

## 学位論文題名

## 水中トンネルの係留索の構造特性と設計法

## 学位論文内容の要旨

新しい渡海手段として水中トンネルは、その実現に向け研究開発が各国で進められている。これは、経済の発展に伴い社会基盤としての交通網の充実への要求が高まり、そのため海峡横断へのニーズが高度化した結果によるものと考えられる。吊橋はその構造原理から最大支間長は3000m程度が限界と考えられている。また海底トンネルや沈埋トンネルでは、水深の深い所では経済的な問題があり、水深100m程度が限界と言われている。

水中では浮力が働くので、この浮力を利用すれば陸上では不可能な大型構造物の建造が可能である。この浮力を利用する渡海方法として浮橋と水中トンネルがある。この中で唯一実績が無いのは水中トンネルであり、その実現への期待が高まっている。

浮力が有効なのは鉛直方向の力のバランスにおいてであるが、水中トンネルには、値の大小は別としても、波や潮流等による水平外力が作用するため、何らかの支持構造が必要になる。

本論文は、水中トンネルの支持構造、特に緊張係留方式について、その構造特性を明らかにし、さらにその設計法を提案する事を目的とした研究について述べたものである。

第2節では、係留索の設計上の課題について整理した。

課題として、1. 構造特性の把握、2. 疲労強度の評価、3. 構造信頼性評価、4. 合理的な係留構造の開発 の4項目を挙げ、その概要と課題の背景について説明した。

第3節では、研究対象とする解析モデルについて説明を行った。

新しい構造物の研究を行うに当たり、具体的な構造物のイメージが必要である。一方では、研究として特異なケースを考えては、一般性に欠ける事になる。

本論文では、(社)水中トンネル研究調査会が提案している、噴火湾水中トンネル計画を解析モデルに取り上げ、基本諸元を明示した。また、ここで初期張力の設定についての基本的な考え方を説明した。

設定された波浪外力に対して、初期張力が少ないとスラックが生じスナップテンションが発生する事が考えられる。このスナップテンションは非連続的な現象であり、現在の解析技術では精度の良いシミュレートが困難な問題である。ここでは現実的な設計上の解決策として、予備解析による初期張力の設定により、スラック・スナップテンションの問題を回避出来ることについて解説した。

また、予備解析結果による、係留索配置と基本的な構造特性について解説した。

第4節での係留索の構造特性では、先ず水中トンネルの係留索の構造解析プログラムの開発について、その基礎方程式の展開およびプログラム機能の説明を行なった。

係留索は、ケーブル構造特有の特性すなわち導入された張力により剛性が大きく変わる幾何学的な非線形性を有する構造である。また対象とする主な外力は波浪であり、変動外力を取り扱う動的な解析が必要になる。

このような非線形構造物の動的解析を行うことができる解析プログラムで、しかも水中トンネルのような水中浮体との連携問題を扱うことができるものは、現状では少ない。

幸い、著者が所属しているNKKでは、TLP (Tension Leg Platform) 用に開発した、緊張係留浮体構造物解析プログラム (NAULS) があり、水中トンネルの構造解析に適用する事ができた。本論文では、この解析プログラムを用いて、係留索配置に着目し、その構造特性を明らかにした。解析結果から、水中トンネル本体の変位と係留索の変動張力を比較して、与えられた条件で、水中トンネルとして採用すべき係留索配置について考察を行った。

また、係留索自体に作用する潮流および波浪の影響についても検討を行った。

係留索の上下端の拘束条件を変えて解析し、曲げ応力のレベルから係留索配置及び係留索の上下端の拘束条件についても考察を加えた。

これらの研究から、水中トンネルの係留索配置を検討する際の基本となる構造特性が明らかになった。

第5節では、係留索には常に大きな変動軸引張り応力が発生している事に注目し、その疲労設計法について提案を行った。この中で、類似構造物である海洋構造物と比較し、水中トンネルの疲労設計法の特徴について考察した。

海洋構造物の疲労設計では、一般的には頻度分布法とスペクトル法が使われているが、水中トンネルの場合は、トンネル本体の許容変位をある程度小さく規定せざるを得ないとすると、係留索の剛性は線形化が可能な構造と見なす事が出来る。水中トンネルの剛性が線形と見なすことができる事を前提とすると、設計上はスペクトル法で実用上は問題ない事を示し、スペクトル法による疲労設計法について、手順、応力応答の統計的予測法および累積被害度の計算法について示した。

さらに第3節で示した解析モデルを用いて、具体的な疲労解析を実施した。

解析の結果、応力振幅の超過確率分布形状は、応力の低い部分で凹、高い部分で凸になり、多少複雑な形状になった。ここで、累積被害度に最も寄与するのは、比較的応力の低い繰返し回数の多い部分である事実を基に、ワイブル分布を当てはめて累積被害度の計算を行った。

その結果、最大波高で設計した係留索の断面では、強度不足であることが明らかになった。この疲労強度不足に対する解決策として、単に断面を大きくする事だけが解決策ではなく、構造の改善や点検・維持管理要領により改善出来る事を示した。

第6節では、水中トンネルの設計に信頼性設計法を活用する意義について述べ、許容破壊確率と安全性指標について考察を加え、水中トンネルの設計に採用すべき許容破壊確率と安全性指標の値について提案を行った。さらにレベル2手法による係留索の構造信頼性理論による理論式の展開及び試解析を行い、考察を行った。信頼性解析として、1. 降伏強度の信頼性指標・破壊確率、2. 疲労強度の信頼性指標・破壊確率、3. 検査を考慮した信頼性指標・破壊確率、の3ケースを対象とした。

その結果、疲労解析でも触れたように、検査の精度、維持管理内容、係留索の取替えの可否により、信頼性指標・破壊確率が大きく変わる事を数値で具体的に示した。

またこの解析結果を受けて、係留構造に必要な要件を整理し明示した。

最後に、第7節では、水中トンネルの係留構造の提案を行った。

これまで提案されている水中トンネルへの係留索取付け構造の調査研究成果の整理から、先ず外付け方式とチャンパー方式の2方式があることを示した。次に具体的に噴火湾の水中トンネルのモデルを念頭に、両案の比較を実施した。その結果チャンパー方式が、疲労設計及び信頼性評価等の面から有効であることを明らかにした。この結論を受け、具体的なチャンパー方式の構造を検討し、トンネル本体が円断面の場合および長円の場合について構造案を提示した。

さらに、具体的な諸元、構造および必要設備について、作業スペースシミュレーションを実施し、基本的な仕様の検討を行った。— 80 —

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 角 田 興史雄

副 査 教 授 佐 藤 浩 一

副 査 教 授 三 上 隆

副 査 教 授 石 山 祐 二

学 位 論 文 題 名

## 水中トンネルの係留索の構造特性と設計法

水中トンネルは、トンネル本体を水深の中間部に浮体構造として構築し、係留索により水底地盤に定着させる新形式のトンネルで、沈埋トンネルを適用することが困難な大水深の海峡横断を可能にするものと期待されてはいるが、世界でまだ建設された例はない。

本論文は、水中トンネルの実現に向けての技術開発として行われた、その係留索の構造特性の解明と合理的な設計法の確立に関する研究について述べたものである。

まず、水中トンネルの安全性にとって重要と考えられる係留索のスラック発生の防止とトンネル本体の供用中の変位の制御の観点から各種係留索方式の比較検討を行い、わが国の沿岸域のように波浪の影響が極めて大きい条件下においては、斜係留索方式の場合にはスラック発生の防止が設計上重要な限界状態となること、鉛直係留索方式の場合にはスラック発生防止には有利であるが、水平変位に関する限界状態が支配的な設計条件となり得ることを明らかにしている。

次に、水中トンネルの波浪に対する非線形解析法として、厳密法と簡易法を提示するとともに、斜係留索方式を採用する場合には簡易法で実用上十分な精度が得られること、および、鉛直係留索方式では厳密法を用いるべきであることを明らかにしている。さらに、鉛直係留索方式の場合、端部の支持条件によっては係留索の曲げに伴う二次応力の影響が大きくなることを示し、その低減が端部構造の設計にとって重要であることを明らかにしている。

さらに、波浪による係留索の疲労限界状態に対する実用的な設計法を提案するとともに、数値計算例により、斜係留索方式の場合には疲労安全性が極めて重要な課題であることを明らかにしている。

続いて、水中トンネルの信頼性解析に基づく検討を行い、水中トンネルの設計に採用すべき安全性指標を提案するとともに、設計当初から検査および維持管理を考慮することの重要性を指摘している。

また、係留索の取付部について種々の方式の比較検討を行い、波浪の影響の厳しい環境に水中トンネルを建設する場合には、チャンバー方式が適することを示し、その構造案を提示している。

これを要するに著者は、新しい渡海構造物として期待される水中トンネルの技術開発を目的に、その係留索の構造特性と設計法に関して研究を行い、多くの新知見を得たもので、構造工学の発展に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。