

弛緩係留された浮遊式構造物の非線形応答の極大値推定と 係留設計に関する基礎的研究

増田 光一*・山本 禎寿**・高石 敬史***

1. 緒 言

近年、海上ホテルや展示施設等を始めとし、浮体式海上空港、海上石油備蓄システム等の大規模な構造物に至るまで、数多く計画、建造がされている。これらの構造物は何らかの係留設備を備えており、当然、その基本設計では厳しい気象、海象に遭遇しても構造物、係留設備の安全性が十分保てるように設計しなければならない。

特に弛緩係留された浮遊式構造物の波浪中での応答特性に影響を与える非線形要因としては、非線形波浪外力、係留系の非線形性、粘性減衰力、波漂流減衰力等が考えられる。実際の設計において厳密にはこれらの非線形要因を全て考慮し、応答評価をすることが望ましいが、初期設計の段階において効率化を計るという意味からは、影響の大きい要因を事前に把握しておくことが有用な設計資料になるものと考えられる。

また、浮遊式構造物が受ける波浪外力は随時変動する。従って、設計波の違いが運動応答、係留索張力にどの程度、影響を与えるかを知ることも設計上重要な一項目であると考えられる。

そこで本研究においては、前述の各非線形要因、有義波高、有義周期をパラメータとした系統計算を時系列シミュレーションにより行い、それらのパラメータが運動応答、係留索張力の最大値等に与える影響を考察し、計算を多数回繰り返すことにより初期設計の段階で最も重要な評価対象となる最大極大値周辺での確率分布を求め、最適な分布関数を当てはめ、最大値の定量的な推定法の検討を行った。

2. 研究方法

一般に、沿岸海域に設置される浮遊式構造物の設計に際しては、設計波法、設計スペクトル法、非線形時系列シミュレーション法等が用いられているが、風、潮流等の複合外力を考慮する場合、非線形時系列シミュレーション法が採用される(日本海事協会, 1983)。この方法

は設置海域での外力の時系列を作成し、非線形運動方程式を解くことにより、運動応答及び係留索張力の最大値のサンプル(標本)値を求め、設定許容値かどうかを判定する方法である。しかし、1回のシミュレーションでは1サンプルにすぎないということから、このような時系列シミュレーション法による解析で信頼度を高めるためには、長時間にわたるシミュレーションを多数回繰り返さなければならないということが指摘されている。

本研究もこの解析方法と同様に、時間領域での運動方程式に、乱数を変えた多くの外力の時系列を入力し、それから得られた運動応答、係留索張力をサンプルとした統計値を取り扱うこととする。

2.1 時間領域の運動方程式

シミュレーションに用いた座標系を図-1に示す。

本研究では外力及び係留力が非線形となるため、固有周期に対応した同調現象も含め、時々刻々の流体力係数を選択できる(1)式のような時間領域の運動方程式を用いた(増田ら, 1995)。流体力係数、波強制力については3次元特異点分布法により求めた(増田ら, 1994)。

$$\sum_{j=1}^6 \left[\{m_{ij} + am_{ij}(\infty)\} \ddot{\xi}_j(t) + \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{\xi}_j(\tau) d\tau + B_{wij} \dot{\xi}_j(t) + N_{vij} \xi_j(t) | \dot{\xi}_j(t) | + C_{ij} \xi_j(t) + G_i \{ \xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t) \} \right] = F_i^{(1)}(t) + F_i^{(2)}(t) \quad (i=1 \sim 6) \quad (1)$$

ここで、 m_{ij} : 浮体質量、 $am_{ij}(\infty)$: 周波数無限大での広義の付加質量、 $K_{ij}(t)$: メモリ-影響関数、 N_{vij} : 粘性減衰力係数、 B_{wij} : 波漂流減衰係数、 C_{ij} : 静的復元力係数、 G_i : 係留力、 $F_i^{(1)}$: 1次波強制力、 $F_i^{(2)}$: 2次波強制力、 ξ_j : j 方向運動変位である。

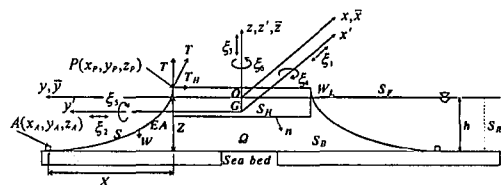


図-1 座標系

* 正会員 工博 日本大学教授

** 工修 日本海洋コンサルタント(株)

*** 工博 日本大学教授

2.2 波浪外力

1次波強制力及び2次波強制力は波振幅 $\zeta(t)$ とインパルス応答関数 $g_i^{(1)}(\tau)$, $g_i^{(2)}(\tau_k, \tau_l)$ との畳み込み積分により以下のように表現できる。

$$F_i^{(1)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_i^{(1)}(\tau) \zeta(t-\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_i^{(2)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_i^{(2)}(\tau_k, \tau_l) \zeta(t-\tau_k) \zeta(t-\tau_l) d\tau_k d\tau_l \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、インパルス応答関数は周波数領域の1次、2次の伝達関数 $H_i^{(1)}(\omega)$, $H_i^{(2)}(\omega_k - \omega_l)$ を用いて、以下のように表される。

$$g_i^{(1)}(\tau) = \text{Re} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_i^{(1)}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$g_i^{(2)}(\tau_k, \tau_l) = \text{Re} \left[\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_i^{(2)}(\omega_k - \omega_l) e^{i(\omega_k \tau_k - \omega_l \tau_l)} d\omega_k d\omega_l \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、2次伝達関数 $H_i^{(2)}(\omega_k - \omega_l)$ は、浮体の1次運動をその平均位置周りで摂動展開し、瞬時の没水面に働く流体圧を積分することで以下のように求められる。

$$\begin{aligned} H_i^{(2)}(\omega_k - \omega_l) &= -\frac{\rho g}{4} \int_{WL} \eta_{Rk}^{(1)} \eta_{Rl}^{(1)*} n_i dl + \frac{\rho}{4} \iint_{SH} \nabla \phi_k^{(1)} \cdot \nabla \phi_l^{(1)*} n_i ds \\ &\quad + \frac{i\rho\omega_l}{2} \iint_{SH} \bar{X}_k^{(1)} \cdot \nabla \phi_l^{(1)*} n_i ds + \frac{m_j \omega_k^2}{2} \bar{X}_{Gk}^{(1)} \times \bar{a}_l^{(1)*} \\ &\quad - i\rho(\omega_k - \omega_l) \iint_{SH} \phi_k^{(2)}(\omega_k - \omega_l) n_i ds \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、 ρ ：流体密度、 $\eta_k^{(1)}$ ：1次波面上昇量、 $\phi^{(1)}$ ：1次の全速度ポテンシャル、 $\bar{X}^{(1)}$ ：浮体上点の1次変位ベクトル、 WL ：浮体水線、 $\bar{X}_G^{(1)}$ ：浮体重心の1次変位ベクトル、 $\bar{a}^{(1)}$ ：1次変位角ベクトル、 $\phi_k^{(2)}$ ：2次差成分入射波ポテンシャルである。

2.3 粘性減衰力

粘性減衰力に関しては、実際の設計を考え、粘性減衰力係数 N_{vij} を一般的な抗力係数を用いて評価する。並進運動について考えると以下のように表現できる。

$$N_{vij} = \frac{1}{2} \rho C_{Di} A_{di} \quad (i=1\sim 3, j=1\sim 6) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 ρ ：流体密度、 C_{Di} ：抗力係数、 A_{di} ：没水部の投影面積である。

2.4 波漂流減衰力

まず、波漂流減衰力を評価するに当たり周波数領域における波漂流減衰係数 $b_{ii}(\omega)$ は、定常波漂流力 $F_{Di}(\omega)$ と波浪中抵抗増加の関係より下式のように与えられる。

$$b_{ii}(\omega) = \left[\omega \frac{dF_{Di}(\omega)}{d\omega} + 4.0 F_{Di}(\omega) \right] \frac{1}{C} \quad (i=1\sim 6) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで C は波速である。

(8)式で与えられた波漂流減衰係数 $b_{ii}(\omega)$ は各周波数の関数であり、これを不規則波のスペクトル $S_b(\omega)$ と各周波数における波漂流減衰係数と積分することにより、下式のような波漂流減衰係数 B_{wii} に変換できる。

$$B_{wii} = \int_0^\infty S_b(\omega) b_{ii}(\omega) d\omega \quad \dots\dots\dots (9)$$

2.5 係留力

係留索により係留された場合の係留力は、物体固定座標系上での各浮体側係留索取付点座標 $(x'_{Pi}, y'_{Pi}, z'_{Pi})$ 及び水平面内での各係留索取付角 α_i を用いて以下のように表すことができる。

$$G_1(\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)) = \sum_{i=1}^N -T_{Hi} \cos \alpha_i \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$G_2(\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)) = \sum_{i=1}^N -T_{Hi} \sin \alpha_i \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$G_3(\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)) = \sum_{i=1}^N -T_{Vi} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$G_4(\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)) = \sum_{i=1}^N T_{Hi} z'_{Pi} \sin \alpha_i - T_{Vi} y'_{Pi} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$G_5(\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)) = \sum_{i=1}^N T_{Vi} x'_{Pi} - T_{Hi} z'_{Pi} \cos \alpha_i \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$G_6(\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)) = \sum_{i=1}^N T_{Hi} y'_{Pi} \cos \alpha_i - T_{Hi} x'_{Pi} \sin \alpha_i \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、水平張力 T_{Hi} 及び鉛直張力 T_{Vi} は修正カタナリ理論を用いて求める。

3. 数値計算モデル

数値計算に用いた浮体モデルと係留系の諸元を図-2、

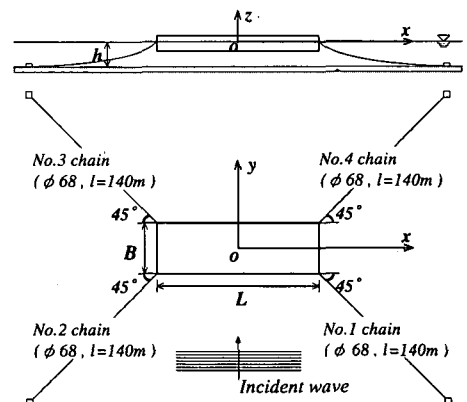


図-2 数値計算モデル配置図

表-1 数値計算モデル諸元

長さ (m)	130.0
幅 (m)	40.0
吃水 (m)	1.83
水深 (m)	5.7
排水量 (m ³)	9516.0
索長 (m)	140.0
索径 (mm)	φ 68
水中重量 (kgf/m)	115.7
初期張力 (kgf)	8.0×10^3
破断荷重 (kgf)	3.57×10^5

表-1 に示す。

浮体モデルは実際に稼働している「境ヶ浜フローティングアイランド」(沿岸開発技術センター, 1991)とした。係留系については、フローティングアイランドでは、クロスに係留されているが、本研究では浮体から45度に張られた4本の係留索とした。用いたチェーンは68φの第III種スタッド付きチェーンであり、破断荷重は356.6tfである。入射波についてはBretschneider-光易型スペクトルより算出した不規則波とし、乱数を変えることにより100種類の波を作成した。入射波方向は浮体の動揺、係留に最も厳しいと考えられる90度とした。なお、フローティングアイランドの設計波は有義波高1.5m、有義周期4.0秒である。シミュレーションの継続時間は全て4,000秒とし、時間間隔は左右揺れの固有周期(約40.0秒)の1/200の0.2秒とした。

4. 結果及び考察

4.1 浮遊式構造物の運動応答及び係留索張力に与える非線形要因の影響

運動応答、係留索張力に与える非線形要因として非線形波浪外力(2次入射波ポテンシャル)、粘性減衰力、波漂流減衰力に着目し、これらの影響について、それぞれ100回のシミュレーションにより系統計算を行った。表-2にシミュレーションのパターンと考慮した要因を示す。本稿ではFactor-A, B, C, Tについて比較を行った。

表-2 数値計算条件(非線形要因)

Case	考慮した非線形要因
Factor-A	2次入射波ポテンシャル
Factor-B	粘性減衰力
Factor-C	波漂流減衰力
Factor-D	2次入射波ポテンシャル+粘性減衰力
Factor-E	2次入射波ポテンシャル+波漂流減衰力
Factor-F	粘性減衰力+波漂流減衰力
Factor-T	全要因

100回のシミュレーションで得られたNo. 1 chainの索張力の極大値の確率分布の平均値を図-3に、その超過確率を図-4にそれぞれ、対数正規分布と共に示す。

全てのケースにおいて対数正規分布によって近似できるものと思われ、 10^{-3} の確率を見ると全要因を考慮したもの、2次入射波ポテンシャル、波漂流減衰力を考慮したものとは15~20tf近い張力の差が見られ、粘性減衰力のみを考慮した場合は全要因を考慮した場合よりも10tf以上の差が見られる。

つまり、それぞれの非線形要因を単独で考慮した場合は過大評価してしまう恐れがあることが分かる。

4.2 浮遊式構造物の不規則波中における非線形応答と極大値の推定

前節の非線形要因を全て考慮した上で、波浪外力の条件として表-3に示した有義波高、有義周期の組み合わせについてそれぞれ100回のシミュレーションを行った。表中の数字は係留索が破断することなくシミュレーションを終了した回数である。本稿では境ヶ浜フローティングアイランドの設計条件に近い表中、Case. 1~Case. 3の3組を取り扱った。

先ず、それぞれの左右揺れとNo. 1 chainの索張力の

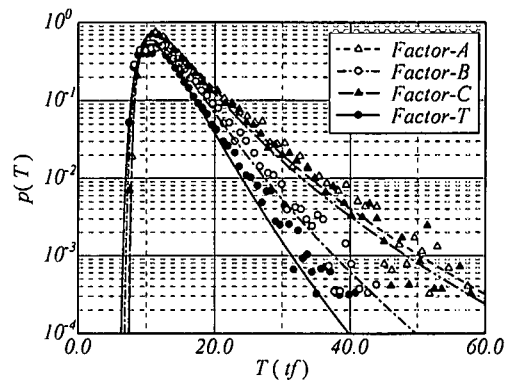


図-3 No. 1 chainの索張力の最大値の確率分布

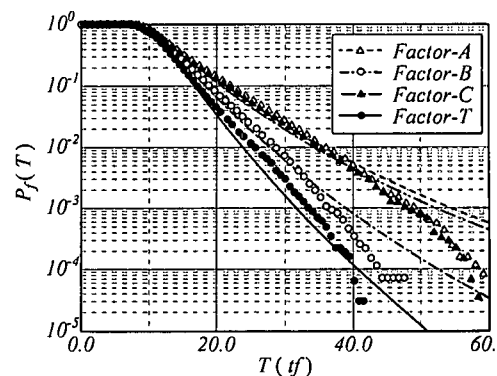


図-4 No. 1 chainの索張力の最大値の超過確率

表-3 数値計算条件 (波浪条件)

	1.5 m	2.0 m	2.5 m	3.0 m
4.0 s	100	100 (Case 1)	100 (Case 2)	100
5.0 s	100	93 (Case 3)	82	63
6.0 s	92	68	31	31
7.0 s	62	41	29	22
8.0 s	49	25	24	15

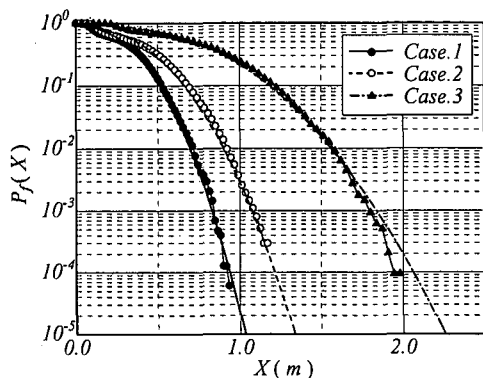


図-5 左右揺れの最大値の超過確率

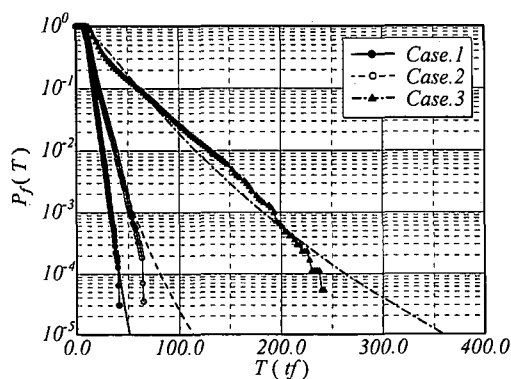


図-6 No. 1 chain の索張力の最大値の超過確率

極大値の超過確率を図-5, 図-6 に示す。

左右揺れの極大値はそれぞれの標準偏差を用いることによりガウス分布によってフィッティングを行った。全てのケースで良い一致を示しており、左右揺れの極大値はガウス分布で近似出来る。

No. 1 chain の索張力については対数正規分布をフィッティングした。左右揺れ程ではないものの対数正規分布によりほぼ近似出来るものと思われる。

次に、シミュレーションに用いた係留索に左右方向の強制変位を与えたときの索張力の特性曲線を図-7 に示す。これを用いて、左右揺れがガウス分布となると仮定して推定した索張力の超過確率の結果が図-8 である。

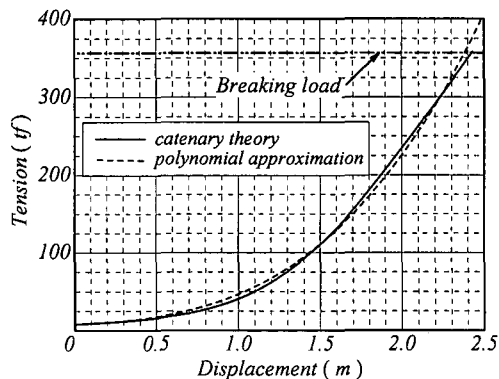


図-7 張力特性曲線 (左右揺れ)

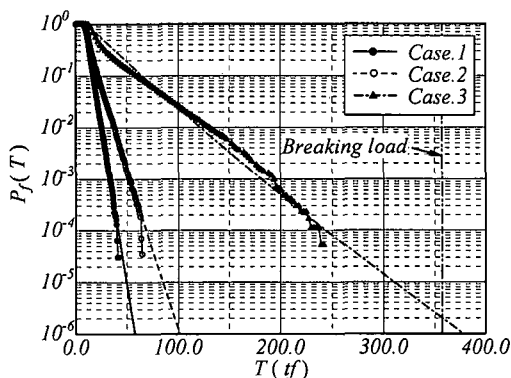


図-8 索張力の最大値の推定値

この結果より左右揺れの極大値分布と張力特性を用いて、張力の超過確率分布を推定出来る。

以上の結果からシミュレーションより 10^{-4} 程度までしか求めることが出来ないが、本研究で近似した分布関数により破断荷重に達する確率をほぼ推定できる。

例えば、図-8 の Case. 3 の結果を見るとシミュレーションでの超過確率は 10^{-4} で約 240 tf の張力が出ている。破断荷重は 357 tf なので 120 tf 程の余裕がある。この差がどの程度安全側であるかは破断荷重での超過確率である 10^{-6} の値を読み取ることによって知ることが出来る。

しかしここで一つ注意を要することは、係留索の破断に及んだケースを考慮すると、索張力の極値の周期が約 20 秒であるので、100 回のシミュレーションでは 20,000 個の極大値が得られることになる。そのうちの 7 回が破断荷重を越えたことになり、超過確率としては約 3.5×10^{-4} となる。この結果は破断に及ばなかった結果と比較すると危険側である。

この理由としては、係留索の動的影響や、長周期動揺と波浪による 1 次運動のピークが重なり瞬間的に過剰な張力が働いたためだと考えられる。また、本稿中では記載していないが 1 次運動の大きさとしては最大で 80 tf 程

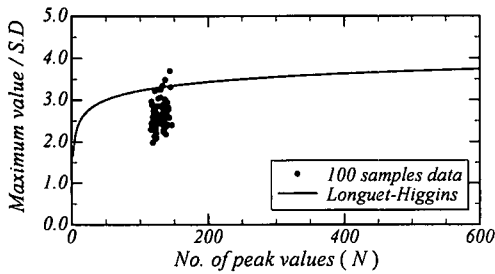


図-9 左右揺れの最大極大値の分布

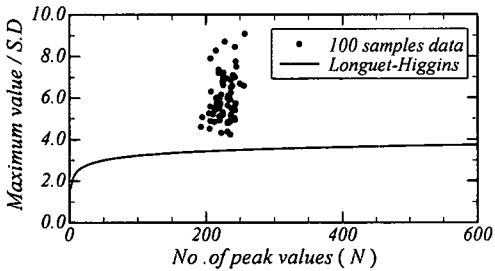


図-10 No. 1 chain の索張力の最大極大値の分布

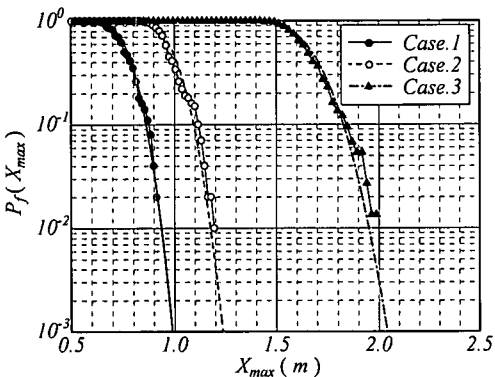


図-11 左右揺れの最大極大値の超過確率

度が予想される。

これまでに述べた極大値の超過確率の結果を見ると、運動応答、索張力が大きくなるに従いその傾向にばらつきが見られる。これはそれぞれ 100 回のシミュレーションを行っているが、それぞれの最大極大値の出現する確率は様々であるためである。そこで図-9、図-10 に Case. 3 における左右揺れと索張力の最大極大値と標準偏差との比を極値総数に対して示した。

実線が Longuet-Huggins による最大極大値の平均値と標準偏差との比を示した線形理論値である (合田, 1977)。これらの図より最大極大値が広範囲に分布していることが分かる。そこで、最大極大値の分布について解析を行った。

図-11、図-12 に左右揺れ、No. 1 chain の索張力の最

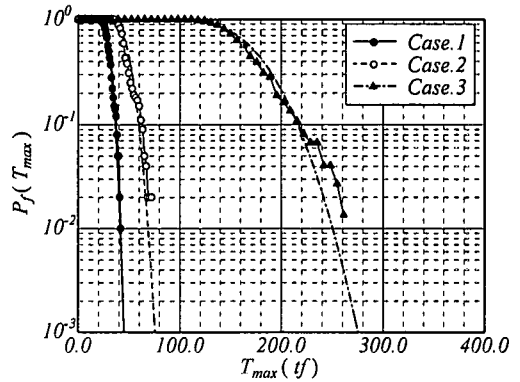


図-12 No. 1 chain の索張力の最大極大値の超過確率

大極大値の超過確率をガウス分布によってフィッティングした結果を示す。この結果を見ると左右揺れの最大極大値の分布特性は極大値と同様にガウス分布によってフィッティングすることが出来、張力に関しても左右揺れ同様にガウス分布を用いるのが妥当である。

5. 結 言

本研究で得られた結論は以下になる。

- (1) 左右揺れの極大値の分布特性はガウス分布によって、索張力に関しては対数正規分布によってほぼ近似出来ることが分かった。
- (2) 左右揺れ及び係留索張力の最大極大値の分布特性は、ほぼガウス分布となることが分かった。
- (3) 極大値の確率分布に分布関数を当てはめることにより非線形要因の影響を定量的に把握出来た。
- (4) 近似した分布関数を用いることにより破断荷重に対して、設定した係留条件がどの程度安全側であるか推定出来る。
- (5) 係留索が破断に及ぶようなケースから考えると、(4)での推定値より超過確率は高くなり危険側となることが分かった。
- (6) 今後は破断に及ぶようなシミュレーションを考慮した安全性評価の手法を検討する必要がある。

参 考 文 献

- 沿岸開発技術センター (1991): 浮体構造技術マニュアル。
 合田良実 (1977): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会。
 日本海事協会 (1983): 係留システム設計指針。
 増田光一・大澤弘敬 (1994): 沿岸海域に弛緩係留された浮遊式構造物の運動応答及び係留索張力の予測法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 464 号, pp. 128-139。
 増田光一・大澤弘敬 (1995): 沿岸海域に弛緩係留された浮遊式構造物の運動応答及び係留索張力の予測法に関する研究 (第 2 報) 一避難場所を有する浮遊式建築物の応答評価一, 日本建築学会構造系論文集, 第 471 号, pp. 193-202。