

鉛直方向氷力に及ぼす断面形状と凍着強度の影響に関する研究

Effects of Various Cross-sections and Adfreeze Bond Strength on Vertical Ice Load

寺島貴志*, 犬塚勉*, 成田恭一**, 本田秀樹***, 大島香織****, 宇佐美宣拓****, 佐伯浩*****

Takashi Terashima, Tsutomu Inuzuka, Kyo-ichi Narita, Hideki Honda, Kaori Oshima, Norihiro Usami, Hiroshi Saeki

In cold regions, ice sheets adfreeze to pile structures constructed in the sea. Due to changes in the water level, vertical ice loads act on the structures. These ice loads need to be considered to design pile structures affected by ice sheets.

Ice loads acting on pile structures with circular cross-sections have been explained analytically. However, ice loads acting on pile structures with other cross-sections have never been researched. In this report, we study ice loads acting on pile structures with elliptical or rectangular cross-sections theoretically and experimentally. Furthermore we consider effects of various cross-sections and adfreeze bond strength.

Keywords: vertical ice load, cross-sections of pile structures, adfreeze bond strength

1. はじめに

寒冷地の水域に建設された直立構造物に氷盤が凍着している状態で、潮汐などに伴う水位変動があると、構造物に鉛直上下方向の氷力が作用する。水位変動量（氷盤のたわみ量）が増加すると、鉛直方向氷力も増加するが無限に増加するわけではなく、水位変動量がある一定量に達すると氷盤は破壊し、この時の氷力が最大となる。氷盤破壊時の形態は曲げにより氷盤が放射状と同心円状に割れる曲げ破壊と、構造物と氷盤との界面で剥離する凍着破壊の2つに大別できる。過去に、鉛直方向氷力により栈橋の固定杭が引か抜かれたり座屈する被害や、水位観測塔や取水塔が倒壊する被害が米国の五大湖や我国で発生している。しかし、著者らの実験的研究を除いて、これらの被害の原因解明のための実規模での実験例はほとんどないのが現状である。本研究では、1997年及び1998年1月に実規模での野外実験を実施し、著者等が求めた理論的な鉛直方向氷力の算定結果と比較することにより、断面形状と凍着強度が与える氷力への影響について考察するものである。

2. 野外実験

2. 1 実験方法

1997年1月と1998年1月に、潮汐の影響を受けない網走湖の呼人漁港で実規模の野外実験を行った。実験に使用した模型杭は直径21.6, 50.8及び80.0cmの3種類の円断面杭、扁平率が1/2と1/3で断面積が等しい2種類の楕円断面杭、辺長が19.2, 45.0及び70.9cmの3種類の正方形断面杭である。以下に、実験の手順を示す。

1) 漁港内の水面が凍結する前に、理論的に岸壁の影響を受けないように岸壁から10m程度離してモデル杭を浮置した。

2) 港内が完全に結氷して、杭に氷盤が凍着し氷温が安定している夕方から深夜にかけて、図1に示すように、杭を鉛直方向に速度0.13~0.20mm/sec (46.8~72.0cm/hr) でクレーンで引き上げた。これは実現象における潮汐による水位変動速度よりやや大きい値である。この時に、クレーンと杭との間にロードセルを介して杭の引き抜き力（鉛直方向氷力に相当）を計測した。同時に、杭の設置地点、設置地点より2m、4mの3地点において、5秒間隔で杭の変位とその周囲の氷盤の変位（水位変動量に相当）をレベルで計測した。

3) 氷盤の曲げ破壊または氷盤と杭の凍着破壊が起こり、杭が完全に引き抜かれるまで計測を継続した。この間に、曲げ破壊時の氷盤からの発生音と氷盤のクラックパターンを目視とビデオ撮影により観察した。

現場の氷盤から直方体の供試体（供試体寸法：15cm×15cm×100cm）を切り出して、単純桁の3点曲げ試験から曲げ弾性率と曲げ強度を求めた。また、同時に現場の氷厚を計測した。

* 正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）（札幌市北区北7条西1丁目NSS・ニューステージ札幌）

** 正会員 島田建設（株）

*** 正会員 日本鋼管（株）

**** 学生会員 北海道大学大学院

***** 正会員 北海道大学工学部

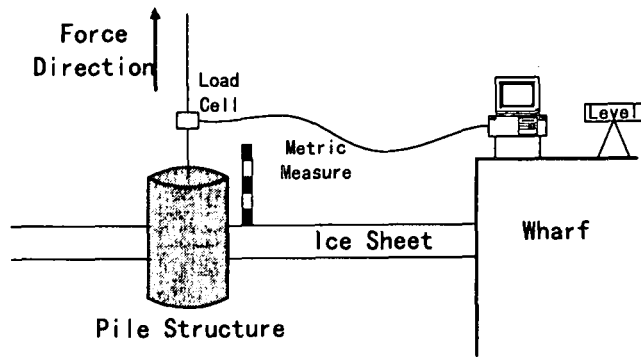


図1 野外実験の状況図

2. 2 実験ケース

模型杭は、断面形状を円形、楕円形及び正方形の3種類とし、扁平率 ($K=l_2/l_1$)、断面積及び周長（模型杭と氷盤との接触面積）による鉛直方向氷荷重への影響を調べるために、表1に示す8種類の模型杭を実験に用いた。これらの杭を用いて1997年には9ケース、1998年には12ケースの実験を実施した。

表1 模型杭の諸元

断面形状	径・辺長 (cm)	扁平率 K	断面積 (cm^2)	周長 (cm)
円形	$a=10.8$	1	366	68
円形	$a=25.4$	1	2027	160
円形	$a=40.0$	1	5027	251
楕円形	$l_1=138.6, l_2=46.2, K=1/3$	1/3	5026	310
楕円形	$l_1=113.1, l_2=56.6, K=1/2$	1/2	5026	275
正方形	19.2	-	369	77
正方形	45.0	-	2027	180
正方形	70.9	-	5027	284

2. 3 実験結果

1) 氷盤の破壊形態

図2に杭の形状が円形、楕円形及び正方形の場合の、実験時において観察された氷盤の代表的な破壊形態を示す。

円形断面の場合には、はじめに6本の放射状クラックが発生し、次に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれた。理論的には、放射状クラックの発生に引き続いて直ちに同心円状クラックが発生する場合もあるが、本実験では同心円状クラックは発生しなかった。ここで、特筆すべき点は放射状クラックは6本が全て同時に発生しないことである。円形断面の場合には、杭と氷盤との接触面における曲げモーメントは半径方向に同一なため、理論的には放射状クラックは同時に発生するものと考えられる。しかし、実際には、非同時に放射状クラックが発生することは、後述する曲げ試験により明らかとなった氷盤の曲げ強度に分散があることに起因するものと考えられる。

楕円形断面の場合にも、円形断面と同様に、はじめに6本の放射状のクラックが発生し、次に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれ、同心円状のクラックは発生しなかった。ここで、放射状クラックは最初に長軸上に発生した。

正方形断面の場合には、はじめに4本の初期クラックが隅角部から発生し、次に凍着破壊が起こり杭が引き抜かれた。円形断面や楕円形断面の場合と同様に、本実験では最終クラックは発生しなかった。

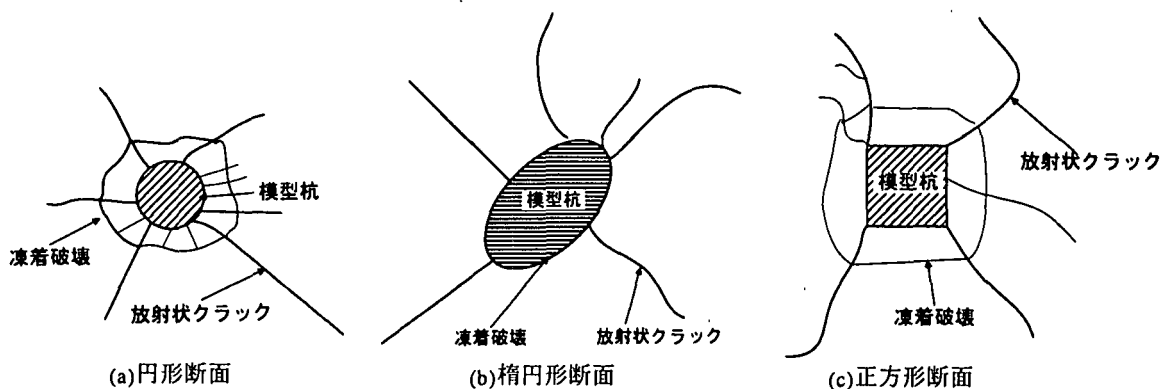


図2 氷盤の破壊形態

2) 氷力と氷盤のたわみ量の計測結果

図3にロードセルにより計測した氷力と杭設置地点（0 m）、杭から2 m及び4 mの地点における氷盤のたわみ量の経時変化の一例を示す。これによると、円形断面の場合には放射状クラック発生後、320sec までは氷力と氷盤のたわみ量の傾きがほぼ同様であるが、320sec 以降では氷力に対してたわみ量の傾きが大きい。

図4に半径 a による半径方向の距離 r の無次元量と杭設置地点（r=a）におけるたわみ量 $W_{r=a}$ による W の無次元量との関係を示す。図中で示しているたわみ量は、放射状クラック発生前の 200sec、放射状クラック発生後の 300sec 及び前述のたわみ量の傾きが大きくなっている 370sec について示したものである。これによると、 $r/a=10.5$ （杭から 4 m 地点）では $W/W_{r=a}$ は 0.4 でどの時刻でもほぼ同じであるが、 $r/a=6$ （杭から 2 m 地点）では時刻とともに増加している。

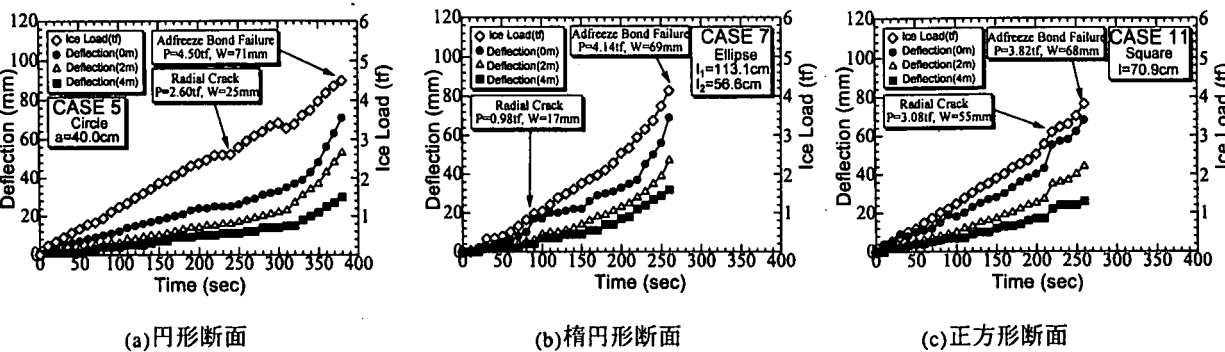


図3 氷力と氷盤のたわみ量の経時変化

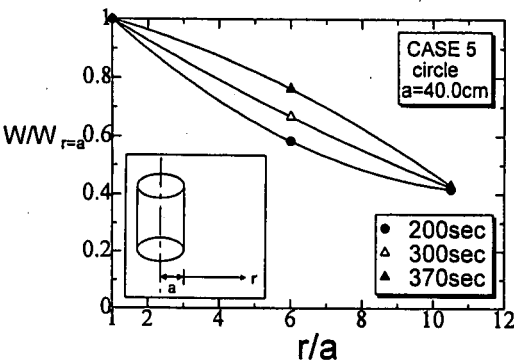


図4 氷盤のたわみ量の変化

3) 氷力に及ぼす断面形状の影響

表2に断面積が同一の模型杭の形状毎に曲げ破壊時（放射状クラック発生時、または初期クラック発生時）と凍着破壊時における氷力を示す。これによると、1997年の曲げ破壊時の氷力は円形が最も大きく、凍着破壊時では楕円形が最も大きい。また、1998年では曲げ破壊時の氷力は正方形が最も大きく、凍着破壊時ではほぼ同じ値である。すなわち、断面積が同一の模型杭に作用する氷力には、形状による明確な特徴は見られなかった。これは、曲げ破壊時に放射状クラックは非同時に発生していることや、凍着破壊時における凍着強度の違いなどに起因するものと考えられる。

表2 氷力に及ぼす形状の影響

断面形状	径・辺長(cm)	氷力 (tf)			
		199 7年		199 8年	
		曲げ破壊時	凍着破壊時	曲げ破壊時	凍着破壊時
円形	a=40.0	2.0	5.86	1.90	4.57
			4.45	2.60	4.50
	平均	2.0	5.16	2.25	4.54
楕円形	K=1/2	1.5	6.11	1.00	4.14
	K=1/3	1.8	6.91	1.30	4.97
	平均	1.65	6.51	1.15	4.56
正方形	l=70.9	1.6	5.42	3.10	3.82
				4.30	5.51
	平均	1.60	5.42	3.70	4.67

4) 凍着強度に及ぼす杭径・氷厚の影響

図5は過去4力年の野外実験における氷厚 h で無次元化した杭径（辺長） D と凍着強度 τ_B との関係を示したものである。これによると、1980年代に実施された酒井等及び小山等の実験においては $D/h < 1$ であるが、今回初めて実施した実規模での実験においては $1 < D/h < 4$ である。今回の野外実験における氷厚と杭径の範囲では、 $1 < D/h$ において凍着強度は急激に低下し一定値に近づくことが明らかとなった。

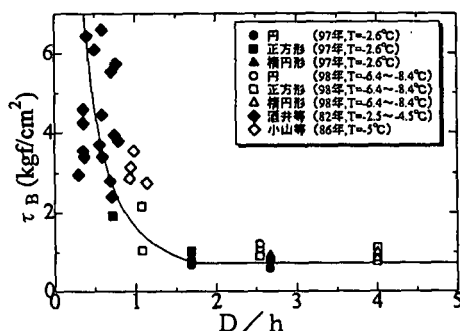


図5 杭径の無次元量と凍着強度との関係

5) 曲げ強度と曲げ弾性率

現場の単純桁の3点曲げ試験から、1997年及び1998年1月のそれぞれの実験時における氷厚は約30cm, 20cm, 曲げ強度は平均10.0kgf/cm², 10.8kgf/cm², 曲げ弾性率は平均27,000kgf/cm², 23,500kgf/cm²であった。また、1998年の実験では、曲げ強度の最小値は9.5kgf/cm², 最大値は13.4kgf/cm², 9供試体の分散は1.50（標準偏差は1.22）であり曲げ強度にはばらつきがあることがわかる。

3. 理論解析

1) 鉛直方向氷力の算定方法

理論的な氷力については、氷盤の破壊する過程を考慮すると、放射状クラックが発生するまでの氷力 P_1 、放射状クラックが発生する時点の氷力 P_{max1} 、放射状クラック（初期クラック）が発生以降の氷力 P_2 、同心円状クラック（最終クラック）が発生する時点の氷力 P_{max2} 及び凍着破壊時の氷力 P_B の5つに分けて算定する必要がある。

円形断面の構造物に作用する鉛直方向氷力については、Kerr¹⁾は氷盤を弾性床上の無限に大きな薄い平板と仮定して氷力 P_1 の算定方法を示したが、この方法によると氷盤のたわみ量が増加すると、氷力が無限に増加することになる。しかし、実際には氷盤のたわみ量がある程度増加すると氷盤は曲げ破壊か凍着破壊するものと仮定して、佐伯ら²⁾は放射状クラック発生時点の氷力 P_{max1} の算定方法を示した。一方、Christensen³⁾は、放射状クラック発生後は氷盤は8つの楔形の半無限平板に分割されると考えて氷力 P_2 の算定方法を示し、同心円状クラック発生時点の氷力 P_{max2} はNevelにより近似的に示された。

断面形状が楕円形の場合には、円形断面の場合に円柱座標が用いられているのに対して、西畑ら⁴⁾が楕円柱座標を用いて氷盤破壊前の氷力 P_1 及び放射状クラック発生時点の氷力 P_{max1} の算定方法を示した。

断面形状が正方形の場合には、氷盤破壊前の氷荷重 P_1 は、Golushkevichにより検討されているが、特異点を有するため円形や楕円形の場合と同様な弾性床上の無限平板としての解析は難しい。初期クラック発生後は氷盤は4つの楔形半無限平板に分割されるものとして、Papkovichは放射状クラック発生後の氷力 P_2 の算定方法を示した。

以上のように、氷盤の破壊する過程を考慮して、著者ら⁵⁾が種々の直立構造物に作用する鉛直方向氷力の算定方法を提案した。

2) 氷荷重の理論値と実験値の比較

図6～図8は氷盤のたわみ量と氷力との関係を示したもので、黒丸は今回の実験における実測値、実線は前述の理論による計算値である。

円形の場合については、放射状クラックが発生するまでの氷力と凍着破壊時の氷力の実測値と理論値はほぼ一致している。また、放射状クラック発生後、凍着破壊に至るまでの氷力の実測値と理論値は一致していないが、傾きはほぼ同様である。したがって、放射状クラックが実際には非同時に発生していることを考慮すると放射状クラック発生後の氷力についても実測値と理論値はほぼ一致しているものと考えられることができる。

楕円形の場合については、放射状クラックが発生するまでの氷荷重の実測値と理論値はほぼ一致している。また、凍着破壊時の氷力の実測値は理論値よりやや小さめである。

正方形の場合については、凍着破壊時の氷力の実測値は理論値よりもやや小さめである。また、凍着破壊に至るまでの氷力の実測値は理論値である P_2 と良く一致している。

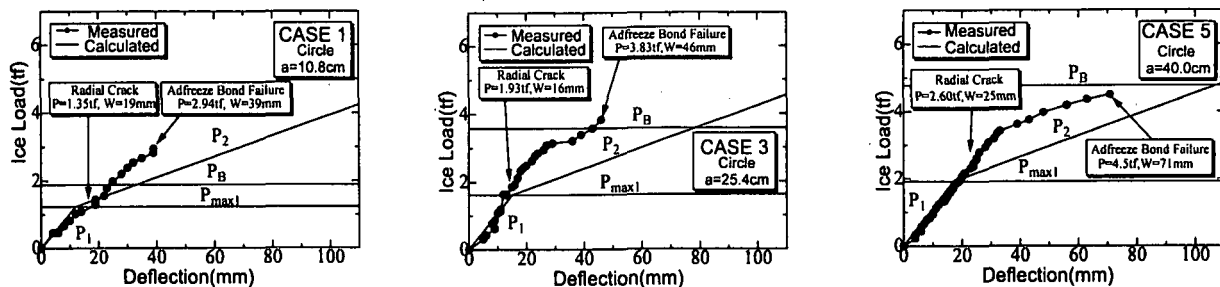


図6 氷盤のたわみと氷力の関係（円形断面）

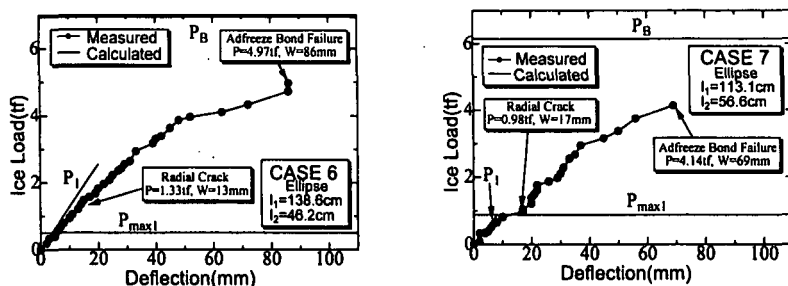


図7 氷盤のたわみと氷力の関係（楕円形断面）

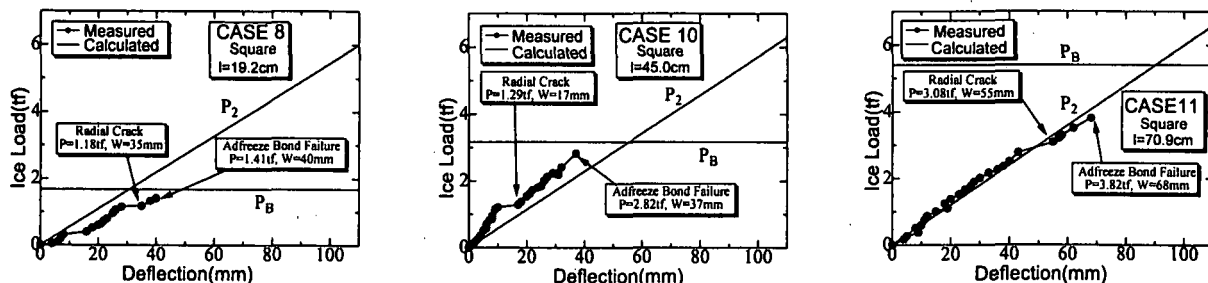


図8 氷盤のたわみと氷力の関係（正方形断面）

4. おわりに

本研究により得られた主要な結論を要約すると次の通りである。

- (1) 1997年及び1998年1月に、鉛直方向氷力を計測するための実規模の野外実験を実施した。それぞれの実験時における氷厚は約30cm, 20cm, 曲げ強度は平均10.0kgf/cm², 10.8kgf/cm² 曲げ弾性率は平均27,000kgf/cm², 23,500kgf/cm²であった。また、1998年の実験では、曲げ強度の最小値は9.5kgf/cm², 最大値は13.4kgf/cm²であり、曲げ強度には分散がある。
- (2) 氷盤の破壊形態はいずれのケースも初めに氷盤に放射状クラックが発生し、引き続いて凍着破壊が発生した。ただし、放射状クラックは6本が全て同時に発生しない。これは氷盤の強度等が一樣でないことに起因するものと考えられる。
- (3) 断面積が同一の模型杭に作用する氷力には、断面形状による明確な特徴は見られなかった。
- (4) 今回初めて実施した実規模での実験における氷厚による杭径の無次元量の範囲は、 $1 < D/h < 4$ である。この範囲では、 $1 < D/h$ において凍着強度は急激に低下し一定値に近づくことが明らかとなった。
- (5) 弾性理論による計算値と実測値を比較した結果、曲げ破壊（放射状クラック、または初期クラックの発生）の発生前後で計算値と実測値はほぼ一致している。また、最大氷荷重は、断面形状が円断面の場合にはほぼ一致し、正方形及び楕円形断面の場合には計算値に比べて実測値がやや小さめであった。

参考文献

- 1) A. D. Kerr; The Bearing Capacity of Floating Ice Plates Subjected to Static or Quasi-Static Loads; Journal of Glaciology (1976).
- 2) 佐伯浩、小野敏行、山田満、尾崎晃；直立杭構造物に作用する海水の力に関する研究；第28回海岸工学講演会論文集 (1981), pp. 396-400.
- 3) F. T. Christensen; Interaction between Floating Ice Sheets and Vertical Structures Due to Water Level Fluctuations; Technical University of Denmark (1986).
- 4) 西畑昭史、木岡信治、成田恭一、寺島貴志、佐伯浩；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；海洋開発論文集 (1996)VOL.12, pp. 349-354.
- 5) 寺島貴志、西畑昭史、成田恭一、川合邦広、本田秀樹、佐伯浩；直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重に及ぼす断面形状の影響について；海洋開発論文集 (1996)VOL13, pp. 819-824.
- 6) 中澤直樹、五十嵐昇、竹内貴弘、小野敏行、佐伯浩；海水と構造物材料表面間の凍着強度について；第1回寒地技術シンポジウム講演論文集 (1985), pp. 172-177.