

減衰装置付テンションレグプラットフォームの開発 —基本計画と減衰装置の性能試験結果—

Development of Tension Leg Platform with Mechanical Damping System
—Basic Planning of TLP and Performance Test Results of Hydraulic Damper—

片山正敏*・宇ノ木賢一**

Masatoshi Katayama and Ken-ichi Unoki

Recently, various types of tension leg platform (hereinafter called "TLP") have been proposed, designed, and constructed for deep sea oil drilling and production platforms. This paper first presents a basic concept of a TLP with a mechanical damping system (hydraulic damper). Next, the basic planning on a prototype model of TLP with a mechanical damping system is briefly described. Finally, the results of an in-laboratory dynamic loading test, which was performed to verify the performance of hydraulic damper selected an optimum system, are also introduced.

Keywords : Tension leg platform, Basic planning and designing, Mechanical damping system, Performance Test

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の一つの形式として、各種テンションレグプラットフォーム（以下、TLPと略称）が欧米では設計・建造されるようになってきた。TLP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大規模油田はもとより、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）開発向けとしても着目され、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。とくにテンションレグ（註：テンドンとも呼称される）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、減衰装置付TLPの波高影響を考慮した近似的波浪中応答解析法や減衰装置の効果を確かめるための波浪中応答特性に関する数値解析、水槽試験結果などについてはすでに報告した。^{1), 2)}

本論文では、減衰装置をレグ機構に組み込んだTLPに関して、その基本概念や基本計画事項を中心に述べる。また、最適な減衰装置として選定した油圧システムについての縮尺模型による室内での性能試験から得られた基本計画のためのデータについても簡単に紹介する。

2. 減衰装置付TLPの基本的な考え方

(1) TLPの一般的な特徴

大水深海域における石油・ガス生産プラットフォームの一形式としてのTLPは、従来の固定／着底式プラットフォームと比べて、波浪中運動をある程度許容する代わりに波浪荷重を軽減させた点にある。現時点において、世界中で稼働中、あるいは、建造中の各種TLPの主要目を表-1に示す。³⁾

全体構造的にみると、コラム本数は4本が中心となっており、平面的な対象性が重視される傾向にある。また、上部構造（浮体）の材質は、鋼製で設計寿命20～25年程度のものが中心となっているが、コンクリート製として設計寿命を50年と長くした例（北海、HEIDRUN TLP）もある。

これらのTLPの特徴としては、下記の点があげられる。⁴⁾

a) 上部構造に半潜水式構造を適用することにより波浪荷重の軽減が図られ、とくに上下運動の抑制により波

* 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

表-1 各種TLPの主要目³⁾

名 称	HUTTON	JOLLIET	SNORRE	AUGER	HEIDRUN
設置海域	北 海	メキシコ湾	北 海	メキシコ湾	北 海
オペレーター	CONOCO	CONOCO	SAGA	SHELL	CONOCO
水 深	148 m	536 m	310 m	872 m	350 m
稼働開始年	1984	1989	1992	1993	1995
排 水 量	70,147 t	18,447 t	116,600 t	69,000 t	171,600 t
デッキ重量	19,000 t	4,800 t	37,000 t	9,100 t	41,700 t
吃 水	32 m	24 m	37.5 m	27.5 m	70 m
生 産 量	90,000 bpd oil	35,000 bpd oil 50 MM cfm gas	190,000 bpd oil	40,000 bpd oil 150 MM cfm gas	200,000 bpd oil
スロット数	32	20	44	32	48
コラム本数	6	4	4	4	4
浮体材質	鋼 製	鋼 製	鋼 製	鋼 製	コンクリート製
デッキ材質	鋼 製	鋼 製	鋼 製	鋼 製	鋼 製
レグ機構 (テンドン)	4×4=16 260 mmφ	3×4=12 609.6 mmφ	4×4=16 914.4 mmφ	3×4=12 660.4 mmφ	3×4=12 1117.6mmφ
アンカー	鋼 製 独立型 パイル	鋼 製 一体型 パイル	鋼 製 独立型 重力式	鋼 製 独立型 パイル	鋼 製 独立型 重力式

浪中運動性能、安定性のよいプラットフォームが得られるので、TLP上に搭載される石油およびガス生産設備の高い操作性・生産性が得られる。

- b) テンションレグ（テンドン）適用による全体構造の柔構造化により、大水深向けプラットフォームとして鋼材重量の軽減、安全性の高い全体構造が得られ、また、経済的・技術的に水深影響が小さくなっている。
- c) 固定式プラットフォームに比べて現地据え付けが容易であり、現地での大規模な海洋土木工事を必要としない。
- d) 離脱式レグ機構の適用により移動可能となり、限界可採油田（Marginal Field）開発にも適している。
- e) 半潜式石油掘削・生産装置をはじめとする、この種構造物の豊富な設計・建造実績や技術を応用することにより高い信頼性、操作性が得られている。

(2) 減衰装置付TLPの基本的な考え方

減衰装置付TLPに装備されるレグ機構の減衰装置の機能は、波浪中レグ（テンドン）に発生する張力応答を軽減させることを主たる目的としているが、このほかに下記のような機能も有するものとして計画する。

- a) TLP据付／移動時にテンショナーとして
- b) TLP据付時に各レグ要素の初期張力の微調整用として
- c) TLP稼働時の変動荷重による傾斜（トリム／ヒール）の微調整用として
- d) 非常時（たとえば石油掘削・生産時の暴噴事故など）のTLP緊急離脱用として
- e) TLPレグ機構損傷時の全体構造系の安定性を得るための Equalizing System として
- f) 潮汐などによる浮力変動に対するレグ初期張力調整用として

3. 減衰装置付TLPの基本計画

(1) 基本計画条件

TLPの全体構造規模としては、限界可採油田などの比較的中小規模油田開発向けのものを想定して、小規模なものとし、設置海域も特定しないが、下記のような海・気象条件には対応できるものとする。

○ 風 速： $V_w = 60 \text{ m/sec}$

○ 潮 流： $V_c = 1.5 \text{ m/sec}$

○ 波 浪： $H_z=17.2\text{ m}$
 $(H_{\max}=32.0\text{ m})$
 $T_z=14.0\text{ sec}$

(2) 基本計画

検討した減衰装置付 TLP の概念図を図-1 に示す。減衰装置は、上部構造の四隅にある直径 14.0 m のコラム頂部に配置したが、これは先に述べた減衰装置の各種機能を発揮させるためである。また、レグ機構については、

- 鋼製パイプ+柔ばね+減衰装置 (ダンパー)
- 鋼製パイプ+柔ばね
- 鋼製パイプ

の組み合わせにて、波浪中のレグ張力応答特性を検討した結果、「鋼製パイプ+柔ばね+減衰装置 (ダンパー)」のケースが、ほかの2ケースと比べて変動張力応答が少なくなっており、この組み合わせを採用することとした。表-2 に減衰装置付 TLP の主要目を示す。

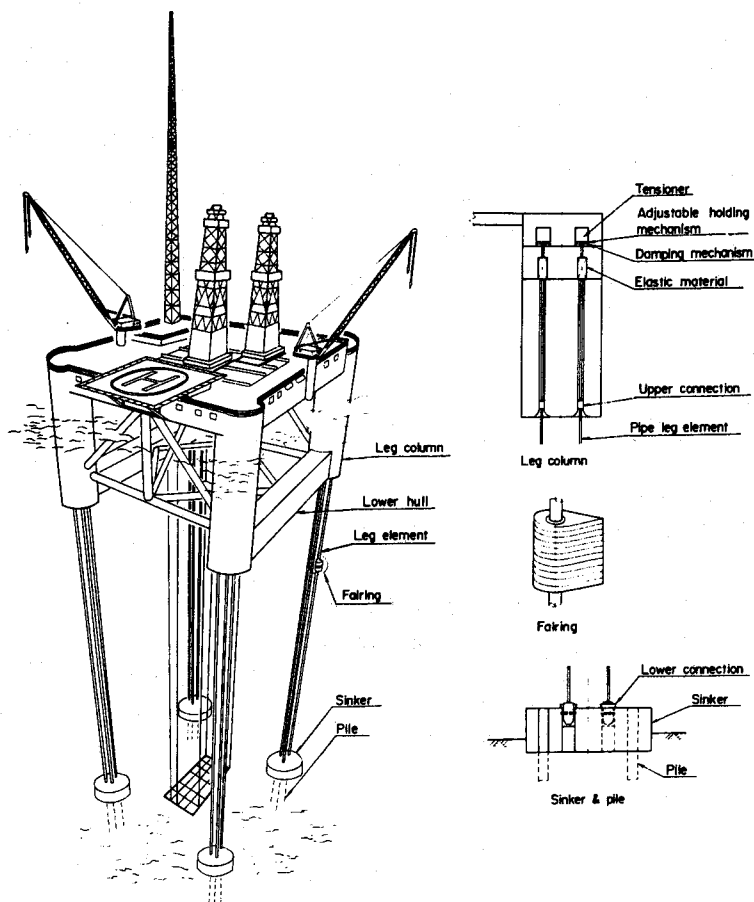


図-1 減衰装置付 TLP の概念図

(3) 減衰装置の基本計画

減衰装置 (ダンパー) は、振動系に付加して強制振動による振幅の軽減などを図る制振装置の一つで、一般機械や構造物に広く使用されており、この目的で利用できる物理現象には下記のようなものがある。⁵⁾

- 流体の粘性
- 流体の流れ抵抗
- 空気の流れ抵抗
- 摩擦力
- 粘弾性と内部減衰
- 塑性
- 電磁力

これらの中から、吸収すべきエネルギー量に対して比較的に小型に設計でき、しかも抵抗力が比較的広い振動数にわたって安定している「流体の流れ抵抗」を利用した油圧式減衰装置 (Hydraulic Damper) を選定することとした。

油圧式減衰装置 (ダンパー) の種類としては、大きく分けて軸揺動形 (レバー形) と直動形があり、さらに軸揺動形はピストン摺動形と回転翼形に、直動形は単筒形と複筒形に分類されるが⁶⁾、本検討で選定した油圧式減衰装置は、直動形の単筒形であり、油圧シリンダ

表-2 減衰装置付 TLP の主要目

長さ (コラム間) 距離 L	65.0 m
デッキ高さ D	55.0 m
コラム 個数-外径	4 本- $\phi 14.0\text{ m}$
吃水 d	33.0 m
排水量 Δ	35,000 t
重心高さ KG	30.5 m
初期張力 T_i	1,750 tf/leg* (合計 7,000 t=排水量の20%)
水深 h	600 m
レグ機構 (減衰装置・テンドン) の諸元	
減衰装置ばね定数	1,500 tf/m/leg*
減衰定数	4,500 tf·s/m/leg*
レグばね定数	4,500 tf/m/leg*
備考	減衰装置と鋼管 $1,290\text{ cm}^2$ /レグを併用
レグの構成:	
鋼管 4本/leg*	

表-3 油圧式減衰装置の主要目

項 目	主 要 目
設 計 基 準	
減衰装置のばね定数	1,500 tf/m(コラム) 100 tf/m(シリンダー)
減衰装置の減衰定数	4,500 tf・s/m(コラム) 300 tf・s/m(シリンダー)
シリンダーストローク	2,000 mm
設 計 圧 力	210 kgf/cm ²
シリンダー	
内 径 (Bore)	420 mm
ロッド (Rod) の直径	380 mm
ストローク	2,000 mm
アキュムレータ (4シリンダー分)	
ヘッド側(Headside)	1,776 ℓ × 181 kgf/cm ² max.
ロッド側(Rodside)	448 ℓ × 199 kgf/cm ² max.
オリフィス (2シリンダー分)	
最 大 流 量	3,823 ℓ/min.
最 大 降 圧	49.8 kgf/cm ²

表-4 油圧式減衰装置 1/3 縮尺模型の主要目

項 目	主 要 目
設 計 基 準	
減衰装置のばね定数	10.4 tf/m(シリンダー)
減衰装置の減衰定数	18.0 tf・s/m(シリンダー)
シリンダーストローク	670 mm
設 計 圧 力	70 kgf/cm ²
シリンダー	
内 径 (Bore)	140 mm
ロッド (Rod) の直径	100 mm
ストローク	670 mm
アキュムレータ (4シリンダー分)	
ヘッド側(Headside)	70 ℓ (35 ℓ×2) × 60 kgf/cm ² max.
ロッド側(Rodside)	50 ℓ (25 ℓ×2) × 25 kgf/cm ² max.
オリフィス (2シリンダー分)	
最 大 流 量	256 ℓ/min.
最 大 降 圧	15.56 kgf/cm ²

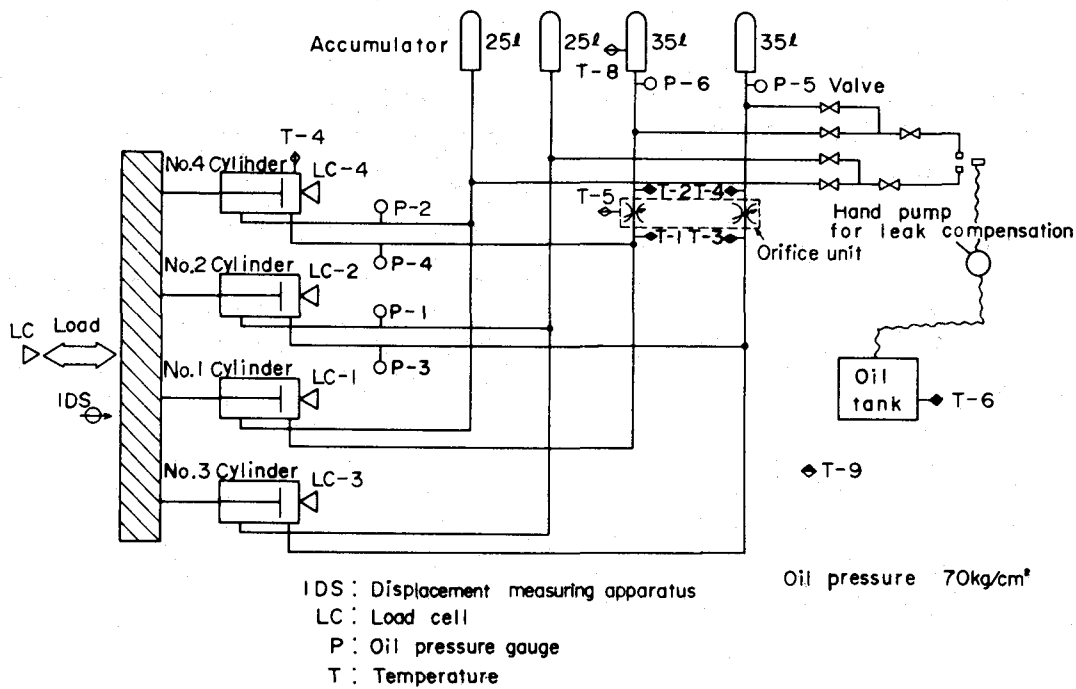


図-2 油圧式減衰装置の性能試験時計測配置図

一、アキュムレータ、オリフィスなどから構成されている。

以上のような基本的考え方に基いて、表-2に示した減衰装置付TLPの主要目にしたがって油圧式減衰装置を検討した。とくに、コラム頂部のスペース（直径14.0mφ）を考慮して、操作性、保守・維持などが容易となるように配慮した。選定した油圧式減衰装置（ダンパー）の主要目を表-3に示す。

4. 油圧式減衰装置の性能（特性）試験

(1) 試験法

下記に示す3種類の試験を実施した。

a) 基本特性試験

○ばね特性：油圧シリンダー位置を1/4、2/4、3/4 ストロークに設定して、荷重と変位（±100 mm）の関係を計測した。

○減衰定数：5段階の加振速度（周波数×振幅）に対して、オリフィス前後の圧力損失を計測した。

b) 規則加振試験

減衰効果の確認と、レグ変動張力の低減にともなう油圧ダンパーには熱の発生がともなうので、発生熱量（油温上昇）を把握するため、つぎの条件にて規則加振試験を行った。

変位制御：±40～±100 mm

ストローク：1/4、2/4、3/4 ストローク位置

減衰装置：オリフィス作動およびオリフィス・バイパス

加振速度：3段階（18、12、6 mm/s）

c) 不規則加振試験

b)と同様の目的で修正 Pierson-Moskowitz 型スペクトル（平均波周期は8、10、12s の3ケース）に対応する不規則加振試験を実施した。図-2に計測装置の概略配置を示す。また、表-4に試験に用いた油圧式減衰装置（1/3 縮尺模型）の主要目を示す。

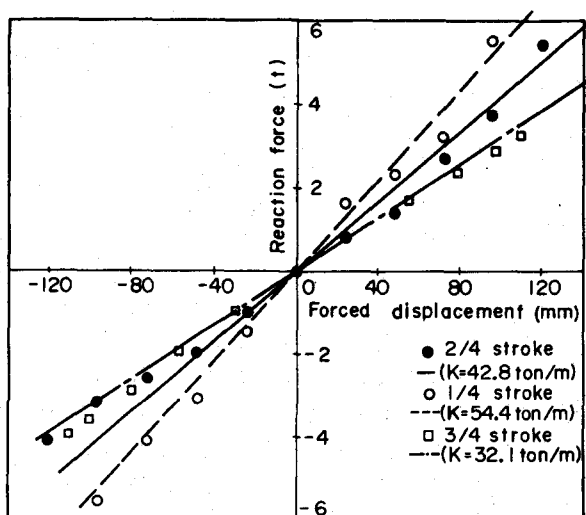


図-3 油圧式減衰装置のばね特性

(2) 試験結果

a) 基本特性

○ばね特性・・・ばね特性試験結果（図-3）より、ばね定数はストローク位置によって変化し、さらに、わずかながら非線形性を有していることが分かった。

○減衰特性・・・減衰定数は規則加振による荷重-変位応答の最適近似および仕事量（註：ヒステリシスを描く荷重-変位曲線内の面積）から求めた。

b) 規則加振試験

規則加振試験による応答特性を図-4に示す。計測値と計算値はよく一致しており、減衰装置の効果が確認された。

c) 発生熱量

規則加振した場合の温度上昇の計測および計算結果を図-5に示す。両者は比較的によく一致している。

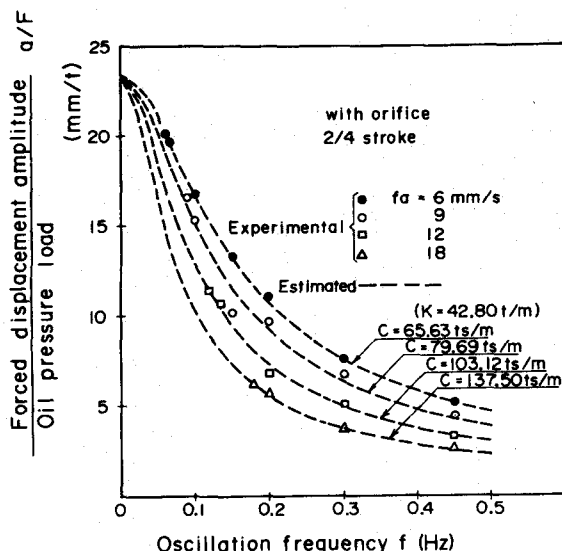


図-4 油圧式減衰装置の規則加振応答特性

(3) 波浪中応答特性推定上の留意点

減衰装置の性能試験の結果から、ばね定数や減衰定数は設定値に対して無視できない程度に変動することが明らかとなった。これはブラダー型アキュムレータの非線形ばね特性や、オリフィスの減衰特性が流体の速度に依存するためと考えられる。このため本研究における実機TLPの基本計画にあたっては、ばね定数設定値 $\times(0.8\sim1.5)$ 、減衰定数設定値 $\times(0.8\sim2.0)$ 程度の変動を考慮したが、レグ張力変動は $-4\sim+2\%$ 程度の変動であり、TLPの初期計画においては問題とならないことが明らかとなった。

5. ま と め

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。とくにテンションレグ（註：テンドンとも呼称される）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、本論文では、減衰装置をレグ機構に組み込んだTLPに関して、その基本概念や基本計画事項を中心に述べた。また、最適な減衰装置として選定した油圧システムについての縮尺模型による室内での性能試験から得られた基本計画のためのデータについても簡単に紹介した。

主要な結論は次のとおりである。

- (1) 減衰装置付TLPの技術的な特徴や基本的な考え方について述べた。
- (2) 減衰装置付TLPに関して、その実機相当モデルについての全体基本計画や減衰装置の基本計画を行って、実際問題への適用性を明らかにした。
- (3) TLPのレグ機構に油圧式減衰装置（Mechanical Damping System）を組み込む場合に必要となる減衰装置の基本計画データに関して、 $1/3$ 縮尺模型試験を実施して検討した結果について述べた。

参 考 文 献

- 1) 片山正敏、宇ノ木賢一：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特性—近似的解析法と水槽試験結果—、土木学会海洋開発論文集、Vol. 8、pp. 93～98、1992。
- 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) 金網正夫：大水深海洋石油生産プラットフォームの開発動向とJOIA TLPの開発状況について、日本造船学会誌、第743号、pp. 10～18、1991。
- 4) 三和英一：海洋石油開発関連構造物の現状—4. 1 浮遊式生産システム、第7回海洋工学パネル報告書、海洋工学連絡会、1993。
- 5) 時田保夫、森村正直監修：防振制御ハンドブック—第4編・第2章・第4節ダンパ（大型）、PP. 421～427、朝フジ・テクノシステム、1992。
- 6) 日本機械学会：機械工学便覧、B. 応用編、3. 2. 10 緩衝器およびダンパ、PP. B1-149～152、丸善館、1987。

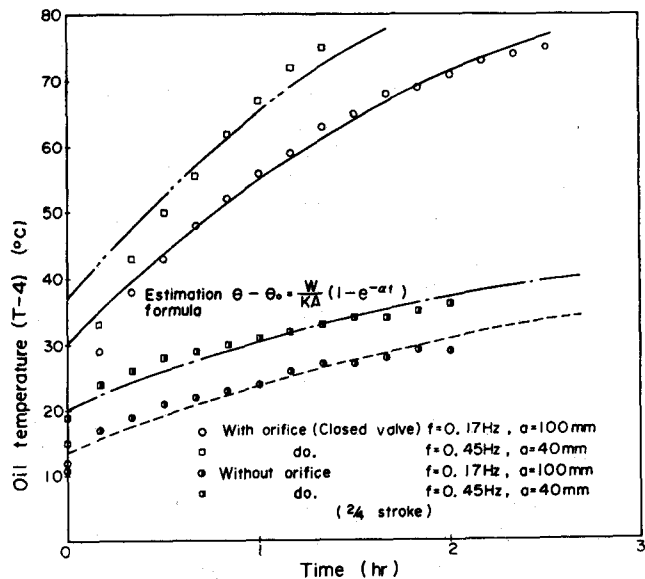


図-5 規則加振時の温度特性