

博士（工学）蟹江俊仁

学位論文題名

水中浮遊式トンネルの解析手法と動搖特性に関する研究

学位論文内容の要旨

わが国は、4つの本島と多数の島嶼で構成される島国であることから、従来より海峡横断、海域横断に対する社会的ニーズが高い上、狭い国土と広い海域を今後さらに有効に利用するため、身近にありながらこれまで利用されてこなかった海域の利用が必須となろう。こうした背景から、より効率的、経済的にネットワークを構築する渡海技術のひとつとして、従来の渡海技術にはない特徴を有する水中浮遊式トンネルの有用性が注目されている。水中浮遊式トンネルは、自身の重力を上回る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、橋梁やトンネルと同じように、鉄道、新交通システム、道路、歩道など、幅広いニーズに対応できる新しい構造形式の土木構造物である。しかし、水中トンネルと同様、大水深域でその効果を発揮する同種構造物、フローティングブリッジ（浮橋）は1980年頃から実用化され始めたのに対し、水中浮遊式トンネルの方は未だ実現にはいたっていない。その理由として、水中に完全に没水していることにより、波浪や地震に対してより複雑な挙動を示す可能性があり、必要とされる高度な解析的あるいは実験的な手法と設備の環境が整っていなかったこと、万一の事故や災害を想定した利用者の心理的な課題への対応策が欠如していたこと、また経済面での他の渡海構造物に対する優位性が十分に証明されてこなかったこと、等が挙げられる。

水中浮遊式トンネルの最大の特徴は、適切な浮力と重量のバランスで支持構造物への荷重を軽減することと、それにより生じる動搖を制御しつつ許容できる構造とすることである。このため、動搖の挙動を把握し、支持構造物に作用する荷重を予測し、変位や発生外力・反力を制御する技術が不可欠となる。特にわが国沿岸域での適用を考えた場合、今後期待される渡海部は少なくとも数km以上と広く、また厳しい波浪や地震に対する安全性も評価しなければならない。しかしながら、波浪ならびに地震という支配荷重に対する動搖問題を、一貫した手法論で全体モデルでの解析にまで拡張して体系的に研究した例はこれまでのところ見あたらず、本研究の重要な意義がそこにある。

本研究は、水中浮遊式トンネルの支配荷重である波浪や地震に対する解析手法を確立し、その動搖特性を明らかにすること、そして水中浮遊式トンネルの成立条件について検討し、特徴を活かすための構造諸元等はどうあるべきかに答えを導くことに目的がある。

まず第2章において、構造のモデル化の中でも特に重要な、テンションレグによる係留復元力の評価を行った。水中浮遊式トンネルの場合、従来式構造物よりも大きな変位を許容することを前提としているため、非線型性を示す大変位時の係留索の復元力評価そのものが課題となる。ここでは、その疑似線形化を図り、非線型性を考慮した厳密解との比較を通じて妥当性を検証した。

波浪に対する解析的研究は、第3章において断面二次元モデルを、また第4章において三次元の全体モデルを取り上げて行っている。波浪動搖の場合、最大の関心事のひとつは流体力の評価手法である。第3章での断面二次元のモデルに対しては、流体の非圧縮、非回転の条件下で慣性力が卓越する場合、水中での剛体

運動や流体力を極めて良く再現できるとされている回折波理論に基づいて行った。このモデルを用いて、水深、水中浮遊式トンネルの設置位置、係留索の形状などを様々に変化させてその影響を定量的に評価し、水中トンネルが具備すべき条件等が調査・検討された。その結果、係留索の形状やトンネルの比重がもたらす影響が動搖特性に与える影響のきわめて大なることが判明した。

第4章では、水中浮遊式トンネルの延長が長大であるがために特に重要となってくる全体系での動搖について考え、長大水中浮遊式トンネルの動搖を経済的かつ効率的に解析できる全体解析モデルを提案した。これは、波浪による流体力を修正モリソン式により評価し、剛体一バネ系モデルで表現した全体モデルに導入したものであり、回折波理論による单一あるいはごく少数の剛体を対象にした従来の係留浮体の動搖問題の解法に比べ、剛体の連続体で表現される長大構造物への拡張性ならびに適用性に優れている。この解析手法の適用に当たっては、3章で用いた断面二次元モデルを用いて回折波理論による解との差異を検証した。この比較検討により、修正モリソン式による解法の適用性を確認し、全体動搖解析問題に拡張して解析を行った。その際、構造側からは函体間の継手構造の剛性、作用荷重側からは波浪の入射角などをパラメータとし、これらが全体挙動を支配する要素であることが解明された。

一方、支配荷重として重要なもうひとつの外力、地震に対しても、第5章において断面二次元モデルでの解析を行った。地震の場合は、造波減衰や回折効果の影響があまりでない高周波小変位の問題のため、解析手法論的には修正モリソン式に絞って解析研究を行ったが、鉛直方向震動時の流体の圧縮性評価については、方法論についての提案を加えた。解析は、波浪の場合と同様に、水深や設置水深、係留索の形状などを変化させながら、地震時の基本動搖特性の解明を行い、水平方向挙動と鉛直方向挙動との間に大きな違いがあることが明らかにした。

第6章では、地震時の全体動搖問題を扱った。地震時全体動搖の課題は、水中浮遊式トンネルが長大な場合に生じる、伝播位相差の影響の評価である。本研究では、トンネル軸に沿った多数の地震入力点を通じて位相差が評価できるよう、全地震入力点を独立な絶対変位で表現できるモデルに拡張した。解析に当たっては、まず正弦パルス波による伝播位相差の影響を調査し、さらに人工地震波を伝播速度を変化させながら導入して全体動搖を解析した。これにより、伝播位相差の違いが応答変位や発生断面力に与える影響などが定量的に評価された。

第7章では、これら一連の研究成果を受けて、水中浮遊式トンネルの構造についての具体的な検討を行っている。すなわち、設計手法論についての提案とそれに基づく試設計の実施である。設計手法論の提案においては、限界状態設計法を適用することとし、その限界状態の定義と設計理念を示した。また、波浪や地震の厳しい環境条件を想定して試設計を行い、設計を通じてクリティカルとなる構造条件等が分析された。

本研究により、水中浮遊式トンネルの支配荷重である波浪や地震による動搖特性が明らかになったと同時に、変位や加速度、発生断面力を制御する上で重要な因子についても解明された。さらに、試設計を通じて、未だ実例のない水中浮遊式トンネルの構造が具体化され、実現化に向けての具体的な研究課題や開発指針が得られたものである。

# 学位論文審査の要旨

主査教授 三上 隆  
副査教授 角田 興史雄  
副査教授 佐伯 浩  
副査教授 佐藤 浩一  
副査教授 石山 祐二

## 学位論文題名

### 水中浮遊式トンネルの解析手法と動搖特性に関する研究

水中浮遊式トンネルは、自重を上回る浮力を有するチューブ状の構造体(函体)を、テンションレグ等の係留索により海中に安定化させる新規渡海構造物であり、従来の渡海技術にない特徴を有し、幅広いニーズに対応できる構造物として注目されているが、水中に完全に没水しているため、波浪や地震に対してより複雑な挙動を示す可能性があること、この動搖特性を把握するのに必要となる解析的・実験的手法が確立されていなかったこと等のために、未だ実現されていない。

本論文は、水中浮遊式トンネルの延長が長大であるがために特に重要となってくる全体系での動搖問題を取上げ、まず従来の係留浮体の解法に比べ、長大構造物への拡張性・適用性に優れている実用的解析法を開発し、ついで地震・波浪下の動搖特性を明らかにし、さらに設計手法論を提案し、試設計を通じて未だ実例のない水中浮遊式トンネルの構造を具体化したものである。その主要な成果を要約すると以下となる。

(1)全体構造に対する実用的解析法として、大きな変位を許容する構造物のモデル化において重要となる非線形性を示す係留索の復元力評価では疑似線形化によって計算の効率化に成功し、作用流体力を修正モリソン式、トンネルを剛体一ばね系モデルで表現し、周波数領域および時間領域のいずれの場合も解析できる解法を提案した。

(2)波浪時の動搖特性は、係留索形状、波浪の入射角と周期、構造物の固有周期、函体間のジョイント剛性等に大きく依存し、特に波浪周期に近い周期成分を高次モードに持つ係留タイプでは、ジョイント剛性の差異による応答の違いが顕著に出ることを明らかにした。

(3)地震時の動搖の制御は、水中浮遊式トンネルの場合には、係留索形状の選択によってかなり可能になることを指摘し、また構造物の固有周期と地震波の卓越周期が近接する係留タイプは、地震波の伝播速度が曲げモーメント等の発生断面力に大きな影響を与えることを明らかにした。

(4)設計手法論の提案では限界状態設計法を適用し、その限界状態の定義と設計理念を示し、さらに波浪や地震の厳しい環境条件下での試設計を行い、構造設計上の留意点を明確にした。

これを要するに、著者は、水中浮遊式トンネルの支配荷重である地震や波浪に対する簡便な解析手法を開発し、その動搖特性と成立条件を明らかにしたもので、構造力学および構造設計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。