

能動制御による大水深 TLP テンドンのアペンディング

正員 鈴木 英 之* 正員 吉 田 宏一郎*

Controlled Upending of Deep Water TLP Tendons

by Hideyuki Suzuki, *Member* Koichiro Yoshida, *Membr*

Summary

This paper presents theoretical development and experimental results of controlled installation technique of deep water TLP tendons. Dynamic response and deformation of a single-piece TLP tendon is controlled using wing-like appendages which generate drag force. The appendages are unfolded by servomechanism and drag force is controlled by changing the opening angle. This actuator utilizes free fall momentum of sinking tendon. Thus the actuator is efficient from viewpoint of consumed energy and the size of the actuator can be small. The system is suitable for deep water uses.

In the theoretical development LAC/HAC approach is employed to make the system robust against the nonlinearity and uncertainties in the dynamics of underwater line structure. DVFB is employed for LAC and significant modes are controlled by HAC. The line structure handled in this paper is almost neutrally buoyant and a constraint is imposed so that the moment of control forces about supporting point be zero. Otherwise there is possibility of structure do not sink and the structure can not be installed. Control parameters were chosen from computer simulations, and experiments were conducted successfully. The experiments are important to verify the theoretical development and robustness of control.

1. は じ め に

海洋石油の開発、大洋底の掘削、炭酸ガスの海洋投入などに関連して、水深 1000 m を超える海底あるいは海底近くを対象にした技術開発が進められている。海洋石油の開発では、大規模油田を求めて大型開発が大水深で進められている¹⁾。大水深掘削は地球物理に関連して、また、炭酸ガスの海洋投入は地球温暖化の緊急避難的処置として検討されている²⁾。

これらに関連した技術開発の一つに、大水深で多用される長尺のパイプ類や係留部材などの水中線状構造物をいかに建造、設置するかという問題がある。強度部材として重要な TLP テンドンでは特に重要な検討課題である。建造方法の一つは、いくつかの要素を設置海域でつなぎ合わせながら設置するものである。多くの要素をシリーズにつなぐことは、構造全体の信頼性を低下させるために望ましい

ものではない。また、洋上での組み立ては品質を確保する上でも望ましいものではないと考えられる。他の方法としては、あらかじめ一体に製作した構造物を現地まで曳航した上で設置する方法がある³⁾。この方法は破損しないように曳航する方法と、破損しないように設置する方法に分けられる。前者については実際に曳航途上での事故も報告されている⁴⁾。

水平状態で現地まで持って来た構造物を鉛直に設置するには、Fig.1 に示すように作業船からワイヤーで吊り降ろすことが従来から行われてきている。しかし、この方法はワイヤーが長くなるにしたがって吊った物とワイヤーよりなる系の固有周波数が低下して、波の周波数領域に近づいて作業性が著しく低下する。さらに、作業期間が長くなるために、海象との兼合で作業を行うチャンスも少なく、一度始めたら中止することが難しいなどの問題がある⁵⁾。

そこで、作業性の向上のために、一体で製作した長大な水中線状構造物を応答・変形を制御しつつ設置する手法の検討を行った。具体的には TLP テンドン設置の際の変形

* 東京大学工学部船舶海洋工学科

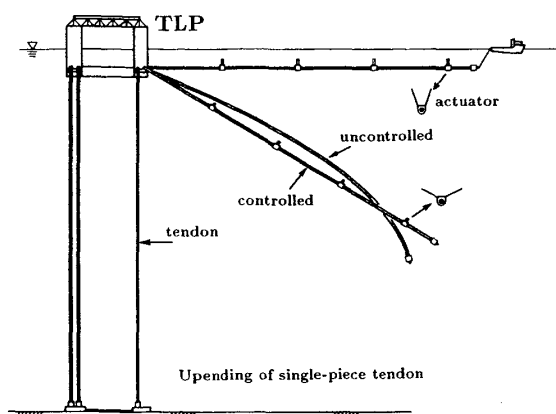


Fig. 1 Schematic diagram of upending of single-piece tendon.

を、構造物に沿って取り付け付けた羽状の付加物をサーボにより開閉してこれに働く抗力を変化させて制御するという方法で、手法の理論面の検討と実験を行った。一般にこのような長大な水中線状構造を投入すると、投入開始後まもなく変形が最も厳しい状態を迎える。これを過ぎると変形は小さくなり、じきに鉛直状態に達して曲げ変形はなくなる。パッシブな方法は変形が厳しくなる時期をずらすだけで変形を抑えることになる。また、水中線状構造物ではわずかな力が大きな変形を生むので、設置作業の過程で出くわす外乱や突然の状況変化に対応して構造を護ることが難しく、アクティブに制御することが望ましい。ここで用いた制御アクチュエーターは設置過程にある構造の落下の勢いを利用するもので、少ないエネルギーで制御力を発生でき、効率的で小型の装置が可能である。装置自体は作業終了後に切り離して容易に回収できるものと考えられる。一方で、落下速度が小さくなると発生できる制御力が小さくなり、効きが悪くなるという欠点があるが、落下速度が小さくなるのは鉛直に近い状態で、構造がまっすぐになり制御も必要ない状態になるので支障はないと考えられる。

水中線状構造物に固有の問題としては、単純な形状にもかかわらず挙動が非線形で、軸方向の剛性に比べてたわみの剛性が小さいなどの特異性がある。また、作用する流体力も非線形でパラメータの不確実性もある。そこで、制御の定式化で用いたいくつかの仮定と、アクチュエーターの特性の下で制御が確実に機能することを確認する必要がある、シミュレーション計算で制御パラメータの検討を行った上で実験を行ない確認を行った。

2. 制 御 方 法

定式化では張力は小さく無視できるものと仮定する。一般に長尺の水中線状構造物では、形状を保持する上で張力が重要な働きをするが、設置過程では張力は比較的小さいと考えられる。大水深 TLP テンソンは強度上の観点から中性浮力化して用いられる傾向にあり、設置の過程で張力

は小さく、また、設置はきわめて緩やかに行われるものとする。中性浮力化されているので制御力は小さくて済む。海中におけるこのような細長い構造物の大変位問題では、作用する外力が本質的に非線形で、線形モデルでは不十分であることが制御を難しくしている。また、流体力係数にも不確実な部分があるために、制御方法はロバストでなければならない。

そこで、制御手法としては宇宙構造物 LSS の制御などで検討されている階層的な制御手法 LAC (Low Authority Control)/HAC (High Authority Control) を用いた⁷⁾。この手法は LAC で系全体の振動の減衰を増した上で、HAC により各たわみモードを個別に制御するもので、宇宙構造物のような線形系については確立された手法である。しかし、水中線状構造物のような非線形系については安定性は必ずしも証明できていないので、シミュレーション計算と実験を重視した検討を行った。構造物はほぼ中性浮力化していて応答は緩やかなので、時々刻々の歪エネルギーが最小になるように HAC を定式化した。また、LAC は HAC 制御がスピルオーバーにより残余モードを励起する不安定を防止し、なおかつパラメータの変動に対してロバストであることが必要で、センサーとアクチュエーターを同置する DVFB (Direct Velocity Feed back)⁸⁾ を用いた。系は正実性の条件によりエネルギー散逸系になり、減衰が増強される⁸⁾。構造の変形からモード成分を求めるにはノイズに対して強い、固有関数の直交性を利用したモーダルフィルター⁹⁾を用いた。また、構造はほぼ中性浮力化されているので、一般に制御力は構造物の落下に強く干渉してしまう。そこで、制御力がピン支持点回りに作るモーメントの総和がゼロになる拘束条件を課し、確実に落下するように定式化で考慮した。

制御の定式化は次の手順で行った。

- (1) ハミルトンの原理から運動方程式として偏微分方程式を導く。
- (2) たわみを固有関数展開して、連立の常微分方程式を導く。得られる常微分方程式は非線形である。
- (3) 制御方法は系の減衰を増した上でモードを制御する LAC/HAC アプローチとする。

水中線状構造物の挙動は非線形で、変形は単純なたわみ形状であることが予想されるので、比較的低次までの固有関数を考慮することでダイナミクスのかなり正確な記述ができると予想される。

2.1 運動方程式

まず水中線状構造物を、一方の端をピン支持されて重力と浮力が作用する中で自由落下する梁としてモデル化して運動方程式を求める。その上で変形モードを仮定してモード領域の運動方程式を求める。座標系は Fig. 2 に示すように、空間固定の座標系 O-XY と梁とともに回転する座標系 o-xy を用いる。o-xy 座標系の水平からの傾き角 θ を反時

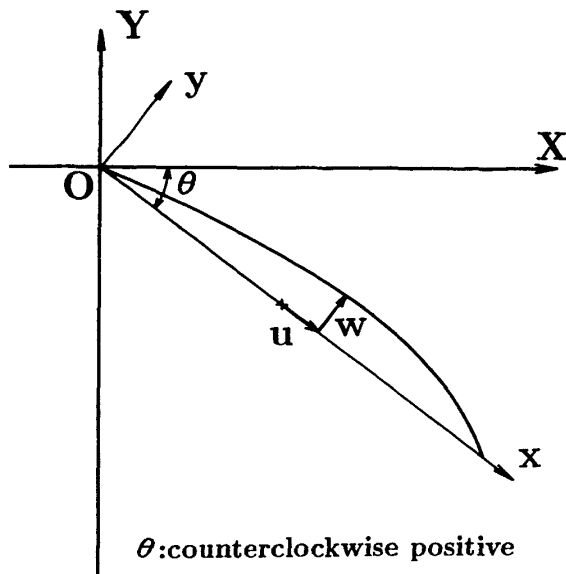


Fig. 2 Coordinate system and definition of deformation.

計回り正として定義する。o-xy 座標系での梁のたわみを w , 軸方向変位を u とすると空間固定の O-XY 座標系での座標との間には次の関係がある。

$$\begin{aligned}
 &\text{位置 } X \text{ 成分 } (x+u) \cos \theta - w \sin \theta \\
 &\quad Y \text{ 成分 } (x+u) \sin \theta + w \cos \theta \\
 &\text{速度 } X \text{ 成分 } \dot{u} \cos \theta - (x+u) \sin \theta \dot{\theta} - \dot{w} \sin \theta \\
 &\quad \quad - w \cos \theta \dot{\theta} \\
 &\quad \quad = (\dot{u} - w \dot{\theta}) \cos \theta \\
 &\quad \quad \quad - (x \dot{\theta} + u \dot{\theta} + \dot{w}) \sin \theta \\
 &\quad Y \text{ 成分 } \dot{u} \sin \theta + (x+u) \cos \theta \dot{\theta} \\
 &\quad \quad + \dot{w} \cos \theta - w \sin \theta \dot{\theta} \\
 &\quad \quad = (\dot{u} - w \dot{\theta}) \sin \theta \\
 &\quad \quad \quad + (x \dot{\theta} + u \dot{\theta} + \dot{w}) \cos \theta
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、o-xy 座標系は梁の先端が x 軸上に来るように取った。ラグランジアンは

$$\begin{aligned}
 L = T - U = &\int_0^L \frac{1}{2} \rho A \{ (\dot{u} - w \dot{\theta})^2 \\
 &+ (x \dot{\theta} + u \dot{\theta} + \dot{w})^2 \} dx \\
 &- \int_0^L \frac{1}{2} (EI w''^2 + EA u'^2) dx \\
 &- \int_0^L \mu g \{ (x+u) \sin \theta + w \cos \theta \} dx
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 T は運動エネルギー、 U は歪エネルギー、 μ は水中重量、 g は重力定数、 ρ は材料密度、 A は梁断面積、 E はヤング率、 I は断面二次モーメント、線積分は梁の全長 L について行う。運動方程式はハミルトンの原理により、次の作用積分の停留条件から求まる。

$$\begin{aligned}
 0 = &\int_{t_1}^{t_2} [\delta L + \delta W] dt \\
 = &\int_{t_1}^{t_2} \left[\int_0^L \rho A \{ -\ddot{u} + 2\dot{w}\dot{\theta} + w\ddot{\theta} + (x+u)\dot{\theta}^2 \} \delta u \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \{ -\dot{u}\dot{\theta} + w\dot{\theta}^2 - (x+u)\ddot{\theta} - \dot{u}\dot{\theta} - \dot{w} \} \delta w \\
 &+ \{ -2(w\dot{w} + u\dot{u} + x\dot{u})\dot{\theta} - (w^2 + (x+u)^2)\ddot{\theta} \\
 &- (x+u)\ddot{w} + w\ddot{u} \} \delta \theta \} dx \\
 &- \int_0^L EI w'''' \delta w dx + \int_0^L EA u'' \delta u dx \\
 &- \int_0^L \mu g \{ (\delta u - w \delta \theta) \sin \theta \\
 &+ (x \delta \theta + u \delta \theta + \delta w) \cos \theta \} dx \\
 &+ \int_0^L F(x, t) (\delta w + x \delta \theta) dx \\
 &+ \int_0^L \sum_{i=1}^n P_i(t) \Delta(x-x_i) (\delta w + x \delta \theta) dx \Big] dt
 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 W は仮想仕事、 $F(x, t)$ は分布外力、 $P_i(t) \Delta(x-x_i)$ は x_i に作用する集中荷重で、 $\Delta(x-x_i)$ はデルタ関数である。 δu , δw , $\delta \theta$ についてまとめると梁の軸方向、たわみ方向、回転の運動方程式が得られる。さらに、梁が緩やかに落下し、たわみと軸方向変位が小さいとして、動方程式の高次項を無視すると、たわみ方向運動方程式は

$$\begin{aligned}
 \rho A (-x \ddot{\theta} - \ddot{w}) - EI w'''' - \mu g \cos \theta + F(x, t) \\
 + \sum_{i=1}^n P_i(t) D(x-x_i) \\
 = m (-x \ddot{\theta} - \ddot{w}) - EI w'''' - \mu g \cos \theta \\
 + \frac{1}{2} \rho C_d D (-x \dot{\theta} - \dot{w}) | -x \dot{\theta} - \dot{w} | \\
 + \sum_{i=1}^n P_i(t) \Delta(x-x_i) = 0
 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、分布力には相対速度を考慮した修正 Morison 式で表される流体力を考慮した。付加質量は慣性力項に取り入れ、全体の慣性を m とした。さらに、梁の変形は緩やかで、梁の落下速度よりたわみの変形速度が小さいとして、抗力項の高次項を無視すると

$$\begin{aligned}
 m (-x \ddot{\theta} - \ddot{w}) - EI w'''' - \mu g \cos \theta \\
 + \frac{1}{2} \rho C_d D (x^2 \dot{\theta}^2 + 2x \dot{w} \dot{\theta}) \\
 + \sum_{i=1}^n P_i(t) \Delta(x-x_i) = 0
 \end{aligned} \quad (5)$$

回転モーメントの釣合は

$$\begin{aligned}
 \int_0^L \rho A (-x^2 \ddot{\theta} - x \ddot{w}) dx - \int_0^L \mu g x \cos \theta dx \\
 + \int_0^L x F(x, t) dx \\
 + \int_0^L \sum_{i=1}^n x P_i(t) \Delta(x-x_i) dx \\
 = \int_0^L m (-x^2 \ddot{\theta} - x \ddot{w}) dx - \int_0^L \mu g x \cos \theta dx \\
 + \int_0^L \frac{1}{2} \rho C_d D x (-x \dot{\theta} - \dot{w}) | -x \dot{\theta} - \dot{w} | dx \\
 + \int_0^L \sum_{i=1}^n x P_i(t) \Delta(x-x_i) dx \\
 \approx \int_0^L m (-x^2 \ddot{\theta} - x \ddot{w}) dx - \int_0^L \mu g x \cos \theta dx \\
 + \int_0^L \frac{1}{2} \rho C_d D x (x^2 \dot{\theta}^2 + 2x \dot{w} \dot{\theta}) dx
 \end{aligned}$$

$$+ \int_0^L \sum_{i=1}^n x P_i(t) \Delta(x-x_i) dx = 0 \quad (6)$$

2.2 たわみの固有関数展開

たわみを次のように仮定する。

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n T_i(t) \phi_i(x) \quad (7)$$

ここに、 ϕ_i は両端を単純支持された梁の正規固有関数で、境界条件 $\phi_i(0) = \phi_i'(0) = \phi_i(L) = \phi_i'(L) = 0$ を満たす。 λ_i は対応する固有値である。これをたわみの運動方程式に代入すると

$$\begin{aligned} & m \left\{ -x \ddot{\theta} - \sum_{i=1}^n \ddot{T}_i(t) \phi_i(x) \right\} \\ & - \sum_{i=1}^n \lambda_i^4 E I T_i(t) \phi_i(x) - \mu g \cos \theta \\ & + \frac{1}{2} \rho C_d D \left\{ x^2 \dot{\theta}^2 + 2x \dot{\theta} \sum_{i=1}^n \dot{T}_i(t) \phi_i(x) \right\} \\ & + \sum_{i=1}^n P_i(t) \Delta(x-x_i) \\ & = m \left\{ -\dot{\theta} \sum_{i=1}^n X_i \phi_i(x) - \sum_{i=1}^n \dot{T}_i(t) \phi_i(x) \right\} \\ & - \sum_{i=1}^n \lambda_i^4 E I T_i(t) \phi_i(x) \\ & - \mu g \cos \theta \sum_{i=1}^n I_i \phi_i(x) \\ & + \frac{1}{2} \rho C_d D \left\{ \dot{\theta}^2 \sum_{i=1}^n Y_i \phi_i(x) + 2x \dot{\theta} \sum_{i=1}^n \dot{T}_i(t) \phi_i(x) \right\} \\ & + \sum_{i=1}^n P_i(t) \Delta(x-x_i) = 0 \quad (8) \end{aligned}$$

回転モーメントの釣合は積分の一部を実施して

$$\begin{aligned} & -m \frac{L^3}{3} \ddot{\theta} - m \int_0^L x \ddot{w} dx - \mu g \frac{L^2}{2} \cos \theta \\ & + \int_0^L \frac{1}{2} \rho C_d D x (x^2 \dot{\theta}^2 + 2x \dot{\theta} \dot{w}) dx \\ & + \sum_{i=1}^n x_i P_i(t) \\ & = -m \frac{L^3}{3} \ddot{\theta} - m \sum_{i=1}^n X_i \ddot{T}_i(t) \\ & - \mu g \frac{L^2}{2} \cos \theta + \frac{1}{8} \rho C_d D L^4 \dot{\theta}^2 \\ & + \rho C_d D \dot{\theta} \sum_{i=1}^n Y_i \dot{T}_i(t) + \sum_{i=1}^n x_i P_i(t) = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

ここに、次のような $1, x, x^2$ の固有関数展開を用いた。

$$\begin{aligned} 1 &= \sum_{i=1}^{\infty} I_i \phi_i(x) \\ x &= \sum_{i=1}^{\infty} X_i \phi_i(x) \\ x^2 &= \sum_{i=1}^{\infty} Y_i \phi_i(x) \end{aligned} \quad (10)$$

以上得られた運動方程式から N 次 ($N \gg 1$) までのモードを取って、まとめて行列を用いて表すと

$$\begin{aligned} & -m \begin{bmatrix} \frac{L^3}{3} X_1 \cdots X_N \\ X_1 \quad 1 \\ \vdots \quad \cdots \\ X_N \quad 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{T}_1 \\ \vdots \\ \ddot{T}_N \end{bmatrix} \\ & + \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{\theta} \begin{bmatrix} \frac{L^4}{4} 2Y_1 \cdots 2Y_N \\ Y_1 \quad \alpha_1 \\ \vdots \quad \cdots \\ Y_N \quad \alpha_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{T}_1 \\ \vdots \\ \dot{T}_N \end{bmatrix} \\ & -EI \begin{bmatrix} 0 \quad 0 \cdots 0 \\ 0 \quad \lambda_1^4 \\ \vdots \quad \cdots \\ 0 \quad \lambda_N^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ T_1 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} \\ & - \mu g \cos \theta \begin{bmatrix} \frac{L^2}{2} \\ I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ \phi_1(x_1) & \cdots & \phi_1(x_n) \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_N(x_1) & \cdots & \phi_N(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

ここに、 α はたわみ方向運動方程式の第6項被積分項の $2x$ の評価値である。水中線状構造の応答で流体力の非線形性は本質的なもので、得られた運動方程式でも非線形は保持されている。

2.3 たわみ振動の制御 (LAC)

振動の制御 (LAC) には DVFB を用いる。アクチュエーターとセンサーを同置した DVFB についてはパラメーターの変動に関して閉ループ系の正実性が保持されるのでロバストである⁹⁾。また、梁はほとんど中性浮力であるから、一般に制御力は自由落下に強く影響し、最悪の場合には梁が沈まないという事態が生じる。そこで、制御力が梁の自由落下に影響しないようにするために、制御力のピン回りのモーメントがゼロという拘束条件を課す。

$$[x_1 \cdots x_n] \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

ここで、制御力 $[P_1, P_2, \dots, P_n]^T$ を、速度をフィードバック (DVFB) して系全体の減衰を高める LAC 制御力 $[P_1, P_2, \dots, P_n]^T$ と、モードを個別に制御する HAC 制御力 $[P_1, P_2', \dots, P_n']^T$ に分け次のようにする。

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} D [y_1 \cdots y_n] \begin{bmatrix} x_1 \phi_1(x_1) \cdots \phi_N(x_1) \\ \vdots \\ x_n \phi_1(x_n) \cdots \phi_N(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{T}_1 \\ \vdots \\ \dot{T}_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_1'' \\ \vdots \\ P_n'' \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、右辺第1項のLACは速度をフィードバックしたもので、行列の形はセンサーとアクチュエーターが同置されていることを示している。さらに、 $[z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ が次の関係を満たすようにすると、たわみ振動制御力によるピン回りのモーメントはゼロとなる。

$$[x_1 \cdots x_n] \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

2.4 たわみ量の制御 (HAC)

個々のモードの制御は時々刻々の梁の歪エネルギーが最小になるように定式化する。(11)式の運動方程式の一行目は梁の剛体運動である。振動が十分に減衰したほぼ定常な状態で、 T_i の影響も小さいとすると

$$m\ddot{\theta} - \frac{3L}{8}\rho C_d D \dot{\theta}^2 + \frac{3}{2L}\mu g \cos \theta = 0 \quad (15)$$

この関係を、行列で表示した運動方程式に代入す。さらに速度フィードバック (LAC) を減衰行列 D を用いて書き改めると次式が得られる。

$$\begin{aligned} m \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \vdots \\ \dot{T}_N \end{bmatrix} - \frac{1}{2}\rho C_d D \dot{\theta} \begin{bmatrix} \alpha_1 & & \\ & \cdots & \\ & & \alpha_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \vdots \\ \dot{T}_N \end{bmatrix} \\ - \frac{1}{2}\rho C_d D \dot{\theta}^2 \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} + \frac{3L}{4} \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \\ + EI \begin{bmatrix} \lambda_1^4 & & \\ & \cdots & \\ & & \lambda_N^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} \\ + \mu g \cos \theta \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} + \frac{3}{2L} \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} D_{11} & \cdots & D_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ D_{N1} & \cdots & D_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \vdots \\ \dot{T}_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \phi_1(x_1) & \cdots & \phi_1(x_n) \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_N(x_1) & \cdots & \phi_N(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1'' \\ \vdots \\ P_n'' \end{bmatrix} \\ = 0 \quad (16) \end{aligned}$$

速度フィードバック (LAC) により振動が減衰し、たわみがほぼ定常であるとするならば、時間依存の項の寄与は小さいと考えられるので無視すると、運動方程式から次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} = \frac{1}{EI} \begin{bmatrix} \lambda_1^4 & & \\ & \cdots & \\ & & \lambda_N^4 \end{bmatrix}^{-1} \left\{ -\mu g \cos \theta \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \right. \\ \left. + \frac{3}{2L} \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \right. \\ \left. + \frac{1}{2}\rho C_d D \dot{\theta}^2 \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} + \frac{3L}{4} \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \right. \\ \left. + \begin{bmatrix} \phi_1(x_1) & \cdots & \phi_1(x_n) \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_N(x_1) & \cdots & \phi_N(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1'' \\ \vdots \\ P_n'' \end{bmatrix} \right\} \quad (17) \end{aligned}$$

取扱の便利のために、行列を文字に書き直す。

$$T = \frac{1}{EI} \Lambda^{-1} [-F + \Phi P] \quad (18)$$

ここで、 $\Lambda = \text{diag}[\lambda_1^4, \dots, \lambda_N^4]$, $P = [P_1'', \dots, P_n'']^T$, Φ は $\phi_i(x_j)$ を要素とする行列、 F は θ に依存する外力項である。歪エネルギーが最小となるように、残りの HAC 制御力 P を決める。自由落下に影響しないという拘束条件は

$$x^T P = 0 \quad (19)$$

ここに、 $x = [x_1, \dots, x_n]^T$, 歪エネルギーは次のように表現される。

$$\begin{aligned} V &= \int_0^L \frac{EI}{2} w''^2 dx = \int_0^L \frac{EI}{2} w w'''' dx \\ &= \frac{EI}{2} \sum_{i=1}^N \lambda_i^4 T_i^2(t) = \frac{EI}{2} T^T \Lambda T \quad (20) \end{aligned}$$

ここに、 $T = [T_1(t), \dots, T_N(t)]^T$ 。拘束条件のもとでエネルギーを最小にする問題は、ラグランジュの未定係数 λ を用いて次の関数を極小化することとなる。

$$\begin{aligned} I &= \frac{EI}{2} T^T \Lambda T + \frac{1}{2} P^T H P + \lambda x^T P \\ &= \frac{1}{2EI} [-F + \Phi P]^T \Lambda^{-1} [-F + \Phi P] \\ &\quad + \frac{1}{2} P^T H P + \lambda x^T P \quad (21) \end{aligned}$$

ここに、 H は制御力に関する重み行列である。停留条件は

$$\frac{\partial I}{\partial \lambda} = x^T P = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial I}{\partial P} = -\frac{1}{EI} [-F + \Phi P]^T \Lambda^{-1} \Phi + P^T H + \lambda x^T = 0$$

以上の関係をまとめて

$$\begin{bmatrix} \Phi^T \Lambda^{-1} \Phi + EI H & EI x \\ x^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \lambda \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Phi^T \Lambda^{-1} F \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

したがって、これを解いて HAC 制御力 P が得られる。この HAC 制御力は、梁の振動が LAC により十分減衰しているとの仮定のもとに得られた静的なものである。

3. 制御シミュレーション

制御の定式化の過程ではいくつかの仮定を用いている。それらは運動方程式を固有関数展開する際の非線形性の取扱方, LAC がたわみ振動の減衰強化を行う一方で梁全体は重力場のなかで落下を続けていること, また, HAC の定式化は LAC が十分に機能してたわみ振動がほとんどない状態を仮定しているなどである。そこで, 実際に機能することをシミュレーションで確認する必要がある。また, 制御に用いるアクチュエータは抗力を制御するので落下する方向へ力を発生できない, そこで実験ではあらかじめ自重を大きめに取り, 制御力の原点を下向きにずらすことによって上向き, 下向き両方向に制御力を発生できるようにしている。そこで, シミュレーションによりあらかじめ必要な制御力を調べておき, 自重調節の情報を得ておくことが必要である。

まず, 制御しない場合の応答を時間領域で求めた。運動方程式は非線形なので, ニューマーク法により運動方程式を直接時間積分して応答を求めた。実験で用いた模型について8次のモードまでを考慮して, 制御を行わない場合の結果を Fig.3 に示す。模型は実験の項で紹介するが Table 1 のような特性値を持ったアクリル製の模型で3基のアク

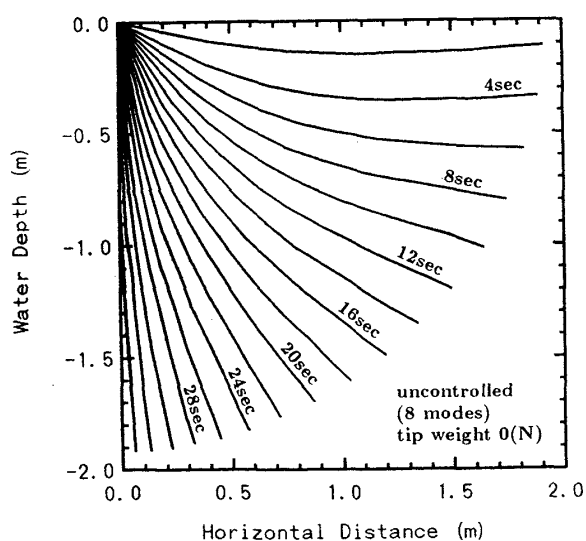


Fig.3 Calculated response of uncontrolled tendon model.

Table 1 Principal data of tendon model.

Outer diameter of model (m)	0.038
Inner diameter of model (m)	0.032
Diameter of bar (m)	0.00434
Length (m)	1.920
Mass in air (kg)	1.44
Moment of inertia of section (m^4)	1.75×10^{-11}
Young's modulus (N/m^2)	3.4×10^9

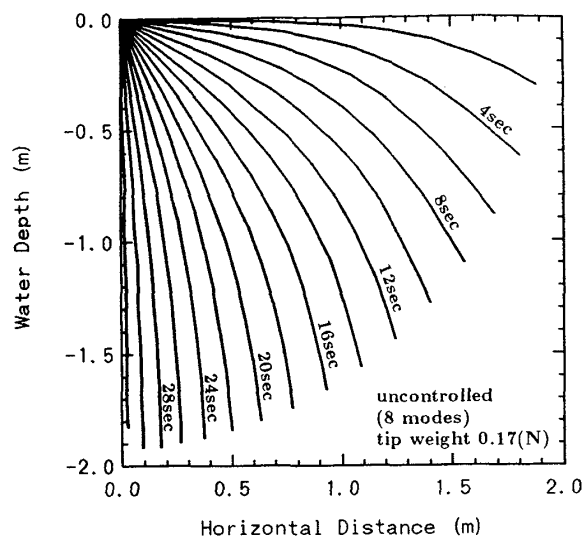


Fig.4 Calculated response of uncontrolled tendon model with tip weight.

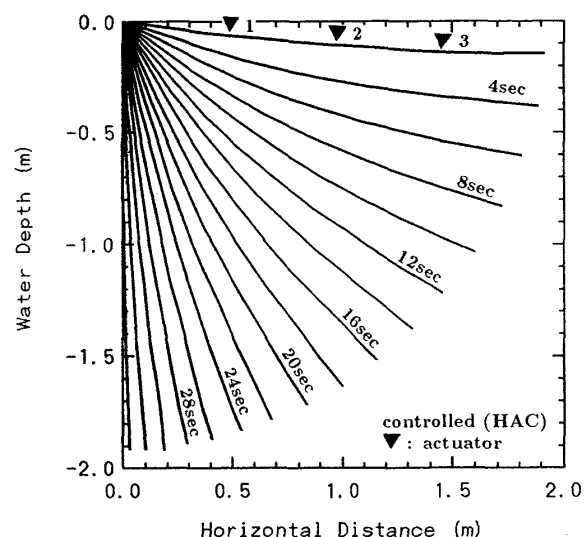


Fig.5 Calculated response of controlled tendon model by HAC.

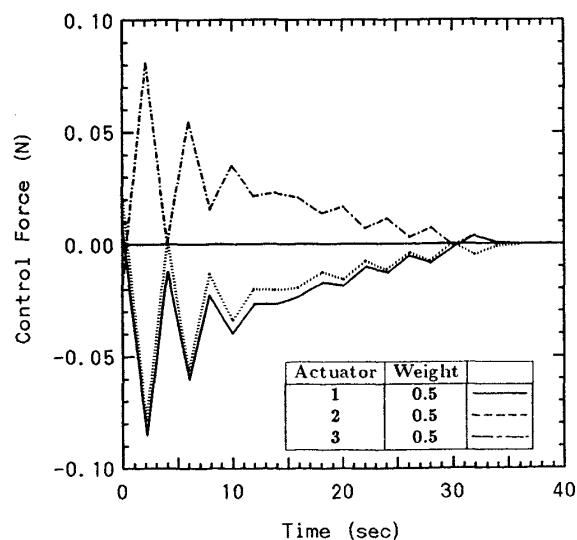


Fig.6 Time series of control forces of HAC.

チュエーターが等間隔に取り付けられているものである。水平状態にあった模型は最終的には鉛直になるが、その過程で一時非常に変形が激しくなる状態があることが判る。考慮するモード数を8, 4, 2と変えたが差は小さく1, 2次のモードが支配的であることが判った。落下を開始してから鉛直に達するまでに38秒かかっている。模型の端部に17.3 gfのおもりを取り付けた場合の結果をFig.4に示す。おもりのために端部から引き込まれるように落下を開始している。落下を開始してから鉛直に達するまでに34秒かかっている。

つぎに、制御した場合の計算結果を示す。HACのみによる制御結果をFig.5に、制御力の時系列データをFig.6に示す。落下の過程で梁のたわみはかなり小さくなっている。最大の制御力は8 gf程度で、試験体重量に比べて非常に小

さな値となっている。落下に要する時間は36秒で、制御を行わない場合とほとんど同じである。これは制御力が落下に影響しないように定式化したことが十分に機能していることを示している。制御力は変動しながら時間とともに減少しており、羽が落下にともなって閉じて行くことが判る。変動が大ききことは制御に用いるアクチュエーターの負担を大きくするので好ましくない。なお図中のウェイトは制御力に関する重み H を対角行列とした場合の、各アクチュエーターに対応する重みである。つぎに、LACとHACを併用した場合の結果をFig.7に示す。応答はHACのみの場合と同様で、落下時間も無制御の場合と同じであり、制御力も小さな値に収まっている。さらに制御力の時系列データFig.8を見ると、変動がなくなり緩やかな変化になっており、最大の制御力も4 gfと小さくなっていることが

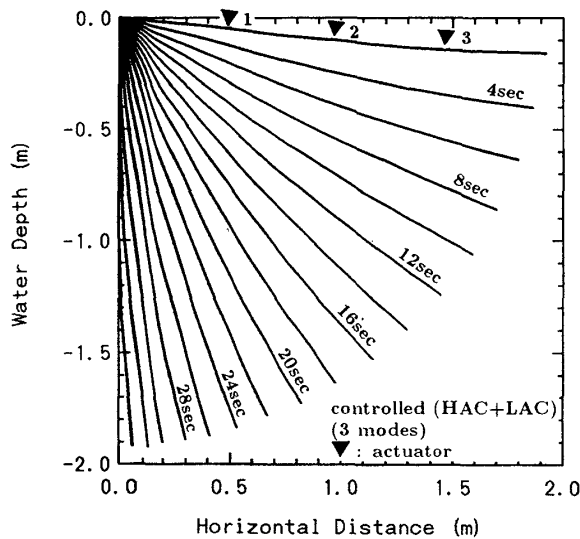


Fig. 7 Calculated response of controlled tendon model by LAC/HAC.

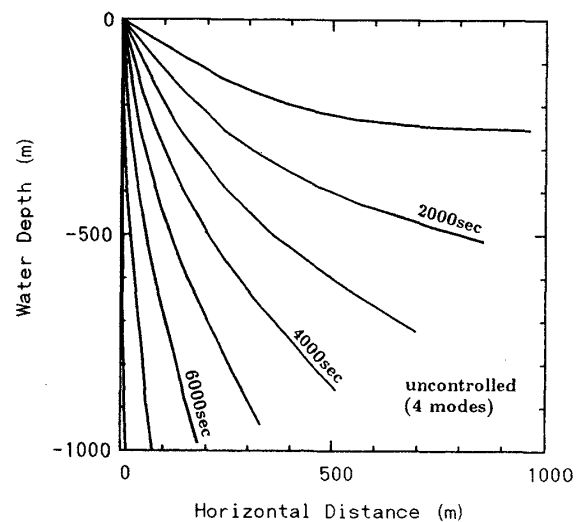


Fig. 9 Calculated response of uncontrolled 1000 m tendon.

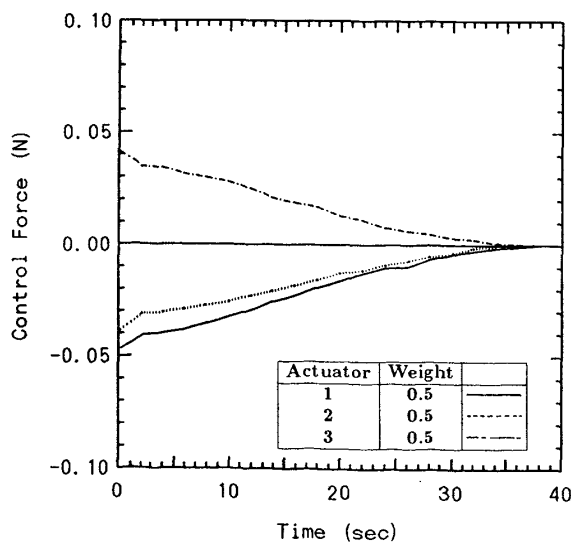


Fig. 8 Time series of control forces of LAC/HAC.

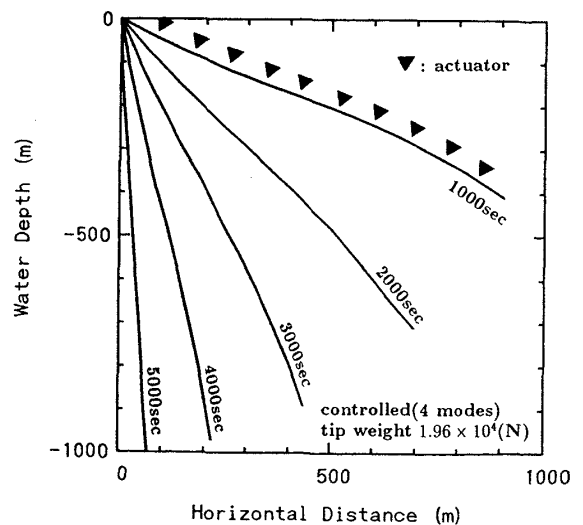


Fig. 10 Calculated response of controlled 1000 m tendon with 2tf tip weight.

Table 2 Principal data for simulation of TLP tendon.

Outer diameter of model (m)	2.0
Length (m)	1000
Weight in water (N)	4.067×10^6
Moment of inertia of section (m^4)	0.0012
Young's modulus (N/m^2)	2.1×10^{11}

判る。これは LAC が機能してたわみ振動が減少したことにより HAC が安定したことによるもので、HAC が LAC を前提にして定式化されたことに由来する現象であることが判る。

最後に長さ 1000 m テンドンの制御しない場合の計算結果と制御した場合の結果を Fig.9 と Fig.10 に示す。テンドンの特性値を Table 2 に示す。Fig.9 の制御しない場合の結果では落下に 8000 秒かかっている。Fig.10 の制御した場合は、テンドン端部に 2 tf のおもりを取り付け、10 基のアクチュエーター制御を行っている。要求される制御力は小さな値となっている。落下に要する時間は 6000 秒である。

4. 実 験

計算では実際に近い状態で、制御が正しく機能するかを見たわけである。一方、考慮した非線形性などは定式化でモデル化されているので実際とは異なる上、パラメーターの不確実性もある。そこで、実際に制御が機能するかを確認するために実験が必要である。

4.1 実験装置

実験は東京大学工学部船舶海洋工学科強度実験室の小型水槽において行った。この水槽は、長さ 5.9 m × 幅 3.3 m × 深さ 1 m で、中央部に深さ 1.2 m 幅 2.2 m の溝を設けたものである。実験システムを Fig.11 に示す。水中線状構造物上の各点の位置は超音波を用いた位置計測装置により計測した。装置は構造に取り付けた超音波発振器の 1 つから超音波を発信させ、空間固定の 3 つの受信機により受信して、各受信機へ超音波が到達するまでの時間から発振器と受信機間の距離を求め、これらの距離から 4 面体を構成して発振器の座標を割り出すものである。計測データが欠落した場合には再度計測を行うなどの処理を行っている。各発振器の座標がわかれば模型の変形が判るので、固有関数の直交関係を用いるモーダルフィルタ⁹⁾によりモード成分を求めることができる。さらに、巡回型デジタルフィルタを用いて、微分とノイズ除去を行い変形速度と傾斜速度を求めた。変形と傾斜から制御力を算定し、羽の開閉角度を計算してサーボにより羽を駆動している。計測と制御の一連の処理は 10 Hz で行った。

4.2 実験模型

実験に供したテンドンの模型を Fig.12 に示す。模型は流体力をアクリル製の外殻要素が受け、曲げ剛性は模型中

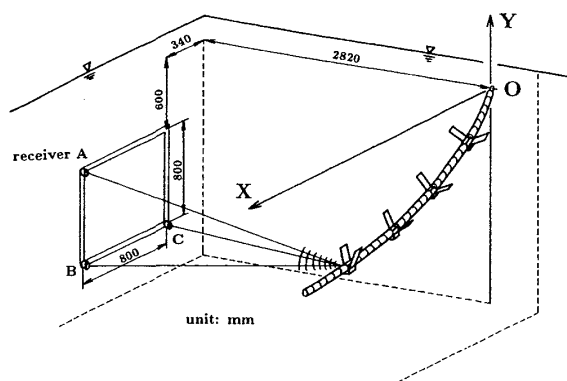


Fig. 11 Experimental setup of control experiments.

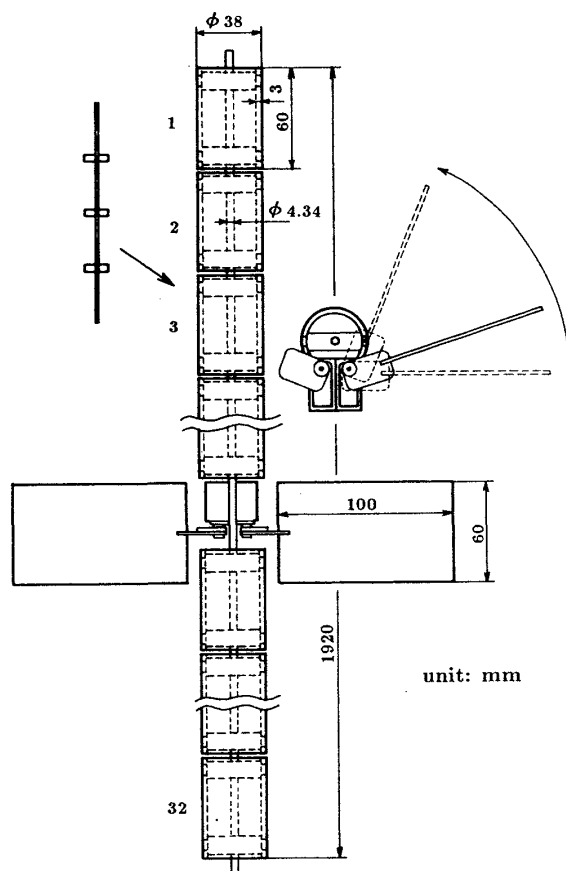


Fig. 12 Tendon model and actuators for control experiment.

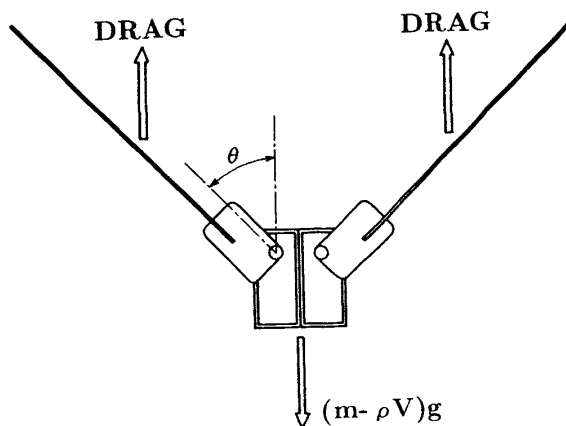


Fig. 13 Drag type actuator with wing-like appendages.

央に通したジュラコン（ポリアセタール）製の棒が持つようになっている。外殻要素は大きく曲げ変形を生じた際に接触しないように、互いに間隔を開けて取り付けられている。模型の寸法、質量など特性値は Table 1 に示した。模型の浮力は外殻要素に浮力材を取り付けて調整した。アクチュエーターは 3 基で等間隔に取り付けられている。

4.3 アクチュエーター

制御に用いたアクチュエーターは Fig.13 に示すように、羽状の付加物を開閉して抗力を調節するものである。羽に生じる抗力と速度、羽の開閉角度の関係は、水中の落下試験から求めた。羽に働く抗力は羽の開閉角度と落下速度の関数で、制御に必要な精度の範囲で次式から算定できる。

$$F = kV^2 \quad (24)$$

$$k = 0.2190\theta - 0.01568$$

ここに、 $F(N)$ は抗力、 $V(m/sec)$ は落下速度、 $\theta(rad)$ は羽の開閉角度。この装置の利点は模型が落下する際の位置のエネルギーを利用するもので、装置の携行するエネルギーが少なく済む点である。一方、欠点は模型が運動していないと制御力が発生しないことと、運動と反対の方向にしか制御力を発生できない点である。後者についてはあらかじめアクチュエーターにおもりを取り付け、下向きにずらしておくことにより上下両方向へ制御力を発生させることができる。実験の対象としているシステムでは、制御力が必要なときには模型の運動速度も大きく、一方で速度が小さくなるのは鉛直に近づいた状態で制御の必要もなくなるなど、この制御機構の制約は特別の困難に結び付かない。

5. 実験結果

まず、応答のシミュレーション計算が実際の実験と一致するかを確認するために自由落下させた場合の計算結果と

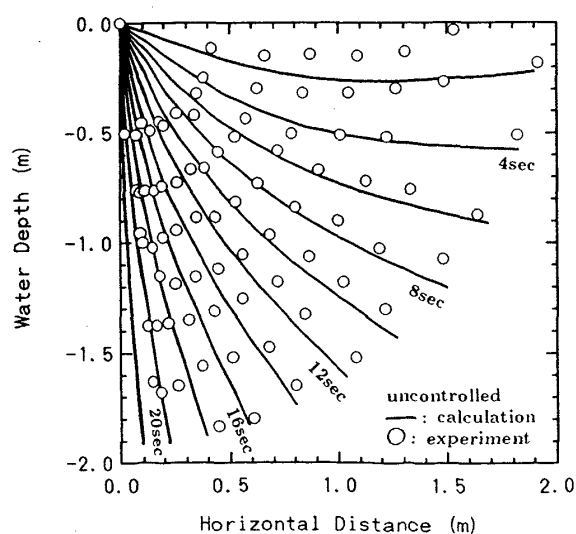


Fig. 14 Comparison between experiment and calculation of uncontrolled tendon model.

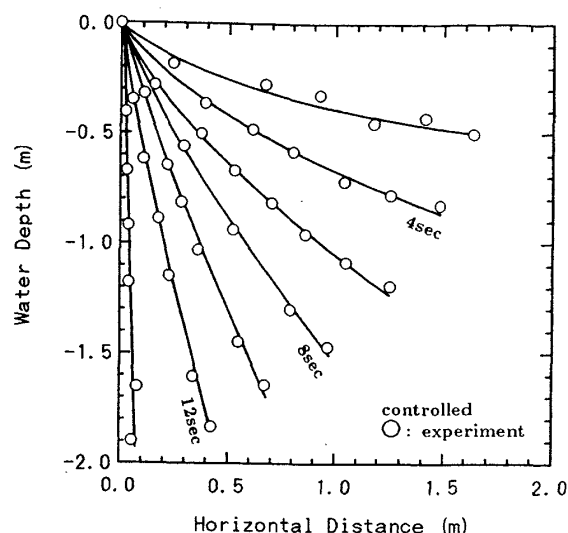


Fig. 15 Controlled responses of tendon model.

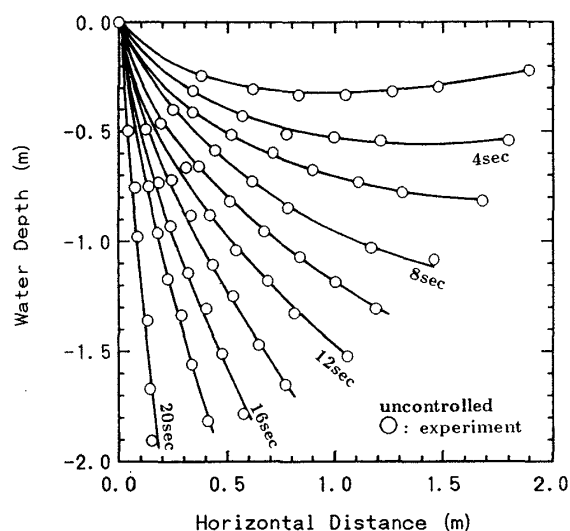


Fig. 16 Uncontrolled responses of tendon model.

実験結果の比較を行った。Fig. 14 で丸印は実験の計測結果で、計算結果を示す実線とはおよそ良い相関を示している。実験開始直後に一致が良くないのは、実験では柔らかい模型を先端で吊っているために初期形状がカタナリ形状であるのに対して、計算の初期条件は水平な直線形状であることによる。落下に要した時間は実験では 27 秒、計算では 28 秒とよく一致している。

つぎに制御した場合としない場合の実験結果の比較を Fig. 15 と Fig. 16 に示す。制御した場合でも模型に変形がみられシミュレーションほど完全には直線状にはなっていないが、制御しない場合に比べて効果が現れている。なお、制御した場合と制御しない場合の落下時間が異なるのは、模型端部に取り付けたおもりの違いによる。

6. ま と め

長大な TLP テンドンを鉛直に設置する際に、応答・変形を制御しつつ設置する手法の検討を行った。制御は水中線状構造物に取り付けた羽状の付加物を開閉し、これに働く抗力を変化させて制御する方法で、理論面と実験での検討を行った。この制御アクチュエーターは落下の勢いを利用するので効率的で小型にできるので有効と考えられる。制御の手法は構造応答の非線形性と流体力係数の不確実性を考慮してロバストなものとして、階層的な制御手法 LAC/HAC アプローチをとることとした。LAC ではスピルオーバー対策として、DVFB により系全体の振動の減衰を増し、HAC でモードを個別に制御した。また、制御力により構造が沈み込まなくなるのを防ぐために、制御力のピン支持点回りのモーメントの総和がゼロになるという拘束条件を課した。制御実験はシミュレーション計算で動作を確認した上で行ない、変形を抑えながら鉛直に持つて行くことができた。

今後の課題としては、

(1) 実際の状況を想定して、潮流の影響を検討する必要がある。波については、影響が海の表面に限られるので問題はない。

(2) 羽を用いるアクチュエータは効率的であるが、利用上の拘束が大きいため他のアクチュエーターも検討すべきである。

謝 辞

本論文に示した実験は松村竹実、渡辺啓介両君の平成2年度卒業研究として行ったもので、両君には実験の準備、細かな調整など忍耐を要する実験を行っていただきここに感謝します。また、実験に当たっては永井英晴助手に超音波

位置計測装置の改良、大学院生の宮崎英剛君に制御用アクチュエーターの製作を手伝って頂き、実験の成功に大きく寄与して頂きここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Edward E. Horton, "Status of Deepwater Production System", Marine Technology, Vol. 28, No. 1, Jan. 1991, pp. 39-45.
- 2) 石谷久, 松橋隆治, 大村昭士, 島田荘平, 須鍵孝彦, "CO₂ 海洋投入に関する技術的可能性評価", エネルギー・資源, Vol. 12, No. 3, pp. 66-74.
- 3) Meyer Steinberg and Anthony S. Albanese, "Environment Control Technology for Atmospheric Carbon Dioxide", International Workshop on the Energy/Climate Interaction, March. 1980, pp. 1-31.
- 4) 森川正夫, 山内豊, 石川邦照, 小段範久, 小宮治彦, "TLP 長尺テンドンの曳航と設置について", 関西造船協会誌 第215号, pp. 129-136, 1991.
- 5) P. C. Wybro, S. C. Bultema and J. L. Mueller, "Installation of the Jolliet Field TLWP", OTC6362, 1990.
- 6) E. R. Jeffreys and A. J. Fyfe, "Advances in Underwater Technology", Ocean Science and Offshore Engineering Vol. 19, Graham & Trotman, 1989.
- 7) J. N. Aubrun, "Theory of the Control of Structures by Low Authority Controllers", J. of Guidance and Control, Vol. 3, No. 5, 1980, pp. 444-451.
- 8) M. J. Balas, "Direct Velocity Feedback Control of Large Space Structures", J. of Guidance and Control, Vol. 2, No. 3, 1979, pp. 252-253.
- 9) L. Meirovitch and H. Baruh, "The Implementation of Modal Filters for Control of Structures", J. of Guidance and Control, Vol. 8, No. 6, 1985, pp. 707-716.