

減衰装置付テンションレグプラットフォームの 波浪中応答特性—近似的解析法と水槽試験結果—

Response Characteristics of Tension Leg Platform with Mechanical Damping System in Waves
—Approximate Response Analysis Method and Tank Test Results—

片山正敏*・宇ノ木賢一**

Masatoshi Katayama and Ken-ich Unoki

This paper first presents an approximate response analysis method for a tension leg platform with a mechanical damping system in waves based on the finite amplitude and non-linearized theory. Next, the results of a tank test for verifying the effect of the mechanical damping system and the accuracy in computation and the applicability to practical problems of the above response analysis method are introduced. Finally, the response characteristics of the tension leg platform with the mechanical damping system in waves and its applicability to practical problems are discussed by pursuing the systematic numerical analysis on a prototype tension leg platform.

Keywords : Response characteristics, Tension leg platform, Mechanical damping system, In waves

1. はじめに

大水深海域における石油・ガス生産プラットフォームとして、ガイドタワー方式やテンションレグ方式のいわゆる揺動形構造物 (Compliant Structures) が欧米では設計・建造されるようになってきた。なかでもテンションレグプラットフォーム (以下、TLPと略称) は、波浪中動揺特性に優れ、生産作業性および維持補修がジャケット方式と原則的に同じでありながら、経済性に優れ、かつ、移動性に富むことから海気象条件や地理的条件に恵まれない中小規模油田の、いわゆる、限界可採油田 (Marginal Field) 開発向けとして着目され、研究開発や実用化が進められてきた。

TLPの計画設計にあたっては、その波浪中運動特性のほかに、レグ機構 (以下、外部力学系と呼称) の構造形式や強度上の安全性の検討が重要となってくる。とくに外部力学系の波浪中張力応答特性は、その剛性 (復原性) や減衰機構に大きく依存する。このため、TLPの波浪中レグ張力応答を低減させる目的で減衰機構に着目し、これに油圧式減衰装置 (Mechanical Damping System) を組み込むことを検討した。すなわち、線形理論に基づく減衰装置付TLPの波浪中応答解析法や減衰装置の効果を確認するための基礎的水槽試験¹⁾ならびに大波高下でのTLPの非線形応答 (波高影響) に関する水槽試験²⁾などを実施してきた。

本論文では、減衰装置を外部力学系 (レグ機構) に組み込んだTLPの波浪中応答特性に関して、波高影響を考慮した近似的全体応答解析法を中心に、水槽試験による近似的応答解析法の実問題への適用性や実機相当モデルについての簡単な数値解析による減衰装置付TLPの波浪中応答特性の検討結果について述べる。

2. 近似的波浪中応答解析法

(1) 基本的仮定および解析法

応答解析にあたっては、次のような基本的仮定が設けられている。

- 全体応答解析にあたっては、立体骨組構造として取り扱うことができる。
- 流体は非圧縮、非粘性、非回転の理想流体とする。
- 構成部材の断面寸法は波長に比較して十分小さく、かつ、その流体力学的な相互干渉は無視できる。
- レグ機構 (係留ライン) などの外部力学系に作用する流体力学的な力は無視できる。
- 波は微小振幅または有限振幅の深海進行波とし、流体力は波による水粒子の変位、速度、加速度で線形表示できる。
- 構造変形は微小弾性で、運動応答解析においては無視でき、運動は重心まわりの調和振動とする。

* 正会員 九州共立大学工学部開発学科 (807 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

** 三菱重工業株式会社

g) 風圧力、潮流力、波漂流力などは全体構造の運動変位にかかわらず一定とし、静的外力として取り扱える。
 各構成部材に作用する力は、慣性力、圧力による力、相対変位による力、相対速度による力、相対加速度による力の5種類と仮定し、部材要素重心を節点とする立体骨組構造の節点外力（節点集中荷重および分布荷重）とみなす。慣性力以外の4種類の力のうち、部材要素の変位、速度、加速度に依存する項は、復原力、Radiation Force や外部力学系による係留力、および Froude-Kriloff Force、Diffraction Force の波強制力などである。
 以上から、各波周波数に対するみかけ慣性力、減衰力、復原力（外部力学系を含む）および波強制力からなる運動方程式が組み立てられる。この運動方程式を解析することにより、6成分の運動振幅・位相が求められ、したがって、各構成部材の分担すべき部材力やLEG張力も決定される。

(2) 波浪中全体応答解析法

TLPの上部構造は、基本的には半潜水式構造物と同様であり、その波浪中の応答解析にあたっては、半潜水式海洋構造物と同様の方法³⁾が適用でき、外部力学系に関する項を一部修正すればよい。すなわち、減衰装置付TLPの全体構造系の周波数応答関数は、部材要素*i*に関する式(1)～(3)を解くことにより求められる。³⁾ (図-1参照)

$$\sum_i F_i^W + \sum_i F_i^B + \sum_j F_j^T = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\sum_i F_i^{WI} + \sum_i F_i^C + \sum_i F_i^{DR} + \{ \sum_j (T_j^t \cdot C_j^I \cdot T_j) + \sum_k (T_k^t \cdot C_k^I \cdot T_k) \} \cdot \eta_{static} = 0 \quad \dots \dots (2)$$

$$\begin{aligned} & \sum_i (T_i^t \cdot A_i \cdot T_i) \cdot \ddot{\eta} + \sum_i (T_i^t \cdot B_i^I \cdot T_i) \cdot \dot{\eta} \\ & + \sum_i (T_i^t \cdot B_i^{II}) \cdot (T_i \cdot \dot{\eta} - \dot{\zeta}_i) \cdot |T_i \cdot \dot{\eta} - \dot{\zeta}_i| \\ & + \sum_j (T_j^t \cdot C_j^I \cdot T_j) \cdot \eta + \sum_k (T_k^t \cdot C_k^I) \cdot (T_k \cdot \eta - \zeta_k) \\ & = \sum_i (T_i^t \cdot G_i) \cdot \ddot{\zeta}_i + \sum_i (T_i^t \cdot H_i) \cdot \dot{\zeta}_i + \sum_k (T_k^t \cdot G_k) \cdot \zeta_k \quad \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ただし、

- F_i^W : 重量ベクトル（積載荷重、自重など）
- F_i^B : 浮力ベクトル
- F_j^T : 外部力学系（LEG）の初期張力ベクトル
- F_i^{WI} : 風荷重ベクトル
- F_i^C : 潮流力ベクトル
- F_i^{DR} : 波漂流力ベクトル
- T_j : 上部構造への外部力学系の着力点*j*の変位変換マトリックス
- T_j^t : T_j の転置行列
- T_k : 水面を切る部材要素*k*の変位変換マトリックス
- T_k^t : T_k の転置行列
- T_i : 部材要素*i*の変位変換マトリックス
- T_i^t : T_i の転置行列
- C_j^I : 上部構造への外部力学系の着力点*j*における非線形ばね定数マトリックス
- C_k^I : 水面を切る部材要素*k*に関する復原力係数マトリックス

- η_{static} : 静的変位ベクトル（風、潮流、波漂流力に対応する）
- η : 全体構造系（外部力学系を含む）の重心の運動変位ベクトル
- $\cdot$: 時間に対する微分記号（ $\dot{x} = dx/dt$ ）
- A_i : 部材要素*i*に関するみかけ慣性力係数マトリックス（波面と運動を考慮した没水部について）
- B_i^I : 部材要素*i*に関する造波減衰力係数マトリックス（波面と運動を考慮した没水部について）
- B_i^{II} : 部材要素*i*に関する抗力係数マトリックス（波面と運動を考慮した没水部について）
- ζ_i : 入射波の水粒子の部材要素*i*における変位ベクトル
- ζ_k : 入射波の水粒子の水面を切る部材要素*k*における変位ベクトル
- G_i : 部材要素*i*に作用する波強制力の慣性力係数マトリックス（波面と運動を考慮した没水部について）

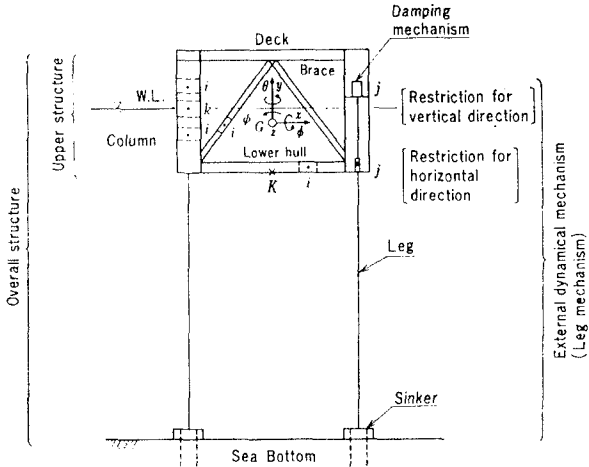


図-1 TLPの模式図

G_k : 水面を切る部材要素 k に作用する波強制力の変動浮力係数マトリックス

H_1 : 部材要素 i に作用する波強制力の減衰力係数マトリックス (波面と運動を考慮した没水部について)

外部力学系を有する浮体 (TLP) では、復原力係数マトリックス要素のロール、ピッチに対応する対角項には、式 (4) により外部力学系の初期条件 (初期張力) を考慮しなければならない。

$$B \cdot KB - W \cdot KG - T \cdot Z_p \quad \dots \dots \dots (4)$$

ただし、

B : 浮力、 W : 重量、 T : 初期張力、 KB : 浮心高さ、 KG : 重心高さ、 Z_p : 初期張力の着点高さ

また、図-2 に示す外部力学系のばね定数 (k_1 、 k_2) および減衰定数 (C_1) は、式 (5)、(6) に示す等価な並列のばね定数 k_e 、減衰定数 C_e に置き換えることができる。

$$k_e = k_2 \cdot \{k_1 (k_1 + k_2) + (\omega C_1)^2\} / \{(k_1 + k_2)^2 + (\omega C_1)^2\} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$C_e = C_1 \cdot k_2^2 / \{(k_1 + k_2)^2 + (\omega C_1)^2\} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ただし、

k_2 : レグの軸方向の剛性 (EA) によるばね定数
 $= EA/L$ (L : レグの長さ)

k_1 : 減衰装置のばね定数

C_1 : 減衰装置の減衰定数

ω : 波の円周波数

全体構造の重心まわりの運動を近似的に調和振動と仮定して、

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \eta_0 \cos(\omega t + \epsilon) \\ \dot{\eta} &= -\omega \eta_0 \sin(\omega t + \epsilon) \\ \ddot{\eta} &= -\omega^2 \eta_0 \cos(\omega t + \epsilon) = -\omega^2 \eta \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (7)$$

式 (7) の形で表し、式 (3) に代入し、 $\ddot{\eta}$ について整理した後、初期値として式 (3) を線形化した運動方程式の解析による線形解を使用して、必要な精度まで繰り返し計算を行って解を求め、その解を用いてフーリエ級数に展開することにより最終的な周波数応答関数が求まる。

また、外部力学系に作用する変動張力 F_v は式 (8) にて計算される。

$$\left. \begin{aligned} F_v &= \eta_0 \sqrt{k_e^2 + \omega^2 C_e^2} \cdot \cos(\omega t + \epsilon_v) \\ \epsilon_v &= \tan^{-1} \{ (k_e \sin \epsilon + \omega C_e \cos \epsilon) / (k_e \cos \epsilon - \omega C_e \sin \epsilon) \} \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots (8)$$

(3) 不規則波中応答解析

周波数応答関数が求まれば、不規則波中での運動変位、部材力や外部力学系 (レグ機構) に作用する張力などのパワースペクトル密度関数や分散なども計算されるので、不規則波中の応答も簡単に求まる。

つぎに、不規則波浪の波スティーブネスは一例として、図-3 に示すようにあらわすことができる。⁴⁾ ここで、平均波周期 $T_z > 13s$ において、100 年再現期待値の最大波高 32.0m に対応する短期海象の有義波高 $H_{1/3}$ を 17.2m とした。 ($H_{max} = 1.86H_{1/3}$)

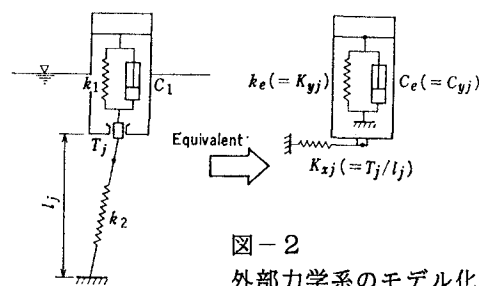


図-2 外部力学系のモデル化

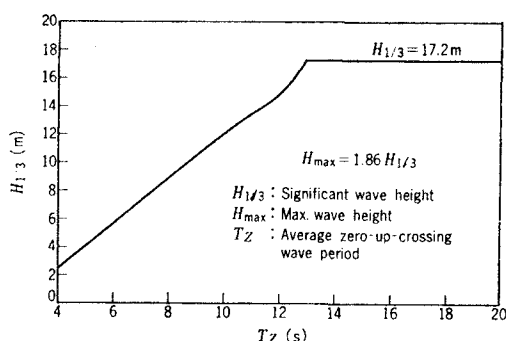


図-3 不規則波のスティーブネス (再現期間100年)

3. 水槽試験

(1) 試験法

TLP 上部構造の供試模型は、4 本-コラム、4 本-水平ブレースから構成される半潜水式構造の 1/70 縮尺模型を使用した。表-1 に主要諸元を示す。外部力学系の構成要素の一つである減衰装置としては電磁ダンパ ($C_1 = 0.02 \text{ kgf} \cdot \text{s/cm}$) を、レグ要素としてはコイルばね ($k_1 = 2-1.54 \text{ kgf/cm}$ 、 $k_2 = 8.89 \text{ kgf/cm}$) およびピアノ線を用いた。なお、波浪中運動 (動揺) は、6 成分動揺計測装置をデッキ上面に取り付けて、また、レグ張力はレグ下端部に取り付けたリングゲージを用いて計測した。

供試波は規則波で、試験範囲は次のとおりである。

波方向 : $\mu = 0^\circ$ 、 45° 、波高 : $h_w = 3.0 \text{ cm}$ 、 14.0 cm 、 42.0 cm 、波周期 : $T_w = 0.6 \sim 3.0 \text{ s}$

また、試験ケースは2ケースで、ケース1：減衰装置なし、ケース2が減衰装置付である。

(2) 波浪中運動応答試験結果

規則波中の運動応答試験結果の一例（ケース1：減衰装置なし、ケース2：減衰装置付）として斜波中のデッキ頂部での上下揺れの計測値と計算値の比較を図-4に示す。両者は減衰装置なしの同調点を除いて比較的よく一致している。上下揺れの実線非線形性（波高影響）は $T_w > 1.5\text{ s}$ において顕著にあらわれている。これは上下揺れと前後揺れおよび左右揺れの間の非線形なカップリングによるものと思われる。

(3) 波浪中レグ張力応答試験結果

同様に、斜波中レグ張力応答試験結果と計算値の比較を図-5に示す。この場合にも計算値と計測値はケース1（減衰装置なし）の同調点付近を除いては比較的よく一致している。非線形性（波高影響）は、 $T_w = 1.0\text{ s}$ 付近にて少し認められ、 $H_w = 42.0\text{ cm}$ の場合には $T_w > 1.8\text{ s}$ においてもかなり認められる。なお、入射波 $\mu = 45^\circ$ 、ケース1状態における模型の固有周期（計測値）は、 $T_H = 0.78\text{ s}$ 、 $T_P = 2.62\text{ s}$ 、 $T_B = 7.32\text{ s}$ である。また、ケース1よりケース2の方の同調点が長周期側にずれているのは、減衰装置中のばね（ k_1 、図-2参照）の影響である。

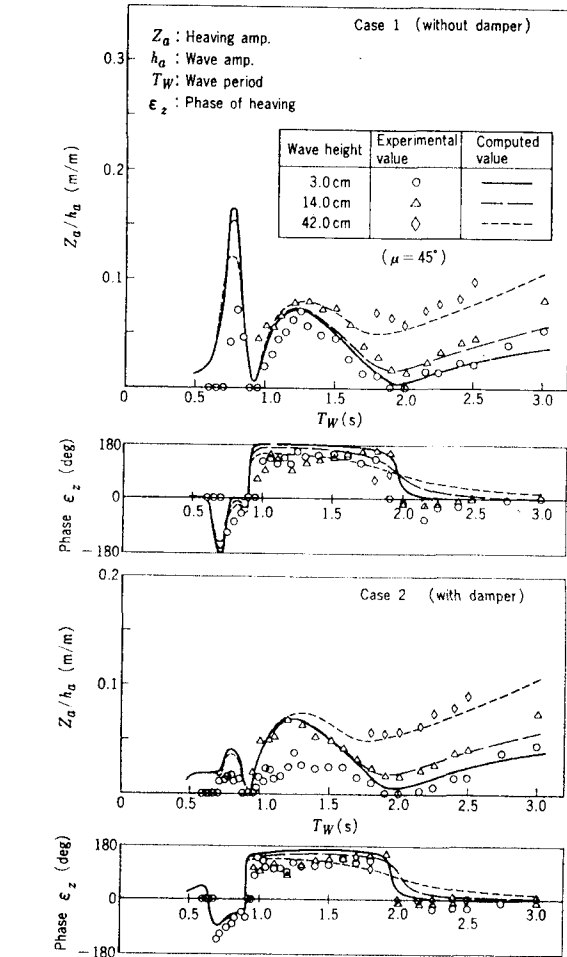


図-4 規則波中の上下揺れ

表-1 上部構造の主要諸元

項 目	模 型
長さ(コラム間距離) L	0.929 m
デッキ高さ D	0.886 m
コラム 個数-外径	4-φ0.200 m
ブレース 個数-外径	4-φ0.145 m
吃 水 d	0.429 m
排水量 Δ	102 kg
重 量 W	102 kg
重心高さ KG	0.435 m

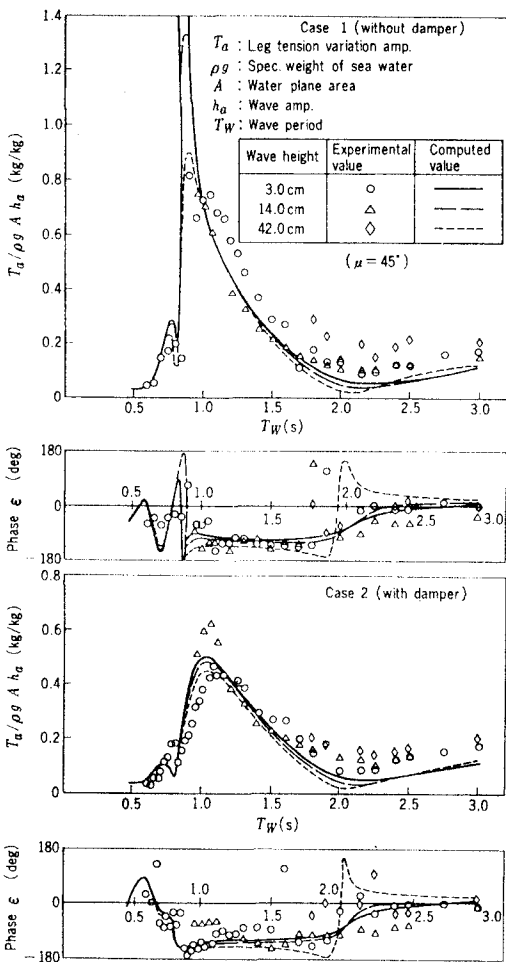


図-5 規則波中のレグ変動張力

(4) 減衰装置の効果

減衰装置の効果は図-4、5からも明かなようにTLP全体構造系の応答の同調点付近で顕著にあらわれている。すなわち、ケース1（減衰装置がない場合）とケース2（減衰装置付の場合）を比較すると、同調点でのピーク値でみると、上下揺れについては大幅に、レグ張力についても約2／3程度に低減していることがわかる。

4. 実機相当モデルについての検討

(1) 実機相当モデル

検討の対象とした実機相当モデルの主要諸元は表-2に示すとおりである。減衰装置付実機相当モデル（モデルⅠ）は、鋼管と油圧式減衰装置からなる減衰機構を備え、減衰装置なし実機相当モデル（モデルⅡ）は、モデルⅠから減衰装置を取り除いた鋼管のみからなるレグ機構を備えたものと想定した。

(2) 減衰装置付 TLP の不規則波中応答特性

図-6および図-7に減衰装置付 TLP（モデルⅠ）および減衰装置なし TLP（モデルⅡ）の斜波中における波下側のレグ張力応答特性（変動張力）をそれぞれ示す。不規則波のスペクトルとしては Pierson-Moskowitz 型を用い、周波数応答関数としては有義波高に対応したものを考慮した。

減衰装置付 TLP についての応答の非線形性（波高影響）は $T_z > 6s$ では、有義波高 2m と 10m を比較すると顕著である。有義波高 10m における単位有義波高に対する応答振幅の有義値は $T_z = 7s$ では有義波高 2m におけるものより約 10% 程度大きくなっている。有義波高 20m における応答の非線形性は、有義波高 2m と 10m における場合の非線形性ほどはみ

られない。同様に減衰装置なし TLP（モデルⅡ）についての応答の非線形性（波高影響）は、 $T_z > 6s$ では、有義波高 2m と 10m の間で 4~8% 程度 10m での応答値が高くなっている程度である。

減衰装置付 TLP（モデルⅠ）と減衰装置なし TLP（モデルⅡ）の不規則波中のレグ変動張力を比較すると、波周期の短い範囲（ $T_z = 4 \sim 6s$ ）で減衰装置の効果がみられ、単位有義波高あたりの変動張力（有義値）は平均波周期 4s では約 35tf/m から約 20tf/m へと大幅に低減されている。海洋での長期波浪統計データによれば、一般的に、比較的短周期の波が卓越することが多く、したがって、TLP に減衰装置を組み込むことにより、疲労強度の大幅な向上を図ることが期待できる。

表-2 実機相当モデルの主要諸元

長さ(コラム間)距離L	65.0 m	
デッキ高さ D	55.0 m	
コラム	4 本-φ14.0 m	
吃水 d	33.0 m	
排水量 Δ	35,000 t	
初期張力 T_i	1,750 tf/レグ* (合計 7,000 t=排水量の20%)	
水深 h	600 m	
外部力学系諸元	モデルⅠ	モデルⅡ
	減衰装置付	減衰装置なし
減衰装置ばね定数 k_1 (tf/m/レグ*)	1,500	∞
減衰定数 C_1 (tf・s/m/レグ*)	4,500	0
レグばね定数 k_2 (tf/m/レグ*)	4,500	4,500
備考 レグ*の構成: 鋼管4本/レグ*	減衰装置と鋼管1,290cm ² /レグを併用	鋼管1,290cm ² /レグのみ

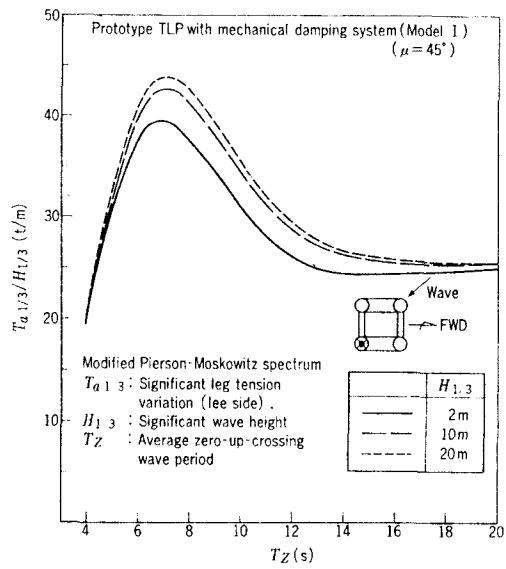


図-6 減衰装置付実機相当モデルの不規則波中レグ変動張力

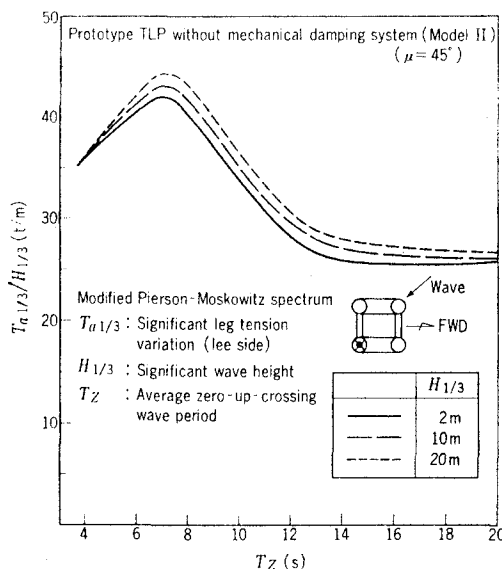


図-7 減衰装置なし実機相当モデルの不規則波中レグ変動張力

(3) 再現期間100年の異常波浪中でのレグ変動張力応答

図-3に示した再現期間 100 年の不規則波の波スティーブネスから平均波周期 T_Z に対する有義波高の限界を決定し、その限界有義波高に対応した不規則波中の応答（図-6および図-7参照）を用いて、再現期間 100 年の最大波高を有する短期海象におけるレグ張力応答（変動張力）の有義値を求めた。

減衰装置付 TLP（モデル I）および減衰装置なし TLP（モデル II）についての計算結果をそれぞれ図-8 および図-9 に示す。また、非線形性（波高影響）のほとんどない $H_{1/3}=2\text{m}$ での応答関数を用いて計算した結果も参考までに図中に示した。

図-8によれば、減衰装置付 TLP（モデル I）の再現期間 100 年のレグ張力応答の有義値は、平均波周期 $T_Z=14\text{s}$ 近くにて最大となり、最大有義値は約 460tf と予測される。また、図-9によれば、減衰装置なし TLP（モデル II）の再現期間 100 年のレグ変動張力の有義値も平均波周期 $T_Z=14\text{s}$ 近くにて最大となり、最大有義値は約 480tf と予測され、モデル I の約 460tf と比べてたいした差異はない。すなわち、減衰装置の効果は 100 年級暴風時のような平均波周期の長い場合には、それほど期待できないことがわかる。

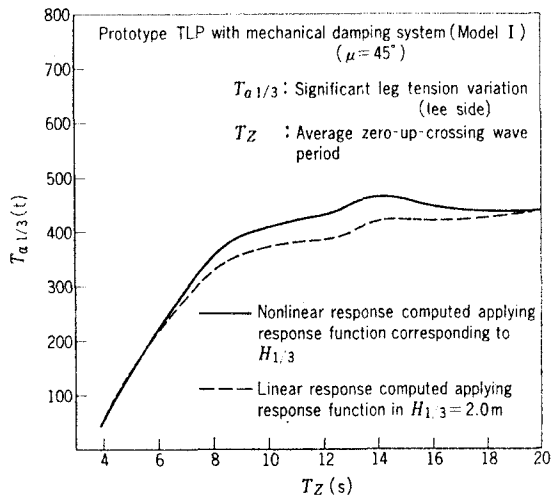


図-8 減衰装置付実機相当モデル
のレグ変動張力の有義値

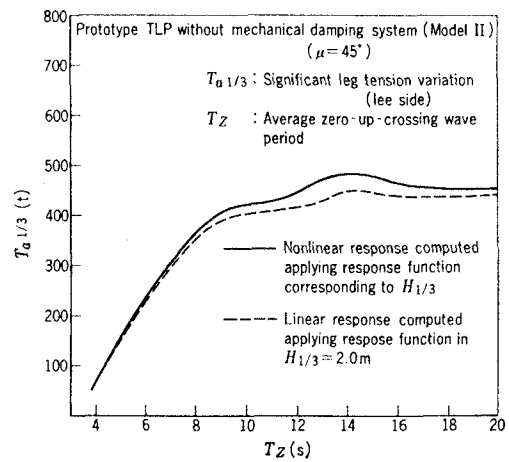


図-9 減衰装置なし実機相当モデル
のレグ変動張力の有義値

5. ま と め

減衰装置付 TLP に関して、非線形性（波高影響）を考慮した、近似的な波浪中全体応答解析法を中心に、水槽試験による近似的応答解析法の実問題への適用性の検討結果や実機相当モデルについての簡単な数値解析による減衰装置付 TLP の波浪中応答特性などについて述べた。

主要な結論は次のとおりである。

- (1) 減衰装置付 TLP の大波下での非線形性（波高影響）を考慮した近似的な応答解析法について述べるとともに、水槽試験結果により実問題への適用性を検証できた。
- (2) TLP のレグ機構に油圧式減衰装置（Mechanical Damping System）を組み込むことにより、波浪中のレグ張力応答振幅を低減させ、強度上（疲労強度）の安全性を向上させることができる。
- (3) 実機相当モデルについて簡単な数値解析を行って、減衰装置付 TLP の波浪中応答特性について述べるとともに、減衰装置を組み込むことの実用化についてある程度の見通しが得られた。

参 考 文 献

- 1) 片山正敏、宇ノ木賢一、三和英一：減衰装置付テンションレグプラットフォームの波浪中応答解析、三菱重工技報、Vol. 18, No. 3, pp. 35~47, 1981.
- 2) 北見英一、二宮勝也、片山正敏、宇ノ木賢一：テンションレグプラットフォームの波浪中非線形応答特性、三菱重工技報、Vol. 22, No. 2, pp. 123~131, 1985.
- 3) 片山正敏、宇ノ木賢一：半潜水式海洋構造物の波浪中全体構造応答特性、日本造船学会論文集、第163号、pp. 351~362, 1988.
- 4) Det norske Veritas : Rules for Classification of Mobile Offshore Units, Pt.3 Ch.1 Sec.4, 1982.