

I-94 波浪を受ける緊張係留ケーブル構造の動的非線形応答特性について

大同工業大学 正会員 水澤 富作
川田工業 正会員 ○ 寺島 太郎

1. はじめに ケーブルや鎖で係留されたGyued Tower PlatformやTension Leg Platformは、深海開発用の柔軟な海洋構造物(Compliant Offshore Structure)として知られている。このような海洋構造物の基本周期は、波の卓越周期よりかなり大きく、20-90秒にもなるので¹⁾、動的応答解析が必要になる。また、係留ケーブルには、自重、浮力、風力、波浪などの外力が作用し、また次に示すような非線形性状を考慮しなければならない。(1) 幾何学的非線形、(2) 材料学的非線形、(3) 波浪による非線形抗力(非保存力問題)、(4) Slack状態で示されるケーブル剛性の減少やスナッチ荷重問題、(5) 非線形波などが挙げられる。単軸応力部材としてのケーブルのつり合い形状は、張力を与えることにより幾何剛性が生じ、また軸方向変位が小さくとも有限変形を考慮しなければならない。一般に、ケーブル問題の解析過程は、初期つり合い形状を求める形状決定問題と、この形状を基に解く動的問題に分けられる。

波浪を受けるケーブル構造の動的応答解析²⁾には、Lumped parameter法、伝達マトリックス法や有限要素法が広く用いられている。また、動的応答解析法として、(i) 非線形運動方程式を線形化した周期応答解析法と(ii) 非線形運動方程式を直接数値積分する時刻歴応答解析法が用いられている。これまでの研究では、ケーブルを単純なバネで置き換え、線形な周期応答解析法によるものが多くみられる。

本研究では、3次元有限変位弾性理論に基づくケーブル要素とNewmarkの β 法を用いて、波浪を受ける緊張ケーブルで係留された浮体の動的な非線形運動の応答特性について解析している。これらのに作用する流体力は、Morisonの一般式とAiry波理論より求めている。定常荷重によるケーブルの初期つり合い形状を求めるために、Viscous relaxation法を適用している。また、長時間の規則波浪を受けるケーブル・浮体の運動特性を検討するために、浮体のHeaving(上下)運動とDrifting(水平)運動の応答履歴より得られる位相図、軌跡図や変位-張力図を用いている。Fig. 1に示すような緊張ケーブルで係留された浮体(Tension Leg Platform)の運動特性に与える波高、波周期、抗力係数やケーブルの初期張力の影響について検討している。

2. 式の定式化 ケーブルにより係留された浮体の運動方程式を、3次元有限変位弾性理論、Total Lagrangian表現と仮想仕事の原理より導き、これに基づくアイソパラメトリック・ケーブル要素を定式化している。式の定式化にあたり、次の解析仮定を設ける。(1) ケーブルの断面は十分小さく、また単軸応力を仮定する。(2) ケーブルの曲げとねじりの影響は無視する。(3) ケーブル軸に垂直な平面は、変更後もこの軸に垂直である。(4) 無応力でのケーブルの初期形状を、変形後の形状における応力とひずみの表現に用いる(Total Lagrangian表現)。(5) 構造減衰は流体減衰に比べて小さいのでこれを無視する。(6) 浮体は剛球体であり、波長にくらべて十分小さいものとする。(7) 浮体の浮力により導入されるケーブルの初期張力は変動しないものとする。

2.1 解析手法 ここでは、紙面の都合により、式の定式化の詳細については省略する。動的な非線形応答解析は、次のような手順で行う。(1) 任意の定常荷重を受けるケーブルの初期つり合い形状(強い幾何学的非線形問題)は、準動的な手法であるViscous relaxation法³⁾を用いて解析する。(2) 非線形運動方程式を解くために、このつり合い形状を基に、反復法を組合わせたNewmarkの β 法を用いて、応答解析を行う。(3) 得られた変位や速度応答履歴より、位相図、軌跡図など求める。(4) なお、波浪による流体抗力は、形状依存の非線形外力であるが、それぞれ垂直成分と接線成分をMorisonの一般式より求めている。

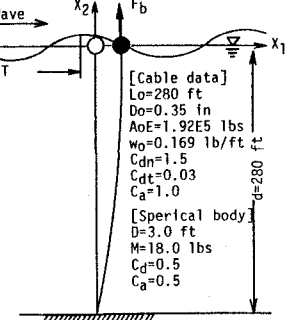


Fig. 1 Tension leg platform

3. 数値計算例及び考察 本手法の精度等については^{1,2)}、検討済みであるので省略する。ここでは、

Fig. 1に示すように浮体の浮力を利用して、鉛直方向にケーブルで緊張係留された浮体(TLP:Tension Leg Platform)の2次元動的応答特性について検討する。とくに、規則波浪を受けるケーブル・浮体の運動の周期特性を調べるために、Heaving運動とDrifting運動の応答履歴より求められる位相図や軌跡図を用いる。なお、数値計算を行うために、次のような計算仮定を用いる。(1) 浮力、 F_b により導入されるケーブルのプレストレスは、時間とともに変動しない。(2) 浮体は剛球体とし、一本のケーブルによりその中心で結ばれている。また、波による回折や散乱の影響は無視する。(3) 作用する波浪は、波周期、 T と波高、 H を持つ微小振幅波であり、水中で静的につり合ったケーブル・浮体に作用するものとする。

以上の計算仮定のもとに、規則波浪を受けるケーブル・浮体の運動に与える波周期、波高、抗力係数、 C_d やケーブルの初期張力、 F_b の影響について解析を行った。動的応答解析においては、積分時間幅 Δt は、0.001 secとし、また定常運動状態の周期特性を調べるために270 secまで計算している。なお、本数値計算に用いた単位は、すべて feet-pound系(1 ft=0.3049 m, 1 lb=4.448 N)である。

浮体の2次元運動(x_1, x_2, t)は、一般に3次元の応答履歴で表される。この運動の周期特性を表すために、Fig. 2に示す変位応答と速度応答を時間軸から投影した2次元の位相図($x_1, \dot{x}_1$)が求められる。この図では、波高 5.0 ft、波周期 5.0 secとケーブルの初期張力、 $F_b=300.0$ lbsを受ける浮体のHeaving運動の位相図が示されている。定常運動状態では、閉トラジェクトリーが描かれる。浮体は、波の1サイクルでこのトラジェクトリーを時計回りに一回転している。また、Fig. 3には、初期張力を変化させた場合のDrifting運動とHeaving運動の位相図が示してある。これより、Drifting運動は、周期的であるが、Heaving運動は、ケーブルのスラックの影響を大きく受けている。さらに、波高、波周期や抗力係数の影響についても検討している。

4. あとがき 得られた主な結果

は、次のようになる。1. 浮体のDrifting運動は、波高、波周期やケーブルの初期張力に関係なく、非常に周期的である。2. 浮体のHeaving運動は、Drifting運動と比較して、小さなものであるが、ケーブルのスラックや衝撃特性により、大きな影響を受ける。3. その影響は、ケーブルの初期張力や波周期、波高により大きく生じてくる。3. また、ケーブルの抗力係数、 C_d は、浮体のHeaving運動に影響を与える。5. 浮体の位相図や軌跡図を求めることにより、浮体や係留ケーブルの定常状態での運動の周期特性を求めることができる。今後、緩係留された浮体の運動や、複数のケーブルで係留された浮体の動的応答について検討していきたい。なお、本研究は、科研費(海外学術研究)及び大同工業大学研究奨励金の援助を受けている。

参考文献:

- 1) 水澤他:海洋環境下でのケーブルの自由振動解析について。土木学会海洋開発論文集, Vol. 5, pp. 273-278, 1989.
- 2) 水澤他:海洋ケーブルの動的非線形挙動について。日本造船学会第9回海洋工学シンポジウム論文集, pp. 309-316, 1989.
- 3) Webster, R.L.:On the static analysis of structures with strong geometric nonlinearity. Comput. Struct., vol. 11, pp. 137-145, 1980.

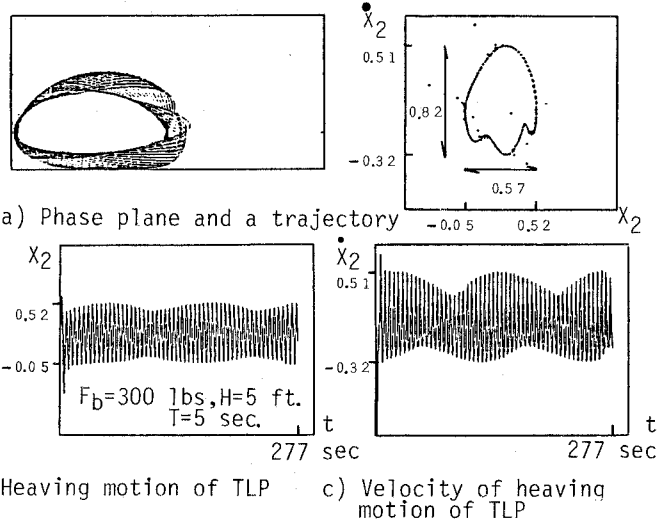


Fig. 2 Phase plane of heaving motion of TLP

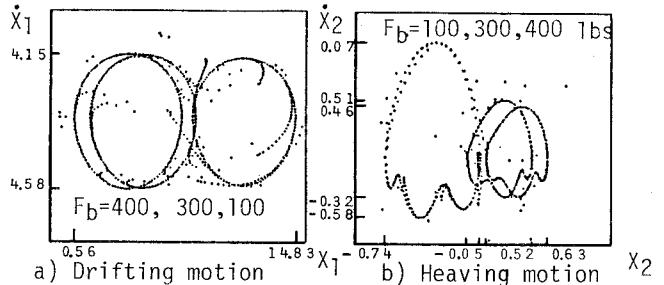


Fig. 3 Phase plane of TLP; H=5 ft, T=5 sec