傾斜テンションレグ係留されたセミサブ型海洋構造物 ー係留系の逐次崩壊

正員 井出 太郎* 正員 鈴木 英之**
正員 岡 徳 昭** 正員 吉田 宏一郎***

Progressive Collapse of Mooring System of Semisubmersible Type Floating Structure
Moored by Inclined Tension Legs

by Taro Ide, *Member* Hideyuki Suzuki, *Member*
Noriaki Oka, *Member* Koichiro Yoshida, *Member*

Summary

This paper deals with progressive collapse behavior of mooring system of very large floating structure. We have studied progressive collapse behavior of mooring system of barge type floating structure which is installed in calm sea, moored by dolphin mooring, and protected by break water. In this report, floating structure installed in open sea is considered. The wave condition may be so strong that semisubmersible type is reasonable rather than barge type. The water depth may be so large that it should be moored by inclined tension legs.

Time series program which models in-plane elastic response as a beam and anti-plane elastic response based on the theory of plates is made and progressive collapse behavior is simulated.

An experiment was made on collapse behavior under regular and irregular wave using 1/333 scale model of semisubmersible type floating structure moored by inclined tension legs. Mooring rope is set to be cut off from floating structure when the load on the rope is over preset value.

1. 緒 言

超大型浮体式海洋構造物を設計してゆく上で避けなければいけない災害として、浮体本体の被災による「沈没」や係留施設の破壊による「漂流」等が考えられる。「漂流」は係留系が逐次的に破壊されることによって発生する事象であり、地震、津波、台風などがその原因として考えられる。本研究ではこの係留系逐次崩壊現象を扱う。

筆者らはこれまで湾内や防波堤の内側など波の穏やかな場所に、ドルフィン係留によって係留されたバージ型浮体を想定し、防波堤が十分に機能している状態で強風により逐次崩壊に至る場合について研究を行ってきた¹⁾。本研究

では、こうした湾内など比較的浅く海象条件の穏やかな海域ではなく、中水深の外洋に超大型浮体式海洋構造物を設置することを想定する。水深が大きいため防波堤等の設置は困難であることから浮体が外洋の厳しい海象条件にさらされると考えられ、波浪中応答の小さいセミサブ型浮体を想定する。また水深が大きくドルフィン係留を用いると大規模な構造物が必要となるため、傾斜テンションレグ係留を想定する。現在このような中水深、外洋設置型の海洋構造物に関する研究は少ないが、離島振興や地方活性化のための空港としてニーズがあり、中水深の外洋におけるインフラストラクチャーとしてこうした浮体を研究することは必要であると考えられる²⁾。

まず超大型浮体を面内弾性変形については梁に、面外変形については板理論を用いてモデル化し、プログラムを作成した。外力として波浪を考え、係留システムの逐次崩壊挙動シミュレーションを行う。次に水槽において模型を用いた係留系逐次崩壊実験を行う。傾斜テンションレグ係留された 1/333 スケールのセミサブ型浮体模型に規則波と不規則波をかけ、ある一定値以上の負荷が係留索にかかる場

* 科学技術庁

** 東京大学工学部環境海洋工学科

*** 東海大学海洋学部マリンデザイン工学科

合は係留が浮体からはずれるようにする。こうして得られたシミュレーションと実験の結果を解析することにより、係留系逐次崩壊現象の全体像を把握することを目的とする。

2. 係留系逐次崩壊のシミュレーション

2.1 浮体と係留のモデル化

浮体の運動を鉛直方向と水平方向に分け、それぞれについて運動方程式をたて、係留部分で両者の整合性をとる。係留系逐次崩壊現象という非線形現象を扱うために、これを時間領域で解く。鉛直方向の運動方程式は式(1)となる³⁾。

$$\begin{aligned} m\ddot{w} + \sum_{u=1, v=1} (m_{uv} + m_{adv})\delta(x-x_u)\delta(y-y_v)\ddot{w} + c\dot{w} \\ + \int K(t-\tau)\dot{w}(\tau)d\tau + D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) \\ + \sum_{p=1, q=1} \{k_{pq}\delta(x-x_p)\delta(y-y_q)(w-w_s) \\ + b_{pq}\delta(x-x_p)\delta(y-y_q)\} \\ + \sum_{u=1, v=1} \{k_{wuv}\delta(x-x_u)\delta(y-y_v)w \\ + b_{wuv}\delta(x-x_u)\delta(y-y_v)\} = f(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで

m_{uv} : カラムの質量

m_{adv} : カラムの付加質量

x_u, y_v : カラム取り付け位置

$K(t)$: メモリー影響関数

D : 浮体の単位幅当たりの曲げ剛性

k_{pq} : 係留のばね剛性

w_s : 係留索自然長時の係留索上端位置と係留をしていない状態の係留索上端取り付け位置の鉛直方向の差

k_{wuv} : 水ばねのばね剛性

ここで

$$w = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} a_{ij}(t)\phi_i(x)\psi_j(y) \quad (2)$$

とおく。 $\phi_i(x)$ は両端自由梁の固有関数を用いて式(3)のように表される。

$$\phi_0 = 1$$

$$\phi_1 = \frac{2\sqrt{3}}{L}x$$

$$\phi_{2n} = \frac{\cos \frac{\lambda_{2n}x}{2}}{\cos \frac{\lambda_{2n}L}{2}} + \frac{\cosh \frac{\lambda_{2n}x}{2}}{\cosh \frac{\lambda_{2n}L}{2}}$$

$$\phi_{2n+1} = \frac{\sin \frac{\lambda_{2n+1}x}{2}}{\sin \frac{\lambda_{2n+1}L}{2}} + \frac{\sinh \frac{\lambda_{2n+1}x}{2}}{\sinh \frac{\lambda_{2n+1}L}{2}} \quad (3)$$

$\psi_j(y)$ も同様である。式(1)に式(2)を代入し、両辺に $\phi_i(x)\psi_j(y)$ をかけ、 x と y に関して端部から端部まで積分を行う。関数間に直交関係が存在するため、質量と減衰のマトリクスは対角成分のみが残る。境界条件は板の端部においてモーメントとせん断力が零である条件を用いる。

$$-Dv\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad -D(2-v)\frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} = 0 \quad (4)$$

以上の運動方程式をニューマーク β 法を用いて解くことにより、時間領域で w を求める。

超大型浮体の水平方向運動は面内撓み振動を梁にモデル化する^{1),4)} ことにより表現する。支配方程式と境界条件は式(5)~(7)のようになる。

$$-k'GA\frac{dv_s}{dx} = EI\frac{d^3 v_B}{dx^3} \quad (5)$$

$$m\frac{d^2 w}{dt^2} + c\frac{dw}{dt} - k'GA\frac{d^2 v_s}{dx^2}$$

$$= f - kw - \int K(t-\tau)\dot{w}(\tau)d\tau$$

$$(6)$$

$$w = v_B + v_s \quad (7)$$

ここで

k : 係留のばね剛性

v_B : 曲げ変形による撓み

v_s : セン断変形による撓み

EI : 浮体の曲げ剛性

$k'GA$: 浮体のせん断剛性

v_B に関する両端自由の境界条件は

$$\frac{d^2 v_B}{dx^2} \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d^3 v_B}{dx^3} \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (9)$$

また v_s に関する境界条件は

$$\frac{dv_s}{dx} \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (10)$$

である。

支配方程式における変数を v_B のみとし、これを境界条件(8), (9)のもとで解く。まず式(8)の境界条件を満たす関数群の線形和で仮定した次のような解を考える。

$$v_B = b_{-1}(t) + b_0(t)\left(\frac{L}{2} - x\right) + \sum_{i=1}^{\infty} b_i(t) \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (11)$$

式(11)は式(9)の境界条件を満たさないため、後から拘束条件として加える。式(11)を支配方程式に代入し、両辺に $\phi_i(x)$ を掛け、端部に沿って積分を行うと関数の直交性からマトリクスは主に対角成分が残る。以上をニューマーク β 法を用いて解くことにより $b_i(t)$ を得、式(11)から v_B を得る。同様に、 v_s を剛体運動を含まない関数群の線形和で表すことにより、式(5)を用いて v_s を求める。

傾斜テンションレグの変位と張力の関係は式(12)のようになる。

$$\begin{Bmatrix} T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{T_p}{L} \cos^2 \alpha + \frac{EA}{L} \sin^2 \alpha & \frac{EA - T_p}{L} \sin \alpha \cos \alpha \\ \frac{EA - T_p}{L} \sin \alpha \cos \alpha & \frac{T_p}{L} \sin^2 \alpha + \frac{EA}{B} \cos^2 \alpha \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ w \end{Bmatrix} \quad (12)$$

ここで

T_p : 静平衡時の初期張力

α : 係留の傾斜角

である。

2.2 外力のモデル化

浮体運動を鉛直方向と水平方向に分けて考えるため、外力も鉛直方向と水平方向に分けて考える。水平方向の外力として1次波強制力、波漂流力、鉛直方向の外力として1次波強制力を考え、どちらも特異点分布法を用いて浮体にかかる波強制力の周波数応答関数を得⁵⁾、これをフーリエ変換することによりインパルス応答関数とし、波振幅の時系列と畳み込み積分を行うことにより1次、2次の波強制力時系列を得る。不規則海洋波のスペクトルとしてISSC型のパワースペクトルを用いる。

3. 係留系逐次崩壊の模型実験

実験は1998年8月から9月にかけて東京大学環境海洋工学科動揺水槽において行った。スケールが1/333のアクリル製セミサブ型浮体模型を20本の傾斜テンションレグにより係留し、造波機により起こした波(規則波と波スペクトルに基づく不規則波)による係留系の逐次崩壊現象を調べる。浮体長辺に平行な波を入射し、波の進行方向を y 座標、浮体長辺方向を x 座標とする。

水槽の深度が3[m]あるため、係留下部を固定する為の架台を設置し、それを海底面と仮定する。この場合の水

深は0.6[m]となる。Table 1に浮体、係留模型の諸条件、Fig. 1に浮体模型の概要を示す。

係留索にはばね剛性が 8.43×10^2 [kgf/m]のワイヤーを用いる。Fig. 1に示す様に波方向に4本の係留索を用いた係留を行い、波と直角方向については文献2)を参考にして5本の係留索を用いた係留を行う。以下では係留索と浮体の接続位置の y 座標が同じである5本の係留索を1列と数え、波上側からそれぞれ第1列～第4列と呼ぶ。係留の傾斜角(鉛直方向と係留索のなす角度)は 0.264 [rad]と 0.472 [rad]の2通りとし、それぞれ係留1、係留2と呼ぶ。係留を逐次崩壊させるために各係留索に磁石を用いた破断機構を設ける。Fig. 2に示す様にカムに鉄片を取り付け、また係留索側には永久磁石を取り付ける。磁石と鉄片が鉛直に分離するよう鉄製器具を回転可能にしておく。

係留破断機構において破断荷重を調節するため、磁石と鉄片の間に厚さの異なるシートを挟む。このシートの厚さにより破断荷重を1係留索当たり $1.0 \sim 3.5$ [kgf]の間で調節する。初期張力に関しては20本の係留索を1つ1つ調整することが困難であるため、初期張力に相当する重りを係留索端部に取り付け、これを用いて初期張力の設定を行う。設定後は、係留索下部を係留固定装置で係留架台に固定する。計測は係留破断位置と時刻、 x, y, z 方向の変位について行う。係留破断位置と時刻は磁石が鉄片から分離する(係留が破断する)のをリードスイッチを用いて電

Table 1 Particulars of the experimental structure model

Water depth	0.6[m]
Length	3.0[m]
Breath	0.6[m]
Height	0.2[m]
Weight	18.2[kgf]
Vertical bending rigidity	77.45[kgfm ²]
Horizontal bending rigidity	1.71e+4[kgfm ²]
Shareing rigidity	9.73e+4[kgf]

Fig. 1 Schematic of floating structure model

Fig. 2 Mechanism of mooring disconnection

氣的に計測する。

4. シミュレーションと実験の結果と考察

4.1 浮体一係留系の応答と張力分布

浮体長辺に平行な規則波が入射する場合、浮体の応答は波方向において波と同じ周波数で、その周波数特有の味噌摺り運動を行う。例えば Fig. 3 に示すのは周波数 0.65 [sec] の規則波が入射する場合のシミュレーション

Fig. 3 Motion of floating structure (Mooring 2, incident wave period=0.65 [sec])

における y - z 断面浮体挙動を模式的に描いた図であるが、この場合浮体端部が、浮体外部に向かって傾斜した楕円を描くように味噌摺り運動を行う。この運動は浮体の波方向長さ、カラム間距離により異なると考えられる。また、Fig. 4 に示すのはシミュレーションにおける係留位置付近の波直交方向断面の上下方向変位振幅分布であるが、端部が最も小さくなっており、次いで中央部が小さくなっているのがわかる。これは Fig. 5 に示す様に浮体を x 方向に無限長さをもつ梁と仮定し係留索を取り付け波強制力を掛けたと、これと線形重ね合わせをした時に生じるモーメントが零となるよう端部モーメントを与えた系の線形重ね合わせにより導かれる、浮体一係留系の純構造的な原因による振幅形状である。

浮体応答から係留索の張力分布は次のようになる。波方向の張力分布は周波数特有の味噌摺り運動により決定される為、例えば波周期 0.65 [sec] の場合は Fig. 3 に示す味噌摺り運動を行い、Fig. 6 に示す様に第 1, 4 列の最大張力が相対的に大きくなる。(Fig. 6 はシミュレーションによる各係留索の最大張力分布を表している) また、波周期 0.9 [sec] の場合はこれと異なる味噌摺り運動を行うことにより第 2, 3 列の最大張力が相対的に大きくなる等、波周波数によって波方向に最大位置が分散する。また波直交方向の張力分布は初期張力が一定の場合、浮体一係留系の

Fig. 4 Amplitude of vertical direction (Simulation, Mooring 2, incident wave period=0.90 [sec])

Fig. 5 Superimpose of two systems

Fig. 6 Tension distribution in mooring legs (Simulation, Mooring 2, incident wave period=0.60 [sec])

構造的要因により周波数に関わらず端部よりも少し内部で最大となる。(Fig. 4 参照)

4.2 初期破壊位置

最大張力の分布からわかるように初期張力一定の場合、波直交方向における初期破壊位置は、浮体端部ではなく内部である可能性が高い。本研究で用いた浮体の場合は、特に端部影響により張力振幅の最も大きくなる x 方向端部から2番目の係留索で多く初期破壊が生じているのが Fig. 7 からわかる。(Fig. 7 は係留2, 有義波高 $0.04 \sim 0.045$ [m] におけるシミュレーションと実験による初期破壊位置の頻度分布である) また、波方向に関しては波周波数により浮体の運動が異なるため、外側の係留索(第1列, 第4列)に最大荷重の掛かる場合、内側の係留索(第2列, 第3列)に最大荷重の掛かる場合、第3列に最大荷重がかかる場合等様々あり必ずしも波上側から初期破壊が生じるわけではなく波方向について全体に分布しているのが判る。

4.3 逐次崩壊の順序

今回行ったシミュレーションと実験における典型的な崩壊順序は第1列と第2列, 第3列と第4列はそれぞれ破壊の生じる時間が近く, 第1列, 第2列が破壊されてから時間をおいて第3列, 第4列が破壊される, 或いはその逆で第3列, 第4列が破壊されてから時間をおいて第1列, 第2列が破壊されるというものである。Fig. 8 はシミュレーションと実験において波の入射が始まってから各係留索が破壊されるまでの経過時間を示しており, (a), (b) が前者の例, (c), (d) が後者の例である。この理由として4.4が考えられる。

4.4 逐次崩壊の要因

シミュレーションと実験から浮体一係留系逐次崩壊挙動のシナリオは次のようになることがわかった。波方向の浮体運動と波直交方向の張力分布から最大張力をもつ係留索が決まり初期破壊が生じる。崩壊は初期破壊が生じた係留からより変形拘束の大きい中央部に向かって浮体長辺

(a) Simulation

(b) Experiment

Fig. 7 Distribution of frequency of first breaking position (Mooring 2)

方向に進行し (Fig. 9 参照), その2列が全壊した後に他の2列に崩壊が進行するというものである。初めに崩壊する2列は各コラムフーティングに働く初期張力と初期破壊した係留索の初期張力に基づく擾乱と荷重再配分に加えて、波強制力による浮体運動の影響により逐次崩壊をおこす。その擾乱が構造的に最後に崩壊する2列に伝播し、主に波強制力による浮体運動により全壊に至るものと考えられる。

4.5 逐次崩壊に要する時間

全壊するまでに要する時間の有義波高による変化は実験でもシミュレーションでもみられない。これは逐次崩壊が始まると初期張力に基づく衝撃的な擾乱によって逐次的な破壊が進行するためと考えられる。また逐次崩壊に要する時間は今回行ったシミュレーションの場合最大で2秒程度であり, 実験の場合も最大3秒程度である。これを実機スケールに換算すると $40 \sim 50$ [sec] となり, 初期破壊が生じてから1 [min] 程度で全壊に至ることがわかる。初期破壊による擾乱と荷重の再配分効果は非常に大きいため

(a) An example of progressive collapse from weather side of wave (Simulation)

(b) An example of progressive collapse from weather side of wave (Experiment)

(c) An example of progressive collapse from lee side of wave (Simulation)

(d) An example of progressive collapse from lee side of wave (Experiment)

Fig. 8 Breaking time and position (Mooring 2)

Fig. 9 Progress of progressive collapse

く短時間に崩壊し、今回検討した浮体一係留系の逐次崩壊に対する冗長性が著しく低いことを示している。これに対処するためには係留点を増やすことにより浮体一係留系全体の冗長性を高くする、また係留点1つあたりの係留本数を増やすことにより個々の係留点の冗長性を高くし、初期破壊を抑える方法がある。

4.6 波の入射開始から係留系の全壊までに要する時間

Fig. 10 に示すのはシミュレーションによる設計波高 15 [m]、設計風速 50 [m] の条件下において安全率 1.4 で設計された実機スケール浮体の再現期間 10000 年の海象条件（風速 65 [m]、有義波高 25 [m]）下における累積

崩壊確率である。この条件下では台風が最も過酷な状況を呈する期間（1000 [sec]）に 5 割程度が全壊することが判る。ただし、この 1000 [sec] は風荷重の最も厳しい期間を示しており、波荷重の厳しい期間はこの 10 倍程度と考えられるため、再現期間 10000 年の海象条件下ではそのほとんどが全壊すると考えられる。

波の入射開始から係留系全壊までに要する時間の累積崩壊確率は有義波高や破断荷重に対して非常に敏感である。破断荷重が 1 割変化すると全壊時の累積崩壊確率は 7~8 割程度、有義波高が 3 割変化するとやはり全壊時の累積崩壊確率は 7 割程度変化する。このため、波の入射開始から

Fig. 10 Cumulative collapse probability of the period of complete collapse of mooring system (Simulation)

係留系全壊までに要する時間の累積崩壊確率を定量的に算定するにあたっては設計値の選択が重要になる。

5. 結 言

傾斜テンションレグにより係留されたセミサブ型海洋構造物一係留系の逐次崩壊挙動に関するシミュレーションと実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 超大型浮体式海洋構造物の場合、弾性挙動が逐次崩壊のプロセスに影響を及ぼす。
- (2) 浮体長辺に平行な波が入射する場合、浮体が味噌摺り運動を行う為、波方向の初期破壊は必ずしも波上側でなく波下側、中央部から生じる場合がある。また波直交方向に関しては、浮体の弾性変形により、少し内部又は中央部で初期破壊が生じる可能性が高い。
- (3) 典型的な係留系の逐次崩壊順序は初期破壊が生じた係留からより変形拘束の大きい中央部に向かって浮体長辺方向に崩壊が進行し、その2列が全壊した後には他の列に崩壊が進行するというものである。
- (4) 初期破壊が生じてから全壊するまでに要する時間はシミュレーション、実験共に2~3秒程度であり、これを実機スケールに換算すると1 [min] 程度となる。初期破壊による擾乱と荷重の再配分効果は非常に大きいためごく短時間に崩壊し、今回検討した浮体一係留系の逐次崩壊に対する冗長性が著しく低いことを示している。これに対処するためには係留

点を増やすことにより浮体一係留系全体の冗長性を高くする、また係留点1つあたりの係留本数を増やすことにより個々の係留点の冗長性を高くし、初期破壊を抑える方法がある。

- (5) 本研究において遭遇確率30%程度の外力条件で設計を行ったセミサブ型浮体一傾斜テンションレグ係留系は遭遇確率1%程度（再現期間10000年に相当）の海象条件でそのほとんどが全壊する。
- (6) シミュレーションにおいて累積崩壊確率は有義波高や破断荷重に対して敏感に反応する。この為、累積崩壊確率の算定においては設計値の選択が非常に重要である。

参 考 文 献

- 1) 井出太郎, 鈴木英之, 吉田宏一郎: 面内弾性応答及び風の空間相関が超大型浮体一係留系の逐次崩壊に与える影響, 造船学会論文集, 平成10年1月
- 2) 西垣亮: 中規模浮体式海上空港の構造設計, 東京大学修士論文, 1996年2月
- 3) 今井茂, 安宅浩一: 航空機離着陸時の浮体式空港の弾性応答, 東京大学卒業論文, 1997年2月
- 4) 坪郷尚, 岡田博雄: 巨大箱型浮体構造の動的挙動に関する研究—梁モデルによる水平撓み挙動特性の検討, 関西造船協会誌第228号, 平成9年5月
- 5) 飯島一博: 超大型半潜水式浮体の波浪中応答解析と構造形態が構造応答に与える影響, 東京大学博士論文, 1998年3月