

水中トンネルの係留形式とその構造特性

Study on Structural Characteristics of Support Systems for Submerged Floating Tunnels

前田直寛*、森川正夫**、石川邦照***、角田與史雄****

Naohiro Maeda, Masao Morikawa, Kuniteru Ishikawa, Yosio Kakuta

* NKK 橋梁建設部 次長 (〒230 神奈川県横浜市鶴見区末広町2丁目1番地)

** NKK エンジニアリング研究所 津研究センター 主任研究員 (〒514-03 三重県津市雲出銅管町1番地)

*** 工博 NKK 船舶海洋技術部 統括スタッフ (〒514-03 三重県津市雲出銅管町1番地)

**** 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

ABSTRACT : This paper assesses tension mooring systems for supporting a submerged floating tunnel. The structural characteristics of this system are clarified analytically, paying attention to the three primary problems (mooring line arrangement, developed stress, and nonlinearity) in designing mooring lines for submerged floating tunnels.

1. はじめに

水中では、浮力が作用するため、陸上では不可能な超長大の構造物の実現の可能性がある。経済性の観点から海峡横断手段として、吊橋の経済支間長を越えた範囲から、水中トンネルの実現の可能性が高まるのはまさにこの理由からである。

水中トンネルの支持方式は、水中トンネルの基本原理由である『浮力』の利用の考え方により以下の2つに分類できる。

- (1) テンションムアリング方式
- (2) 架台方式

テンションムアリング方式による水中トンネルの支持方法は、トンネル本体の比重を1以下とし、その余剰浮力により係留索に初期張力を導入して、トンネル全体の支持構造としての剛性を確保するシステムである。この係留索の初期張力の値が、係留索の配置方法と並んで、この方式の剛性の向上の重要なファクターとなる。例えば、石油生産用の海洋構造物の一つであるTension Leg Platformのような鉛直係留タイプのテンションムアリング方式では、潮流、波浪等の水平外力に対しては、限定された剛性しか持ち得ない。そのために、一般の人々が通行するような水中トンネルに採用する場合には、潮流、波浪等の比較的穏やかな海域に使用が限定される可能性もある。また、潮流、波浪等の外力による係留索の張力による2次剛性の影響も係留索配置によっては大きく異なり、剛性の非線形性の評価が、テンションムアリング方式では重要となる。

架台方式による水中トンネルの支持方法は、トンネル本体の比重を1以上とし、あらかじめ海底に設置した支

持構造に載せる方式である。テンションムアリング方式との決定的な違いは、支持構造が圧縮力の反力で設計されることである。しかし、支持構造は、多くの場合、潮流力、波力等の水平外力による架台自体の引抜き力により構造の規模が決まる。このことは、架台方式においても、横剛性確保についてはテンションムアリング方式と同じ課題を持っていることを意味する。トンネル自体の比重を大きくすることは、理論的には無限に選択範囲が設定できる。しかし、実際はトンネル内空断面に働く浮力が大きく、比重としては1.2~1.5の範囲となる。また、海底の土質条件も架台の構造選定においては、重要な条件となる。

この2つの支持方式が選択できることは、他の海峡横断手段に比べて、水中トンネルがより優位になるための重要な要因になると考えられる。

技術的な観点から両方式を比較すると、水深により難易度に差はあるが、架台方式は沈埋トンネル等の既存の要素技術の延長で実現可能な構造であると評価できる。

しかし、テンションムアリング方式は、構造解析の方法、構造要素の開発、施工法の開発、維持管理システムの開発、構造系の安全水準の評価等の多くの解決すべき課題があり、技術的に興味の沸く、エキサイティングな構造である。

本論文では、シミュレーション解析により水中トンネルの鉛直係留タイプと斜め係留タイプの比較を行ない、テンションムアリング方式の構造特性の一部を明らかにした。また、これらの結果を水中トンネルの設計に役立てる事を目的としている。

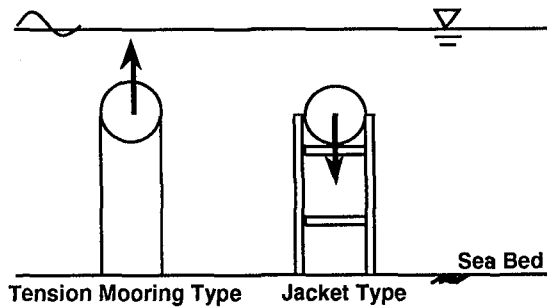


図1.1 テンションモアリング方式・架台方式

2. テンションモアリング方式の設計上の課題

水中トンネルの係留索を設計する場合の基本的な課題は、以下の3点である。

- (1)係留索配置
- (2)係留索の断面の決定
- (3)係留索上下端の固定構造の決定

上記の課題を検討するにあたり、テンションモアリング方式の水中トンネルにおける以下の構造特性を把握する必要がある。

- (1)係留索配置とその構造特性
- (2)係留索に発生する応力の評価
- (3)係留索上下端の拘束条件と応力

2.1 係留索の配置とその構造特性

水中トンネルの係留索配置は、これまで種々の提案がなされてきている。この係留索配置の一義的な課題は、波浪や潮流による水平力に対する水中トンネルの横剛性の確保である。水中トンネルの横剛性は、1) 係留索自体の剛性、2) 初期張力、3) 係留索の配置、4) 水深の4つのパラメータで評価できる。

水中トンネルの設置場所の波浪、潮流および水深の条件が確定すると、上記1)、2)、3)の残り3つのパラメータの最適な組合せを決定することが、係留索の設計の第一の課題となる。ここで、波浪外力は変動荷重であり、水中トンネルの動揺特性を考慮する必要がある。

2.2 係留索に発生する応力の評価

水中トンネルの係留索に発生する応力としては、初期張力によるものに加えて、以下の変動応力が発生する可能性がある。

- 1) 波と同周期を持つ水中トンネルの動揺に基づく変動応力
3章以下の章にて検討結果を示す。
- 2) 係留索の軸方向の固有周期に対する変動応力
係留索の軸方向の固有周期は、非常に小さな値に設定されており、波浪による挙動解析には大きな影響を与えない。
- 3) 係留索の横方向固有周期に対応する変動曲げ応力

係留索の横方向の固有周期（鉛直係留の場合20～50秒程度）は、波浪エネルギーの卓越する範囲よりも大きな値に設定されている。

4) 渦励振による係留索の変動曲げ応力

渦励振による変形曲げ応力を次のような簡易な手法で検討した。軸力の載荷された両端支持の梁の曲げ振動の式と、一様流中に存在する円柱に発生するカルマン渦の振動周波数の式から、渦励振と係留索の弾性振動との共振の可能性を検討した結果、同調の可能性は少ないことが判った。

上記の応力のレベルを把握して、係留索の断面を決定することが、係留索設計の第2の課題となる。

2.3 係留索上下端の拘束条件と応力

水中トンネルと類似の構造物としてTLP（Tension Leg Platform）があげられる。この係留索の上下端の構造には、フレクスジョイント（Flexjoint）が用いられているが、非常に高価で維持管理上も水中トンネルでは課題が多い。応力的に可能であれば、構造が簡単で維持管理が容易な固定式を採用したい。ここで解決すべき問題は、係留索の上下端を固定した場合の係留索に発生する曲げモーメントによる付加曲げ応力のレベルである。

この付加曲げ応力により係留索の上下端応力を照査することが、第3の課題である。

以上3つの設計上の課題を解決するために、この3つの観点から水中トンネルの構造特性を明らかにするため以下の構造解析を試みた。

3. 解析方法の概要

係留索の非線形性の取扱いと、波浪、潮流の取扱いにより、以下の2つの解析方法が考えられる。

1) 一段階解析法

水中トンネル及び係留索からなる構造全体を弾性骨組みにモデル化し、係留索の非線形性を厳密に考慮して、運動と応力応答を同時に取扱う解析方法である。

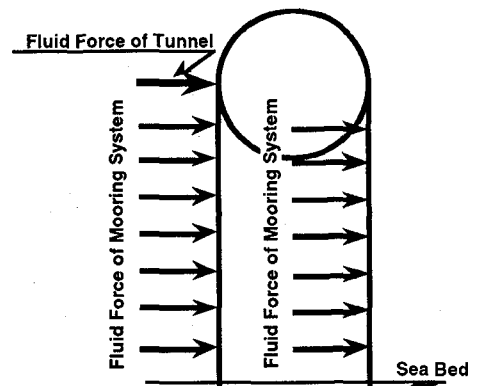


図3.1 一段階解析法

2) 二段階解析法

第一段階として、水中トンネル本体を剛体と見なし、係留索を線形バネにモデル化して、水中トンネル本体の運動応答解析を実施する。
第二段階として、係留索の係留点に運動解析結果から得られた強制変位を与え、係留索の動的応答を求める解析方法である。

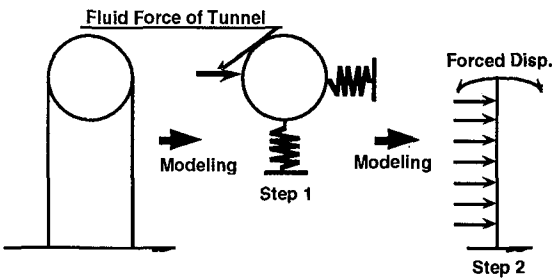


図3.2 二段階解析法

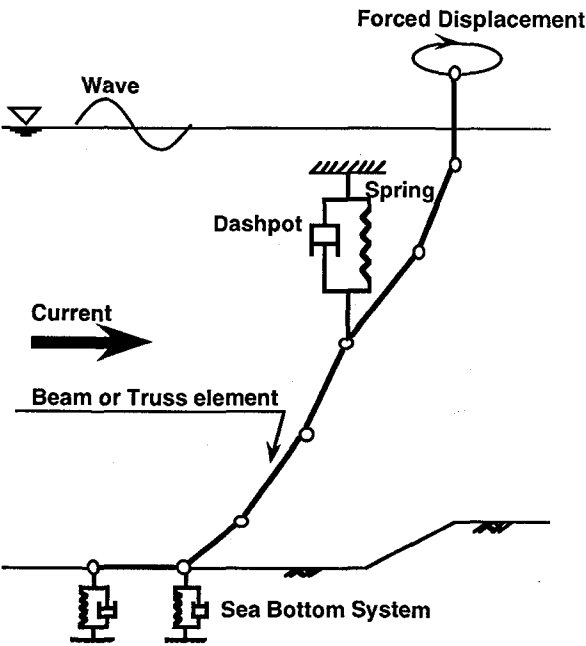


図3.3 シミュレーション解析プログラムモデル

構造寸法に対して弾性変形が微少の場合には、両解析法による結果に差は無い。

一段階解析法は、係留索の非線形性を厳密に扱っているため厳密解が得られるが、係留索自体に働く流体力や係留索自体の固有周期の影響を考慮するためには、手間のかかる解析法である。

二段階解析法は、係留索の剛性を初期張力を基に線形化するため、大変形を起こす構造には適していない。しかし、係留索を単独で扱うため、係留索自体に働く流体力や係留索の固有周期の影響を評価することが、容易にできる利点がある。

3.2 シミュレーション解析プログラム

解析プログラムは、水中線状構造物の非線形動的挙動を時刻歴によりシミュレートするプログラムNKK-NAULSを用いた。このプログラムは、非線形の取扱いに、線形化増分法による反復修正法を併用した、有限要素法である。

時間積分法として、Newmark- β 法を用いている。
力としては、重力、浮力、慣性力、モリソン式に基づく流体力、表面摩擦抵抗力、構造減衰力及び線形剛性と非線形剛性に基づく内力が考慮できる。

本プログラムでは、2.2 1)～4)の変動張力は考慮できるが、5)の渦励振による変動曲げ応力は、考慮していない。

図3.3にシミュレーション解析プログラムの扱える解析モデルを示す。

4. パラメーター解析

4.1 解析モデル

1) 係留索配置

係留索の配置として種々の案が提案されているが

水中トンネルの係留索配置による横剛性の特性を明らかにする目的で、図4.1に示すA、C2つの係留索配置タイプを設定する。Aタイプは鉛直方向のみの緊張係留方法で、Cタイプは60°に傾斜した係留索を平行に左右2本ずつ配置した緊張係留方法である。

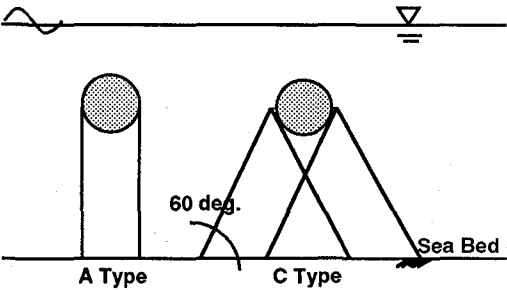


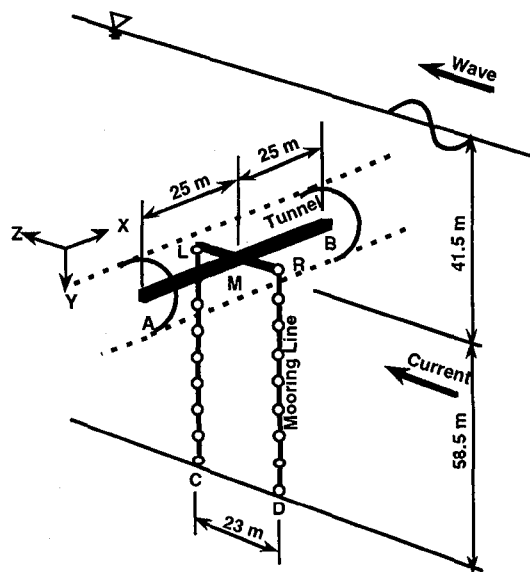
図4.1 係留索配置の解析モデル

2) 係留索上下端の拘束条件

係留索の上下端部の拘束条件として固定と自由の2つのケースを考える。
上下端の拘束条件により流体力による係留索に生じる曲げモーメント分布の差及び固定した場合の上下端の曲げ応力度を評価することを目的とする。

3) 構造解析モデル

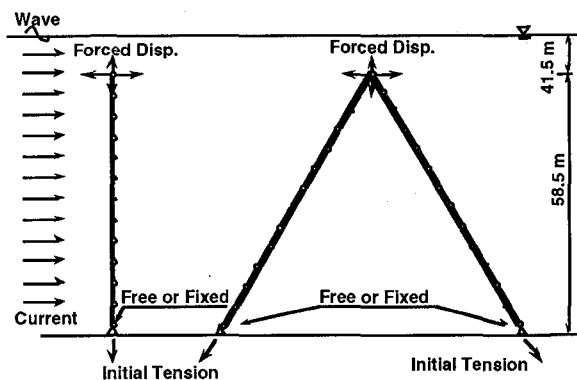
一段階解析法及び二段階解析法の構造解析モデルを図4.2に示す。



Restraint Cond.	X	Y	Z	θx	θy	θz
A B (Symm.)	1	0	0	0	1	1
C D (Pin)	1	1	1	0	0	0
L R (Pin)	1	1	1	0	0	0

1 : Fixed 0 : Free

Model A-3



Model A-1 or A-2 Model C-1 or C-2

図4.2 構造解析モデル

4.2 解析条件

解析条件は、(社)水中トンネル研究調査会で決めた標準の値を採用した^{2),3)}。

想定したサイトは北海道内浦湾口部で、図4.3に位置図を示す。また、設定した水中トンネルの基本諸元を図4.4および表4.1に示す。

4.3 解析ケース

表4.2に解析ケース、解析方法及び解析条件を示す。

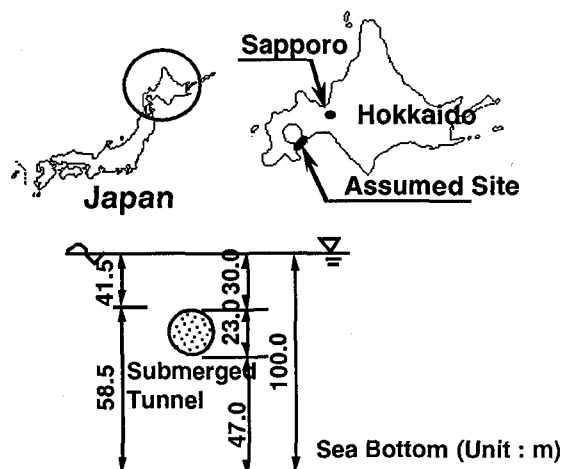


図4.3 水中トンネル想定位置図

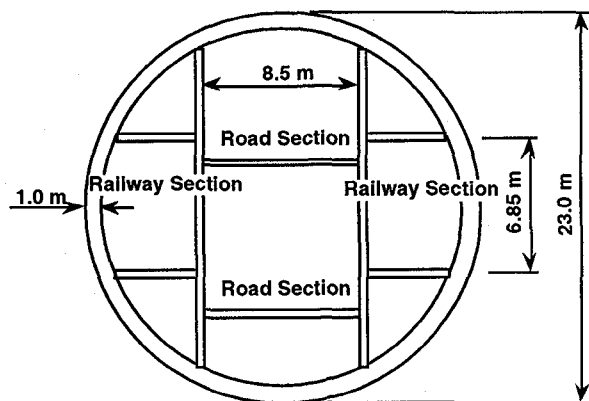


図4.4 水中トンネル概略形状

表4.1 水中トンネル諸元

Classification	Item	Particulars
Water Depth		100 m
Tunnel Installation Depth		30 m (at Tunnel Top)
Tunnel Cross Section	Outside Diameter	23 m
	Wall Thickness	1 m
	Material	Concrete
	Weight in Air	288 tf/m
	Buoyancy	425 tf/m
	Drag Coeff.	1.0
	Mass Force Coeff.	1.0
Mooring Line	Added Mass Coeff.	1.0
	Outside Diameter	1100 mm
	Wall Thickness	40 mm
	Material	Steel
	Cross Section Area	$1.332 \times 10^5 \text{ mm}^2$
	Section Modulus	$3.406 \times 10^7 \text{ mm}^3$
	Drag Coeff.	1.0
Wave	Mass Force Coeff.	1.0
	Added Mass Coeff.	1.0
Wave	Wave Height	18.6 m
	Wave Period	13.0 sec.
Current	Current Velocity	0.6 m/sec.

表4.2 解析方法・解析条件

Mooring Type	Analysis Method	Case No.	Initial Tension (tf/1Leg)	Forced Displacement		Restriction Condition	Current (m/sec)	Wave (Amp.) (Period)
				Vertical (Amp.)(Period) (Phase)	Horizontal (Amp.)(Period) (Phase)			
A	Two-step Analysis	A-1	3498	0.18 m, 6.5 sec -90°	5.058 m, 13 sec -180°	Free	0.6	9.3 m 13 sec
		A-2	3498	0.18 m, 6.5 sec -90°	5.058 m, 13 sec -180°	Fixed	0.6	9.3 m 13 sec
C	Two-step Analysis	C-1	3000	0.034 m, 13 sec 0°	0.131 m, 13 sec -180°	Free	0.6	9.3 m 13 sec
		C-2	3000	0.034 m, 13 sec 0°	0.131 m, 13 sec -180°	Fixed	0.6	9.3 m 13 sec
A	One-step Analysis	A-3	-	-	-	Free	0.6	9.3 m 13 sec

4.4 解析結果及び考察

1) 係留索配置による特性比較

図4.5にAタイプ係留及びCタイプ係留の軸力の変動値の比較を示す。横軸に係留タイプを、縦軸に軸力をそれぞれ示す。Aタイプ係留の軸力変動は、Cタイプ係留の約70%となる。

図4.6にAタイプ係留及びCタイプ係留の変位の比較を示す。横軸に係留タイプを、縦軸に変位をそれぞれ示す。Cタイプ係留の変位は、Aタイプ係留に比較してかなり小さい。これらの結果より、構造強度上の観点から

は、軸力変動の小さいAタイプの方が有利であると考えられる。一方、水中トンネルの機能上の観点からは、変位量の小さいCタイプ係留が水中トンネル本体の速度及び加速度が小さくなるため、より適したシステムであると考えられる。しかし、変位の周期が小さい場合には、Aタイプ係留でも速度及び加速度が許容範囲に入る可能性がある。したがって、計画段階で、海象による水中トンネルの挙動及び強度検討を正確に把握しておく必要があると考えられる。

2) 係留索の曲げ応力

図4.7はAタイプ係留の一段階解析法による曲げモーメントの時刻歴図で、上図は波上側、下図は波下側の係留索のほぼ中央付近の出力を示している。横軸に時間を、縦軸に曲げモーメントを示す。曲げモーメントに関しては、波上側と波下側で挙動が違うため係留索1本での二段階解析法によるシミュレーション解析では不十分であると考えられる。

図4.8にAタイプ係留の上下端の拘束を自由にして一段階及び二段階解析法にてシミュレーション解析を実施したときの係留索の曲げモーメント振幅の分布を示す。縦軸、横軸は曲げモーメントの振幅及び節点番号をそれぞれ示す。一段階解析法では、波上側と波下側に発生する曲げモーメントには差がある。波上側は波下側よりも最大曲げ応力の発生する付近で20%程度小さくなっている。これは、二段階解析法では出力されない結果であり、Aタイプ係留の場合、一段階解析法を実施する必要があると考えられる。

図4.9にAタイプ係留の上下端の拘束を固定にした場合の曲げモーメントの振幅の分布を示す。縦軸、横軸は図4.8と同様に、曲げモーメントの振幅及び節点番号をそれぞれ示す。上下端の回転を拘束しているため、横方向の動きによって大きな曲げモーメントが上下端に発生している。

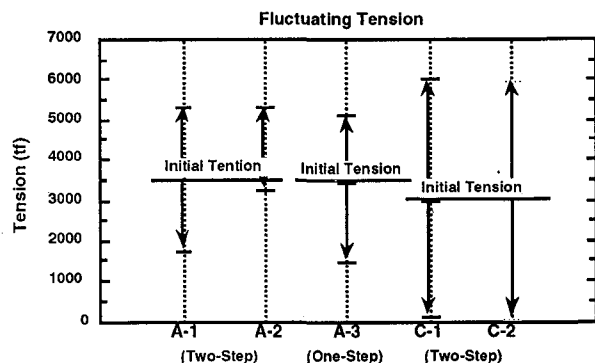


図4.5 軸力の変動値

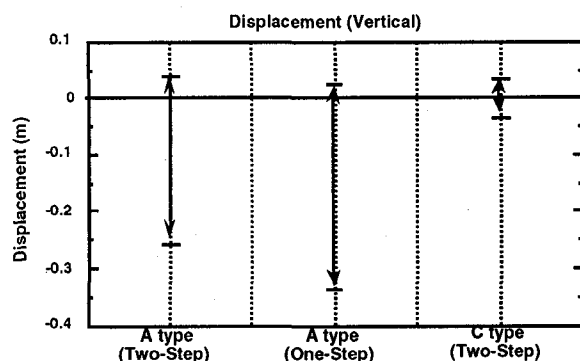


図4.6 変位の比較

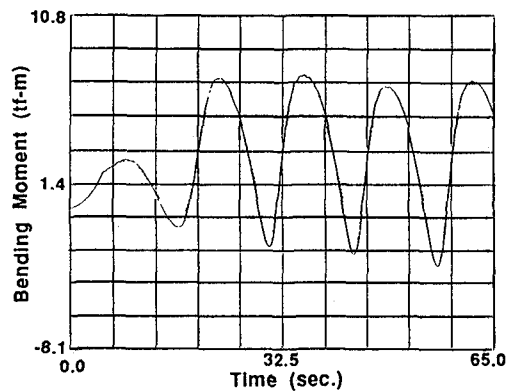
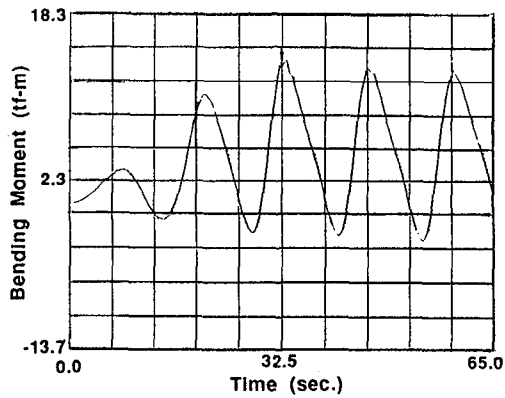


図4.7 曲げモーメントの時刻歴図 (A-3)

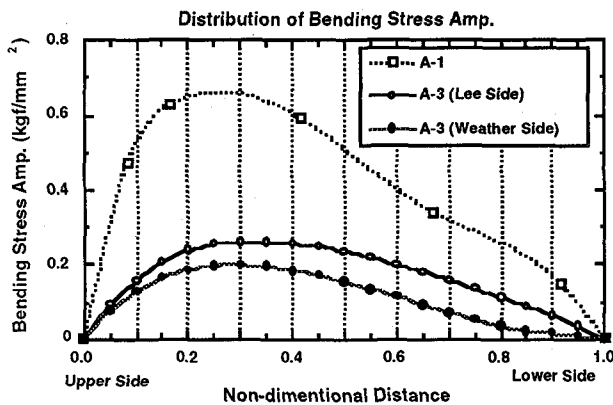


図4.8 曲げモーメント振幅の分布の比較 (A-Type係留)

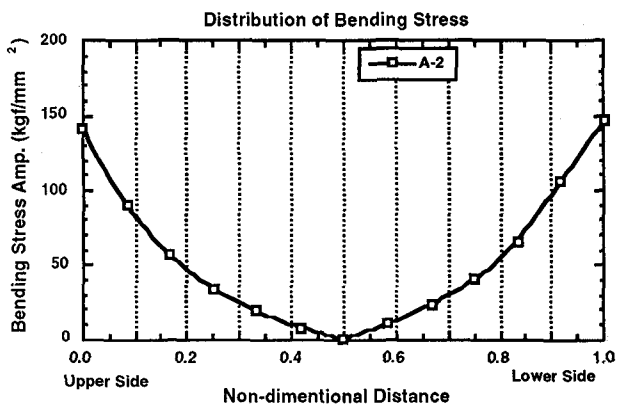


図4.9 曲げモーメント分布 (A-Type, 上下端固定)

図4.10にCタイプ係留の上下端を自由にした場合の曲げモーメントの振幅の分布を示す。縦軸、横軸は図4.8と同様に、曲げモーメントの振幅及び節点番号をそれぞれ示す。上下端がピン支持の場合には、波上側及び波下側の係留索が左右方向へ最大変位し、軸力が最小になっているときに最大の曲げモーメントが発生しており、波上側及び波下側の曲げモーメントの振幅に差が出てくる。値に差があるのは、波上側の係留索では、軸力が減少していく時には潮流と逆方向に運動しているため相対速度が増大し、抗力がより大きくなり、一方、波下側では、軸力が減少していくときには、潮流と同一方向に運動しているため相対速度が減少し抗力が小さくなる。そのため、波上側の方が波下側よりも大きな曲げモーメントになるものと考えられる。

同じく図4.10にCタイプ係留の上下端を固定にした場合の曲げモーメントの振幅の分布を示す。縦軸、横軸は図4.7と同様に、曲げモーメントの振幅及び節点番号をそれぞれ示す。上下端を固定した場合には、係留索の中央部では、上下端を回転自由にした場合よりも約22%小さくなっているが、下端部では大きな値を示している。また、上端よりも下端での曲げモーメントの振幅が大きくなっているのが判る。

表4.3に各Caseの解析における最大軸応力及び最大曲げ応力の結果を示す。Aタイプ係留の場合、端部を固定にすると大きな曲げ応力が発生する。しかし、Cタイプ係留の場合は、上下端を固定にしても曲げ応力は軸応力の1割弱となっており応力的には十分余裕がある。

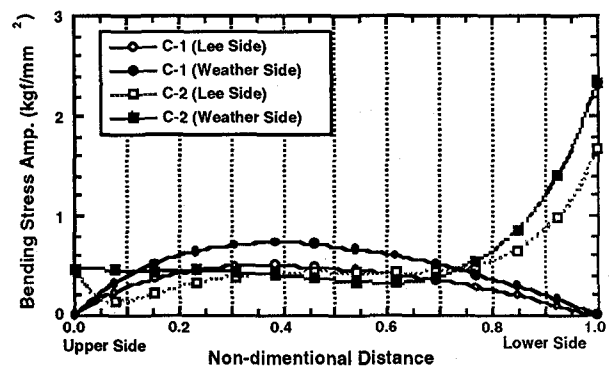


図4.10 曲げモーメント分布の比較 (C-Type係留)

表4.3 最大軸応力・最大曲げ応力

Analysis Method	No.	Max. Axial Stress	Max. Bending Stress	Bending Axial
Two-step Analysis	A-1	40.0 kgf/mm ²	0.63 kgf/mm ²	0.0158
	A-2	40.0 kgf/mm ²	146.0 kgf/mm ²	3.6500
	C-1	44.8 kgf/mm ²	0.73 kgf/mm ²	0.0163
	C-2	44.3 kgf/mm ²	2.76 kgf/mm ²	0.0623
One-step Analysis	A-3	38.1 kgf/mm ²	0.39 kgf/mm ²	0.0102

以上より、端部を固定した場合には、Aタイプ係留及びCタイプ係留ともに曲げモーメントは増加する。しかし、その影響はAタイプ係留に比べてCタイプ係留の方が小さく、曲げ応力の観点からはCタイプ係留の方が適していると考えられる。また、Aタイプ係留の検討を行うには、一段階解析法を適用する必要があると考えられる。

3) 係留索の非線形性

一段階解析法によるAタイプ係留での水中トンネルの左右方向の変位振幅は約4.5mとなり、線形バネを仮定した5.058mよりも小さな値となっている。一般に、二段階解析法の運動解析で係留索を線形バネとして取り扱った場合と、一段階解析法にて係留索を非線形な取り扱いをした場合とでは、変位、軸力及び曲げモーメントに差が出てくる。したがって、このような係留方法の場合には、水中トンネルも含めた一段階解析法を実施して検討を行う必要がある。この傾向は、水深が深くなるほど顕著となるため計画段階での十分な検討が必要である。

6. まとめ

以上の解析及び検討結果をまとめると次のようなことがいえる。

1. Aタイプ係留及びCタイプ係留を構造強度の観点から見た場合には、変動張力が小さいということからAタイプ係留が適している。しかし、水中トンネルの機能上の観点から見ると、変位量の小さいCタイプ係留が有利であると考えられる。
2. 上下端自由でのAタイプ係留及びCタイプ係留の曲げ応力は、軸応力の数%程度であり、応力的に十分余裕がある。しかし、端部を固定にした場合、Aタイプ係留の場合にはかなり大きな曲げ応力となるため、端部は回転自由とする必要がある。一方、Cタイプ係留の場合には、水中トンネルの変位量が小さいために、端部を固定にしても発生する曲げ応力は十分小さくな

る。したがって、Cタイプ係留の場合には、端部に回転を自由にするための機構を取り付ける必要は無い。

3. Aタイプ係留の場合、係留索の剛性を初期張力で線形バネを仮定した簡易非線形解析法は、係留系の剛性を正しく評価できない。Aタイプの係留方法は、非線形影響を厳密に評価できる解析が必要である。また、水深が深くなるにつれてその影響が大きくなるため厳密な非線形解析が必須である。

上記の結論は、水中トンネルを2次元でモデル化しているため、トンネル本体の剛性や運動を無視しているので、今後は具体的な設置海域を想定した3次元解析が必要となるが、基本計画に必要な係留索の基本特性は、十分把握できたと考える。

また、係留索の配置の選定は、構造系の安全性やトンネル本体の変位・加速度等の機能上の制約、さらに利用者側に立った心理的な評価を含めた、水中トンネルの安全水準の枠組みが必要である。

今後、新しい構造物である水中トンネルの実現に向けて、構造物の特性に合った安全水準の設定が最も大きな課題であり、この問題の国際的な取組がこの水中トンネルという新しい構造物の実現を可能とすると考える。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 蟹江俊二、堀越研一、尾高義夫、三上隆、角田興史雄：波浪作用下の水中トンネルの解析的研究、海洋開発論文集、Vol.8、1992.
- 3) 国栖広志、藤井利侑、水野雄三、佐伯浩：波浪作用下の水中トンネルの挙動に関する実験的研究、海洋開発論文集、Vol.8、1992.

(1994年9月14日受付)