

波浪作用時における水中浮遊式トンネルの全体動揺特性について

北海道大学大学院工学研究科 正 員 ○佐藤太裕
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 蟹江俊仁
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆

1. はじめに

本研究は波浪が作用する長大な水中浮遊式トンネルを弾性床上梁にモデル化し、その解析解より得られる応答値および計算式から大域的な波浪応答特性の概略把握を行うことを目的としている。

2. 解析モデル

図-1は解析モデルの断面図と側面図を示したものである。トンネルは断面径 D の円形断面で曲げ剛性 EI 、単位長あたりの質量 m 、粘性減衰係数 c を有し、トンネル軸方向に係留索を等間隔 h で配置したものを想定する。係留索の形状は(a)に示すタイプのものを考える。

3. 波浪応答解析解

作用波力は固定柱体に適用するモリソン式に構造物と流体との相対運動による影響を考慮した修正モリソン式を適用する。定式化における座標系は図-2に示すとおりである。 x 軸はトンネル軸、 y 軸は水平軸を表す。波が x 軸に入射する角度を ϕ とする。修正モリソン式により評価された流体力を線形化した後に支配方程式の外力項に代入し整理することで、波浪応答を記述した変位 $v(x,t)$ に関する次の支配方程式が得られる。

$$m' \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + c' \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + k_v' v(x,t) \quad (1)$$

$$= F_1 \cos(kx \sin \phi - \omega t) + F_2 \sin(kx \sin \phi - \omega t)$$

ここで ω は波周波数、 k は波数、 t は時間でありまた、 H は波高、 d は水深、 ρ は海水密度、 C_M は慣性力係数、 C_D は抗力係数としたときの m' 、 c' 、 F_1 、 F_2 および支配方程式一般解 $v(x,t)$ は同次解 $v_h(x,t)$ と特解 $v_p(x,t)$ の和となり、これらはそれぞれ文献1)に示すとおりである。

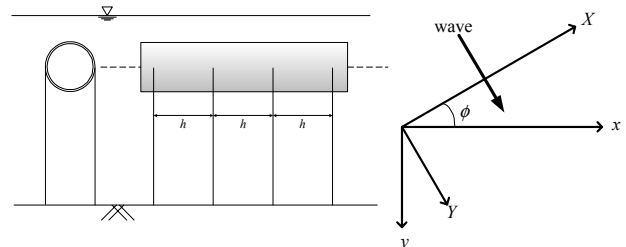
4. 動的構造特性に関する考察

4. 1 曲げ固有振動特性

弾性床上梁の j 次曲げ固有振動数 ω_j については

$$\omega_j > \sqrt{\frac{k_v'}{m'}} (= \omega_{b0}) \quad (2)$$

をいかなる境界条件においても満たすことがわかっている。つまり外力周波数 ω が $\omega < \omega_{b0}$ （非共振周波数領域）



(a) 断面図 (b) 側面図

図-1 解析モデル

図-2 座標系

ならば曲げ振動に関する共振は起こらない。このことは基本構造設計上の1つの目安として有用な情報である。

4. 2 非共振領域の応答ピーク値に関する考察

非共振周波数領域の応答は入射角の影響を大きく受ける。ここでは任意の入射角を考慮した場合の特性周波数を導出する。波の分散関係式として次式が成り立つ。

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (3)$$

ここで g は重力加速度である。一方構造物と作用波の関係に目を向けると、

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} \equiv k_v' v \quad (4)$$

を満たす波数に対応する波周波数が曲げモーメント振幅を極大とする振動数に近い値をとることが考えられる。たわみとして $v = e^{kx \sin \phi}$ を仮定して式(4)に代入し得られた k と分散関係式(3)より、曲げモーメント振幅を極大にする波周波数はおおよそ次式となる。

$$\omega = \sqrt[4]{\frac{g^4 k_v'}{EI \sin^4 \phi} \tanh^4 \frac{k_v' d^4}{EI \sin^4 \phi}} \quad (5)$$

5. 波浪動揺特性についての検討

解析する構造条件、材料条件及び海洋条件は表-1に示すものとした。この構造諸元において鉛直方向は $K_v = k_v h^3 / EI \cong 0.34$ 、 $\omega_{b0} = 2.83$ でありまた水平方向については $K_v \cong 0.000028$ 、 $\omega_{b0} = 0.0259$ となる。これらの K_v は共に弾性床上梁にモデル化可能となる適用条件²⁾を満たしている。

キーワード：水中浮遊式トンネル 弾性床上梁 波浪応答特性 修正モリソン式

連絡先：〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 TEL 011-706-6176 FAX 011-706-6174

表－1 解析条件

トンネル長さ l	2500[m]
係留索のトンネル軸方向取付間隔 h	50[m]
トンネルのヤング係数 E	2.74×10^{10} [N/m ²]
トンネル外径	23[m]
トンネル内径	21[m]
トンネルの単位長さ当たりの質量 m	2.88×10^5 [kg/m]
トンネルの比重	0.7
係留索のヤング係数	2.06×10^{11} [N/m ²]
係留索の断面積	0.12[m ²]
抗力係数 C_D	1.0
慣性力係数 C_M	2.0
水深 d	200[m]
水面からのクリアランス	30[m]

5. 1 鉛直方向の周波数応答特性

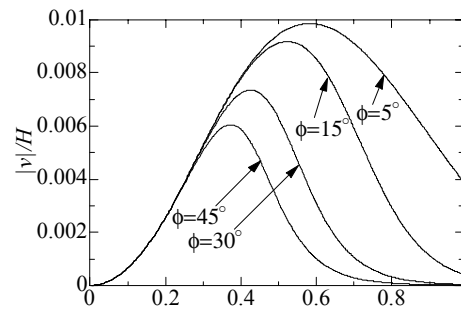
図－3 (a), (b) はトンネル中央点における単位波高 ($H = 1m$) の波が作用した場合の鉛直方向無次元たわみ及び曲げモーメント振幅の周波数応答を示したものである。鉛直方向の運動はこの諸元においては波浪との共振を回避できる非共振領域の議論となる。非共振領域では4. 2で考察したとおり、共振ではないピーク値が存在することが図－3 よりわかる。式(5)によると曲げモーメント振幅極大値をとるおおよその波周波数はそれぞれ $\phi = 45^\circ : \omega = 0.460$, $\phi = 30^\circ : \omega = 0.547$ $\phi = 15^\circ : \omega = 0.760$, $\phi = 5^\circ : \omega = 1.310$ となる。上述の結果を図－3 (b) の結果と照らし合わせると、 $\phi \geq 15^\circ$ では理論的考察と実際の応答計算結果がよく一致していることがわかる。

5. 2 水平方向の周波数応答特性

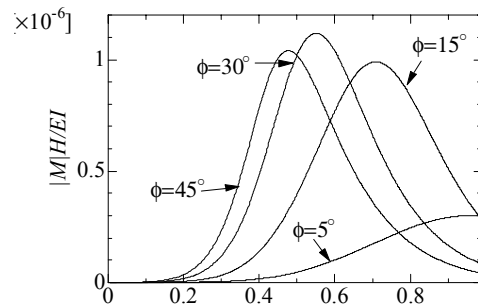
図－4 (a), (b) はトンネル中央点における水平方向無次元たわみ及び曲げモーメント振幅の周波数応答を示したものである。鉛直方向の特性とは大きく異なり、水平方向の場合は係留索による復元力が非常に小さいために ω_{b0} が小さな値となり、その結果有意なエネルギーをもつ波周波数領域が共振周波数領域と重なり構造物との同調が起こり得る。図中にみられる発散的なピーク値はいずれも共振によるものであり、図－3 (a), (b) のピークとは根本的に異なる性質のものである。

6. まとめ

本研究では実際に想定する水中浮遊式トンネルの諸元に対して導出した波浪動揺の周波数応答解析解の特性を考察し、理論的な解釈を加えた。鉛直方向の運動と水

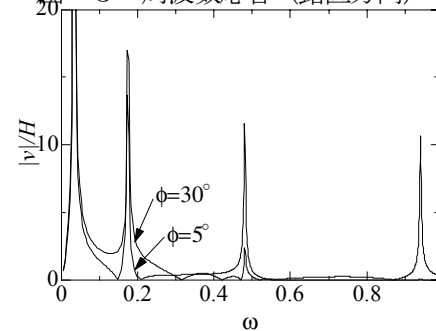


(a) たわみ振幅

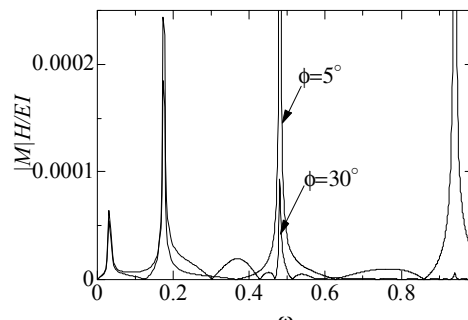


(b) 曲げモーメント振幅

図－3 周波数応答（鉛直方向）



(a) たわみ振幅



(b) 曲げモーメント振幅

図－4 周波数応答（水平方向）

平方向の運動は係留索の剛性の相違により動的特性は大きく異なることが解析解から顕著にみられた。

参考文献

- 1) 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 三上 隆: 弾性床上架にモデル化した水中浮遊式トンネルの波浪応答特性, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.27-34, 2002.
- 2) 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 三上 隆: 動的問題における水中浮遊式トンネルと弾性床上架の等価性に関する検討, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1-8, 2001.