

学 位 論 文 題 名

氷海水槽における模型実験に基づく
氷板と海洋構造物の干渉に関する研究

学位論文内容の要旨

石油・天然ガス等のエネルギー資源の開発は、陸上に賦存する資源の開発に始まり、需要の増大に伴って、より開発環境の厳しい、いわゆるフロンティアの開発へとその対象領域を拡大してきたが、現在、新たなフロンティアとして注目されている領域の一つが、海水に覆われる海域「氷海域」である。氷海域における天然資源の開発の試みは、1960年代に北極海において資源が発見されたことにより注目を集め、本格的な開発に向けての動きが1970年代から80年代にかけて活発に展開された。この動きはその後の原油価格の低迷とともに一時沈静化したが、近年、比較的水況が緩やかな海域を中心に再び氷海域での資源開発の動きが高まってきている。このような海域の代表例がサハリン北東の大陸棚における石油・ガス田の開発である。本開発は、ソ連からロシアへの体制の変換とともに急速に本格化し、一部鉱区では1999年より、石油の商業生産が開始されている。

氷海域における資源開発において克服すべき技術的課題としては、低温環境下における鋼材等の脆性化・着氷等様々であるが、最大の問題は海水の存在である。海水は、資源開発用プラットフォーム等の海洋構造物及び開発された資源を輸送する船舶の両者にとって大きな脅威となる。これらのうち、船舶については、氷海域を航行するためのいわゆる砕氷船に対する技術開発が以前より行われ、設計ルールの整備なども比較的進んでいる。この一方、海洋構造物に対する海水の影響、特に、海水が潮流・風等により運動して海洋構造物と干渉する際に及ぼす荷重「氷荷重」については、研究の歴史がまだ浅く、また、氷荷重の発生は氷の破壊を伴いながら進行する複雑な現象であることから、未知の部分が少なくない。しかしながら、氷荷重は、一般に、波浪その他の外力に対して格段に大きく、構造物の設計にあたっての支配外力となることから、これの的確な評価・推定は、氷海域に建設される海洋構造物の設計に不可欠である。本論文では、海洋構造物に働く氷荷重についての研究成果を述べる。

本研究における主要な研究手法は、氷海水槽における模型実験である。氷海水槽は、氷海域を所定の縮尺で実験室内に再現し、模型実験を行う研究施設であり、試験水槽を冷凍庫内に封設した施設である。氷海水槽では冷凍庫内を低温に保つことにより水槽中に氷を成長させてこの中で各種の模型実験を行うが、これらの実験結果が工学的に有意なものとなるためには、ここにおいて使用される氷「模型氷」が、実海水の各種機械的特性を相似率に従って縮尺した特性を有する特殊な氷である必要がある。このような模型氷の開発とその特性の把握は氷海水槽における実験的研究のベースを成すものであり、それ自体が重要な研究と言える。本論文でも、模型氷の特性についての研究成果を示す。まず、模型氷が模擬すべき対象である海水について、その一般的特徴及び機械的特性を述べる。次いで、曲げ強度、厚さ、弾性率、圧縮強度、破壊靱性及び動摩擦について、模型氷についての研究結果を示す。

海洋構造物と氷板との干渉は、構造物と氷の接触面が鉛直であるかあるいは傾斜しているかによ

り現象が大きく違い、この結果、構造物に働く氷荷重の強度並びにその挙動は両者で大きく異なるものとなる。このため、本研究では鉛直構造物と傾斜構造物に分けて研究を行った。

鉛直構造物については、円柱及び角柱型の構造物模型を用いた実験により研究を行った。これらの形式は鉛直型構造物を単純化した模型あるいは多脚型構造物等のような構造物の一部を模擬した模型ととらえることができる。本研究ではこのような模型を氷板中に一定速度で貫入させ、その時模型に加わる氷荷重を計測した。この手法は、運動の主体が実現象では氷板であるのに対し、構造物模型を運動させるという意味で逆であるが、相対的な意味では問題は無く、一般に採られている手法である。実験の際には様々な様式の氷の破壊が観測された。この破壊様式は、実験条件により変化する。すなわち、模型の運動速度が低い、あるいは模型幅と氷板厚さの比として与えられるアスペクト比が高い場合には氷板の座屈あるいは曲げ破壊が観測されるが、この逆の条件では圧壊が卓越する。このような氷板の破壊様式の違いは模型に働く氷荷重にも影響を与える。本研究では、計測された氷荷重データの確率分布をワイブル関数により表現することを試みた。この結果、ワイブル関数に含まれる2種類のパラメーターが上記の模型の運動速度及びアスペクト比の関数として表現されることを示した。また、両パラメーター間にも相関があることを示した。

一方、鉛直型海洋構造物に氷荷重が加わった場合、構造物に振動等の動的応答が発生することが知られている。本研究では、構造物模型の剛性・固有周波数等の動的特性を調整できる実験設備を用いて、氷荷重に対する構造物の動的応答についても研究した。実験結果は、構造物の動的応答は氷板の運動速度の影響を受け、低速領域では準静的な振動を示すが、速度が上がると定常的振動に変化し、さらに速度が上がると逆に振動が減衰する、という3種類の領域に分けられることを示した。本研究では、この結果に基づき、各領域間の遷移条件並びに構造物の振動加速度の推定方法を求めた。

次に傾斜型構造物としては、円錐型構造物を対象として研究を行った。円錐型構造物についての研究においても模型を氷板内に貫入させ、模型に加わる荷重を計測するとともに、模型前面における氷板の破壊挙動の観測も行った。円錐型構造物に働く氷荷重は、氷の破壊に要する荷重成分、破壊された氷片が回転するときの荷重成分、氷片が円錐上に乗りあがることによる荷重成分の3成分から構成される。これらの荷重成分は発生メカニズムがそれぞれ異なることから、氷荷重の詳細について検討するためには、別個に取り扱う必要がある。本研究では、実験時に撮影された氷板の破壊挙動の観測結果を用いて、氷片が円錐上に乗りあがることによる荷重成分とその他の成分の分離を行い、この結果について理論解との比較検討を行った。また、この映像記録から氷板の破壊サイズと氷板の機械的特性との関係を求めた。この結果、理論解は、これの導出過程に含まれる仮定が満たされる場合には実験結果を説明するものであるが、その他の場合には過大な値を与えるものであることを示した。

一方、円錐型構造物に働く氷荷重の計算プログラムの開発も行った。本プログラムは、氷板の破壊をシミュレートする部分とこれに基づいて氷荷重を計算する部分からなる。前者は、実験結果から得られた氷板の破壊サイズと氷板の機械的特性の関係を盛り込むものである。また、後者では、上記の3荷重成分についてそれぞれ計算し、これを時間的に重ね合わせることで氷荷重を求める。このプログラムを用いて、本研究による実験及び他の研究者による実験に対する計算を行い、その結果を比較した。この結果、本プログラムによる計算結果と実験結果は良い一致を示した。この比較対象とした実験には、円錐のサイズ・傾斜角度、氷板の厚さ等が異なる実験が含まれており、この結果は、本研究で開発したプログラムの円錐に働く氷荷重を計算する手法としての妥当性を示したものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 藤 田 陸 博
副 査 教 授 三 上 隆
副 査 教 授 前 晋 爾

学 位 論 文 題 名

氷海水槽における模型実験に基づく

氷板と海洋構造物の干渉に関する研究

石油・天然ガス等のエネルギー資源の開発は、陸上に賦存する資源の開発に始まり、需要の増大に伴って、より開発環境の厳しい、いわゆるフロンティアの開発へとその対象領域を拡大してきたが、現在、新たなフロンティアとして注目されている領域の一つが、海氷に覆われる海域「氷海域」である。

氷海域における資源開発において克服すべき技術的課題として最大の問題は海氷の存在である。海氷は、資源開発用プラットフォーム等の海洋構造物及び開発された資源を輸送する船舶の両者にとって大きな脅威となる。海洋構造物に対する海氷の影響、特に、海氷が潮流・風等により運動して海洋構造物と干渉する際に及ぼす荷重「氷荷重」については、研究の歴史がまだ浅く、また、氷荷重の発生は氷の破壊を伴いながら進行する複雑な現象であることから、未知の部分が少なくない。しかしながら、氷荷重は、一般に、波浪その他の外力に対して格段に大きく、構造物の設計にあたっての支配外力となることから、これの的確な評価・推定は、氷海域に建設される海洋構造物の設計に不可欠である。本論文では、海洋構造物に動く氷荷重についての研究成果をまとめたものである。

本研究における主要な研究手法は、氷海水槽における模型実験である。氷海水槽は、氷海域を所定の縮尺で実験室内に再現し、模型実験を行なう研究施設であり、これらの実験結果が工学的に有意なものとなるためには、ここにおいて使用される氷「模型氷」が、実海氷の各種機械的特性を相似率に従って縮尺した特性を有する特殊な氷である必要がある。このような模型氷の開発とその特性の把握は氷海水槽における実験的研究のベースをなすものであり、それ自体が重要な研究と言える。本論文でも、模型氷の特性についての研究成果を示した。まず、模型氷が模擬すべき対象である海氷について、その一般的特徴及び機械的特性を述べ、次いで、曲げ強度、厚さ、弾性率、圧縮強度、破壊靱性及び動摩擦について、模型氷についての研究成果を示した。

海洋構造物と氷板との干渉は、構造物と氷の接触面が鉛直であるか、あるいは傾斜しているかにより現象が大きく違い、この結果、構造物に働く氷荷重の強度並びにその挙動は両者で大きく異なるものとなる。このため、本研究では鉛直構造物と傾斜構造物に分けて研究を行なった。

鉛直構造物については、円柱及び角柱型の構造物模型を用いた実験により研究をおこ

なった。これらの形式は鉛直型構造物を単純化した模型あるいは多脚型構造物等のような構造物の一部を模擬した模型ととらえることができる。本研究ではこのような模型を氷板中に一定速度で貫入させ、その時模型に加わる氷荷重を計測した。実験の際には様々な様式の氷の破壊が観測された。この破壊様式は、実験条件により変化する。すなわち、模型の運動速度が低い、あるいは模型幅と氷板厚さの比として与えられるアスペクト比が高い場合には氷板の座屈あるいは曲げ破壊が観測されるが、この逆の条件では圧壊が卓越する。このような氷板の破壊様式の違いは模型に働く氷荷重にも影響を与える。本研究では計測された氷荷重データの確立分布をワイブル関数により表現することを試みた。この結果、ワイブル関数に含まれる2種類のパラメーターが上記の模型の運動速度及びアスペクト比の関数として表現されることを示した。また、両パラメーター間にも相関があることを示した。

一方、鉛直型海洋構造物に氷荷重が加わった場合、構造物に振動等の動的応答が発生することが知られている。本研究では、構造物模型の剛性・固有周波数等の動的特性を調整できる実験設備を用いて、氷荷重に対する構造物の動的応答についても研究した。実験結果は、構造物の動的応答は氷板の運動速度の影響を受け、低速領域では準静的な振動を示すが、速度が上がると定常的振動に変化し、さらに速度が上がると逆に振動が減衰する、という3種類の領域に分けられることを示した。本研究では、この結果に基づき、各領域の遷移条件並びに構造物の振動加速度の推定方法を求めた。

次に傾斜型構造物としては、円錐型構造物を対象として研究を行なった。この研究においても模型を氷板内に貫入させ、模型に加わる荷重を計測するとともに、模型前面における氷板の破壊挙動の観測も行なった。円錐型構造物に働く氷荷重は、氷の破壊に要する荷重成分、破壊された氷片が回転するときの荷重成分は発生メカニズムがそれぞれ異なることから、氷荷重の詳細について検討するためには、別個に取り扱う必要がある。本研究では、実験時にされた氷板の破壊挙動の観測結果を用いて、氷片が円錐上に乗りあがることによる荷重成分とその他の成分の分離を行ない、この結果について理論解との比較検討を行なった。また、この映像記録から氷板の破壊サイズと氷板の機械的と特性との関係を求めた。この結果、理論解は、これの導出課程に含まれる仮定が満たされる場合には実験結果を説明するものであるが、その他の場合には過大な値を与えるものであることを示した。

一方、円錐型構造物に働く氷荷重の計算プログラムの開発も行なった。本プログラムは、氷板の破壊をシュミレートする部分とこれに基づいて氷荷重を計算する部分からなる。前者は、実験結果から得られた氷板の破壊サイズと氷板の機械的関係の関係を盛り込むものである。また、後者では、上記の3荷重成分についてそれぞれ計算し、これを時間的に重ね合わせるにより氷荷重を求める。このプログラムを用いて、本研究による実験及び他の研究者による実験に対する計算を行ない、その結果を比較した。この結果、本プログラムによる計算結果と実験結果は良い一致を示した。この比較対象とした実験には、円錐のサイズ・傾斜角度、氷板の厚さ等が異なる実験が含まれており、この結果は、本研究で開発したプログラムの円錐に働く氷荷重を計算する手法としての妥協性を示したものである。

以上、これを要するに、著者は氷海域に建設される海洋構造物に作用する氷荷重を明らかにしたもので、氷工学、海洋工学に寄与するところ大なるものがあり、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。