係を示したものであり、最大流体力は波高と共に増大し、その増加率は浮体が厚いほど大きく、水深の影響はわずかであることが分かる。また、図示していないが、最大流体力と波高の关系到及ぼす板長の影響は、いずれの水深においても見られなかった。従って、最大流体力は波高と板厚に依存していると言える。

4.2 流体力と孤立波の波形との関係

上記の結果に基づき、以下のような量(3)を定義し、最大流体力と比較すると、図-7のように両者は明瞭な線形関係にあり、最大流体力は式(4)で表現できる。

$$\rho_w g h_s B H \quad (3)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 h_s は板厚、 B は板幅、 H は波高である。

$$F_{w\max} = \rho_w g h_s B H \quad (4)$$

本実験で発生させた孤立波は以下のような波形になる

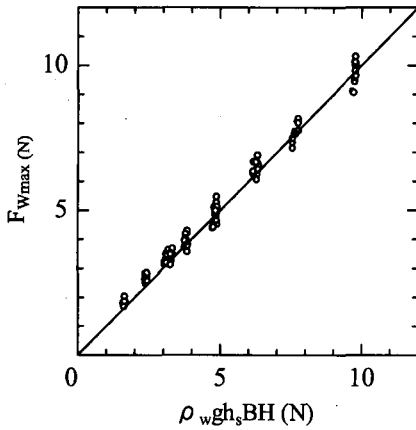


図-7 最大流体力と式(3)のパラメーターとの関係

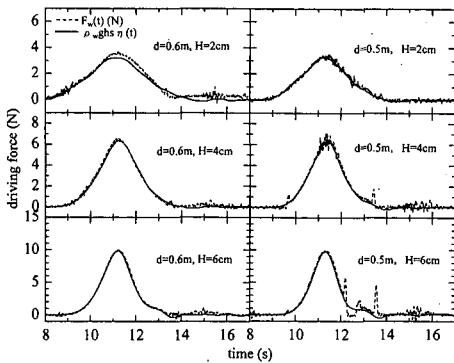


図-8 流体力の時間波形の孤立波波形による近似

よう設定されている。

$$\eta(t) = H \sec k^2(akt) \quad (5)$$

ここで、 $a = \left(\frac{3H}{4d^3}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{5H}{8d}\right)$
 $c = (g(d+H))^{1/2}$

図-5の右欄に示した流体力の時間波形は孤立波の波形に類似している。そこで、式(5)の H に代え、(3)を振幅とする波形を描き、これと流体力の時間波形と比較すると、図-8のようになる。浮体が反力によって係留装置から離れ、係留装置が振動するために見積もられる流体力の変動を除き、流体力の時間波形は孤立波の波形に極めてよく一致している。従って、孤立波によって発生する流体力は以下のように近似することが出来る。

$$Fw(t) = \rho_w g h_s B \eta(t) \quad (6)$$

4.3 孤立波の波形からの係留力の算定

孤立波による流体力を式(6)で表し、これと式(5)を式(1)に代入すると、式(7)となる。

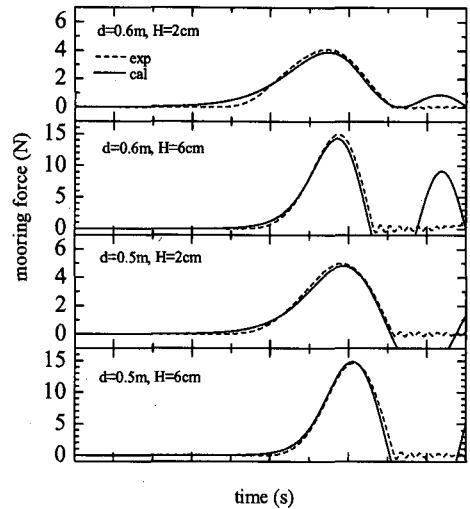


図-9 係留力の計算結果と測定値との比較

$$\rho_w g h_s B H \sec k^2(akt) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx \quad (7)$$

上式を用いて、孤立波の波形から係留力を算定した結果と測定値を比較したのが図-9であり、両者はよく一致している。

さらに、以下のような無次元量を用いると、式(7)は式(10)となる。

$$x^* = \frac{kx}{\rho_w g h_s B H} \quad (8)$$

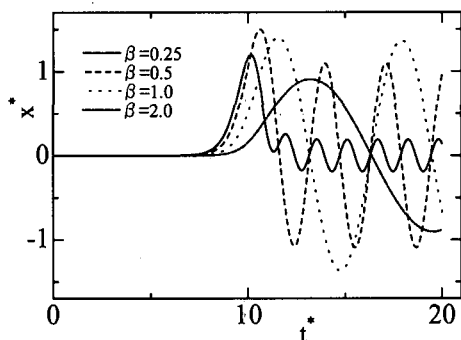
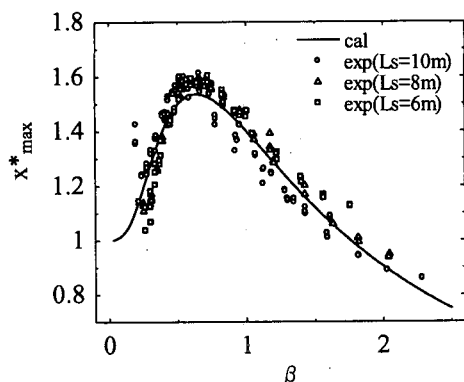
$$t^* = akt \quad (9)$$

$$\sec k^2 t^* = \beta^2 \frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + x^* \quad (10)$$

$$\beta = \frac{ac}{\sqrt{k/m}} \quad (11)$$

式(10)は x^* と t^* の関係が β によって一義的に決定されることを示している。図-10はいくつかの β での x^* と t^* の関係を示したものであり、 x^* の最大値は β によって大きく変化することが分かる。そこで、 β 毎に x^* の最大値を示したのが、図-11の実線であり、実験値とよく一致していることから、ここに示した孤立波による係留力のモデル化が妥当なものであると言える。ただし、 β が0.6付近で計算値と実験値に若干の違いが見られるが、この原因としては式(1)で無視した各種の減衰項の影響である可能性もあり、今後の検討課題と考えている。

x^* は式(8)と式(4)が示すように、最大流体力に対する最大係留力の比であり、これが最大となる β が係留装置にとって最も危険な状態をもたらす。 β は波高、水深、浮体の質量及び係留装置のバネ定数で決まるため、係留装置の設計に当たっては、波高、水深、浮体の質量

図-10 いくつかの β での x^* と t^* の関係図-11 最大係留力と β との関係

に対応して適当なバネ定数となるような係留装置を選定すべきである。

5. 結 語

本研究では、津波来襲時に発生する超大型浮体の係留力の算定法を確立することを目的として、孤立波を用い

た実験を行い、係留力に対する入射波条件、浮体規模、係留装置の剛性の影響を検討した。また、孤立波による係留力の発生に関する簡単なモデル化を行い、実験結果との比較を行った。ここで得られた結論を要約すると、以下になる。

- 1) 最大流体力は孤立波の波高、浮体の厚さ及び幅で決まる。
- 2) 流体力の時間波形は上記の最大流体力を振幅とする孤立波の波形に一致する。
- 3) 以上のことに基づき、孤立波の波形と係留力の関係をモデル化した。これにより、最大係留力をもたらし条件が明らかとなった。これを用いることによって、浮体の質量、設置水深及び波高に対応して適当なバネ定数を有する係留装置を選定する際の定量的な評価が可能となり、係留装置の設計を行う上での重要な知見が得られた。

参 考 文 献

- 居駒智樹・前田久明・増田光一・浅沼貴之・安宅浩一・林 昌彦 (1999): ポンツーン型超大型浮体の不規則波中弾性挙動及び長周期動揺推定に関する研究, 日本造船学会論文集, pp. 201-208.
- 難波康広・加藤俊司・斉藤昌勝 (1999): 超大型浮体式構造物に働く変動漂流力の推定法 —その1: 長波頂波中模型実験—, 日本造船学会論文集, pp. 235-242.
- 増田光一 (1996): 津波による沿岸域に係留された浮体式構造物の運動と係留索張力応答の簡易推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 956-960.
- 増田光一・宮崎 剛・高村浩彰 (1998): 津波による沿岸域に係留された浮体式構造物の運動と係留索張力応答の簡易推定法に関する研究 (第2報), 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 806-810.
- 吉田尚史・永田修一・一色 浩・藤田 孝 (1998): 超大型浮体式構造物に働く流体力・波強制力に関する研究, 関西造船協会誌, 第23号, pp. 1-7.