

学位論文題名

# 幅広鉛直壁氷海構造物に作用する氷荷重と 振動特性に関する研究

## 学位論文内容の要旨

アラスカのクック湾や渤海湾に設置されたジャケット式構造物などの細長い柱状の構造物に氷板が押し寄せると、氷板がある大きさと順次破壊し、周期的に外力が加わる結果、構造物が振動を引き起こすことは、1960年代から広く認識されていた。

一方、北極海のポーフォート海では、水深の浅い沿岸部ではオイル価格の高騰と相俟って、1980年中葉、一辺が約100m、重量が数十万トンのオーダーに達する巨大な土塁式構造物(Caisson Retained Island)や重力式構造物(Gravity Based Structure)が建造された。これらの多くは鉛直壁を有する幅広の構造物である。

これらの大質量の構造物では、振動が発生することは予見されていなかった。静的な荷重のみを評価基準とした設計が採用されていた。この中の一つの Molikpaq は、1986年の春、設計時には予見されていなかった、氷との相互作用による深刻な振動に見舞われケーソン内部の土が液状化を起こす寸前であった報告されている。また、公表されていないが鉛直壁を有する氷海構造物である SSSC, CIDS も Molikpaq ほどの深刻な振動ではないが振動が発生したと言われている。北極海で経験されたこれらの事象から、大型の鉛直壁構造物もある条件下では、振動が発生することが広く認識されるようになった。特に、大きな振動と氷荷重が発生する時に観察される、構造物の幅方向の離れた複数箇所での荷重の位相が一致する同時破壊(Simultaneous Failure)が発生する条件を明確にすることが安全評価上、必要である。鉛直壁は円錐状の傾斜壁構造物と比較すると形状が単純なことから建造が容易であり、コスト面から優位性があり、今後も氷海域での使用が期待されるが振動発生に伴う評価と、その対策が重要な課題として認識されている。

本研究は、幅広の鉛直壁構造物に作用する氷荷重と振動特性を合理的に推定する手法を提言し、実機設計に反映することを目的とした。

氷荷重の因子となる構造物の幅、氷厚の他、振動発生の主たる因子となる剛性、貫入速度、局所的な破壊モデルなど多数のパラメーターを反映させる必要がある。本研究では実験的な研究と数学的モデルとの組み合わせにより、最終的には、氷荷重推定プログラムを作成し、実機設計に適用することにした。

実験的な研究としては、主として氷海水槽と低温試験室を活用し、鉛直壁構造物の基本的な挙動を観察整理した。氷海水槽試験では尿素を添加した粒状結晶の模型氷を使用した。模型氷の強度特性は、鉛直構造物の破壊時に発生する実際の海水の複雑な圧壊現象の細部まで相似とは言い難いところがあるが、実験結果は、振動と荷重の定性的な把握には有用である。

先ずは、実験的な研究の第一段階として、高剛性の貫入モデルにより、構造物の幅と氷厚の関係、構造物の形状などの差を確認するために、5種類の貫入モデルを用いて64ケースの及ぶ一連の試験を実施した。次の段階として、貫入モデルの幅は一定とし、剛性を3段階に変え74ケースの実験を行い、振動、荷重特性と貫入速度、剛性の関係を明確にした。試験では貫入モデルの前面には分割荷重パネルを取り付け、荷重の分布特性、パネル間の相関などが観察できるようにした。

氷海水槽試験では、フレーキングと呼ばれる破壊モードが起きていることは解るが、試験体の前に堆積する氷片に妨げられて、直接破壊現象が観察できない。観察を容易にするために、氷板を縦に置き、破壊した氷片が落下する機構とし、フレーキング現象を直接確認する試験を低温試験室にて行った。実験結果から；

- 1)同時破壊をとまなう大きな振動は、貫入速度が遅いほど、また構造物の剛性が低いほど発生しやすい。剛性が強い鉛直壁構造物は同時破壊が発生しにくい。
- 2)鉛直壁と氷板の相互作用時の氷板破壊はフレーキングをとまなう圧壊モードが卓越する。またフレーキングの長さは、貫入速度が速くなると小さくなり、剛性が高いほど短くなる。
- 3)同時破壊のメカニズムは載荷フェーズのあとに生じるスプリングバックの距離によって、説明できる。スプリングバックの距離が大きくなると、載荷時の損傷領域をスムーズにする作用がある。従って、スプリングバックが大きい場合は定常振動でも、同時破壊が発生する。

などが分った。氷厚に対するスプリングバックの距離が実機と模型試験で同程度であれば、同時破壊の発生する領域は、近似的には、実験結果から導出した無次元のコンプライアンス係数 $C_0$ により予見できることを示した。

構造物の運動方程式、氷板の剛体運動方程式、弾性変形方程式から、氷荷重及び振動を時刻暦として、シミュレーションが出来る数値計算プログラムを作成した。幅広構造物を氷厚とほぼ等しいセグメントに分割し、各セグメントと氷板の間の相対変位と呼ぶ貫入量から、各セグメントの局部荷重を近似的に計算するモデルを、実験的な研究成果を反映して作成した。氷厚方向には5～7層に分割するレイヤーモデルを提案した。前述した剛性を変更して実施した氷海水槽試験結果と本氷荷重推定プログラムによる計算結果を比較し、両者が良く一致することを確認した。同時破壊の発生する範囲は近似的には、 $C_0$ により予見できるが、同時破壊の条件は、構造物の剛性、地盤の剛性、氷板の氷厚、剛性、強度、速度など多くの因子が関係していることから、実機設計上からは、本氷荷重推定プログラムにより振動、荷重の応答を計算し、与えられた設計環境条件下で同時破壊の発現する頻度を予見することが安全評価上必要である。

また実機による検証として、氷荷重推定プログラムを1986年のMolikpaqで観察された同時破壊の事例に適用し、ほぼ現象が定性的にも定量的にも本プログラムにより予見できることを示した。

更に、中規模の重力式鉛直壁構造物を例題にして、地盤剛性、氷板の移動速度をパラメータとし一連の計算を行い、同時破壊の発生する領域と氷板の移動速度の関係、剛性と全体荷重の関係などについて考察し、設計上、留意すべき事項を取りまとめた。

同時破壊が発生すると、全体荷重は非同時破壊時と比べると約7割程度増加する可能性があることを示した。また、設計的な観点からは、同時破壊を避けるほうが好ましいが、同時破壊を避けるためには、基本的には地盤を含めた構造物の剛性を高くする必要がある。同時破壊が発生するような氷況または地盤条件の場合、同時破壊が発現する頻度を予見し、繰り返し荷重による地盤の安定性について検討する必要がある。また同時破壊時の全体荷重、局部荷重に基づく構造設計が必要である。

一連の検証により、一様厚さの氷板に対しては、開発した氷荷重推定プログラムは設計上も十分実用的なレベルに達したと言える。最後に将来課題として、リッジ荷重に対する予備的な試験結果についても言及した。現在開発が進みつつあるサハリン海域では、氷片が山状に堆積したリッジが最大荷重を与えられていると言われており、本氷荷重推定プログラムをリッジ問題へ拡張していく必要があると考える。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 伯 浩  
副 査 教 授 藤 田 睦 博  
副 査 教 授 板 倉 忠 興  
副 査 教 授 三 上 隆

学 位 論 文 題 名

## 幅広鉛直壁氷海構造物に作用する氷荷重と 振動特性に関する研究

北極海のポーフォート海では、水深の浅い沿岸部ではオイル価格の高騰と相俟って、1980年中葉、一辺が約 100m、重量が数十万トンのオーダーに達する巨大な土塁式構造物(Caisson Retained Island)や重力式構造物(Gravity Based Structure)が建造された。これらの多くは鉛直壁を有する幅広の構造物である。

これらの大質量の構造物では、振動が発生することは予見されていなかったため、静的な荷重のみを評価基準とした設計が採用されていた。この中の一つの Molikpaq は、1986 年の春、設計時には予見されていなかった、氷との相互作用による深刻な振動に見舞われケーソン内部の土が液状化を起こす寸前であった報告されている。北極海で経験されたこれらの事象から、大型の鉛直壁構造物も、ある条件下では、振動が発生することが広く認識されるようになった。鉛直壁は円錐状の傾斜壁構造物と比較すると形状が単純なことから建造が容易であり、コスト面から優位性があり、今後も氷海域での使用が期待されるが振動発生に伴う評価と、その対策が重要な課題として認識されている。

以上のことより本論文は、幅広の鉛直壁構造物に作用する氷荷重と振動特性を合理的に推定する手法を提言し、実機設計に反映することを目的としたものである。

氷荷重の因子となる構造物の幅、氷厚の他、振動発生の主たる因子となる剛性、貫入速度、局所的な破壊モデルなど多数のパラメーターを反映させる必要があるが、本論文では実験的な研究と数学的モデルとの組み合わせにより、最終的には、氷荷重推定プログラムを作成し、実機設計に適用している。実験的な研究としては、主として氷海水槽と低温試験室を活用し、鉛直壁構造物の基本的な挙動を観察整理して、氷海水槽試験では最新の技術である尿素有添加した粒状結晶の模型氷を使用した。

実験的な研究の第一段階として、高剛性の貫入モデルにより、構造物の幅と氷厚の関係、構造物の形状などの差を確認するために、5種類の貫入モデルを用いて 64 ケースの及ぶ一連の試験を実施した。次の段階として、貫入モデルの幅は一定とし、剛性を3段階に変え 74 ケースの実験を行い、振動、荷重特性と貫入速度、剛性の関係を明確にした。試験では貫入モデルの前面には分割荷重パネルを取り付け、荷重の分布特性、パネル間の相関などが

解析できるようにしている。氷海水槽試験では、フレーキングと呼ばれる破壊モードが起きていることは解るが、試験体の前に堆積する氷片に妨げられて、直接破壊現象が観察できない。観察を容易にするために、氷板を縦に置き、破壊した氷片が落下する機構とし、フレーキング現象を直接確認する試験を低温試験室にて行い、実験結果から以下の結論を得た。

- 1)同時破壊をともなう大きな振動は、貫入速度が遅いほど、また構造物の剛性が低いほど発生しやすい。剛性が強い鉛直壁構造物は同時破壊が発生しにくい。
- 2)鉛直壁と氷板の相互作用時の氷板破壊はフレーキングをともなう圧壊モードが卓越する。またフレーキングの長さは、貫入速度が速くなると小さくなり、剛性が高いほど短くなる。
- 3)同時破壊のメカニズムは載荷フェーズのあとに生じるスプリングバックの距離によって、説明できる。スプリングバックの距離が大きくなると、載荷時の損傷領域をスムーズにする作用がある。従って、スプリングバックが大きい場合は定常振動でも、同時破壊が発生する。

氷厚に対するスプリングバックの距離が実機と模型試験で同程度であれば、同時破壊の発生する領域は、近似的には、実験結果から導出した無次元のコンプライアンス係数  $C_0$  により予見できることを示した。

さらに、構造物の運動方程式、氷板の剛体運動方程式、弾性変形方程式から、氷荷重及び振動を時刻暦として、シミュレーションが出来る数値計算プログラムを作成した。幅広構造物を氷厚とほぼ等しいセグメントに分割し、各セグメントと氷板の間の相対変位と呼ぶ貫入量から、各セグメントの局部荷重を近似的に計算するモデルを、実験的な研究成果を反映して作成した。氷厚方向には5～7層に分割するレイヤーモデルを提案し、前述した剛性を変更して実施した氷海水槽試験結果と本氷荷重推定プログラムによる計算結果を比較し、両者が良く一致することを確認した。同時破壊の発生する範囲は近似的には、 $C_0$  により予見できるが、同時破壊の条件は、構造物の剛性、地盤の剛性、氷板の氷厚、剛性、強度、速度など多くの因子が関係していることから、実機設計上からは、本研究より開発された、氷荷重推定プログラムにより振動、荷重の応答を計算し、与えられた設計環境条件下で同時破壊の発現する頻度を予見することが安全評価上必要であることも明らかにした。また実機による検証として、氷荷重推定プログラムを1986年のMolikpaqで観察された同時破壊の事例に適用し、実現象が定性的にも定量的にも本プログラムにより予見できることを示した。

更に、中規模の重力式鉛直壁構造物の詳細な研究成果を基にして、地盤剛性、氷板の移動速度をパラメーターとし一連の計算を行い、同時破壊の発生する領域と氷板の移動速度の関係、剛性と全体荷重の関係などについて考察し、設計上、留意すべき事項を取りまとめた。また、同時破壊が発生すると、全体荷重は非同時破壊時と比べると約7割程度増加する可能性があること、設計的な観点からは、同時破壊を避けるほうが好ましいが、同時破壊を避けるためには、基本的には地盤を含めた構造物の剛性を高くする必要があることを明らかにした。一連の検証により、一様厚さの氷板に対しては、開発した氷荷重推定プログラムは設計上も十分実用的なレベルに達したと言える。

これを要するに、著者は氷海域に建設される幅広鉛直壁氷海構造物に作用する氷荷重と振動特性に関する多くの知見を得たものであり、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。