

緊張ケーブルによる箱型浮体の耐波浪特性

CHARACTERISTICS OF WAVE INDUCED MOTIONS OF BOX-TYPE FLOATING BODIES WITH TENSION-LEGS

*

**

久保喜延, 森松一典, 前野弘幸

By Yoshinobu KUBO, Kazunori MORIMATSU and Hiroyuki MAENO

Tension-leg system was worked out to drill the oil field at deep sea. But this system has many unknown factors for its construction method and reliability. Especially, these problems should be more investigated in a field of application to Civil Engineering structures. This paper treats characteristics of wave induced motions of box-type floating bodies with tension legs. As equations of motion of floating bodies are nonlinear coupled equations, its response characteristics of floating bodies to waves are investigated by step-by-step integrations. Analytical results are compared, which are in 2- and 3-degree of freedom systems. It is made clear that there is no difference between the calculated responses of floating bodies in displacement by two methods, but in case of finding the cable tension, it is required to use the analytical method as 3-degree of freedom system.

1. まえがき

近年、海洋における石油掘削域は、水深の深い海域へと広がり、従来の着底式プラットフォームでは構造的、経済的に対応できなくなってきた。そこで、水深の深い海域に適した新しい形式のプラットフォームとして T.L.P (Tension Leg Platform) が提案され、実用に向けた研究が各方面で行われてきている。T.L.P. とは、プラットフォーム部を浮体とし、それを張力を導入したケーブルで水中に引き込むことによって浮体部の動きを拘束するというもので、これまでの浮遊構造物とも、着底式プラットフォーム構造物とも異なる全く新しい構造物である。T.L.P.は、その柔軟な環境適応力や経済性の面などから注目を集めてきているが、実用例が乏しいことなどから安全性および施工性が問題となっている。

これまでのT.L.P.に関するほとんどの研究が、石油掘削を対象としてきているのに対して、本研究は、浮体を用いた種々の土木構造物にT.L.P.を応用するための基礎的研究である。浮遊式土木構造物のうち浮消波堤などは、供用性および施工性、経済性の面から箱型浮体が基本になると考えられる。そこで、本研究では、箱型浮体の耐波浪特性について解析および実験の両面から検討を加えた。

2. 基礎方程式の導出

箱型浮体を緊張ケーブルシステムによって定着する場合の波浪に対する浮体およびケーブルの応答解析を行なうための基礎方程式の導出を行う。その場合、図1のように浮体をその重心と海底とを1本のケーブルで定着し、ケーブルの浮体定着部をヒンジ結合とした場合、すなわち浮体に傾きが生じないとして鉛直方向および水平方向の運動のみを許した場合の2自由度系と考えた場合と図2のように浮体を2本のケーブルで定着し、浮体の運動には鉛直および水平方向の運動に加えて回転方向の運動も許された3自由度系とした場

* 九州工業大学・工学部・開発土木工学科、助教授、(〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

三井建設、*鹿児島県

合の2つに対して基礎方程式を導き、それぞれの解析法による解析結果の比較を行なうと同時に、並行して行った波浪水槽実験結果との比較を行ない、解析上の仮定の検討を行う。

2-1 浮体の傾きを考慮しない場合

解析対象とする系は、幅Bとする正方形底面を有する高さHの浮体で図1に示しているものである。ここで用いている仮定は、以下のとおりである。

- ①ケーブルは浮体の重心にヒンジ結合されている。
- ②浮体は水平、鉛直の2自由度とし、浮体の傾きは考慮しない。
- ③ケーブルは軸力部材として働く。
- ④波圧は、静水圧分布すると考える。
- ⑤波は微小振幅深海進行波を考える。すなわち、波の水面形 $z(x, t)$ は水平方向座標 x と時間 t との関数を用いて次式で表現されるとする。

$$z(x, t) = h_w - \frac{\bar{H}}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad \text{--- (1)}$$

ただし、 $k = 2\pi/L$:波数、 $\sigma = 2\pi/T$:角周波数、 L :波長、 T :周期、 $\bar{H}$:波高

○ケーブル初期張力と浮体座標

まず、静水状態での浮体の釣り合い状態を考える。ケーブル張力が0の状態のケーブル長を初期ケーブル長 ℓ_0 とし、この状態から水深を増加させることによって、付加浮力によってケーブルに張力を付加してケーブルに初期張力を与える。ケーブル初期長 ℓ_0 は、鉛直方向の力の釣り合い条件および幾何学的条件とを用いて図3より以下のように与えられる。

$$\ell_0 = h_{w0} - H_1 + \frac{H}{2}, \quad H_1 = \frac{mg}{\rho_w B^2} \quad \text{--- (2)}$$

ただし、 H_1 :吃水、 m :浮体質量、 g :重力加速度、 ρ_w :水の単位体積重量、 B :浮体幅、 h_{w0} :無張力状態での水深である。

次に、水深を増加させてケーブルに張力を与え、そのときの付加浮力を P_0 、浮体重心の海底からの位置を Z_0 とすると、鉛直方向の力の釣り合いから、ケーブルの初期張力 T_0 は、次式となる。

$$T_0 = P_0 - mg = \rho_w B^2 \left\{ h_w - \left(Z_0 - \frac{H}{2} \right) \right\} - mg \quad \text{--- (3)}$$

ケーブルの弾性係数を E 、断面積を A とすると、幾何学的条件から

$$Z_0 = \left(\frac{T_0}{EA} + 1 \right) \ell_0 \quad \text{--- (4)}$$

となるから、ケーブル初期張力と浮体重心座標は次式となる。

$$T_0 = \frac{\rho_w B^2 (h_w - h_{w0})}{1 + \rho_w B^2 \frac{\ell_0}{EA}}, \quad Z_0 = \frac{\rho_w B^2 (h_w + \frac{H}{2}) - mg + EA}{\rho_w B^2 + \frac{EA}{\ell_0}} \quad \text{--- (5)}$$

となる。

○波圧を受けて変位した場合のケーブル張力

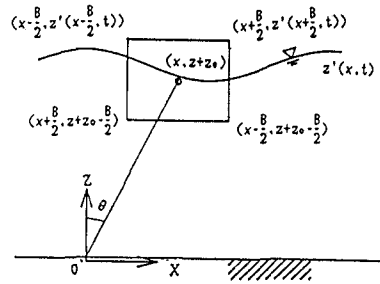


図1 2自由度系の座標

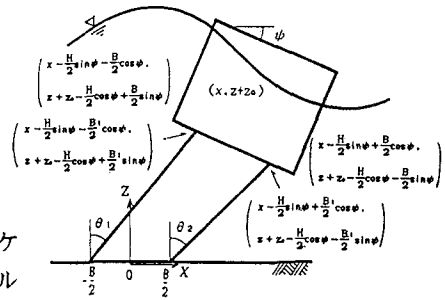


図2 3自由度系の座標

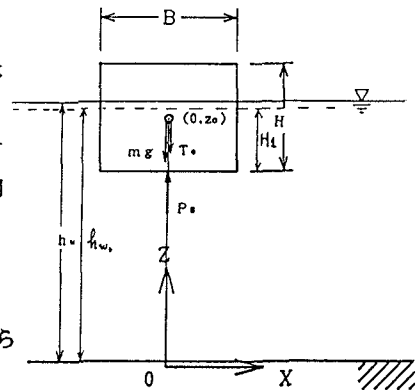


図3 静水状態（初期状態）における浮体のつりあい

図4に示すように浮体に波力が作用して、浮体が変位することにより、浮体の左側面と右側面とにそれぞれ P_L 、 P_R なる波力および浮力 P_B が作用することになる。波圧は瞬間的には静水圧分布をして左右側面に作用しているとしているから、この瞬間における左右の波力は左右の側壁に沿って静水圧を積分することによって得られる。

$$P_L = \frac{1}{2} \rho_w B \left\{ z' \left(x - \frac{B}{2}, t \right) - \left(z + z_0 - \frac{H}{2} \right) \right\}^2$$

$$= \frac{\rho_w B}{2} \left[\left(h_w - z - z_0 + \frac{H}{2} \right) - \frac{H}{2} \cos \left\{ (kx - \sigma t) - \frac{kB}{2} \right\} \right]^2$$

----- (6) 図4 運動状態にある浮体に作用する力

同様にして

$$P_R = \frac{\rho_w B}{2} \left[\left(h_w - z - z_0 + \frac{H}{2} \right) - \frac{H}{2} \cos \left\{ (kx - \sigma t) + \frac{kB}{2} \right\} \right]^2$$

----- (7)

浮体底部に作用する浮力 P_B は

$$P_B = \rho_w B \left\{ \left(h_w - z - z_0 + \frac{H}{2} \right) B - \frac{H}{2} \cos (kx - \sigma t) \sin \frac{kB}{2} \right\}$$

----- (8)

となる。さらに、ケーブルの傾きを θ 、浮体重心の鉛直変位の増分を Z とすると、

$$x = \ell \sin \theta, \quad Z + Z_0 = \ell \cos \theta \quad \text{----- (9)}$$

となり、ケーブル張力の水平成分 T_x および T_y は次式となる。

$$T_x = EA \left(\frac{x}{\ell_0} - \sin \theta \right), \quad T_y = EA \left(\frac{Z + Z_0}{\ell_0} - \cos \theta \right) \quad \text{--- (10)}$$

以上より、浮体の運動方程式は、構造減衰率を C_x 、 C_z としてダランベールの原理によって、

$$\Sigma H = m \ddot{x} + C_x \dot{x} + T \sin \theta - (P_L - P_R) = 0$$

$$\Sigma V = m \ddot{z} + C_z \dot{z} + T \cos \theta - P_B + mg = 0$$

----- (11)

となるから、各項を代入すると以下のようになる。

$$m \ddot{x} + C_x \dot{x} + \frac{EA}{\ell_0} x = EA \sin \theta + \frac{\rho_w B H}{2} \sin \frac{kB}{2} \left\{ 2 \left(h_w - z - z_0 + \frac{H}{2} \right) - H \cos (kx - \sigma t) \cos \frac{kB}{2} \right\} \sin (kx - \sigma t) \quad \text{----- (12)}$$

$$m \ddot{z} + C_z \dot{z} + \left(\frac{EA}{\ell_0} + \rho_w B^2 \right) z = -EA (1 - \cos \theta) - \frac{\rho_w B H}{k} \cos (kx - \sigma t) \sin \frac{kB}{2} \quad \text{----- (13)}$$

2-2. 浮体の傾きを考慮した場合

浮体が2本のケーブルで定着されている場合は、浮体は波力によって図5のように傾き、各ケーブルにもそれぞれの傾きが生じる。そこで、浮体に生じる種々の力、すなわち浮力、左右側面の波圧および2本のケーブルによる張力が浮体の重心回りに形成するモーメントを算出する必要がある。このとき2自由度系の場

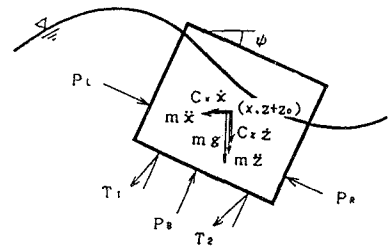
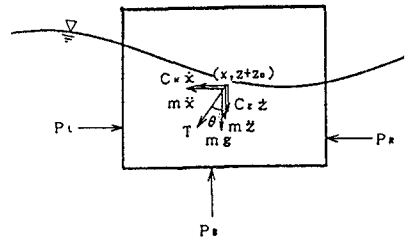


図5 (a) 浮体に加わる力

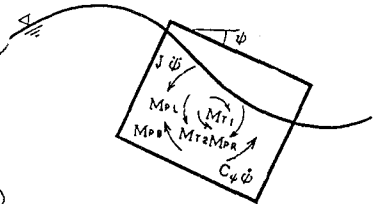


図5 (b) 浮体に加わるモーメント

合に設けた仮定に加えて、ケーブルの傾きは僅かであり、波圧も浮体が傾かない状態のものが作用するという仮定をおくと、前節と同様にして浮体の運動方程式が得られる。

$$\Sigma H = m\ddot{x} + C_x \dot{x} - (P_L - P_R) \cos \psi - P_B \sin \psi + (T_1 \sin \theta_1 + T_2 \sin \theta_2) = 0 \quad \text{----- (14)}$$

$$\Sigma V = m\ddot{z} + C_z \dot{z} + (P_L - P_R) \sin \psi - P_B \cos \psi + (T_1 \cos \theta_1 + T_2 \cos \theta_2) = 0 \quad \text{----- (15)}$$

$$\Sigma M = J \ddot{\psi} + C_\psi \dot{\psi} + M_{PL} - M_{PR} - M_{PB} + M_{T1} - M_{T2} = 0 \quad \text{----- (16)}$$

ただし、J:極慣性モーメント、MPL, MPR, MPB, MT1, MT2は各添字の力に対応する浮体重心回りのモーメントである。これらに各項の計算を行って代入すると、以下の運動方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \text{水平方向: } m\ddot{x} + C_x \dot{x} + \frac{2EA}{l_0} x \\ = EA (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) - \frac{\rho_w B H}{2} \sin(kx - \sigma t) \sin \frac{kB}{2} x \left\{ -2(h_w - z - z_0 + \frac{H}{2}) \right. \\ \left. + H \cos(kx - \sigma t) \cos \frac{kB}{2} \right\} - \left[\frac{EA}{l_0} H + \rho_w B \left\{ (h_w - z - z_0 + \frac{H}{2}) B - \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \sin \frac{kB}{2} \right\} \right] \psi \end{aligned} \quad \text{----- (17)}$$

$$\begin{aligned} \text{鉛直方向: } m\ddot{z} + C_z \dot{z} + \left[\rho_w B H \sin(kx - \sigma t) \sin \frac{kB}{2} \right] \psi + \rho_w B z + \frac{2EA}{l_0} z \\ = -\frac{\rho_w B H}{2} \sin(kx - \sigma t) \sin \frac{kB}{2} x \left\{ -2(h_w - z_0 + \frac{H}{2}) + H \cos(kx - \sigma t) \cos \frac{kB}{2} \right\} \psi \\ + \rho_w B \left\{ (h_w - z_0 + \frac{H}{2}) B - \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \sin \frac{kB}{2} \right\} - \frac{2EA}{l_0} (z_0 - \frac{H}{2}) + EA (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) - mg \end{aligned} \quad \text{----- (18)}$$

$$\begin{aligned} \text{回転方向: } J \ddot{\psi} + C_\psi \dot{\psi} + \frac{EA}{l_0} \frac{Bz + H_2}{2} \psi \\ = -P_L d_{PL} + P_B d_{PR} + P_B d_{PB} + \frac{EA}{l_0} \left[Hx + \frac{l_0}{2} \{ B_1 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) - H (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \} \right] \end{aligned} \quad \text{----- (19)}$$

3. 解析結果の比較

前節で得られた運動方程式は非線形連立方程式となるために、これを解くにあたってはニューマークのβ法を用いて、浮体の逐次応答を求めた。解析時の浮体に関する条件は、表1のとおりである。初期張力は、表2のように浮体重量Wに対して3ケース変化させ、波浪については波高10mとし、波の周期は表3に示すように5ケース変化させて解析を行った。また、運動方程式中の構造減衰率に対応する減衰係数h(=C/2√km)としては、並行して行った水槽模型実験で得られたh=0.03を用いている。これは、流体力のうち流体粒子による減衰力に対応するものである。これ以外に付加質量についても考慮する必要があるが、本解析では、付加質量には浮体の液体排除質量を用い、浮体の質量に加えている。

3-1 水平方向および鉛直方向運動について

図6(1)、6(2)は浮体の水平方向応答変位幅を波の周期に対して示したものである。これらは、それぞれ2自由度系および3自由度系として解析した結果である。これらによると、いずれの解析においても波の周期が7.14秒の場合に、応答変位量は最も大きな

表1 TLPの諸元

浮体	幅 (B)	33 m
	デッキ高 (H)	55 m
	喫水 (H ₁)	33 m
	排水量 (W)	35000 t
ケーブル	長さ (ℓ ₀)	245.36 m
	全断面積 (A)	0.516 m ²
	ヤング率 (E)	1.65×10 ⁸ t/m ²

表2 解析条件 (初期張力)

No	初期張力 (ton)	対応する水深 (m)
1	0.10W= 3500	253.3
2	0.25W= 8750	258.3
3	0.50W= 17500	266.6

っている。この時の波長は 表3から79.51mであるから、浮体底面幅33mの2.4倍である。これは、波の波長が浮体幅の2倍である時、浮体に最も大きな水平波力が作用すると考えられることに対応している。波長が浮体幅の6倍以下の範囲では、浮体の変位量は静止位置から波の進行方向に対して順方向の変位量が大きくなっているが、それ以上の波長になると順方向および逆方向で同程度の変位量となっている。すなわち、波長が長くなると順方向と逆方向で側面に作用する波力の絶対値が等しくなっていることを意味している。次にケーブル初期張力と水平応答変位量との関係について見る。ケーブルの初期張力が小さい場合は、最大応答を示す波の周期7.14秒のところでケーブル初期張力が大きい場合より水平応答変位量が大きくなっているが、波の周期が大きくなると、その変位量はケーブル初期張力が大きい場合より小さくなっている。このことは、ケーブル張力の非線形性が浮体の応答に現れていることを意味していると同時に、初期張力の大きさによって浮体の応答における非線形性の度合いが異なることを意味している。水平変位量に対しては、2自由度系および3自由度系とも同様の結果となっており、解析方法の違いによる差はないと言える。このことは、鉛直方向の変位についても言え、両方法による解析結果はほぼ同じになっている。

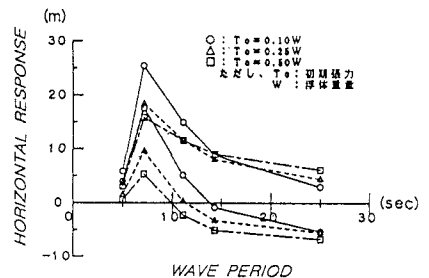
図7は、3自由度解析による水平方向変位と鉛直方向変位とのリサージュ図である。これらの図の座標軸は、値に差がありすぎるために部分的に統一が取れていないが、浮体の動きを知るには便利である。波の周期が小さい領域では、極端に変位変動が小さく、ほぼ円運動をする。最大応答を示す波の周期7.14秒のときは右下がりの楕円運動となる。すなわち、このとき水平変位も鉛直変位も同時に最大および最小の値を取る。波の周期が大きくなると、この楕円運動は水平な楕円となり、水平変位が最大となったとき鉛直変位が0となる。さらに、波の周期が大きくなると、楕円運動の中心は、浮体の静止位置を中心とした形の楕円運動となり、僅かながら左下がりのリサージュ図となり、最大水平変位を過ぎたあたりで鉛直変位が最大値をとることになる。すなわち、水平変位と鉛直変位とは波の動きに対して異なる位相を持っている。

3-2. ケーブル張力について

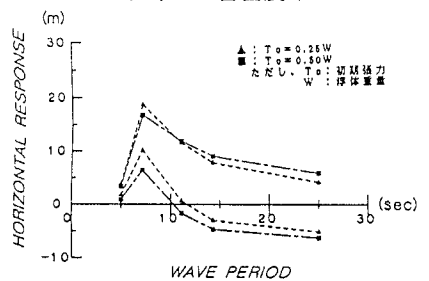
図8(1)および(2)は、波の周期およびケーブル初期張力に対してケーブル張力の増分が動く範囲をみたものである。2自由度系の解析では、ケーブル張力の増分は初期張力の変化に対しては無関係と

表3 解析条件 (波の周期)

No	波の周期 (sec)	対応する波長 (m)
1	$2.52T_{nv}=5.0$	38.99
2	$3.60T_{nv}=7.14$	79.51
3	$5.59T_{nv}=11.1$	192.2
4	$7.20T_{nv}=14.3$	318.9
5	$12.6T_{nv}=25.0$	974.8



(1) 2自由度系



(2) 3自由度系

図6 波の周期に対する水平方向変位

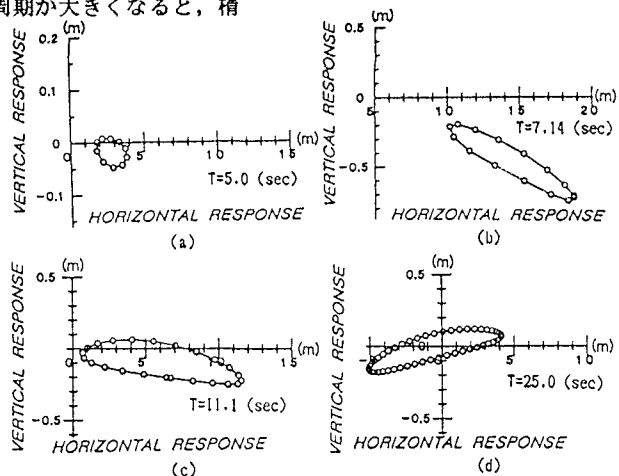


図7 水平-鉛直面内の浮体の運動

っており、波の周期の増加に対しても周期が10秒程度以上で一定となっている。一方、3自由度系における解析結果を見ると、ケーブル張力の減少側の最小値は波の進行方向に対して上流側および下流側の両ケーブルともケーブル初期張力の影響をほとんど受けていない。ケーブル張力の増分側でも、上流側ケーブルの張力がケーブル初期張力の影響を受けていないのに対して、下流側ケーブルは初期張力が大きくなると、張力増分が小さくなっている。また、上流側ケーブルと下流側ケーブルとでは、張力増分側で上流側ケーブルの張力が下流側ケーブル張力の約1.3から2倍程度にもなっている。さらに、両解析法による結果の比較をすると、張力減少側では3自由度系の張力が2自由度系の約2~3倍になり、増分側では上流側ケーブル張力は約2~3倍程度、下流側ケーブル張力は1.2~2倍程度となっている。この結果から、ケーブル張力の検討を行う場合は3自由度系で行わなければならないことがわかる。

4. 解析結果と実験結果との比較

本解析法の妥当性を検討するために、長さ20m、幅1.2mの波浪水槽を用いて1/250の模型を使った実験を行った。造波にはフラップ型造波器を用い、合田・佐藤のポテンシャル理論による造波形状とよく一致した波を得ることができた。変位の測定には非接触型光学変位計を用い、ケーブル張力の測定には動歪計を用い、波面の測定には水位計を用いた。

図9および図10はこの実験結果と実験条件と一致させた3自由度系としての解析結果との比較を行った一例である。図9は水平変位の時刻歴の比較である。図に示されているように、実験値の零点が僅かにずれているが、実験値と解析値とは良い一致をしている。図10は、張力変動の解析値と実験値との比較である。ケーブル張力変動の絶対値は実験値と解析値とでほぼ一致しているが、この時刻歴によれば、両者の間に時間的な差が生じている。これは、実験模型のケーブル定着点を実験上の制約から浮体の底部に設けることができず、模型上端に設けた結果によるものである。

5. まとめ 箱型浮体の耐波浪特性について、解析と実験の両面から検討を行ったが、以下のような結論を得た。
(1) 波圧分布としては時々刻々の静水圧分布を仮定するだけでもかなりの精度が得られる。(2) 応答変位のみを検討であれば、2自由度系としての解析でよいが、ケーブル張力の検討には3自由度系としての解析が必要である。

(参考文献) 森松, 久保, 緊張係留式浮体の動力特性, 第42回年次学術講演会概要集, 1987年, 9月
高木, 新井, 係留浮体の規則波中の運動に関する理論計算, 日本造船学会論文集, Vol.135, 1974年
Kitami, et al., Response Characteristics of T.L.P. with Mechanical Damping System in Waves, OTC4393
佐藤, 合田, 海岸・港湾, わかり易い土木講座, 彰国社刊, 1976年

(1987年10月16日受付)

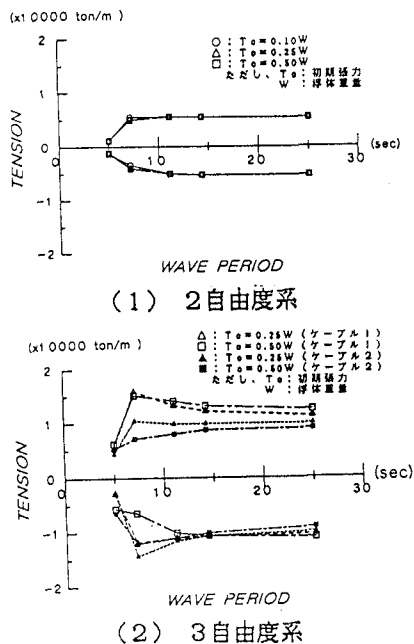


図8 波の周期に対する張力変動

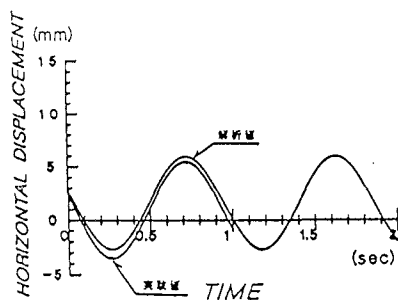


図9 水平方向変位の時刻歴の比較 (実験結果と解析結果)

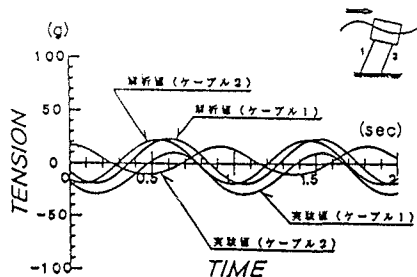


図10 ケーブル張力変動の時刻歴比較 (実験結果と解析結果)