

水中浮遊式トンネルの基本構造解析モデルの開発と 波浪動揺特性に関する研究

学位論文内容の要旨

水中浮遊式トンネルは、浮力を有するチューブ状のトンネル本体を係留索（テンションレグ）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域での渡海手段として大いに期待されているものである。

本来水中浮遊式トンネル外殻部や内部構造に生じる断面力を精度良く算定するには三次元解析が望ましいが、詳細かつ厳密な理論に基づく解析では、各パラメータの応答や強度に及ぼす影響の程度は解析を行うまでその予想が難しい。このため初期構造設計の段階においては比較的簡単でかつ等価なモデルを用いた各構造諸元の決定が要求されることとなる。トンネル縦断方向の全体解析を行う場合、弾性支承上梁モデルが候補の1つとして挙げられる。しかし水中浮遊式トンネルは、動揺を許容するという構造特性から、トンネル函体を安定化させる係留索による局所的な離散ばねの影響が小さく、一様分布ばねとして扱う、つまり弾性床上梁に置き換えた解析が可能な場合も多く予想される。

本論文では以上のような観点から、弾性支承上の梁とみなした水中浮遊式トンネルと弾性床上梁との等価性について静的、動的な面から検討を行い、その適用範囲を明らかにした。またその適用範囲を満たす長大な水中浮遊式トンネルを波浪が作用する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った。本論文は7章より構成されている。

第1章は本論文の序論であり、研究の背景と目的、既往の研究および論文の内容について記述した。

第2章では水中浮遊式トンネルと弾性床上梁の等価性について静的問題に関する検討を行った。まず水中浮遊式トンネルを係留索をばね（支承）とした弾性支承上の梁とみなすことにより係留索上の点の変形に関する差分方程式および厳密解を導出した。そしてそれらと等価な弾性床上梁の支配微分方程式より得られる特性解との比較を行うことで両者の等価性を検討した。その結果、差分方程式および微分方程式の解は共に係留索のトンネルに対する相対的剛性を表す無次元パラメータにより表され、静的問題についてはそのパラメータの大小のみにより等価性が議論されることを明らかにした。具体的には両者が等価である条件は水平及び鉛直方向の曲げ変形について次式を満足する場合である。

$$k_v h^3 / EI \leq 1.2$$

ただし、 k_v ：係留索による水平（または鉛直）方向ばね定数、 EI ：トンネル曲げ剛性、 h ：係留索のトンネル軸方向配置間隔。

第3章では水中浮遊式トンネルと弾性床上梁の等価性について動的問題（曲げ振動）の一般解により検討を行った。水中浮遊式トンネルの動的挙動を差分方程式、等価な弾性床上梁を微分方程式によりそれぞれ同一の無次元パラメータを用いて記述し、動的な特性解の比較により等価な条件は慣性力の影響をほとんど受けないことを明らかにした。さらにそれぞれの固有振動特性、動的応答特性について検討を行い、動的問題における等価性検討の妥当性を検証すると共に、その大域的特性について考察を加えた。

第4章では係留索配置に起因する連成復元力を考慮した弾性支承上梁および弾性床上梁の定式化を行い、第2章と同様に得られる解析解の比較から等価性検討を行った。具体的には水中浮遊式トンネルを曲げとねじりが連成する弾性支承上梁およびそれと等価な弾性床上梁で記述し、前者の連立差分方程式および後者の連立微分方程式における3次の特性方程式の解の比較を行い以下の結果を得た。

- (1) 弾性床上梁とみなすことのできる条件は、虚数となる特性解の偏角の相違から得られる。
- (2) 連成時においても、等価性は第2章で記述した非連成時の無次元パラメータにより検討できる。

第5章では基本構造設計の面から有用な情報を得るべく、第2章から第4章までの研究で得られた適用条件をもとに、実際に想定した水中浮遊式トンネルの構造諸元に関してその適用可能範囲を、係留形式、断面径別に鉛直、水平方向の特性について示した。水平方向の挙動は鉛直方向のそれに比べ柔軟であり、弾性床上梁に置き換えられる条件がゆるく、特に斜レグを用いない係留形式における水平方向の運動についてはおおむね弾性床上梁とみなすことが可能であることが明らかとなった。また水中浮遊式トンネルと弾性床上梁と等価である場合における境界の影響範囲について、無限長梁に集中荷重および集中モーメントが作用した場合の変形、断面力曲線の関数形からその評価を行い、その範囲を第2章で扱った係留索のトンネルに対する相対的剛性を表す無次元パラメータのみにより決定できることを示した。

第6章ではトンネル軸に対し斜め入射する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た場合の支配方程式および周波数応答解析解を導出し、それらを用いて大域的な波浪応答の周波数特性を理論的な解釈のもとに考察した。得られた主な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 水中浮遊式トンネルの曲げ固有振動数は長大であればあるほど、またトンネル曲げ剛性に対して係留索剛性の影響が有意であればあるほど、弾性床上梁における剛体変位に関する固有振動数とトンネルの曲げ固有振動数は互いに接近する値をとる。
- (2) 非共振周波数領域における曲げモーメント振幅のピーク値とそのピーク値をとるおよその波周波数の算定式を波の入射角を考慮して導き、また共振周波数領域における応答ピーク値の算定式を提示した。
- (3) 鉛直方向の運動と水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も顕著にみられた。特に水平方向については波周波数と構造物の固有振動数の一致による共振が問題となる。

第7章では、総括として各章を取りまとめるとともに、本研究の成果と今後の課題に言及した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	三上	隆
副査	教授	角田	與史雄
副査	教授	山田	元
副査	助教授	蟹江	俊仁

学位論文題名

水中浮遊式トンネルの基本構造解析モデルの開発と 波浪動揺特性に関する研究

国土が狭く周囲を海に囲まれているわが国においては、広い海域を有効に利用して各種の公共施設や物流、交通の拠点を作ることは将来に渡って必要である。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もので、従来の渡海技術にはない特徴を有する新規渡海構造物として注目されている。しかし、水中浮遊式トンネルは、従来の構造物と異なり、その重量、剛性、係留形式などによって、発生する変位や断面力が大きく変化する特性を有しており、その設計は従来の構造物に比べて一段と複雑になると考えられる。そのため、初期計画における基本構造諸元の決定に必要な情報を効率的に引き出すために、全体挙動について比較的良い精度で基本特性が把握できる解析モデルの開発が望まれている。

以上のような背景のもと、著者は、水中浮遊式トンネルを弾性基礎上の梁に単純化して取り扱う方法を提案し、その適用範囲を明確にするとともに、設計における重要な検討事項の一つである波浪応答に対して、固有周波数の存在範囲、共振時のピーク高さなどの動揺特性の巨視的な把握を試みたもので、7章で構成されている。

第1章は本論文の序論として、研究の背景と目的、既往の研究および論文の内容について述べている。

第2章および第3章では、鉛直係留形式の水中浮遊式トンネルを対象とし、それぞれ静的問題および動的（曲げ振動）問題に対する弾性床上梁モデルの適用可能性の検討を行い、その適用限界を明らかにしている。すなわち、水中浮遊式トンネルを係留索をばね（支承）とした弾性支承上梁とみなすことにより得られる支配差分方程式の特性解と弾性床上梁の支配微分方程式の特性解の比較検討を行い、適用可能性の評価は係留索のトンネル函体に対する相対剛性を表すパラメータ kh^3/EI （ k ：係留索による水平(または鉛直)方向ばね定数、 EI ：トンネル函体の曲げ剛性、 h ：係留索のトンネル軸方向配置間隔）のみで行えること

を明らかにし、両問題に対する弾性床上梁モデルの適用範囲は $kh^3/EI \leq 1.2$ であることを示し、またその妥当性を自由振動解析および強制振動解析により検証している。

第4章では、鉛直と斜めLEGから成る係留索配置形状を有する水中浮遊式トンネルに対して、第2章および第3章と同様な検討を行っている。すなわち、水中浮遊式トンネルを曲げ変形とねじり変形が連成する弾性支承上梁および等価な弾性床上梁で記述し、前者の連立差分方程式および後者の連立微分方程式の特性解の比較検討より、連成時においても弾性床上梁によるモデル化の適用限界は、第2、第3章の結論とほぼ同一であることを明らかにしている。

第5章では、第4章までの成果を踏まえ、実際に想定される水中浮遊式トンネルの構造諸元に対して、弾性床上梁の適用可能範囲の検討を行い、水平方向の挙動は鉛直方向のそれに比べ柔軟であり、弾性床上梁に置き換えられる条件がゆるく、特に斜LEGを用いない鉛直係留形式における水平方向の運動はおおむね弾性床上梁にモデル化可能であることを明らかにしている。

第6章では弾性床上梁モデルを用いて、トンネル軸に対し斜め入射の波浪が作用する長大な鉛直係留形式の水中浮遊式トンネルの動揺特性の巨視的な把握を試み、境界条件の影響を及ぼす範囲の目安としての特性距離および共振周波数領域における変位応答ピーク値の算定式を提示するとともに、係留索ばねのみによる応答モードが最低次の固有周波数を与え、トンネル函体の変形が関与するものは全てこの値より高くなることを明らかにするなど、構造設計上有用な知見を得ている。

第7章はまとめて、本研究で得られた知見を統括している。

これを要するに著者は、テンションLEGで支持された水中浮遊式トンネルの解析モデルとして、弾性床上の梁に置き換えて取り扱う方法を提案し、その適用範囲を明確にするとともに、波浪応答解析に適用し動揺特性の巨視的な把握を試み、さらに構造設計についていくつかの考察を行ったもので、構造力学および構造設計学の発展に寄与するところ大なるものがある。

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。