

I-43

緊張係留された水中トンネルの自由振動特性

北海道大学 正 員 三上 隆
 北海道大学 学生員 島田 智浩
 北海道大学 学生員 田尻 太郎
 北海道大学 正 員 佐伯 昇
 北海道大学 正 員 芳村 仁

1. はじめに

水中トンネルとは水面下に浮遊したチューブ状のトンネルをレグにより緊張係留した新しいタイプの構造物であり、新たな海峡横断手段として期待されている。

この構造はトンネル本体の浮力によってレグに生じた張力を利用して構造の安定をはかるという構造的特徴を持っている。同様な構造形式としては石油掘削などで用いられているTLP(Tension Leg Platform)などが実際に使用されているが、水中トンネルはまだ実用化には至っていない。

そこで本研究では水中トンネルの基本的な振動特性を把握するために2次元モデルを用いパラメトリックな固有振動解析を行った。

2. 解析モデル

解析モデルは図-1のようにA、B、Cの3つのタイプの係留形式を考える。また解析にあたっては座標原点はトンネルの重心位置にとり、トンネル本体は剛体、レグについては梁要素として定式化を行った。

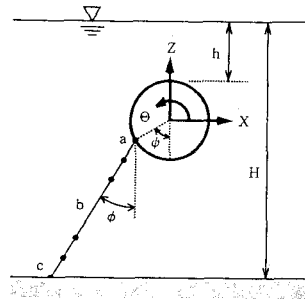
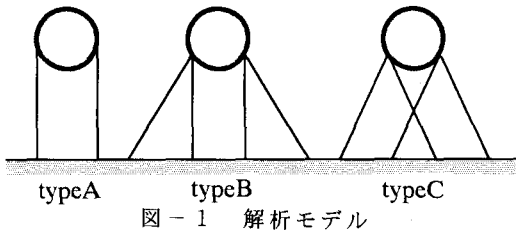


図-2 座標系と記号

3. 基礎方程式

最初に1本のレグについて考える。

ある節点 i, j にかかる外力ベクトルを f_i^* 、 f_j^* 、変位ベクトルを u_i^* 、 u_j^* とする。(*: 局所座標系) このとき、この要素では次の式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} f_i^* \\ f_j^* \end{Bmatrix} = [K^{(0)} + K^{(1)}] \begin{Bmatrix} u_i^* \\ u_j^* \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $K^{(0)}$: 梁の線形剛性マトリックス、 $K^{(1)}$: 初期張力に関する幾何学的剛性マトリックス、

$f_i^* = (x_i^*, z_i^*, m_i^*)^T$ 、 $u_i^* = (u_i^*, w_i^*, \theta_i^*)^T$ である。

式(1)を全体座標系に変換した後、各要素で重ね合わせを行うと次式となる。

$$\begin{Bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} & K_{ac} \\ K_{ba} & K_{bb} & K_{bc} \\ K_{ca} & K_{cb} & K_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Natural Vibration Characteristics of Submerged Tunnels with Tension Legs

by Takashi MIKAMI, Tomohiro SHIMADA, Taro TAJIRI, Noboru SAEKI and Jin YOSHIMURA

ここで図-2のようにaはトンネルと接する側のレグの端点の接点番号、cは地面と接する側のレグの端点の接点番号、bはその中間にある全ての接点番号をあらわす。

また式(2)において、レグに作用する外力は考えないので $f_b = 0$ 、c点は固定端とするので $u_c = 0$ となるから、式(2)より次式を得る。

$$f_a = K_{aa} u_a + K_{ab} u_b \quad (3)$$

$$0 = K_{ba} u_a + K_{bb} u_b \quad (4)$$

式(4)より求めた u_b を式(3)に代入するとa点の外力ベクトルと変位ベクトルに関する式が得られる。

$$f_a = [K_{aa} - K_{ab} K_{bb}^{-1} K_{ba}] u_a \quad (5)$$

剛体上の点aにかかる外力を座標原点にかかる外力に変換するため、以下に示す変換マトリックスSを用いると、次の式が成り立つ。

$$F = S f_a \quad (6)$$

同様に、点aでの変位はSを用いて次のように座標原点での変位に変換される。

$$U = S^T u_a \quad (7)$$

ただし、 (ξ, η) にかかる外力を座標原点にかかる外力に変換するSは次のようになる。

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\eta & \xi & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(6)、(7)を用いて式(5)を変形すると次式となる。

$$F = S [K_{aa} - K_{ab} K_{bb}^{-1} K_{ba}] S^{T-1} U \quad (9)$$

式(9)がレグによるトンネル本体の復原力を表す式となる。

ここで、すべてのレグを考慮すると水中トンネルの重心位置での運動方程式は次のようになる。

$$M \ddot{U} + \sum \{ S_i [K_{aa,i} - K_{ab,i} K_{bb,i}^{-1} K_{ba,i}] S_i^{T-1} \} U = 0 \quad (10)$$

ただし、M：3行3列の対角マトリックスであり、付加質量も考慮している。

以上より固有振動数 ω は次式を解くことにより求めることができる。

$$\det | \sum \{ S_i [K_{aa,i} - K_{ab,i} K_{bb,i}^{-1} K_{ba,i}] S_i^{T-1} \} - \omega^2 M | = 0 \quad (11)$$

4. 数値計算例

図-1の各係留タイプについて、海底面位置、設置水深、レグ取り付け位置、レグ傾斜角をパラメータとして変化させた時の、固有周期の変化を図-3、4、5、6に示す。

ただし、海底面位置、設置水深、レグ取り付け位置、レグ傾斜角は、それぞれ図-2中のH(m)、h(m)、 $\phi(^{\circ})$ 、 $\phi(^{\circ})$ である。

なお計算に用いた断面諸元は表-1の通りである。

表-1 断面諸元

トンネル本体	レグ
直径 : 2.3 m	弾性係数 : $2.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$
質量 : 290 t/m	断面積
慣性モーメント : 27350 $\text{t m}^2/\text{m}$	A、Bタイプ : 0.12 m^2
	Cタイプ : 0.09 m^2

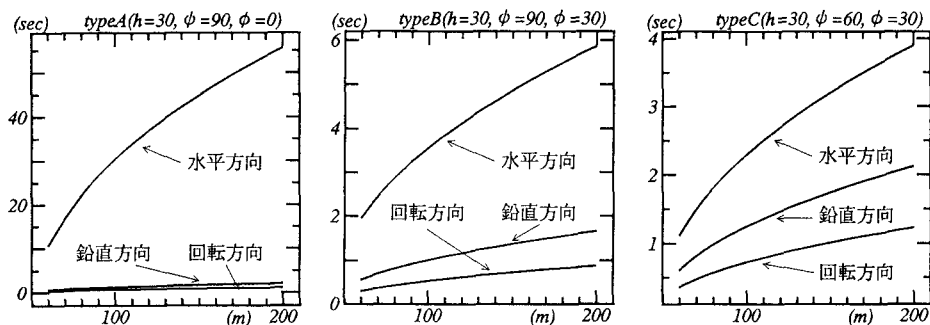


図 - 3 海底面位置の変化による固有周期の変化

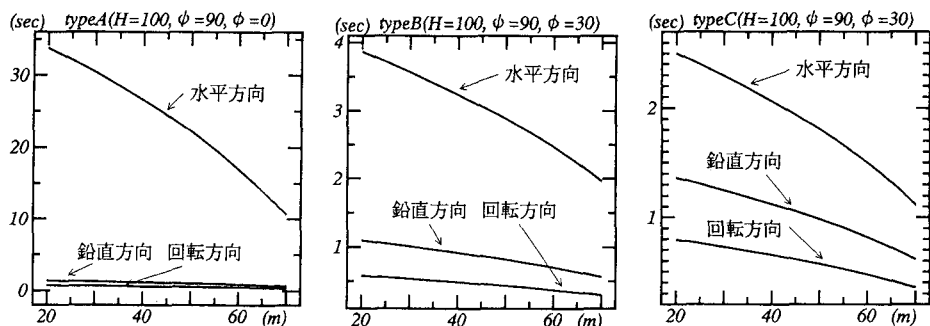


図 - 4 設置水深の変化による固有周期の変化

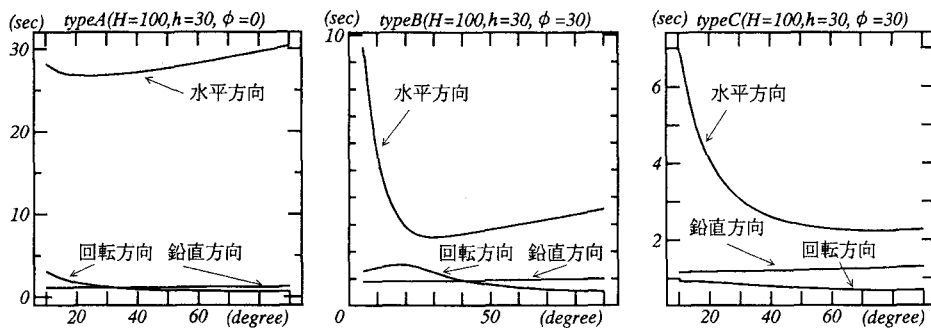


図 - 5 レグ取付位置の変化による固有周期の変化

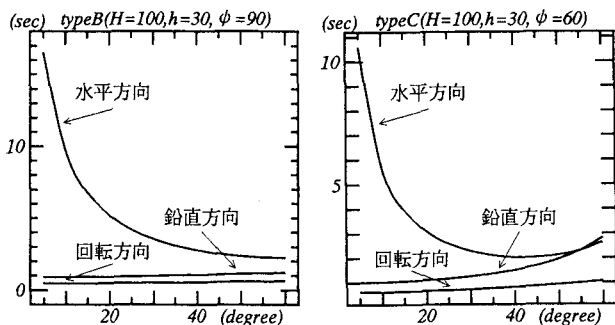


図 - 6 レグ傾斜角の変化による固有周期の変化

5. まとめ

以上の解析結果を要約すると、次のようになる。

- 1) Aタイプは鉛直方向のレグのみなので水平方向の固有周期が他のタイプの固有周期より非常に長い。
- 2) 海底面位置が深くなるにつれて、各タイプ、各方向とも固有周期は長くなる。
- 3) 設置水深が深くなるにつれて、各タイプ、各方向とも固有周期は短くなる。
- 4) レグ取り付け位置が変化すると各タイプの水平方向の固有周期で極小となる点が存在する、またA、Bタイプで回転方向と鉛直方向の固有周期が1次同調する点がある。
- 5) レグ傾斜角が大きくなるとB、Cタイプとも水平方向と鉛直方向の固有周期が近づいてゆき、Cタイプでは1次同調が起こる。

6. 参考文献

- 1) 吉田宏一郎、石川邦照、飯田國廣：浮遊骨組構造物の周期応答解析、日本造船学会論文集、第136号、1974
- 2) 吉田宏一郎、米家卓也、飯田國廣：有限要素法による水中線状構造の応答解析、日本造船学会論文集、第144号、1978
- 3) 吉田宏一郎、石川邦照：緊張係留プラットフォームのスナップ荷重、日本造船学会論文集、第144号、1978
- 4) 工藤君明、木下篤、生駒信康、西野好生：浮体式海洋構造物の緊張係留に関する研究、日本造船学会論文集、第157号、1985年
- 5) 日本造船学会海洋工学委員会構造分科会：半潜式海洋構造物の構造強度理論、日本造船学会誌、1985. 8～