

水中浮遊式トンネルの波浪動揺特性について

蟹江 俊仁¹・三上 隆²・角田 與史雄²

¹ 正会員 工修 大成建設札幌支店 土木部技術室 (〒060 札幌市中央区南一条西1丁目)

² 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北十三条西8丁目)

水中浮遊式トンネルは、従来の構造物に比べて大きな動揺を許容することにより、支持構造物の軽量化、経済化を図ることを目的としている。したがって、動揺の予測と制御が極めて重要な構造物であるが、水中の長大線状構造物としての解析手法が確立されていない上、我が国沿岸域のような厳しい波浪条件下において、どのような挙動を示すのかを研究した例は少ない。本論文では、まず断面二次元のモデルにおいて、基本的な動揺特性の解明を行った後、動的問題に拡張したモリソン式による比較的簡便な全体解析モデルを提案した。その結果、水中浮遊式トンネルの基本的な波浪動揺特性が明かになった。

Key Words: submerged floating tunnel, dynamic response, wave, tension leg, potential theory, Morison's equation

1. 序論

水中浮遊式トンネルは、浮力を有するチューブ形状の構造体を、テンションレグ等の係留索により海中に安定化させた新規渡海構造物であり、フィヨルドのような大水深域や、橋梁・橋脚などの海上・海中障害物を極力減らしたい海峡での渡海手段として適用が期待されている。

これまでの適用提案としては、ノルウェーにおけるフィヨルド横断やメッシナ・ジブラルタル両海峡の横断計画などが挙げられるが、計画概念までを示したものが多く、具体的な解析手法や実験結果について報告したものには極めて少ない。こうした中で、A.E. Loken ら¹⁾は、ノルウェーのフィヨルド横断計画を対象に、実験と解析により水中浮遊式トンネルの動的特性について研究を行っている。解析は、二次元問題での付加質量計算や減衰マトリックスの形成に始まり、トンネル全体をビーム要素にモデル化して行う断面力計算まで、計算上多くのステップを必要としている。一方 Blancaleoni²⁾らは、波浪や地震に対する水中浮遊式トンネルの挙動を、離散化した多質点系モデルにモリソン式で評価される流体力を作用させ、包括的に解析する手法をとっている。これは、長大線状構造物である水中浮遊式トンネルを解析するために実用的な方法と言えるが、運動方程式中に非線形減衰項を含んでいるため、時間領域で解析せざるを得ない。

本研究は、基本的には Blancaleoni らの方法と同様に、多質点系モデルにモリソン式で評価される流体力を作用

させるものであるが、係留索による復元力の非線形性や運動方程式中の非線形減衰項を実験結果に基づいて疑似線形化するなど簡略化に努め、時間領域および周波数領域いずれの場合でも解析できる解析方法を提案した。本解析結果は、二次元断面モデルを用いて境界積分方程式法によるポテンシャル解析結果と比較し、その妥当性が検証されている。

また本研究は、わが国沿岸域での水中浮遊式トンネルの適用を念頭に置いているため、①フィヨルド横断などに比べて、極めて長大なトンネルを対象としていること、また、②厳しい波浪条件を想定していることなどの点で特徴的である。本報告では、水深や係留索の配置形状などが波浪動揺特性に与える影響を見るため、二次元断面モデルを用いたパラメトリックな検討を行い、水中浮遊式トンネルの基本動揺特性を明らかにした。さらに、提案した手法に基づいて全体動揺解析を行い、長大な水中浮遊式トンネルの波浪動揺特性と適用に当たっての課題等について報告する。

2. 水中浮遊式トンネルの構造概要

水中浮遊式トンネルは、連続的に結合された中空断面のチューブと係留索により構成される構造物であり、その構造概念図は図-1に示す通りである。トンネル上部のクリアランスは、航行船舶の吃水など利用条件によって任意に設定が可能であり、海面上に浮いている場合には

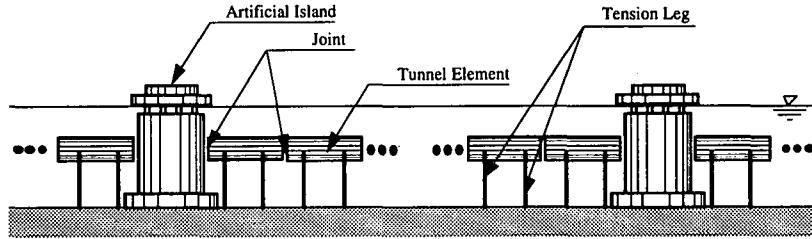


図-1 水中トンネル側面図

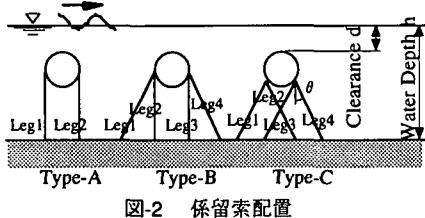


図-2 係留索配置

浮橋となる。また、トンネル下部と海底面とのクリアランスもある程度必要であり、あまり小さい場合には、着底構造あるいは支持架台などによる支持構造の方が経済的に有利となる。本論文では、トンネルチューブが完全に没水していること、また、トンネル下部のクリアランスが少なくともトンネル径の2倍程度はあることを前提にしており、これが従来の浮橋や沈埋トンネルと大きく異なる条件ともなっている。

水中浮遊式トンネルの係留方法ならびに係留索配置はすべての動搖特性に関連する極めて重要な基本条件である。ここでは、テンションレグ方式を採用するものとし、そのトンネル軸直角方向断面内配置については、図-2に示す代表的係留配置の中から、大きく動搖特性の異なるAとCのタイプを主に取り上げた。なお、BタイプはAとCの中間的な特性を持つものとして意図したものである。また、トンネル軸方向については、各々の係留索配置が、一定の間隔で繰り返されるものとする。

3. 流体力評価と運動方程式

(1) 一般的な流体力の評価

水中構造物に作用する流体力の代表的評価方法には、モリソン式による方法と、回折波理論に基づく方法がある。前者は、抗力、慣性力のいずれが卓越する場合でも適用できる反面、回折効果が見込めないため、構造物の代表径が波長に比べて小さい場合（構造物の代表径が波長の0.2以下）に適用される。一方後者は、慣性力が卓越する場合にのみ適用され、一般的には係留船舶など比較的大型構造物の動搖解析に用いられる。本研究のように、異常波浪下の水中浮遊式トンネルを扱う場合、断面径が波長に比べて十分小さく（0.1以下）、回折効果を無視し得る条件と判断されたため、モリソン式の適用

が可能である。また、回折波理論についても、Deanら³⁾の研究成果に照らし合わせてみると、慣性力が卓越する領域であり、本研究で想定している条件下では、いずれの評価方法も適用できることとなる。ここでは、取り扱いが簡単なモリソン式を適用することとし、回折波理論による結果と比較検証することとした。

動的問題に拡張した修正モリソン式を適用した場合の波浪による流体力は、以下の式で表現される⁴⁾。

$$f = C_M A_I \ddot{w} - C_A A_I \ddot{u} + C_D A_D |\dot{w}| \dot{w} - C_D' A_D |\dot{u}| \dot{u} \quad (1)$$

ここに、

A_I : 構造物の排水質量

A_D : 構造物の投影面積

C_M : 慣性係数

C_A : 付加質量係数

C_D : 抗力係数

C_D' : 静水中で構造物が振動する時の抗力係数

w : 水粒子の変位

u : 構造物の変位

上式(1)は、波浪中で振動する剛体に作用する流体力を示しており、2つの独立な流れ場、すなわち構造物の運動による影響を受けない遠方の波流れ場(far field)と、構造物の運動の結果として生じる構造物近傍の流れ場(near field)の線形重ね合わせにより求められるものである。式中の C_M 、 C_D および C_A 、 C_D' は、各々の流れ場におけるレイノルズ数 R_e (Reynolds Number)とKC数(Keulegan-Carpenter Number)の関数であり、波浪実験ならびに静水中での振動実験等から設定される。

$$C_M, C_D = f\left(\frac{\dot{w}_0 D}{v}, \frac{\dot{w}_0 T}{D}\right) \quad (2)$$

$$C_A, C_D' = f\left(\frac{\dot{u}_0 D}{v}, \frac{\dot{u}_0 T}{D}\right) \quad (3)$$

ただし、 D は構造物の代表径、 v は水の動粘性係数、 \dot{w}_0 、 \dot{u}_0 は水粒子と構造物の振幅、 T 、 T_0 は水粒子と構造物の振動周期を示している。

式(1)を、水粒子と構造物との相対速度に置き換えて表現すると、以下となる。

$$f = C_M A_I (\ddot{w} - \ddot{u}) + A_I \ddot{u} + C_D A_D |\dot{w} - \dot{u}|(\dot{w} - \dot{u}) \quad (4)$$

(2) 基本運動方程式

水中浮遊式トンネルの運動を解析するため、式(4)を一般的な運動方程式に当てはめて、マトリックス表現する。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f + B \quad (5)$$

ここに、

- M : 構造物の質量マトリックス
- C : 構造物の構造減衰マトリックス
- K : 復元力マトリックス
- f : 流体力ベクトル (式(4)に基づく)
- B : 静水圧ベクトル

静水圧ベクトルは、水面上に浮いている構造物の場合、運動によって時間的に変化する要素だが、水中浮遊式トンネルの場合は構造体が完全没水しているため一定値となり、運動方程式上省略可能である。したがって、

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = C_M A_I (\ddot{w} - \ddot{u}) + A_I \ddot{u} + C_D A_D |\dot{w} - \dot{u}|(\dot{w} - \dot{u}) \quad (6)$$

上式は、相対速度に関する非線形項を含んでいるため、このままで計算が容易ではない。そこで等価線形化法の考え方を導入し、相対速度の一次線形で表現できるような係数を含んだ、新たな抗力係数 C_{DR} で定義し直すことにとする。この C_{DR} については、後述するように実験的に求めることとする。これにより、最終的に解かなければならない運動方程式は下式(7)の通りとなる。

$$\{M + (C_M - I)A_I\}\ddot{u} + (C + C_{DR}A_D)\dot{u} + Ku = C_M A_I \ddot{w} + C_{DR} A_D \dot{w} \quad (7)$$

4. 係留索復元力の評価

係留索配置がAタイプの場合、水平方向と鉛直方向の復元力特性が大きく異なる上、復元力マトリックスにおける水平方向(x)と鉛直方向(z)の連成項 K_{zx} が非線形となる。このため、直交座標系で表現されることが多い波浪や地震などの外力による運動を解く場合には、取り扱いが複雑になる欠点がある。そこで、この復元力マトリックスを直交座標系において疑似線形化することとした。

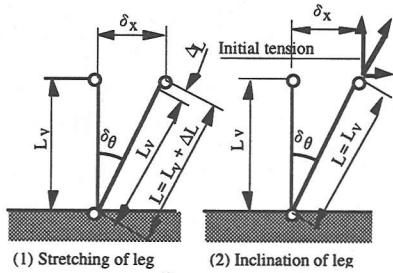


図-3 テンションレグの復元力

(1) 水平方向の復元力

水平方向変位時のテンションレグによる復元力を、図-3に示すような2つの成分に分けて考える。

- ①レグの伸びに起因する、張力増加による成分
- ②レグの傾角増加がもたらす、水平方向分力の増加による成分

ここで、鉛直に張られた2本一対のテンションレグの水平方向復元力(K_{xx})を定式化すると下式のようになる。

$$K_{xx} = \frac{2EA}{L_v} (1 - \cos \delta_\theta) + \frac{2P_v}{L_v} \quad (8)$$

E : レグの弾性係数, A : レグ1本当たりの断面積,
 L_v : レグの長さ, P_v : レグ1本に作用する初期張力
 ΔL : レグの傾角増分

式(8)右辺の第1項は①の成分、第2項は②の成分による復元力を示しているが、両者のいずれの成分が支配的となるかは、レグの弾性係数と断面積、並びに初期張力のバランスによって変化することになる。

(2) 水平・鉛直連成項

前節(「(1) 水平方向の復元力」)において述べたように、水平変位に伴ってレグの張力は増大する。その結果、レグの伸びに起因する成分の内、水平方向分力は式(8)右辺の第1項のように水平方向の復元力となり、鉛直方向分力は同時に鉛直方向の復元力となる。一方、レグの傾角は、初期状態(直立状態)で作用している鉛直上向きの張力(初期張力)と与えた水平外力の釣合いで決まるため、レグ傾角の増加だけでは鉛直方向復元力は生じない。以上より、 K_{zx} を定式化すると、次式(9)のようになる。

$$K_{zx} = \frac{2EA(1 - \cos \delta_\theta)}{L_v \tan \delta_\theta} \quad (9)$$

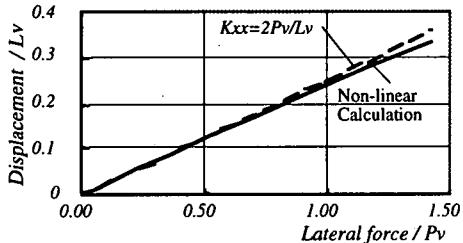


図-4 水平力と水平変位の関係

もし、水平方向力による係留索の伸びが非常に小さければ、式(8)の第1項と式(9)の連成項 K_{zx} は無視できることとなり、実質的な水平方向復元力として式(8)の第2項のみが残るような形となる。ここでは、後に検証するように水平方向力による係留索の伸びが十分に小さいため、水平方向復元力として式(8)の第2項のみを残すこととし、 K_{zx} は0とした。

(3) 復元力マトリックス

以上の結果を踏まえて、係留索配置がAタイプの場合の断面二次元モデルでの復元力マトリックスを構築すると、下式(10)のように疑似線形化された形となる。

$$K = \begin{bmatrix} 2P_v/L_v & 0 & 0 \\ 0 & 2EA/L_v & 0 \\ 0 & 0 & EAD^2/2L_v \end{bmatrix} \quad (10)$$

なお、回転方向については、トンネル断面が円形断面であれば外力による回転方向のトルク自体が作用しないため、省略することも可能である。

(4) 復元力マトリックスの妥当性

この復元力マトリックスの妥当性を検証するため、水平方向力を徐々に増加させながら、水平・鉛直両方向変位を静的に解析した。図-4は、その結果得られた変位と水平方向力の関係を示すもので、各々レグの長さ L_v と初期張力 P_v で無次元化している。これに式(8)の第2項をプロットすると、水平方向変位が $0.2L_v$ 程度までの間、両者が良く一致することがわかる。即ち、Aタイプの場合には、水平変位に伴って鉛直方向にも変位するため、係留索の伸びはほとんど発生しないと言える。このため、係留索の伸びが無いものとして(8)式の第2項だけで定義しても、実用上差し支えないものと判断できる。

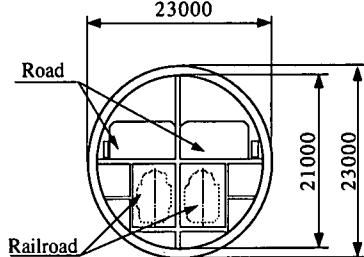


図-5 標準断面図

(5) Cタイプの場合の復元力マトリックス

一方、係留索配置Cの場合は、斜レグによる水平方向運動の拘束が高いため、テンションレグの伸びに起因する成分が卓越する。したがって、トンネル断面の左右に取り付けられた2組4本のテンションレグは、各々が1対のシンプルなトラス構造として線形復元力マトリックスが設定できる。回転についての考え方はAタイプの場合と同様に省略することが可能である。なお、 θ は斜レグが鉛直面となす角度(図-2参照)と定義する。

$$K = \begin{bmatrix} 4EA \sin^2 \theta/L_s & 0 & 0 \\ 0 & 4EA \cos^2 \theta/L_s & 0 \\ 0 & 0 & EAD^2 \cos^2 \theta/L_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

5. 二次元解析による基本動搖特性

前述した解析方法を用いて、具体的な解析を行った結果を以下に示す。

(1) 解析条件

a) 構造条件

二次元断面解析に用いた断面諸元は、表-1に示す通りである。トンネルの比重は、標準として約0.7に設定している。

b) 材料条件

トンネルエレメントのコンクリート及びテンションレグの材料特性は表-2の通りである。

c) 波浪条件

波浪については、極大波浪に対する動搖の検討を主な対象とするため、北海道南部太平洋岸での100年確率波浪⁵⁾を原則として採用した。

有義波高	$H_{1\beta}$	=	9.3 m
最大波高	H_{max}	=	18.6 m
波長	L	=	259 m
周期	$T_{1\beta}$	=	13.0 sec.

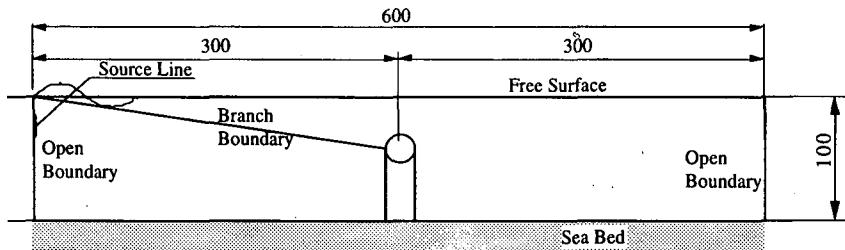


図-6 二次元境界要素法モデル図

表-1 断面諸元

Item	Unit	Specification
Weight	N/m	2.82×10^6
Buoyancy	N/m	4.19×10^6
Sectional Area of concrete	m^2	115.0
Moment of Inertia of Section	m^4	5000
Sectional Area of Leg	m^2	
Type A		0.12
Type B		0.12
Type C		0.09

表-2 材料条件

Material	Unit	Concrete	Tension Leg
Unit Weight	N/m^3	2.45×10^4	7.69×10^4
Strength	N/m^2	2.94×10^7	5.49×10^8 (fy)
Modulus of Elasticity	N/m^2	2.74×10^{10}	2.06×10^{11}

d) 適用した係数値

解析に先だって設定しなければならない係数は、付加質量係数 C_M 、構造減衰係数 C および等価線形化の概念により導入した減衰係数 C_{DR} である。設定に当たっては、Mizuno ら⁶⁾による二次元の波浪動揺実験結果を用いることとした。諸係数値は以下の通りである。

$$C_M = 2.0, \quad C_{DR} = 1.0, \quad C = 6\%$$

(2) 本解析方法の適用性について

上述した条件の場合、抗力成分は小さく、断面二次元の解析においては、線形ポテンシャル理論の適用も可能である。そこで、浅海波領域での微小振幅波を対象に、境界積分方程式法でも解析を行い^{7), 8)}、修正モリソン式による解と比較検討することとした。この時の解析モデルは図-6 に示す通りであり、流体外側の境界面と内側の境界面（構造物境界）は図中に示す Branch Boundary を用いて連続的に積分した。この検討は、修正モリソン式において用いられている、Mizuno らが行った実験の結果として得られた諸係数値の検証の意味も含んでいる。比較検討を行なったのは各係留索配置について、上部クリアランス d を変化させたケースであり、比較結果一覧を表-3 に示す。

表-3 ポテンシャル解と修正モリソン式との比較

Leg	Clearance d (m)	Lateral disp. (cm)		Vertical disp. (cm)	
		BEM	Modified Morison's	BEM	Modified Morison's
Type A	30	506.0	520.0	3.8	4.0
	50	372.0	385.3	1.4	1.4
	70	371.0	410.0	0.3	0.3
Type B	30	33.6	36.6	2.2	2.4
	50	14.6	15.8	0.8	0.9
	70	5.6	5.6	0.2	0.2
Type C	30	13.1	14.1	3.4	4.1

表から明かのように、この条件下では波力の内慣性力項が卓越し、変位量の最も大きいAタイプでも両者の差はほとんど見られない。また、実験により得られた C_M 、 C_{DR} 等の係数も妥当なものと判断できる。

(3) 解析結果

a) 一般的な特徴

水深 (h) = 100 m、斜レグ傾角 (θ) = 30°、上部クリアランス (d) = 30 m の標準構造における解析結果は表-4 の通りである。レグ張力は、トンネルが図-2において最も右側に変位した時の各レグの発生張力を示している。また、レグ張力比は、初期張力に対する変動張力振幅の比であり、これが 1.0 を上回るとレグに圧縮力（負の張力）が作用していると考えられる。本解析では、レグに圧縮力が作用する場合でも、ひずみや変位に相応した反力が生じるものとしているが、実際のテンションレグ構造の場合はレグのたるみ（スラック）により圧縮反力はほとんど発生しない。このため、レグ張力比が 1.0 を上回るケースにおけるレグの発生張力は、スラックの影響も加味した実際の張力ではない。しかし、スラックは、それまでの復元力特性に大きな変化を与えるばかりでなく、変位の回復に際して、「スナップ」と呼ばれる衝撃的な緊張力がレグに作用することになる。この現象は、構造強度に影響を与える上、供用時においては利用

表-4 二次元モデル波浪時解析結果
(水深 $h=100$ m、上部クリアランス $d=30$ m、斜レグ角度 $\theta=30^\circ$)

Arrangement	Wave force ($\times 10^5$ N/m)		Displacement (m)		Reacting force ($\times 10^5$ N)		Leg tension ratio			
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Rotational	Leg 1	Leg 2	Leg 3	Leg 4	
Type A	2.21	6.45	5.058	0.038	0.000	504	504			0.47
Type B	7.23	6.50	0.336	0.022	0.007	573	-149	497	172	1.88
Type C	7.12	6.51	0.131	0.034	0.000	378	378	179	179	0.91

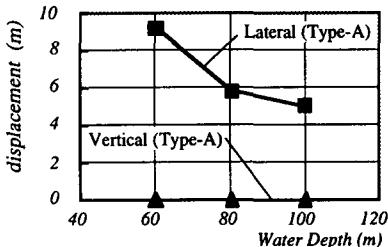


図-7 海底面位置と変位量 (Type A)

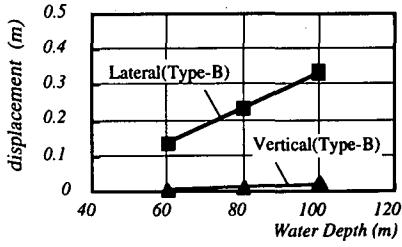


図-8 海底面位置と変位量 (Type B)

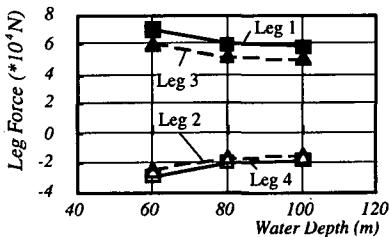


図-9 海底面位置と変動張力 (Type B)

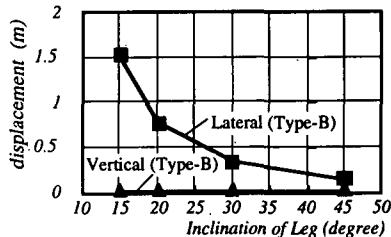


図-10 斜レグ角度と変位量 (Type B)

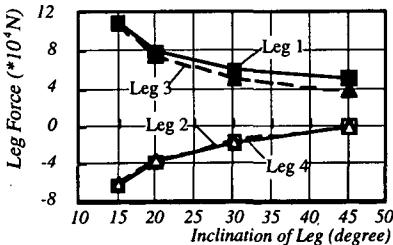


図-11 斜レグ角度と変動張力 (Type B)

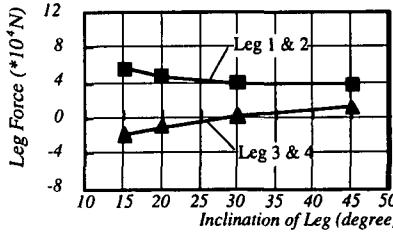


図-12 斜レグ角度と変動張力 (Type C)

者に大きな危険を及ぼす恐れがあり、確実に防止すべきものと考えている。このため、本研究ではスラック発生後の挙動までは解析していない。

表-4から明らかなように、係留索配置の違いによって作用波力や変位、レグの発生張力等に大きな差があることがわかる。例えばAタイプの場合、水平方向復元力が他に比べて格段に小さいため、水平変位は大きいが水平方向波力は非常に小さい。また、水平方向変位が増しても係留索の張力増加は小さく抑えられる。これに対し、B、Cタイプの場合、変位量は非常に小さい代わりに作用波力が大きく、特にBタイプではスラックが生じることが分かる。Cタイプのレグ張力もかなり小さい値を示しており、B、Cタイプ共に、スラック発生に対する防止対策が必要と考えられる。

b) 各種因子の影響評価

水深や水中浮遊式トンネル上部のクリアランス、比重、および斜レグの傾角等を変化させながら、波浪動揺特性を検討した。

水深ならびにクリアランスの変化は、トンネルの固有周期が変わることによる応答特性への影響と、作用外力自身の変化をもたらす。例えば、水深100 m、上部クリアランス30 mの標準構造におけるAタイプの水平方向固有周期は、38秒と非常に長いものの、水深が浅くなるにつれて波浪の周期に近づき、結果として水平変位量は増加する(図-7)。これに対しタイプBは、水深が浅くなるにつれてますます固有周期が小さくなるため、復元力の増加とあいまって大幅に変位が減少する(図-8)。しかし、レグに発生する変動張力は図-9に示すように大

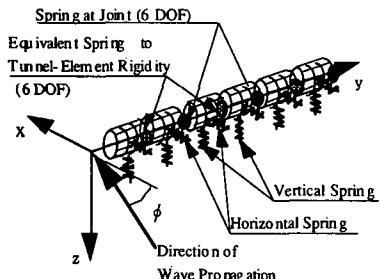


図-13 全体座標系

きくなり、結果としてスラック発生の危険性は増すこととなる。

また、B、Cタイプにおいて、レグ傾角の増加は、水平方向変位およびレグ張力の低下に著しい効果を与えることがわかる(図-10～図-12)。特に θ が 15° と 45° の場合では、最大水平変位量が15～20%にまで低減し、変位及び張力の抑制には効果的である。

6. 波浪による全体動揺の解析

(1) 全体モデルへの拡張

前節までに述べた修正モリソン式による解法を、水中浮遊式トンネルの全体動揺解析に拡張して適用する。ここでは、その全体座標系を図-13のように規定し、以下のような条件を設定した。

- ① 係留索による y 軸方向の復元力は、断面二次元における K_{zx} と同様、疑似線形化できるものと仮定する。
- ② トンネルは軸方向に断面径の約4倍($=100\text{ m} < 1/2 * L$: L は波長)の長さを有する剛体(エレメント)の連続体と仮定する。
- ③ 係留索のトンネル軸方向間隔は、1エレメント長の $1/2$ にあたる 50 m とした。
- ④ 各エレメントの自由度は、エレメント重心まわりの回転慣性モーメントも含めて6自由度とする。
- ⑤ エレメント間には、トンネルの剛性に等価な線形バネを配置する。
- ⑥ トンネル軸方向の付加質量はないものとする。

なお、エレメント間に設けられた線形バネ(Equivalent Spring to Tunnel-Element Rigidity)は、各エレメントの軸方向剛性、曲げモーメント剛性、せん断剛性に等価でなければならない。これらのバネ値は、表-5のように設定したが、断面二次元問題での回転と同様、 y 軸周りの回転モーメントは省略するものとした。

表-5 エレメント間の線形バネ

Direction of Spring	Spring Coeff.	Unit	Equation
Shear along x and z	$1.01 * 10^7$	N/m	$=GA/kL, k=1.5$
Rotation in x-y and y-z plane	$1.30 * 10^9$	Nm/rad	$=EI/L$
Longitude along y	$3.57 * 10^7$	N/m	$=EA/L$

(2) 解析ケース

係留索配置がAとCの場合について、波浪の入射角とエレメント間のジョイント剛性を変化させながら波浪時の動揺を解析した。なお、ここでいうエレメント間のジョイント剛性とは、図-13に示す x および z 軸周りの回転に関する剛性である。この値は、エレメント間で x 、 z 回りの回転を互いに全く拘束しないピン結合の場合と、エレメント一般部のもつ断面剛性と同等の剛性を持つ剛結の場合、およびその中間値を設定した。実際の構造において完全なピン結合は有り得ないが、可撓性ジョイントを適用した場合は、剛結合とピン結合の間の剛性を有するものと予想される。

(3) 水平方向挙動

a) Aタイプ

係留索配置Aタイプについて、波浪入射角 6° でジョイント剛性が剛結の場合とピン結合の場合の波浪動揺性状を図-14および図-15に示す。図は最大変位を記録したときの時刻 t_{max} と、入射波のほぼ1周期に当たる前後12秒間の変位を2秒毎に表したものである。ピン結合の場合、エレメントはトンネル全長に渡ってほぼ一定の変位量で運動する。しかし剛結の場合は、トンネル軸に沿って波打つような変位が見られるのが特徴的である。これはエレメント間のジョイント剛性に依存する比較的高次の固有振動モードが波浪の周期に反応するためである。このように、大きく動搖し易いAタイプの場合は、ジョイントの剛性によって、波浪の動揺性状は大きく異なることが分かる。図-16と図-17には、波浪入射角と最大変位およびジョイント部の最大曲げモーメントの関係を示した。図中には、ジョイント剛性を剛結とした場合の回転剛性に対して $1/2$ に設定した値についても示してある。この図から明かなように、Aタイプの場合にはどのような波浪入射角に対しても安定した挙動を示すピン結合が望ましいことがわかる。Aタイプの係留索配置を行った場合の特徴は、次の通りである。

- ① 軸直角水平方向変位量は大きいものの、スラックは発生しにくい。
- ② エレメント間のジョイント剛性を剛結とした場合の水平方向変位量は、入射角が 0° の場合よりも、ある程度の入射角がある方が大きくなる。

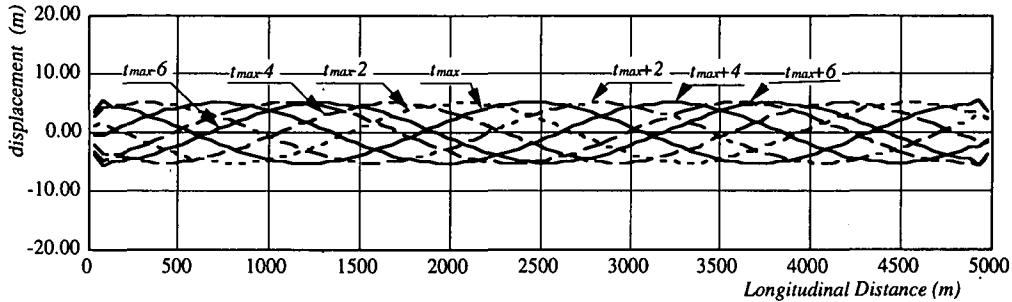


図-14 最大水平変位発生時のトンネル変位図 (Type A、入射角 6°、ピン結合)

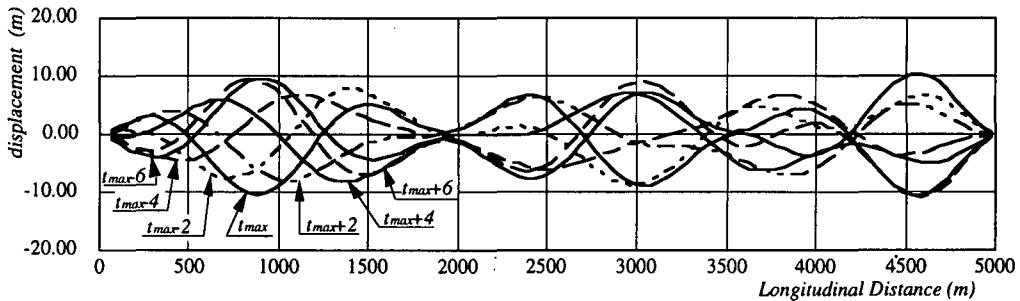


図-15 最大水平変位発生時のトンネル変位図 (Type A、入射角 6°、剛結合)

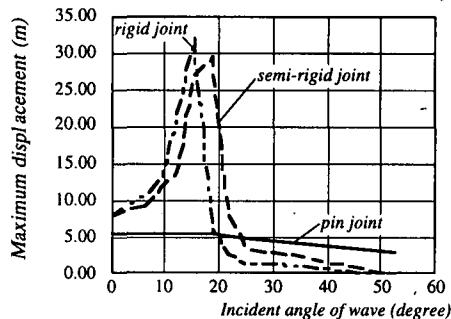


図-16 入射角と最大水平変位 (Type A)

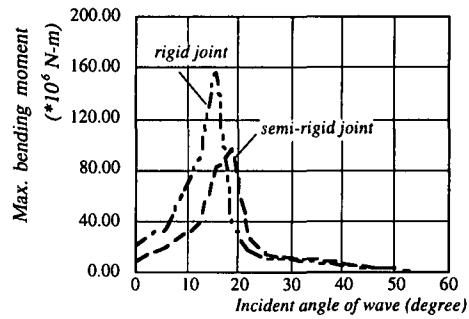


図-17 入射角とジョイント部最大曲げモーメント (Type A)

③この影響が顕著に表れるのは、入射角がおよそ 15° 前後の時である。これは、周期 13 秒の入射波が、延長 5,000 m のトンネル上に丁度 5 波存在する条件である。トンネルの固有値解析によれば、9 次モードの固有周期が 13.3 秒、10 次モードの固有周期が 11.1 秒であることから、入射波によりこれら高次モードの振動が励起され、大きな応答を示すと解釈できる。この時の最大変位量は入射角 0° の時の 3 倍以上となる。

④ジョイント部に発生する曲げモーメントについても変位と同様、入射波による外力と構造物の固有周期が同調する、入射角 15° 前後の時が最も大きい。

⑤こうしたことから、テンションレグ配置 A タイプを採用する場合は、どのような波浪入射角に対しても安定した挙動を示す、ピン結合に近いジョイント構造が望ましい。

b) C タイプ

同様に C タイプについても波浪入射角と最大変位およびジョイント部の最大曲げモーメントの関係を示した(図-18、図-19)。この場合は、ピンと剛結の中間の回転剛性として、剛結の 1/2 の場合のみ示しているが、A タイプと異なり、いずれの場合も入射角が大きくなるにつれて変位、曲げモーメント共小さくなっていく。これは、C タイプの場合、一次モードの固有周期でさえ、波浪の固有周期よりも短く、A タイプのような高次モードでの振動が励起されることがないためと言える。

ピンあるいは剛結のいずれが良いのかを一概に決めるることは難しいが、どのジョイント剛性を用いても入射角 0° の時の変位量が最大であり、その大きさもほぼ同じのため、ジョイントに曲げモーメントが発生しないピン結合に近いジョイントの方が一般的には適切であろう。C タイプについての知見を整理すると、以下になる。

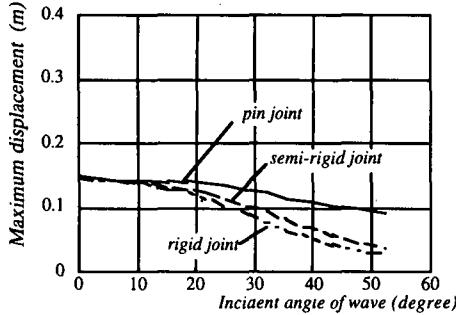


図-18 入射角と最大水平変位 (Type C)

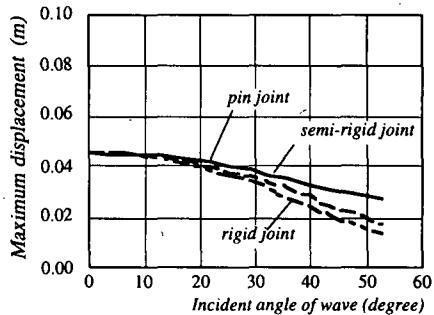


図-20 入射角と最大鉛直変位 (Type A)

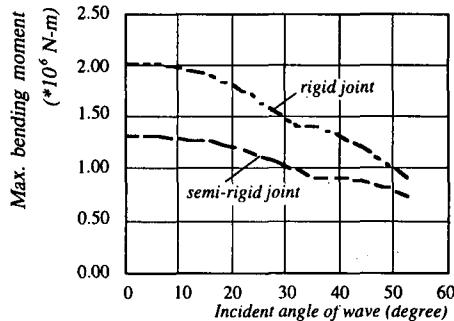


図-19 入射角とジョイント部最大曲げモーメント (Type C)

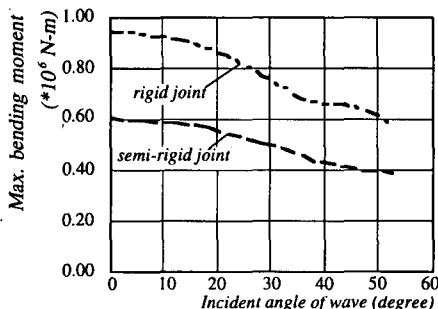


図-21 入射角とジョイント部最大曲げモーメント (Type A)

- ①軸直角水平方向の変位はAに比べ格段に小さくなるが、スラック発生の危険は増大する。
- ②変位量の面では、入射角0°の時が最も大きい。これは、ジョイント部の剛性に関わらず、1次モードの固有周期は波浪の周期よりも小さいためで、最大の応答を示すのは1次モードでの振動を励起する外力条件、すなわち、入射角0°の波浪入射時である。
- ③ジョイント剛性の違いによる、水平方向変位量の顕著な差異は認められないが、波浪入射角が大きくなるほど、ジョイントでの拘束効果の大きい方が変位量も小さくなる。

(4) 鉛直方向挙動

鉛直方向の挙動は、タイプA、タイプC共に非常に似ている。これは、いずれの場合も鉛直方向の主要固有周期が波浪の周期よりもかなり小さいためである。全てのケースにおいて、延長にわたるトンネルエレメントの鉛直変位量はほぼ同じであり、波浪の入射角が0°以上の時は、波浪の伝播遅れに従って変位も伝播していく。

水平方向挙動の場合と同様に、Aタイプについて、波浪入射角と最大変位およびジョイント部の最大曲げモーメントの関係を図-20と図-21に示した。この場合も波浪入射角の増加に伴って変位ならびに曲げモーメントが減少していくのがわかる。また、ジョイント部での剛性の違いが、鉛直方向の変位量に大きな影響を与えないことが

この図から理解できる。最大曲げモーメントについても、波浪の入射角の増大につれて低下していく様子が分かる。

7. 結 論

水中浮遊式トンネルは本体の比重や、係留方式、設置水深の設定などにおいて、計画・設計上の自由度が大きい構造物であるとも言える。しかしその反面、本研究でみてきたように、計画や設計に当たる側の条件設定如何によって、その動的特性は大きく変化することとなる。本研究で得られた波浪による基本的な動搖特性に関する知見を要約すると、次の通りである。

(1) 解析手法について

- ①本研究で設定した条件下では、線形ポテンシャル理論でも、修正モリソン式でも評価が可能な範囲にあり、本報告に示したモデル化をすることにより、大規模・長大な水中浮遊式トンネルを効率的に解析することが可能である。
- ②この方法は簡便である上、今後近い将来の研究において必要になると思われる、次のような問題の解析にも適用が容易である。
 - ・係留索のスラックや係留索材料の特性による非線型復元力の評価
 - ・伝播位相差を伴う地震波の入力

ただし、構造物の断面径と波長の関係から、回折効果が無視し得る場合に適用可能であり、断面径の5倍を下回るような波長の場合には回折波理論を使うべきであろう。

(2) 解析結果について

- ①Aタイプの係留方式は、水平方向の変位量が大きいが、スラックが発生しにくい構造である。
- ②B, Cタイプの係留方式を採用した場合は、Aタイプに比べて動搖変位量は小さいが、スラック発生の可能性が高い。
- ③トンネルの設置レベルは、機能面からその全長に渡ってなるべく一定であることが望ましいが、水深が変化する場合などは、入射波浪の周期と構造物の固有周期を十分考慮し、変位やレグ張力に過大な応答が発生しないように設定すべきである。
- ④トンネルエレメント間のジョイントを剛結とするかピンとするかは、係留方式によっても大きく異なる。B, Cタイプの係留方式を採用した場合のように、変位方向の拘束度が高い（係留索による復元力が強い）場合は、高次モードの影響が小さく、ジョイント部の剛性に対する要求事項は少ない。しかし、Aタイプのように、波浪の周期に近い周期成分を高次の振動モードに持つ場合には、ジョイント剛性の差異による応答の違いが顕著に出る。
今後は、地震時の検討などを加え、さらに水中浮遊式トンネルの可能性について検討を行う予定である。

謝辞：本研究は、水中トンネル研究調査会が主導する「水中トンネルの研究」の一環として始められた。この間、研究調査会事務局をはじめ、北海道大学、室蘭工業大学、

北海道開発局委員並びに参加各社の会員の方々から、多大なご指導とご支援を賜った。また、研究過程においてご協力頂いた大成建設の水谷氏、堀越氏、國分氏にも、合わせて感謝の意を述べさせて頂きたい。

参考文献

- 1) Loken, A.E. et al : Comparison between Hydrodynamic Numerical Methods and Results from Model Tests for Submerged Floating Tube Bridge, *Symposium on Strait Crossings*, pp.427~434, 1990
- 2) F.Brancaleoni, A.Castellani and P.D'Asdia: The response of submerged tunnels to their environment, *Eng. Struct.*, Vol. 11, pp.47-56, 1989.
- 3) Dean, R.G. et al : *Interaction of Structure and Waves, Estuary and Coastline Hydrodynamics*, McGraw-Hill, 1966
- 4) Chakrabarti, S.K.: *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publications, Boston, USA, 1987.
- 5) 近藤俊郎 他、噴火湾の沿岸海洋環境と空間開発に関する基礎的研究、室蘭工大C R Dセンター研究報告 9 0-1, 1990.10
- 6) Mizuno, S. et al.: Experimental Study on Characteristics of Submerged Floating Tunnels under Regular Waves: *The 3rd Symposium on Strait Crossings*, Alesund, Norway 1994.
- 7) Tanaka, Y. et al : Numerical Generation of Gravity Waves and Open Boundary Scheme, *The 10th Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, pp.229~235, 1991
- 8) Orlanski, I.: A Simple Boundary Condition for Unbounded Hyperbolic Flows, *Journal of Computational Physics*, 21, pp.251-269, 1976

(1996.2.7 受付)

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SUBMERGED FLOATING TUNNELS DUE TO WAVE FORCE

Shunji KANIE, Takashi MIKAMI and Yoshio KAKUTA

Although actual submerged floating tunnels have not yet been constructed, they are seen as one of the most promising structures for strait crossings. In order to make the tunnel a reality, it is necessary to analyze the dynamic response of the whole structure with adequate models that cover a wide range of many parameters such as buoyancy, leg arrangement and flexibility of tunnel joint. The authors proposed a suitable model for a super-long submerged floating tunnel using the modified Morison's equation. The response calculated by this method shows a close coincidence with those obtained by the diffraction theory. Super-long tunnels of 5 km in length were therefore analyzed, and the fundamental characteristics of their response due to waves were obtained.