

学位論文題名

水中トンネルに作用する流体力の評価法と
係留システムの安定性に関する研究

学位論文内容の要旨

海峡の水深が深く、対岸距離も比較的長い場合の渡海方法として水中トンネルという新たな構造形式が提案され実用化に向けて世界各地で研究が実施されている。水中トンネルは過剰浮力を有する中空状のチューブを海底面で支持された係留索などによって海中に強制的に引き込み固定する構造である。中空部分を列車や自動車や人などが利用することから、構造物の規模は数メートルから数十メートルに達し、海中構造物としては従来のパイプラインやジャケット式構造物の数十センチメートルから数メートルの規模とは比較にならない程大断面の構造物となる。

従来の研究では、水中トンネルのようにトンネル直径が水深の20%も達する大断面の没水構造に研究はほとんどなく、土木工学としていまだ経験したことの無い構造物であり多くの課題が残されている。

本研究では大断面の構造物が外洋に設置され場合、工学上重要な課題である波浪を対象として、水中トンネルに作用する波力特性、動揺特性(トンネル変位、速度および加速度)ならび係留索に働く張力特性を対象として研究を行った。

構造物に作用する波力は一般に、慣性力、抗力、回折波力などがある。回折波力は構造物の規模が波長に比べて大きいとき、波が構造物周囲に回り込むことによりが発生する力である。この波力は完全流体の非回転運動の条件を仮定することにより、速度ポテンシャルを用いて求めることができる。

一方、慣性力、抗力、揚力は構造物の規模が波の波長に比べ比較的小さいく、入射波が構造物によって変形しないときに支配的な波力である。慣性力は流体そのものが有する加速度成分によって発生する波力成分と、構造物が流体におよぼす力の反作用として受けるいわゆる付加質量力との合力である。加速度成分によって発生する慣性力はポテンシャル理論から求めることができる、しかし、波浪によって動揺する場合、付加質量力は波浪条件によって異なり解析的に解くことは困難である。

抗力は流体の有する粘性に起因する力であり、完全流体の仮定では発生しない。この力は構造物の表面の摩擦により流線の剥離や渦の発生に伴う後流域での圧力低下に伴ない発生する波力である。この波力は理論的に求めることが出来ず通常実験から求める必要がある。

このように、水中トンネルに作用する波力は種々のものが考えられるが、本研究では数値計算および水理実験から水中トンネルに作用する波力が慣性力であることを明らかにした。

つぎに、水中トンネルのような水中に設置される浮遊式構造物を係留する場合、それらの安定性を確保するためには係留方式に対する動揺や係留索に発生する張力を十分把握することが重要である。本研究では大水深域における一形式であるテンションレグプラットフォーム(TLP)にならって、係留方式は緊張係留とした。しかし、TLPは鉛直係留方式であるため横方向の拘束力が弱く水平方向への動揺が大きい。そこで本研究では鉛直係留のほかに斜係留を用いた水平方向の動揺を抑制する係留方式についても検討した。係留索で最も重要な課題は過大な波力が作用することによって発生する係留索の「たるみ」であり、復元時にトンネル浮力によってもたらされる衝撃的な張力「スナップ荷重」の発生にともなう索の破断である。そこで、本研究では作用波力およびトンネルの構造条件から、係留索

の「たるみ」のメカニズムについて水理実験により検討するとともに、数値解析により種々の条件に対する「たるみ」発生条件について明らかにした。

第1章 序論、第2章 水中トンネルに作用する波力、第3章 水中トンネルの係留特性、第4章 結論により構成されている。

第1章は本論文の目的ならびに本論文で取り扱った波力と動揺に関する既往の研究と問題点を明確にするとともに、研究で対象とした範囲についての内容と構成について記述している。

第2章では先ずポテンシャル理論を用いた2次元境界要素法と3次元特異点分布法に対する波力の解析法を紹介し、この理論を用いて水中トンネルの基本的形状に対する波力特性について計算を行い、実験値との適合性のよいことを示した。また、水中トンネルの形状を楕円にした場合や設置水深を変化させたときの波力特性を明らかにした。さらに、3次元特異点分布法をもちいて斜め入射波に対する波力について検討を行い直角入射の場合が波力として最も厳しいことを示した。

一方、水理実験から水中トンネルに作用する波力特性について検討した。実験波力の評価は、流速の2乗に比例する抗力と流体の加速度に比例する慣性項の和で示されるモリソン式を適用した。モリソン式で用いる項力係数と慣性力係数を実測波力を、最小自乗法をもちいて算定し付加質量係数がK.C.数の関数で整理出来ることを示した。また波力の実測値から慣性力と項力との比を求め、水中トンネルに作用する波力の領域について検討した。そして、ポテンシャル理論から算定される波力とモリソン式から算定される波力と実測波力との比較を行い、いずれの計算式を用いても精度良く波力を算定可能であることを明らかにした。実測波力波形から抗力と慣性力の大きさを比べた結果、慣性力が卓越していることを明らかにした。また、不規則波を用いた実験と計算値から、最大波力は最大波高が発生する時刻と同じであることを示した。

第3章は水中トンネルの動揺と係留索に働く張力特性について数値計算と水理実験により検討を行った。係留形式はA（鉛直係留）、BおよびC係留（斜係留）の3タイプで、規則波および不規則波に対して行った。

まず水中トンネルの運動方程式を提示し、トンネル比重、減衰定数、トンネルのパネ定数がトンネルの動揺（トンネル変位、速度、加速度）に与える影響について、時刻歴解析と周波数領域に対する数値解析法を用いて検討し、数値計算の妥当性は各係留方法に対する固有周期については2次元模型実験の結果と比較した。また、減衰定数は水理実験から得るとともに、トンネルの変位によらずほぼ一定であることを明らかにした。

A係留は水平変位が大きくその大きさは波高に比例するが、その動揺周期は波浪と構造物の固有周期との共振によって長周期の動揺が発生する。トンネルの直径を変化させると係留索の「ゆるみ」を防止するためには鉛直波力の押し込み力に対抗できる浮力の確保が必要である。

B係留の水平変位はA係留に比べて1%以下と小さいが、変位を拘束するため係留索には過大な張力が発生する。このため、係留索には「たるみ」が発生し、その原因はトンネル浮力によって発生する係留索の初期張力が波力によってゼロとなるためである。これを防ぐためにはトンネルの浮力を大きくすることや、係留索の角度を大きくすることなどによって対処できることが明らかとなった。

C係留はB係留に対して係留索の係留角度を大きくした場合であり、係留索の「たるみ」をB係留よりさらに発生を抑制可能であることを明らかにした。

第4章は、各章においてそれぞれ得られた工学的に有意な結論を取りまとめて記述した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 板 倉 忠 興
副 査 教 授 角 田 與 史 雄
副 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 助 教 授 山 下 俊 彦

学 位 論 文 題 名

水中トンネルに作用する流体力の評価法と 係留システムの安定性に関する研究

海峡の水深が深く、対岸距離も比較的長い場合の渡海方法として水中トンネルという新たな構造形式が提案され実用化に向けて世界各地で研究が実施されている。水中トンネルは過剰浮力を有する中空状のチューブを海底面で支持された係留索などによって海中に強制的に引き込み固定する構造である。中空部分を列車や自動車や人などが利用することから、構造物の規模は数メートルから数十メートルに達し、海中構造物としては従来のパイプラインやジャケット式構造物の数十センチメートルから数メートルの規模とは比較にならない程大断面の構造物となる。

本研究では大断面の構造物が外洋に設置され場合、工学上重要な課題である波浪を対象として、水中トンネルに作用する波力特性、動揺特性（トンネル変位、速度および加速度）ならび係留索に働く張力特性を対象として研究を行った。

構造物に作用する波力は一般に、慣性力、抗力、回折波力などがある。回折波力は構造物の規模が波長に比べて大きいとき、波が構造物周囲に回り込むことによりが発生する力である。この波力は完全流体の非回転運動の条件を仮定することにより、速度ポテンシャルを用いて求めることができる。

一方、慣性力、抗力、揚力は構造物の規模が波の波長に比べ比較的小さいく、入射波が構造物によって変形しないときに支配的な波力である。慣性力は流体そのものが有する加速度成分によって発生する波力成分と、構造物が流体におよぼす力の反作用として受けるいわゆる付加質量力との合力である。加速度成分によって発生する慣性力はポテンシャル理論から求めることができる、しかし、波浪によって動揺する場合、付加質量力は波浪条件によって異なり解析的に解くことは困難である。

抗力は流体の有する粘性に起因する力であり、完全流体の仮定では発生しない。この力は構造物の表面の摩擦により流線の剥離や渦の発生に伴う後流域での圧力低下に伴ない発生する波力である。この波力は理論的に求めることが出来ず通常実験から求める必要がある。

本研究では数値計算および水理実験から水中トンネルに作用する波力が慣性力であることを明らかにした。

つぎに、水中トンネルのような水中に設置される浮遊式構造物を係留する場合、それらの安定性を確保するためには係留方式に対する動揺や係留索に発生する張力を十分把握することが重要である。本研究では、係留方式は緊張係留とし、鉛直係留のほか斜係留を用い、水平方向の動揺を抑制する係留方式についても検討した。係留索で最も重要な課題は過大な波力が作用することによって発生する係留索の「たるみ」であり、復元時にトンネル浮力によってもたらされる衝撃的

な張力「スナップ荷重」の発生にともなう索の破断である。そこで、本研究では作用波力およびトンネルの構造条件から、係留索の「たるみ」のメカニズムについて水理実験により検討するとともに、数値解析により種々の条件に対する「たるみ」発生条件について明らかにした。

第1章は本論文の目的ならびに本論文で取り扱った波力と動揺に関する既往の研究と問題点を明確にするとともに、研究で対象とした範囲についての内容と構成について記述している。

第2章では先ずポテンシャル理論を用いた2次元境界要素法と3次元特異点分布法に対する波力の解析法を紹介し、この理論を用いて水中トンネルの基本的形状に対する波力特性について計算を行い、実験値との適合性のよいことを示した。また、水中トンネルの形状を楕円にした場合や設置水深を変化させたときの波力特性を明らかにした。さらに、3次元特異点分布法をもちいて斜め入射波に対する波力について検討を行い直角入射の場合が波力として最も厳しいことを示した。一方、水理実験から水中トンネルに作用する波力特性について検討した。実験波力の評価は、流速の2乗に比例する抗力と流体の加速度に比例する慣性項の和で示されるモリソン式を適用した。モリソン式で用いる項力係数と慣性力係数を実測波力を、最小自乗法をもちいて算定し付加質量係数がK.C.数の関数で整理出来ることを示した。また波力の実測値から慣性力と項力との比を求め、水中トンネルに作用する波力の領域について検討した。そして、ポテンシャル理論から算定される波力とモリソン式から算定される波力と実測波力との比較を行い、いずれの計算式を用いても精度良く波力を算定可能であることを明らかにした。実測波力波形から抗力と慣性力の大きさを比べた結果、慣性力が卓越していることを明らかにした。また、不規則波を用いた実験と計算値から、最大波力は最大波高が発生する時刻と同じであることを示した。

第3章は水中トンネルの動揺と係留索に働く張力特性について数値計算と水理実験により検討を行った。係留形式はA（鉛直係留）、BおよびC係留（斜係留）の3タイプで、規則波および不規則波に対して行った。

まず水中トンネルの運動方程式を提示し、トンネル比重、減衰定数、トンネルのバネ定数がトンネルの動揺（トンネル変位、速度、加速度）に与える影響について、時刻歴解析と周波数領域に対する数値解析法を用いて検討し、数値計算の妥当性は各係留方法に対する固有周期については2次元模型実験の結果と比較した。また、減衰定数は水理実験から得るとともに、トンネルの変位によらずほぼ一定であることを明らかにした。

A係留は水平変位が大きくその大きさは波高に比例するが、その動揺周期は波浪と構造物の固有周期との共振によって長周期の動揺が発生する。トンネルの直径を変化させると係留索の「ゆるみ」を防止するためには鉛直波力の押し込み力に対抗できる浮力の確保が必要である。

B係留の水平変位はA係留に比べて1%以下と小さいが、変位を拘束するため係留索には過大な張力が発生する。このため、係留索には「たるみ」が発生し、その原因はトンネル浮力によって発生する係留索の初期張力が波力によってゼロとなるためである。これを防ぐためにはトンネルの浮力を大きくすることや、係留索の角度を大きくすることなどによって対処できることが明らかとなった。

C係留はB係留に対して係留索の係留角度を大きくした場合であり、係留索の「たるみ」をB係留よりさらに発生を抑制可能であることを明らかにした。

第4章は、各章においてそれぞれ得られた工学的に有意な結論を取りまとめて記述した。

これを要するに、著者は水中トンネルに作用する流体力の評価法と係留システムの安定性に関する諸問題を解決したもので、港湾工学、海岸工学の進展に貢献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られる。