

学 位 論 文 題 名

氷海域の構築物に作用する氷力に関する研究

学位論文内容の要旨

世界の極地には、多くの化石燃料が存在していることが報告されている。特に、これらの海域において、炭化水素系資源の採鉱・開発のために建設される構築物は、厳しい環境条件に耐えるだけの安全性が要求される。しかし、海水によって構築物に伝達される力についての理解が不十分であることが、構築物の設計を行う上での大きな障害となっているのが現状である。これは、設計では考慮すべき海水の物性値、構築物と海水の相互作用時の氷盤の破壊についての理解不足、及びこれらが同時に評価されていないことが大きな原因となっているためである。また、上記構築物のみならず、寒冷地の港湾構築物、河川・湖沼に建設される構築物の設計においても、氷によって構築物に伝達される力の評価が必要不可欠となる。

従来の氷力評価に関する研究では、氷と構築物が理想的な条件下で相互作用した時に構築物に伝達される最大氷力（初期氷力）として氷力が評価され、算定式が提案されてきた。これらの提案式には、①氷盤と構築物は一様に接触した状態（理想的な接触条件）で相互作用を開始する、②構築物前面の氷盤が構築物幅にわたり同時に破壊する、③氷厚が一定である、④氷盤を移動させる driving force の大きさに制限はない、との仮定があった。これらの仮定下の氷力は、実海域での氷力と比較すると過大傾向を示し、特に、この傾向は構築物が大型化する程、顕著になる。しかし、実海域の氷盤先端部の形状は非常に不規則であること、構築物と氷盤の接触部における氷盤の破壊は非同時的であること、実氷野の氷厚は、pressure ridge・多年氷・lead ice の存在から非一様であること、ridge - building 効果及び風・流れのせん断力に起因する氷盤 driving force の大きさには制限があること、のために上記の仮定は必ずしも成立しない。

したがって、実海域の水象条件を考慮した氷力評価が望まれている。このため、本研究の目的は以下の通りである。

①氷の力学特性及び氷力の現況を既往の文献から把握する。また、北極海の海水、北海道の淡水湖沼氷、オホーツク海の海水を用いた強度試験から、氷盤の力学的性質を把握する。

②これまでの氷力評価において考慮されていない次の点を検討する。

a) 氷盤と構造物の不完全接触時における氷盤の破壊荷重, b) 構造物前面の氷盤の非同時的破壊時における氷盤の破壊荷重, c) 氷厚が非一様な場合の氷盤の破壊荷重。

③多脚杭で構成される海洋構造物に作用する全体水平氷力の算定法を示す。

本論文は、全7章で構成されている。

第2章では、第一に、氷の力学特性値（氷の圧縮強度、曲げ強度、引張強度、せん断強度、弾性定数、ポアソン比、破壊靱性値）の現状を把握した。第二に、これまでに提案された氷力評価式の現状を把握した。第三に、北極海（チャクチ海）の海水、北海道の淡水湖沼水、オホーツク海の海水を用いた室内圧縮試験、室内曲げ試験、室内・現位置破壊靱性試験の結果を示した。

第3章では、氷盤先端部の形状不規則性が構造物の作用する氷力に与える効果を北海道の淡水湖沼水を用いた小型杭・大型杭によって現地氷盤貫入試験から検討した。ここでは、3種類の氷盤先端部の不規則形状を考慮し、各々の場合について全氷力を理想条件下の全氷力と比較した。この結果、氷盤先端部の形状が不規則な場合、全氷力は低減する。これは、貫入杭が氷盤と接触した後、初期氷力（最大氷力）が発生するまでに必要な貫入量（必要貫入量）よりも大きい凸凹が氷盤先端部にある場合、初期氷力が発生せずに氷盤の非同時的破壊に起因する継続氷力のみが発生するためである。この必要貫入量は、氷厚及び氷の強度が大きくなるに伴って小さくなる。本実験データに基づくと、必要貫入量は2～6 cm（氷厚が6.5～8.8 cm、氷の圧縮強度が4.74～4.88 (MPa)）となるため、実海域の氷盤先端部に僅かな凸凹があると氷盤は非同時的な破壊をする。また、氷盤先端部の水平方向形状は、上空写真から容易に判断出来る。

第4章では、北海道の淡水湖沼水を用いた現地氷盤貫入量試験結果を基に、氷盤の非同時的破壊に起因する継続氷力の時系列特性を詳細に調べた。この結果から、氷盤と構造物の接触状態の確率分布と局部氷圧力値の確率分布に基づいて、構造物幅、氷厚、非拘束時の氷の一軸圧縮強度の関数として、非同時的破壊時の全氷力の算定式を提案した。この提案式から推定された全氷力値とシリンダー内圧から実測全氷力値は良く符合することが知られた。また、Sanderson の pressure area - curve と良く対応し、非拘束時の氷の一軸圧縮強度が10Mpa かつ1%超過確率値の時には、実測データの上限值は予測値を越えず、予測値の実用性が確認された。また、Ashby らの提案式と同様に、本式は氷の破壊強度の寸法依存性を表現している。本実験データに基づくと、各独立破壊領域の局部氷圧力値が対数正規分布に従わなかった。このため、Kry のモデルで要求されている仮定は成立しないことが知られた。

第5章では、氷厚の非一様性が氷の強度に与える効果を、変断面梁の理論・有限要素解析・北極海の実氷を用いた圧縮試験により検討した。計算結果から、氷厚が非一様な氷の強度は、氷厚

変化の度合と載荷圧縮幅に強く影響を受ける。また、北極海の実氷を用いた実験結果から、氷の変形様式、破壊様式を氷厚変化の度合と載荷圧縮幅に応じて示した。これらの氷力と関連させるためには、実海域の氷厚分布の簡易的な測定法の確立及び3次元の氷厚分布の強度評価が今後必要となる。

第6章では、単杭に作用する氷力の既存の評価法を組み合わせることによって、多脚杭形式の構造物に作用す全氷力の算定が可能であることを示した。また、各杭には時差を伴って氷力が作用することに注目し、①初期氷力のみの場合、②初期氷力と継続氷力が作用する場合の両方を検討した。初期氷力と継続氷力を考慮した場合の本計算結果と多脚杭モデルを用いた既往の実験結果を比較し、良く対応することが知られた。また、アラスカクック湾の典型的な氷象条件を考慮し、4本脚・9本脚構造物の全氷力の算定法と計算結果を示した。

第7章では、各章の主たる結果をまとめ、次に、氷海構造物に作用する設計氷力の評価法について言及した。最後に、今後の課題を示した。

以上、本研究は、氷海構造物に作用する氷力の評価を、実海域の氷象条件を取り入れて評価したものである。

学位論文審査の要旨

主査	教授	佐伯	浩
副査	教授	板倉	忠興
副査	教授	藤田	睦博
副査	教授	佐伯	昇

極地海洋における、化石燃料等の開発のために建設される構造物は、厳しい環境条件に耐えうるだけの安全性が要求される。しかし、海水によって構造物の伝達される力についての理解が不十分であることが、構造物の設計を行う上での大きな障害となっているのが現状である。これは、設計で考慮すべき海水の物性値、構造物と海水間の相互作用時の氷盤の破壊についての理解不足、及びこれらが同時に評価されていないことが大きな原因となっているためである。

従来の氷力評価に関する研究では、氷と構造物が理想的な条件下で相互作用した時の構造物に伝達される最大氷力（初期氷力）を氷力として評価されてきた。しかし、実海域の氷盤先端部の

形状は非常に不規則であること、構造物と氷盤の接触部における氷盤の破壊は非同時的であること、実氷野の氷厚は、pressure ridge・多年氷・lead ice の存在から非一様であること等、実海域の氷盤状態を考慮した水力評価が望まれていた。このため、本研究の目的は以下の通りである。

①氷の力学特性及び水力の現況を既往の文献から把握する。また、北極海の海水、北海道の淡水湖沼氷、オホーツク海の海水を用いた強度試験から、氷盤の力学的性質を明らかにする。

②これまでの水力評価において考慮されていない次の点を検討する。

a) 氷盤と構造物の不完全接触時における氷盤の破壊荷重、b) 構造物前面の氷盤の非同時的破壊時における氷盤の破壊荷重、c) 氷厚が非一様な場合の氷盤の破壊荷重。

③多脚杭で構成される海洋構造物に作用する全体水平水力の算定法を示す。

本論文は、全7章で構成されている。

第2章では、第一に、氷の力学特性値（氷の圧縮強度、曲げ強度、引張強度、せん断強度、弾性定数、ポアソン比、破壊靱性値）の現状を把握した。第二、これまでに提案された水力評価式の現状を把握した。第三に、北極海（チャクチ海）の海水、北海道の淡水湖沼氷、オホーツク海の海水を用いた室内圧縮試験、室内曲げ試験、室内・現位置破壊靱性試験の結果を示した。

第3章では、氷盤先端部の形状不規則性が構造物の作用する水力に与える効果を現地氷盤貫入試験から検討した。ここでは、3種類の氷盤先端部の不規則形状を考慮し、各々の場合について全水力を理想条件下の全水力と比較した。この結果、氷盤先端部の形状が不規則な場合、全水力は低減する。これは、貫入杭が氷盤と接触した後、初期水力（最大水力）が発生するまでに必要な貫入量（必要貫入量）よりも大きい凸凹が氷盤先端部にある場合、初期水力が発生せずに氷盤の非同時的破壊に起因する継続水力のみが発生するためであることを明らかにした。この必要貫入量は、氷厚及び氷の強度が大きくなるに伴って小さくなることを明らかにし、実海域の氷盤エッジ部の僅かな凸凹で氷盤は非同時的な破壊をすることを証明した。

第4章では、現地氷盤貫入量試験結果を基に、氷盤の非同時破壊に起因する継続水力の時系列特性を詳細に調べた。この結果から、氷盤と構造物の接触状態の確率分布と局部氷圧力値の確率分布に基づいて、構造物幅、氷厚、非拘束時の氷の一軸圧縮強度の関数として、非同時的破壊時の全水力の算定式を提案した。この提案式から推定された全水力値とシリンダー内圧から実測全水力値は良く符合することが明らかとなった。また、Sanderson の pressure area - curve と良く対応し、非拘束時の氷の一軸圧縮強度が10Mpa かつ1%超過確率値の時には、実測データの上限值は予測値を越えず、予測値の実用性が確認された。また、Ashby らの提案式と同様に、

本式は氷の破壊強度の寸法依存性を表現している。また、各独立破壊領域の局部氷圧力値が対数正規分布に従わなかった。このため、Kry のモデルで要求されている仮定は成立しないことが知られた。

第5章では、氷厚の非一様性が氷の強度に与える効果を、変断面梁の理論・有限要素解析、および北極海の実氷を用いた圧縮試験により検討した。計算結果から、氷厚が非一様な氷の強度は、氷厚変化の度合と載荷圧縮幅に強く影響を受けることを明らかにした。また、北極海の実氷を用いた実験結果から、氷の変形様式、破壊様式を氷厚変化の度合と載荷圧縮幅に応じて示した。

第6章では、3章と4章での成果にもとづき、単杭に作用する氷力を組み合わせることによって、多脚杭形式の構造物に作用する全氷力の算定が可能であることを示した。各杭には時差を伴って氷力が作用することに注目し、初期氷力と継続氷力を考慮した場合の本計算結果と、多脚杭モデルを用いた既往の実験結果を比較し、良く対応することを明らかにした。

第7章では、各章の主たる結果をまとめ、次に、氷海構造物に作用する設計氷力を評価法について言及した。最後に、今後の課題を示した。

これを要するに、著者は氷海域に建設される直立構造物に作用する氷力を明らかにしたもので、氷工学、海洋工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。