

津波中の浮体式海洋構造物における 係留索張力の応答に関する研究

A STUDY ON MOORING TENSION RESPONSES WITH FLOATING STRUCTURE UNDER TSUNAMI

宮崎 剛¹・増田 光一²・小林 昭男³

Tsuyoshi MIYAZAKI, Koichi MASUDA and Akio KOBAYASHI

- ¹ 工博 運輸施設整備事業団運輸技術研究員 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-1-1)
- ² 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
- ³ 工博 日本大学講師 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

Tsunami is brought about an earthquake in the bottom of the sea. Tsunami's wave height becomes higher in shallower sea. Under that condition, Tsunami is considered as shallow water long period wave. Wave load from Tsunami has much influenced to the motions and mooring tensions of a floating structure in offshore area. For this reason, wave load from Tsunami is essential to planning protection against calamities. Since, an estimation method on Tsunami wave exciting forces in the stage of basic design of floating structure has been presented in this study. Summaries of this study are shown as follows;

- 1) A concept of solitary wave corresponding to Tsunami has been proposed. Tsunami wave exciting forces can be calculated with lessor labor.
- 2) The effects of Tsunami wave loads have been made clear comparing two kinds of calculation results. The former is calculation results with Tsunami, the latter is calculation results with wind waves.

Key Words : Tsunami, wave load, solitary wave, motions and mooring tensions, floating structure

1. 緒言

空間資源の一つとして、海洋空間の有効利用を図るために浮体式海洋構造物の導入を考えた場合、合理的な設計を行い、構造物としての安全性を確保するためには各種の環境外力を考慮し検討する必要がある。世界有数の地震国である日本を考えた場合、地震に起因する環境外力を考慮する必要がある。地震に起因する環境外力としては、地震そのものに起因する地震力（海震）の他に、異常波浪としての津波による外力が考えられる。海岸付近に設置される海洋構造物に津波が作用した場合には、波力や浮体式構造物の運動応答に与える影響が大きくなる場合があり、防災上無視できない問題であると考えられる。

このような背景より、沿岸域における津波を想定した運動応答・係留索張力応答の計算・予測が可能となるならば、浮体式海洋構造物の合理的な設計・計画を行う上で非常に有用であると考えられる。そこで本研究では、津波が浮体式海洋構造物に及ぼす

影響を解明する第一段階として、鉛直2次元断面内における津波波力の算定法ならびに津波作用時における浮体式構造物の運動の算定手法の開発を行った。

浮体式構造物の津波応答に関する研究は、ここ数年海岸工学や造船工学の分野で着手されてきている。^{1), 2), 3)}しかし、津波中浮体応答に関する決定的な手法は、計算労力や計算に用いるモデルの制約などから、未だ確立されてはいないのが現状である。浮体式海洋構造物に作用するであろう津波波力を考える場合、海洋構造物に入射する津波波形の想定が重要な検討課題となると思われる。また、超大型浮体式構造物を対象と考えた場合に、想定される津波の初期水位より静水圧近似に基づく伝播計算を行う手法が提案されている。⁴⁾しかし、津波波源の位置や空間的な規模、津波の初期水位の設定などに数多くのパラメータを含むことになるため、設計荷重の設定という面からは、依然その不確実性が問題となると考えられる。

このような研究の現状を踏まえ、本研究では構造物の初期設計を念頭に置いた実用的な津波波力と運

動応答の算定法の開発を目的とする。ここで実用的とは、過大な計算労力を必要としないこと、現象の詳細な再現ではなく、設計に適用できる範囲での値の把握を目指すものである。

2. 津波作用時の浮体の挙動算定法

本章では、構造物の初期設計段階を念頭に置いた津波作用時の浮体応答算定手法を提案する。初期設計における検討を考え、浮体設置点としては、開放性の沿岸域で浮体構造物のメリットが生じる水深40m以深の海域を想定する。このような海域の場合、海岸地形や海底地形が津波の波形変化に及ぼす影響は小さく、津波の第1波目の波形は孤立波として仮定し得ると考える。よって、津波波力の最大値及び浮体運動の最大値の実用的な精度での推定を目的とし、津波波形に関して、エネルギー的に等価であると考えられる孤立波により、津波伝播波形を置き換えて計算労力の軽減を図った。その手法についても本章で示す。

津波初期波形は、断層パラメータを用いたMansinha-Smylieの手法⁵⁾により得ることができる。しかし、この方法を採用した場合、

- 1) 海底地盤変位の計算
 - 2) 水面変位の計算
 - 3) 伝播波形の数値計算
 - 4) 津波波力の算定
 - 5) 浮体式海洋構造物の応答算定
- と言う5段階の手順を踏むことになる。ここで、計算労力という観点からは、上で示した手順の中で、海底地盤変位の計算から伝播波形の数値計算までの段階は、計算に用いるパラメータの多さや、その不確定性（パラメータを一義に定めることの困難さ）、加えて地震源から浮体設置海域までの数値シミュレーションが必要となるため、計算領域の大型化による計算時間の増大等によって計算労力が膨大となることが予想される。更に、津波波源が大水深（2000m）であるのに対して浮体設置水深は、数十メートル（一般には50m以浅）であるため、計算上の不安定さなども問題となる。そこで本研究では、浮体式海洋構造物に津波が及ぼす影響を明らかにするために、浮体設置点における実用的な津波波形推定法を提案する。本研究では、孤立波の裾野の広がりや波高との比をパラメータとし、津波波形を孤立波で置換する方法を提案する。計算手法の流れは以下になる。

- 1) 地震マグニチュードに対応した津波初期波高推定
- 2) 海洋構造物設置水深における津波波高の推定
- 3) 海洋構造物設置水深における津波波長の推定
- 4) 海洋構造物設置点における津波相当孤立波の決定
- 5) 津波相当孤立波を用いた津波波力の推定
- 6) 海洋構造物の津波応答の算定

この手法を用いることにより、伝播波形の数値計算という最も計算労力の大きな部分を省力化することができる。

(1) 地震マグニチュードに基づく津波初期波高の推定

本計算手法においては、地震マグニチュードに対応した津波初期波高を予め数値計算によって算定⁶⁾し、初期波高を得ることとする。ここで、本計算手法は2次元断面を想定し、海底断層をモデル化するための、断層長さ、断層幅、滑り量、走向、傾斜角、滑り角の6つのパラメータのうち、ここでは断層長さは一定とする。また、マグニチュードのみならず幅、滑り量、走向、傾斜角、滑り角の5つのパラメータも津波初期波形の決定には重要な要因となることが判っているが、本研究ではあくまで実用的な算定手法を目指すため、断層幅の変化のみに着目して、マグニチュードの変化に伴う波高変化の推定を行う。断層幅に関しては、マグニチュードに対して、

$$\begin{aligned} \log LW &= M - 4.07 \\ \therefore 10^{M-4.07} &= LW \\ \therefore W &= \frac{10^{M-4.07}}{L} \end{aligned} \tag{1}$$

(L=100km一定)

なる経験式が得られている。⁴⁾ここで、M:マグニチュード、L:断層長さ、W:断層幅である。また、地震マグニチュードに対しては、津波の危険性が生じるのは一般にM6.5以上の場合とされている⁴⁾ため、M6.5以上の場合について検討する。津波初期波形の算定に用いたパラメータの一例を以下に示す。

表-1 断層パラメータ

断層幅 (m)	$W=10^{M-4.07}/L$
断層深さ (km)	2
滑り量 (m)	4
走向 (deg.)	60
滑り角 (deg.)	30

ここで、マグニチュードに対応した津波波高の計算結果をまとめると、図-1のようになる。この図より、マグニチュードに対応した津波波高の推算が可能となる。

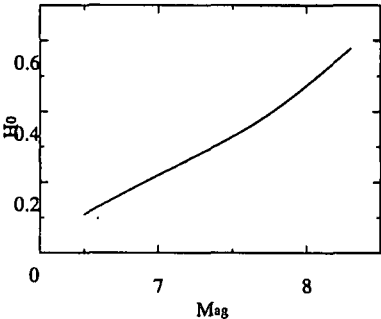


図-1 マグニチュードに対応した津波波高

(2) 構造物設置水深における津波波高の推定

前章で述べた手法で津波初期波高を推定した後、設置地点における津波波高の推定を行う。津波波高の推定には以下に示すGreenの式⁷⁾を用いることとする。

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{B_0}{B} \right)^{1/2} \left(\frac{h_0}{h} \right)^{1/4} \quad (2)$$

ここで、 H ：水路幅 B 、水深 h の浮体設置地点の津波波高、 H_0 ：水路幅 B_0 、水深 h_0 の地点での津波初期波高である。水深が浅い場合には、津波変形を岸の理論⁷⁾によって計算することができる。

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{\sqrt{1+\eta_0}-1}{\sqrt{1+\eta}-1} \right)^{4/5} \left(\frac{6\sqrt{1+\eta_0}-1}{6\sqrt{1+\eta}-1} \right)^{4/5} \quad (3)$$

ここで、 η ：津波波高、水深比 $\bar{\eta} = \eta/h$ 、 η ：波高（ η ：設置点波高、 η_0 ：波源の波高）、 h ：水深（ h ：設置点水深、 h_0 ：波源の水深）である。

(3) 海洋構造物設置水深における津波波長の推定

津波の性状を示すパラメータとして、重要な要素として津波の波高と並んで津波の波長が挙げられる。本手法では、前項で得られた津波波高、浮体設置水深、浮体設置点における海底勾配に基づき、津波波長を推定する。津波波長としては、津波の第1波目の波長をzero up-crossで定義する。津波波長の推定に際しては、予め海底勾配をパラメータとして、後述の境界要素法を用いて波形伝播に関する系統計算を行い、その結果得られた図-2を用いることとする。

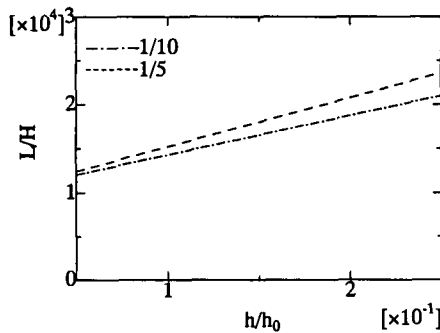


図-2 水深変化に対する津波波長の変化

(4) 海洋構造物設置地点での津波相当孤立波の設定

本計算手法においては、津波伝播波形をエネルギー的に等価であると考えられる孤立波で置き換えることとする。本報では、この孤立波を津波相当孤立波と呼ぶこととする。津波相当孤立波としては、津波波高に波高を合わせるが、津波波長に対し孤立波には波長の定義が不可能であるため図-3に示すように、 $H'/H = 1/100$ の点をもって波長 L を定義することとした。

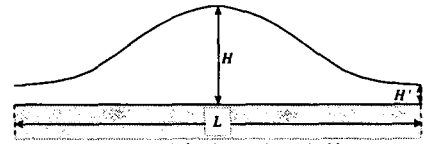


図-3 孤立波波長の定義

(5) 津波相当孤立波を用いた津波波力の推定

津波相当波力を決定した後、津波波力の推定を行う。津波波力の推定に関しては、孤立波を用い以下に述べる計算手法を用いて行う。その際、設置水深に関しては浮体近傍に関しては一定水深として考えるとする。

a) 津波波力

本研究では浮体に作用する津波波力の算定には2次元鉛直断面における境界要素法を用い、波強制力の形で算定した。

b) 基礎方程式

流体を非圧縮・非粘性と仮定し、水粒子の運動が非回転と仮定すると、速度ポテンシャルの存在が保証される。これより、流場の基礎方程式として(4)式に示すLaplace方程式を満たす。

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (4)$$

本研究で用いる座標系は図-4に示すように、右手直交座標系を用い、問題を簡単にするため鉛直2次元断面モデルについて考えることにする。この時、流体の内部領域を Ω 、境界を S と呼ぶものとする。

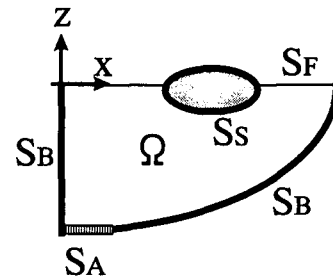


図-4 流場座標系

c) 境界条件

波を起こす（波が入射する）境界部の条件としては、次に示す境界条件を与える。なお、 $v(x, z; t)$ は境界における流速、 $\vec{n}$ は境界の法線ベクトルを表す。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = v(x, z; t) \cdot \vec{n} \quad \text{on } S_A \quad (5)$$

水底および構造物表面などの固定壁の境界条件は、境界自体に変化が無く、境界の法線方向に流速を持たないことから、次の様に示される。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_B, S_S \quad (6)$$

本手法では時間領域で解析を行うため、自由表面の境界条件を、自由表面の形状から求められる運動学的条件と、Bernoulliの定理から求められる力学的条件の二つに分けて考えるものとする。自由表面

の運動学的条件は自由表面上の波形から以下のように示すことができる。ただし、 η は自由表面の鉛直方向変位を表している。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{on } S_f \quad (7)$$

次に、自由表面の力学的条件は、Bernoulliの定理において、大気圧を基準と考えた場合、次式によって表すことができる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{on } S_f \quad (8)$$

d) 境界積分方程式

前節で示した境界値問題と等価な境界積分方程式は(9)式のように与えられる。なお、 P は観測点を、 Q はソース点を示し、 Φ^* が基本解を示している。

$$\frac{1}{2} \Phi(P) = \int_S \frac{\partial \Phi}{\partial n} \Phi^* dS - \int_S \Phi(Q) \frac{\partial \Phi^*}{\partial n} dS \quad (9)$$

この境界積分方程式を離散化し、速度ポテンシャルを未知数とする連立方程式を誘導する。なお、ここでは2次元空間を対象としているため、基本解は次の式で与えられる。ここで r は PQ 間の距離である。

$$\Phi^*(P, Q) = \frac{1}{2\pi} \log \frac{1}{r} \quad (10)$$

得られた速度ポテンシャルの時間 t に関する変化は、時間増分法によって解析している。速度ポテンシャルが得られると、物体表面に作用する圧力は、Bernoulliの定理から(11)式のように表すことができる。

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi)^2 \quad (11)$$

ここで、 ρ は流体密度、 t は時間を表す。(11)式で示される圧力を、浮体の没水線について積分することにより、各運動方向に作用する波強制力が導かれる。

(6) 津波中浮体応答

津波相当孤立波を用いて津波波力を算定した後、浮体応答の算定を行う。浮体応答の算定法を以下に示す。

a) 津波中浮体応答算定法

本計算手法においては流場を2次元鉛直断面で捉え、2次元領域において津波作用時の浮体の応答の算定を行う。本手法に用いた座標系を図-5に示す。

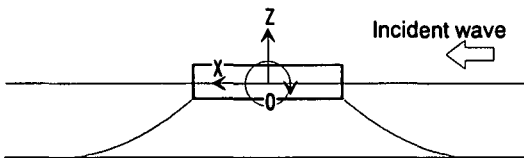


図-5 運動応答算定座標系

b) 運動方程式

本算定手法においては、時間領域において浮体式構造物の運動応答を算定する。解析には、以下に示

す一般的な浮体応答の算定に用いられる運動方程式を用いた。

$$\begin{aligned} & \{M\} + \{Ma\} \ddot{X}(t) + \{Dm\} \dot{X}(t) \\ & + \{B\} \dot{X}(t) \dot{X}(t) + \{C\} X(t) \{G(t)\} \\ & = \{Fe(t)\} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 M は慣性力係数、 Ma は付加質量係数、 Dm は造波減衰力係数、 C は静的復元力係数、 B は粘性減衰力係数、 G は係留力、 $Fe(t)$ は津波波力を表す。また、 X は運動応答を表し、ドットは時間微分を意味する。以下 X_i の添え字 i は2次元鉛直断面における運動モードを示し、 $i=1, 2, 3$ は各々 surge, heave, pitchを意味する。本研究においては浮体に関する流体力係数を一定値と考える所謂 C.C. (Constant Coefficient) 法を基本に考えていく。本手法は所謂 C.I. (Convolution Integral) 法と比較して計算労力が低く、より実用的な計算手法であると考えられる。 Ma , Dm に関しては特異点分布法⁶⁾によって、各運動モードの固有周期における値を予め計算しておき、その値を用いる。この運動方程式に前節で計算された各時間における津波波力を $Fe(t)$ として与え、Newmark- β 法により時間領域で解析を行う。

c) 係留系復元力

係留力 G は、浮体運動算定に関して重要な支配的要素である。そこで本研究では、係留索の伸びを考慮した修正カテナリー理論に基づき、時々刻々の係留力を算定し、実用的な範囲での精密な算定を行った。⁶⁾係留力は浮体重心と係留索の浮体側取付点までの位置ベクトルを用いて次式のように与えられる。

$$G_1 = \sum_{i=1}^N -T_{H_i} \quad (13)$$

$$G_2 = \sum_{i=1}^N -T_{V_i} \quad (14)$$

$$G_3 = \sum_{i=1}^N T_{V_i} x_{p_i} - T_{H_i} z_{p_i} \quad (15)$$

ここで、 $G_i(i=1, 2, 3)$ は各運動モードに対応する係留力、 N は係留索本数、 T_{H_i} は水平張力、 T_{V_i} は鉛直張力、 (x_{p_i}, z_{p_i}) は物体固定座標系における浮体側係留索取付点座標である。さらに、水平張力 T_{H_i} 、鉛直張力 T_{V_i} は前述のように係留索の伸びを考慮した修正カテナリー理論を用いて解析を行い、係留索の浮体側取付点は、瞬時瞬時の浮体の運動に伴って変化するものとする。また、張力 T は、水平張力 T_{V_i} と鉛直張力 T_{H_i} により次式により計算できる。

$$T = \sqrt{T_{H_i}^2 + T_{V_i}^2} \quad (16)$$

3. 数値計算による検討

本研究での計算例として浮体式海洋構造物として、浮体規模としては $B \times L \times D = 48.0 \times 100.0 \times 6.0(\text{m})$ を想定した。浮体設置水深としては、津波来襲時における退避なども考えて $h = 40.0(\text{m})$ とした。構造物の用途としては、沖合防災基地などを想定している。

(1) 津波中浮体応答算定例

想定する地震規模はM=7.7とする。浮体の設置水深 h ならびに海底勾配 S_1 については図-6のように設定した。

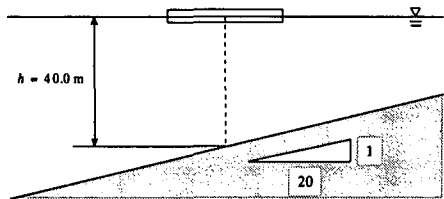


図-6 計算モデル

津波相当孤立波を用いた入射波波形は図-7のようになる。

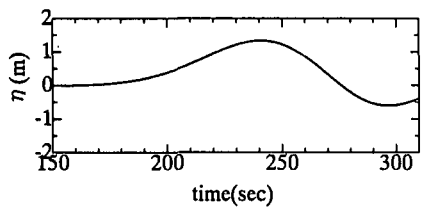


図-7 入射波波形時系列

計算された津波入射波波形を用いて、浮体の運動応答を算定した。運動応答算定に用いた係留索諸元を表-2に、運動算定結果を図-8に示す。

表-2 運動応答算定に用いた係留索諸元

使用チェーン	鋳鋼アンカーチェーン第3種(φ=130)
単位水中重量	333.09kgf/m(3264.282N/m)
断面積	0.0265m ²
初期張力	90.0tf(882.0N)

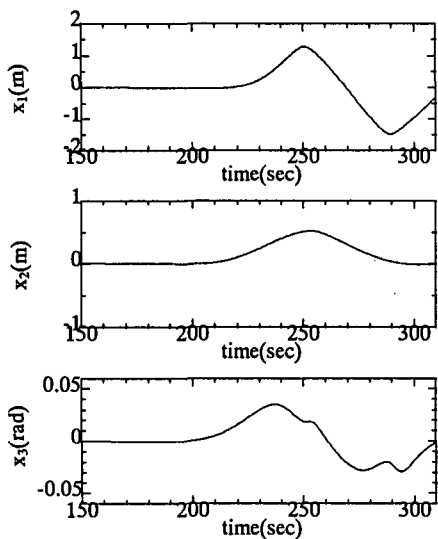


図-8 運動応答算定結果

津波作用時には、浮体は上下方向には水面変位に追従して動くことが判る。それに対して、水平方向には波力が衝撃的に作用するため、通常の波浪中の場合と比較して大変位の運動となることがわかる。次に係留索張力応答に関して図-9に示す。

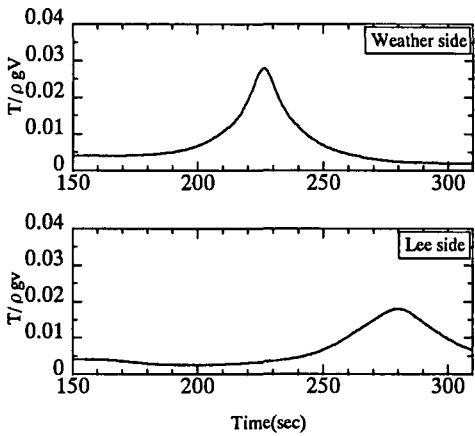


図-9 運動時の係留索張力応答

水平方向における大振幅の変位によって、係留索張力が大きくなっていることが判る。今回の設定条件における係留索の破断荷重と比較すると、今回は係留系の破断は生じないことが判る。

(2) 浮体式海洋構造物に対する津波荷重の検討

前項までに示した計算手法を用いて実機構造物を想定し、津波荷重の係留設計に及ぼす影響について検討を行った。構造物としては沖合浮体式波力装置⁸⁾を想定した。沖合浮体式波力装置は三重県五ヶ所湾の湾口部の沖合約1.5km、水深約40mの海域に設置されている。計算に用いた浮体諸元等を表-3に示す。浮体式波力装置は波上側4本、波下側2本の係留チェーンを用いて弛緩係留されている。また併せて波浪が作用した場合について、同一の設置条件および係留条件において浮体の長周期動揺を考慮した計算を行った⁶⁾。

表-3 計算諸元

浮体規模(B×L×D)	30.0×50.0×3.00(m)
水深	40.0(m)
浮体排水量	4612.5(t)
有義波高	8.0(m)
津波発生時	7.7
海底地震マグニチュード	
係留チェーン(長さ×本数)	φ160(250(m)×4(本)), φ81(200(m)×2(本))

ここで用いる波浪条件としては、設計条件として設定された、潮岬における観測データから推定された五ヶ所湾における50年再現波高 $H_{1/3}=8.0$ mとした。⁸⁾ 図-10に同一の設置条件、係留条件における津波作

用時の応答と、波浪作用時の応答に関して、係留索張力の最大値に着目して示す。

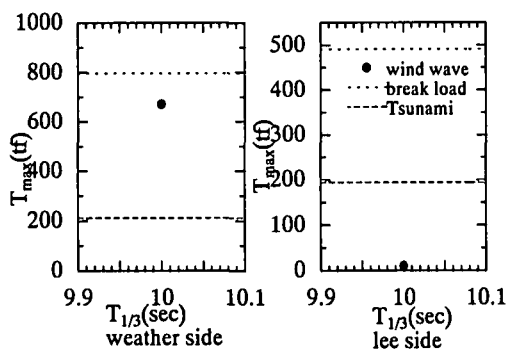


図-10 係留索張力の最大値

図-10は、波浪作用時と津波作用時における係留索張力の最大値を、波上側係留索と波下側係留索に分けて示したものである。破線で津波作用時の索張力を示し、●で波浪作用時の索張力を示す。また、参考までに点線で係留索として用いたチェーンの破断荷重を示した。暴風時の海象条件であると考えられ、設計条件でもある50年再現波高作用時に比較して、相応の係留索張力が津波が作用した場合に発生していることが判る。このことから、浮体式海洋構造物の初期設計段階において津波荷重の考慮が必要不可欠であると考えられる。次に、浮体式海洋構造物の係留系の初期設計という側面からは、「浮体式海洋構造物技術マニュアル」⁹⁾によれば、浮体式海洋構造物の係留設計を行う際には、係留索張力の最大値が係留チェーンの破断荷重の1/3に収まるように推奨されており、50年再現波高を設計条件として用いた今回の計算例においては、係留索の設定に関する再検討もしくは係留索張力の最大値の抑制策⁸⁾が求められるが、暴風時を対象とした係留設計が行われていれば、津波作用時にも係留系の破断を免れることが出来るという結果であると考えられる。浮体式海洋構造物の初期設計を、係留索の1次的な選定と捉え、本手法によって確認された津波荷重の規模は、貴重な設計情報となると考えられる。海岸地形や海底地形の変化による津波波形的変化の影響は、本手法には厳密には採り入れられてはいないが、詳細設計時には精密に検討すべき課題であると考えられる。

4. 結言

以上により、以下の結論を得た。

- 1) 津波相当孤立波という概念を導入し、津波波力の推定について、より計算労力を低減した形の算定手法を構築・提案した。

- 2) 構築・提案した算定手法を用いて、実際の浮体式海洋構造物を想定し、運動応答・係留索張力の応答の推定を行い、その有用性を明らかにした。また、波浪を対象とした場合の計算結果と係留索張力によって比較を行い、浮体式海洋構造物の設計において津波荷重の及ぼす影響について考察した。津波作用時の係留索張力は、浮体式海洋構造物の設計において重要な検討項目となることが確認された。
- 3) 海岸地形や海底地形による津波波形的変形の影響に関しては、本研究で開発した計算手法には厳密には採り入れられてはいないが、その影響に関しては詳細設計の段階で精密に検討されるべき課題であることはいふまでもない。

以上、本論によって、浮体式海洋構造物に作用する津波波力と運動応答に関する実用的な推定法を確立した。本手法を用いることにより、初期設計段階における、津波作用時の浮体式海洋構造物の係留設計に際して有用な情報が得られるものと考えられる。

謝辞：沖合浮体式波力装置に関して海洋科学技術センター大澤弘敬博士より資料の御提供を頂いたことを記し、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 増田光一・佐竹寛之・高村浩彰・宮崎剛：「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策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. 956-960，1996
- 2) 吉田宏一郎・鈴木英之・細見育郎・菜畑英生：「津波・海震の浮体に対する影響評価」，日本造船学会論文集，第180号，pp. 403-409，1996
- 3) 増田光一・宮崎剛・高村浩彰：「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策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. 806-810，1998
- 4) 多部田茂・井上義行・木村茂・牧野弘幸：「超大型浮体構造物に作用する津波荷重の数値計算」，日本造船学会論文集，第184号，pp. 307-313，1998
- 5) Mansinha, L. et al, 'The displacement field of incind faults', Bull. Seism. Soc. Amer., 61, 1971
- 6) 増田光一・大澤弘敬：「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. 128-139，1994
- 7) 土木学会：「水理公式集」，（社）土木学会，1986
- 8) 大澤弘敬・永田良典・宮島省吾・前田久明：「浅海域における沖合浮体式波力装置の係留システム設計」，日本造船学会論文集，第182号，pp. 341-348，1997
- 9) 沿岸開発技術研究センター：「浮体構造物技術マニュアル」，沿岸開発技術センター，1991