

寒冷地の水理構造物に作用する鉛直方向氷荷重に関する研究

学位論文内容の要旨

寒冷地に建設される水理構造物は氷との相互作用において種々の影響を受けている。すなわち、海洋、河川、湖沼、ダム湖に建設されている直立構造物、例えば、栈橋、ドルフィン、係船杭、岸壁、石油掘削リグ、橋脚、護岸、取水塔などの構造物には、潮汐、ダムの水位調節、融雪などに伴う水位の変動があると構造物の上下方向に鉛直方向氷荷重が作用する場合がある。水位が上昇する場合には鉛直上向きに氷荷重が作用し、実際に我が国においても、水位観測塔がこのような力で引き抜かれたことがあるし、このような被害が米国の五大湖などの栈橋でもよく発生する。また、水位が下降する場合には鉛直下向きの氷荷重が作用し、我が国において、ダムの取水塔がこのような力により倒壊したことがある。したがって、寒冷地の水域に直立構造物を設計する際には、この鉛直方向氷荷重を十分に考慮する必要がある。

この鉛直方向氷荷重について、Kerr は氷盤を等方弾性体の無限に大きな薄い平板と仮定して、円形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の理論式を示している。この Kerr の算定方法によれば、水位変動量が増加すれば構造物に作用する氷荷重も無限に増加することになる。しかし、氷荷重は水位変動量に比例して無限に増加するわけではなく、実際には水位変動量がある量に達すると、氷盤の曲げ破壊や構造物と氷盤との接触面での凍着破壊が発生する。したがって、いずれかの破壊が起これば、その時点の氷荷重が最大となる。つまり、この最大氷荷重に構造物の基礎の支持力あるいは構造物自体の強度が耐えられるならば、前述のような被害は生じない。安全かつ経済的な構造物を設計するためには、この曲げ破壊と凍着破壊が考慮された鉛直方向氷荷重をより精度よく推定することが極めて重要である。佐伯、中澤等により上述した曲げ破壊と凍着破壊を考慮した氷荷重の算定方法が提案されているが、氷盤の破壊過程や構造物の断面形状や構造形式などを考慮した鉛直方向氷荷重の算定方法は未だ体系化されていないのが現状である。更に、鉛直方向氷荷重に関する小規模な室内実験と凍着強度に着目した野外での引き抜き試験は過去にも実施されているが、実規模での野外実験の実施例は著者等の網走湖での実験を除いてない。したがって、これまでは鉛直方向氷荷重の算定方法の妥当性は実証されていなかったと言っても過言ではない。

このような背景を鑑み、本研究は、氷盤の破壊過程を考慮して、直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の新しい算定方法を導出し、著者の理論の妥当性を初めての実規模での野外実験により検証することを目的としてしている。

第1章は本論文の序論であり、本研究の背景と目的について述べるとともに、本論文の構成と本研究と関連した過去の研究成果のレビューを行った。さらに、本論文の主題である鉛直方向氷荷重による水理構造物の被害例についても述べる。

第2章では、単独の直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の算定方法について述べる。まず、円形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の算定方法について、過去の研究を

レビューすることにより、氷荷重の算定方法の課題を明確にするとともに、単独の円形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の算定方法を、弾性床上の無限薄肉平板理論を用いて示した。また、曲げ破壊及び凍着破壊の破壊形態と破壊の過程、氷盤の構造物への凍着の有無、フラッキングの有無、さらに構造形式（直立型、コーン型、逆コーン型）等を考慮することにより、氷荷重の算定方法を体系化した。

さらに、写像関数を用いて円形断面の問題に帰着させる手法により、楕円形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の理論解を初めて求めるとともに、その計算手法を示した。また、正方形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重については、実験より得られた破壊形態を考慮して、新しい算定方法を示した。

第3章では、多脚構造物と直立壁に作用する鉛直方向氷荷重の理論的な算定方法に関して、まず過去の研究をレビューすることにより、多脚構造物と直立壁に作用する鉛直方向氷荷重の理論的な算定方法についての課題を明確にした。次に、円形断面の杭状構造物が2本の場合と4本の場合及びn本の場合について、杭間隔と各杭に作用する氷荷重の関係から、複数杭の相互作用の効果を明らかにするとともに、多脚構造物に作用する鉛直方向氷荷重の算定方法を示した。さらに、フラッキングの有無と氷盤の破壊過程を考慮することにより、直立壁に作用する氷荷重の系統的な算定方法を示した。

第4章では、鉛直方向氷荷重を決定づける最も重要な物性値である凍着強度と曲げ強度についてまず、氷と諸材料間の凍着試験と氷の曲げ試験に関する過去の研究をレビューすることにより、過去の実験手法及び実験結果についての課題を明確にした。凍着強度試験においては、実規模に近い、 $1 < 2a/h < 4$ （ a は杭径、 h は氷厚）の範囲において淡水氷に関する凍着試験を実施することにより、 $1 < 2a/h$ において凍着強度は急激に低下し、その後、一定値に近づくことを明らかにするとともに、実用的な凍着強度を求めた。また、淡水氷に関する曲げ試験を実施することにより、氷盤の曲げ強度特性を明らかにした。

第5章では、初めての杭の引き抜きに関する実規模での野外実験と、ジャケット型（4本杭）の杭構造物に作用する氷荷重に関する野外実験を行い、鉛直方向氷荷重に関する野外実験と室内実験に関する過去の研究をレビューすることにより、過去の実験における課題と問題点を明確にした。

さらに、初めての実規模での杭の引き抜きに関する野外実験を実施することにより、第2章で示した単一の杭状構造物に作用する鉛直方向氷荷重の理論解析の妥当性を初めて実証するとともに、氷盤の破壊のプロセスと基本的な破壊パターンを明らかにした。さらに、ジャケットタイプの構造物の引き抜きに関する野外実験を実施することにより、第3章で示した多脚構造物に作用する鉛直方向氷荷重の理論解析の妥当性と、氷盤の破壊パターンを実証した。また、著者らが導いた理論と計算法を用いて実際の氷海域に建設された杭構造物に作用する鉛直方向氷荷重を考慮した試設計を示した。最後に、以上の理論解析と実験により得られた知見から、鉛直方向氷荷重の低減方法について考察し、具体的な手法を提案した。

第6章では、本研究全般のとりまとめを行い、主要な結論を述べるとともに、今後の展望と課題について述べた。

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 藤 田 睦 博
副 査 助 教 授 山 下 俊 彦

学 位 論 文 題 名

寒冷地の水理構造物に作用する鉛直方向氷荷重に関する研究

寒冷地に建設される水理構造物は種々の氷の影響を受けている。すなわち、海洋、河川、湖沼、ダム湖に建設されている直立構造物、例えば、栈橋、ドルフィン、係船杭、岸壁、石油掘削リグ、橋脚、護岸、取水塔などの構造物には、潮汐、ダムの水位調節、融雪などに伴う水位の変動があると構造物の上下方向に鉛直方向氷荷重が作用する場合がある。水位が上昇する場合には鉛直上向きに氷荷重が作用し、実際に我が国においても、水位観測塔がこのような力で引き抜かれたことがあるし、米国の五大湖などの栈橋でもよく同様の被害が発生する。また、水位が下降する場合には鉛直下向きの氷荷重が作用し、我が国において、ダムの取水塔がこのような力により倒壊したことがある。したがって、寒冷地の水域に直立構造物を設計する際には、この鉛直方向氷荷重を十分に考慮する必要がある。

この鉛直方向氷荷重について、Kerr は氷盤を等方弾性体の無限に大きな薄い平板と仮定して、円形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の理論式を示している。この算定方法によれば、水位変動量が増加すれば構造物に作用する氷荷重も無限に増加することになる。しかし、実際には水位変動量がある量に達すると、氷盤の曲げ破壊や構造物と氷盤との接触面での凍着破壊が発生する。したがって、いずれかの破壊が起これば、その時点の氷荷重が最大となる。つまり、この最大氷荷重に構造物の基礎の支持力あるいは構造物自体の強度が耐えられるならば、前述のような被害は生じない。安全かつ経済的な構造物を設計するためには、この曲げ破壊と凍着破壊が考慮された鉛直方向氷荷重をより精度よく推定することが極めて重要である。

このような背景を鑑み、本研究は、氷盤の破壊過程を考慮して、直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の新しい算定方法を導出し、著者の理論の妥当性を初めての実規模での野外実験により検証することを目的としてしている。

第1章は本論文の序論であり、本研究の背景と目的について述べるとともに、本論文の構成と本研究と関連した過去の研究成果のレビューを行った。さらに、本論文の主題である鉛直方向氷荷重による水理構造物の被害例についても述べている。

第2章では、単独の直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の算定方法について述べている。まず、円形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の算定方法について、

過去の研究をレビューすることにより、氷荷重の算定方法の課題を明確にするとともに、単独の円形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の算定方法を、弾性床上の無限薄肉平板理論を用いて示した。また、曲げ破壊及び凍着破壊の破壊形態と破壊の過程、氷盤の構造物への凍着の有無、フラッディングの有無、さらに構造形式（直立型、コーン型、逆コーン型）等を考慮することにより、氷荷重の算定方法を体系化した。

さらに、写像関数を用いて円形断面の問題に帰着させる手法により、楕円形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重の理論解を初めて求めるとともに、その計算手法を示した。また、正方形断面を有する直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重については、実験より得られた破壊形態を考慮して、新しい算定方法を示した。

第3章では、多脚構造物と直立壁に作用する鉛直方向氷荷重の理論的な算定方法に関して、まず過去の研究をレビューすることにより、多脚構造物と直立壁に作用する鉛直方向氷荷重の理論的な算定方法についての課題を明確にした。次に、円形断面の杭状構造物が2本の場合と4本の場合及びn本の場合について、杭間隔と各杭に作用する氷荷重の関係から、複数杭の相互作用の効果を明らかにするとともに、多脚構造物に作用する鉛直方向氷荷重の算定方法を示した。さらに、フラッディングの有無と氷盤の破壊過程を考慮することにより、直立壁に作用する氷荷重の系統的な算定方法を示した。

第4章では、鉛直方向氷荷重を決定づける最も重要な物性値である凍着強度と曲げ強度についてまず、氷と諸材料間の凍着試験と氷の曲げ試験に関する過去の研究をレビューすることにより、過去の実験手法及び実験結果についての課題を明確にした。凍着強度試験においては、実規模に近い $1 < 2a/h < 4$ （aは杭径、hは氷厚）の範囲において淡水氷に関する凍着試験を実施することにより、 $1 < 2a/h$ において凍着強度は急激に低下し、その後、一定値に近づくことを明らかにするとともに、実用的な凍着強度を求めた。また、淡水氷に関する曲げ試験を実施することにより、氷盤の曲げ強度特性を明らかにした。

第5章では、初めての杭の引き抜きに関する実規模での野外実験と、ジャケット型（4本杭）の杭構造物に作用する氷荷重に関する野外実験を行い、鉛直方向氷荷重に関する野外実験と室内実験に関する過去の研究をレビューすることにより、過去の実験における課題と問題点を明確にした。

さらに、初めての実規模での杭の引き抜きに関する野外実験を実施することにより、第2章で示した単一の杭状構造物に作用する鉛直方向氷荷重の理論解析の妥当性を初めて実証するとともに、氷盤の破壊のプロセスと基本的な破壊パターンを明らかにした。さらに、ジャケットタイプの構造物の引き抜きに関する野外実験を実施することにより、第3章で示した多脚構造物に作用する鉛直方向氷荷重の理論解析の妥当性と、氷盤の破壊パターンを実証した。また、著者らが導いた理論と計算法を用いて実際の氷海域に建設された杭構造物に作用する鉛直方向氷荷重を考慮した試設計を示した。最後に、以上の理論解析と実験により得られた知見から、鉛直方向氷荷重の低減方法について考察し、具体的な手法を提案した。

第6章では、本研究全般のとりまとめを行い、主要な結論を述べるとともに、今後の展望と課題について述べた。

これを要するに、著者は、種々の断面形状を有する各種構造形式の水理構造物に作用する鉛直方向氷荷重について、氷盤の破壊形態を考慮した氷荷重の理論式を導出するとともに、実規模での実験結果により、理論の妥当性の検証を行った。さらに、得られた理論に

基づいて、氷荷重低減方法を提案するなど、寒地海洋工学及び氷工学へ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。