

多脚構造物に作用する鉛直方向氷荷重の野外実験とその評価

寺島 貴志*・宇佐美宣拓**・佐伯 浩***

1. はじめに

寒冷地の海洋, 河川等に建設される多脚型の石油掘削リグ, 棧橋の固定杭, 係船杭, ダム湖の取水塔などの円断面構造物に氷盤が凍着している場合には, 潮汐などに伴う水位変動があると, 構造物に鉛直方向氷荷重が作用する. このような構造物が鉛直方向の外力に対して十分な耐力を有していない場合には, 構造物に氷荷重が作用することにより, 例えば Wortley (1985)によれば, 杭が引き抜かれたり座屈する被害が過去に発生している. したがって, 氷荷重の作用を受ける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. 単杭に作用する鉛直方向氷荷重については, 初めての規模での杭の引き抜きに関する野外実験により実証された寺島ら (1997, 1998) の理論的な算定方法により推定可能である. しかし, 複数の杭により構成される多脚構造物に作用する鉛直方向氷荷重については, Kerr (1978), 土谷ら (1986a) 及び土谷ら (1986b) の理論解析と Christensen (1986) の室内実験以外には, 過去に研究例はほとんど存在しないのが実状である. 特に, 実験的研究に関しては, Christensen (1986) の室内実験を除いて実施例はなく, しかも本実験は 3 本と 5 本の模型杭を 1 列に並べた場合の限られた条件下における室内実験であり, 実際に建設される多脚型の石油掘削リグ, 棧橋, 取水塔等多脚構造物の杭が複数列に配置されていることを考慮すると実用的とは言い難い.

このような背景から本研究は, 複数列に配置された多脚構造物に作用する鉛直方向氷荷重に関する初めての野外実験を実施することにより, 多脚構造物に作用する氷荷重の算定方法について考察するものである.

2. 野外実験

2.1 実験方法

1998 年 12 月に, 北海道大学敷地内において, 複数の模型杭の引き抜きに関する野外実験を実施した. 使用した

模型杭は, 直径 20 mm の円断面形のステンレス製ボルトであり, 4 本の模型杭を緊結することにより多脚構造物と見なした. ボルトを用いた理由は, 模型杭と氷盤との接触面積を大きくすることにより意図的に凍着力を増大させ, 引き抜き開始直後における氷盤の模型杭からの剝離を未然に防止するためである. 具体的実験方法は以下に示すとおりである.

a) 野外に設置された 2 つの鋼製タンク (長さ 275 cm×幅 200 cm×深さ 50 cm と長さ 150 cm×幅 150 cm×深さ 75 cm) に淡水を入れ, タンクの水面を隔壁により 2 分割して各々の水面に 4 本の模型杭と 1 本の模型杭を設置した.

b) ボルトの本数が 4 本の場合には, ボルト下端と上端とで杭間隔が同一に保持できるように鋼製のフレームによりボルトを固定した.

c) 図-1 に示すように, 模型杭のフレームとロードセル及び油圧ジャッキを連結し, 油圧ジャッキにより模型杭を引き上げた. この時に, ロードセルにより模型杭の引き抜き力 (鉛直方向氷荷重に相当) を計測した.

d) 氷盤の曲げ破壊または凍着破壊が起り, 模型杭が完全に引き抜かれるまで氷荷重の計測を継続し, 同時に, 曲げ破壊時におけるクラックの発生状況と凍着破壊の状況を目視により観察した.

e) 模型杭の引き抜き終了後に, タンク内の氷盤の氷厚を測定した.

なお, 実験は模型杭と氷盤とが十分に凍着している深夜, 気温は -2°C ~ -5°C において実施した.

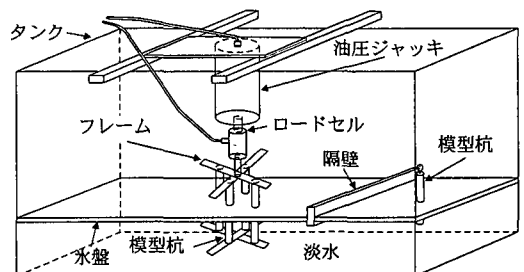


図-1 実験装置

* 正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ(株)
** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
*** フェロー 工 博 北海道大学教授 大学院工学研究科

2.2 実験ケース

実験ケースは表-1に示すとおり、模型杭が4本の場合が9ケース、比較のため模型杭が1の場合の引き抜き実験も同時に6ケース実施し、合計15ケースの模型杭の引き抜き実験を実施した。

表-1 野外実験の実験ケース

ケース名	模型杭の本数	杭間隔 (cm)
CASE 1-4	4	10
CASE 2-1	1	—
CASE 2-4	4	10
CASE 3-4	4	20
CASE 4-1	1	—
CASE 4-4	4	20
CASE 5-1	1	—
CASE 5-4	4	40
CASE 6-1	1	—
CASE 6-4	4	40
CASE 7-1	1	—
CASE 7-4	4	40
CASE 8-4	4	60
CASE 9-1	1	—
CASE 9-4	4	80

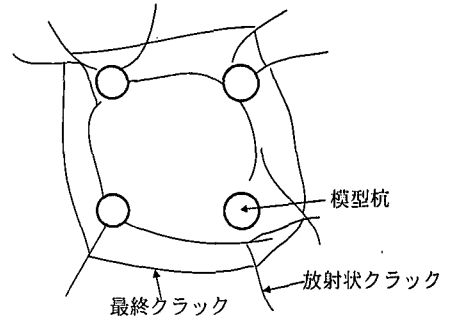


図-2 氷盤の破壊形態 (曲げ破壊)

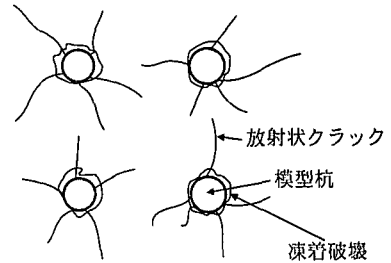


図-3 氷盤の破壊形態 (凍着破壊)

2.3 実験結果

a) 氷盤の破壊形態

模型杭の本数が4本の場合における代表的な氷盤の破壊形態は図-2及び図-3に示すとおりである。本実験において観察された氷盤の破壊形態と破壊過程を要約すると、概ね以下に示すとおりである。

i) 杭本数が4本で曲げ破壊が発生する場合

図-2に示すとおり、杭間隔が10~40 cm ($l/a \leq 40$: l は杭間隔, a は杭半径)の場合に、油圧ジャッキにより加圧後、はじめに各々の模型杭の周辺より非同時に放射状クラックが発生した。氷盤の撓みの増加とともに、模型杭より半径方向の放射状クラックは徐々に長さを増し、ある時点において隣同士の模型杭から発生している放射状クラックがつながり、4本の模型杭を正方形形状に結ぶようなクラックの形状となった。それとほぼ同時に、正方形形状のクラックの外側に更に最終クラックが発生し、正方形形状のはじめのクラックにおいて氷盤と模型杭とが剝離した。

ii) 杭本数が4本で凍着破壊が発生する場合

図-3に示すとおり、杭間隔が80 cm ($l/a=80$)の場合には、油圧ジャッキにより加圧後、はじめに各々の杭の周辺より非同時に放射状クラックが発生した。しかし、放射状クラックはつながることなく、ある時点において各々の杭の界面において凍着破壊が発生して杭が引き抜かれた。

また、杭間隔が60 cm ($l/a=60$)の場合には、加圧直

後に凍着破壊が発生し、放射状クラックは発生しなかった。

iii) 杭本数が1本の場合

杭本数が1本の場合には、破壊形態とその過程は大別して2つのパターンが観察された。

1つは、はじめに放射状クラックが発生し、次に凍着破壊が発生して模型杭が引き抜かれるパターンである。

2つめのパターンは、はじめに放射状クラックが発生し、次に同心円状クラックが発生して模型杭が引き抜かれるパターンである。

b) 氷荷重の計測結果

各実験ケースにおける氷厚と氷荷重の計測結果を表-2に示す。氷厚は各実験において模型杭の周囲の3ヶ所程度測定し、これらの平均値を表中に示しており、実験時における氷厚は3.7~13.7 mmであった。また、氷荷重は油圧ジャッキにより加圧後から模型杭が完全に引き抜かれるまで計測を実施し、表中には最大値を示している。いずれの実験ケースにおいても、最大氷荷重は模型杭が引き抜かれる直前における氷盤の破壊時に記録されている。また、表中の破壊形態は模型杭が引き抜かれる時点における氷盤の破壊形態を示している。“ P_4/P_1 ”は杭本数が1本の場合の氷荷重 P_1 と4本の場合の氷荷重 P_4 との比を示しており、“補正後の P_4/P_1 ”は氷厚により P_4/P_1 を補正したものである。曲げ破壊の場合には理論的には氷荷重は氷厚の2乗に比例し、凍着破壊の場合には氷厚に

比例することが知られている。したがって、1本杭と4本杭とで氷盤の破壊形態が同一の場合に限って、曲げ破壊の場合には P_4/P_1 を氷厚の2乗で補正し、凍着破壊の場合には氷厚で補正している。

氷荷重の計測結果と氷盤の破壊形態との関係を要約すると、概ね以下に示すとおりである。

- 氷盤の破壊形態が1本杭、4本杭ともに曲げ破壊の場合 (CASE 2, 4, 7) には、補正後の P_4/P_1 は4を越えない。
- 氷盤の破壊形態が1本杭の場合に凍着破壊で、4本杭の場合が曲げ破壊のケース (CASE 5, 6) においては、 P_4/P_1 は4を越えるが、1本杭の凍着破壊時の氷荷重が小さいためである。すなわち、氷盤の破壊形態が仮に同様であったとすれば、 P_4/P_1 は4以下であったものと予想できる。
- CASE 9の P_4/P_1 が4を越えたのは、1本杭の引き抜き開始前にすでにクラックが発生していたことにより、相対的に1本杭の氷荷重が小さかったことによるものと考えられる。
- 以上より、1本杭と4本杭のいずれの場合にも氷盤の破壊形態が同一であれば、4本杭に作用する氷荷重は1本杭に作用する氷荷重の4倍以下と考えられる。

表-2 氷荷重の計測結果

case	杭本数	間隔 (cm)	氷厚 (mm)	破壊形態	氷荷重 (N)	P_4/P_1	補正後の P_4/P_1
1-4	4	10	6.2	曲げ	196	—	—
2-1	1	—	9.8	曲げ	160	2.84	2.30
2-4	4	10	10.9	曲げ	454		
3-4	4	20	12.9	曲げ	625	—	—
4-1	1	—	6.6	曲げ	93	2.60	2.38
4-4	4	20	6.9	曲げ	242		
5-1	1	—	6.0	凍着	50	4.80	4.80
5-4	4	40	8.0	曲げ	240		
6-1	1	—	13.7	凍着	58	5.26	5.26
6-4	4	40	13.0	曲げ	305		
7-1	1	—	6.1	曲げ	75	4.68	3.97
7-4	4	40	6.6	曲げ	351		
8-4	4	60	3.7	凍着	249	—	—
9-1	1	—	7.1	凍着	61	4.44	5.99
9-4	4	80	5.3	凍着	271		

3. 理論解析

3.1 単杭の場合の理論解析

円形断面を有する単一の直立構造物に作用する鉛直方向氷荷重については、寺島ら (1997, 1998) によると氷盤の破壊形態と破壊過程を考慮すると、無限弾性床上の弾性理論を用いることにより、単一の杭状構造物に作用する氷荷重は Kelvin 関数を用いて以下の5つの状態に

分類して算定することができる。

- a) 放射状クラックが発生するまでの氷荷重

$$P_1 = 2\pi a D \lambda^3 \Delta \frac{[kei'(\lambda a)]^2 + [ker'(\lambda a)]^2}{kei(\lambda a)ker(\lambda a) - kei'(\lambda a)ker'(\lambda a)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

a : 構造物の半径

$$D: \text{氷盤の平板剛度} \left(D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \right)$$

ν : 氷のポアソン比

E : 曲げ弾性率

h : 氷厚

$$\lambda: \text{氷盤の特性長の逆数} \left(\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_w}{D}} \right)$$

k_w : 氷の単位体積重量

kei, ker: Kelvin 関数

Δ : 水位変動量

である。

- b) 放射状クラックが発生する時点の氷荷重

$$P_{max1} = \frac{\pi \sigma_f h^2}{3} \frac{\lambda a ([kei'(\lambda a)]^2 + [ker'(\lambda a)]^2)}{kei(\lambda a)kei'(\lambda a) + ker(\lambda a)ker'(\lambda a)} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 σ_f は氷盤の曲げ強度である。

- c) 同心円状クラックが発生するまでの氷荷重

$$P_2 = \frac{2\pi k_w \Delta}{\left(\lambda^2 [Dn_2(\lambda a) Dn_3'(\lambda a) - Dn_2'(\lambda a) Dn_3(\lambda a)] \right) \cdot [Dn_3'(\lambda a) I_2 - Dn_2'(\lambda a) I_3]} \dots\dots\dots (3)$$

$$I_2 = 0.45694 - \int_0^{\lambda a} x Dn_2(x) dx,$$

$$I_3 = -0.45694 - \int_0^{\lambda a} x Dn_3(x) dx$$

ここに、 Dn_2 , Dn_3 は Nevel の関数である。

- d) 同心円状クラックが発生する時点の氷荷重

$$P_{max2} = 1.154 \sigma_f h^2 [1.05 + 2\lambda a + (\lambda a)^3 / 2] \dots\dots (4)$$

- e) 凍着破壊が起こる場合の氷荷重

$$P_3 = 2\pi a h \tau_B \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 τ_B は凍着強度である。

3.2 複数杭の場合の氷盤の撓み

杭どうしの距離が離れている場合にはそれぞれ1本の杭として氷荷重を算定することが可能であると考えられるが、複数の杭が近接している場合には、その内の1本の杭に作用する氷荷重や周辺の氷盤の撓みは、少なからず他の杭の影響を受けることが予想される。

Kerr (1978) は杭に作用する氷荷重を集中荷重と見な

して、氷荷重と氷盤の撓みの関係式を次式により表わした。

$$w(x, y) = -\frac{\lambda^2}{2\pi k_w} \sum_i P_i \text{kei}(\lambda r_i) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 P_i は*i*番目の杭に作用する氷荷重、 r_i は*i*番目の杭から任意の点までの距離である。氷盤の撓みを計算例を図-4に示す。ここで氷荷重は、 $P=20$ kN、氷盤の曲げ弾性率は、 $E=3000$ MPa、氷厚は、北海道の潮沼における代表的な氷厚により、 $h=50$ cmの条件で、また杭の間隔は、 $l=1$ m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 mの6種類について計算を行った。

図中において、○はそれぞれの場合における杭の中心位置を示している。これより、上記の条件においては、杭間隔が1 mから15 mの間では氷盤の撓みの最大値が杭どうしの中間地点で現れるが、杭間隔を20 m以上離れた場合、その最大値は杭の中心位置となることが明らかとなった。

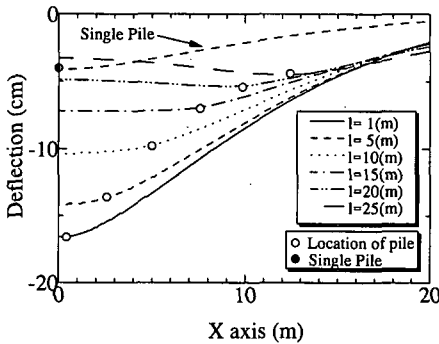


図-4 氷盤の撓み量の理論値

3.3 複数杭の場合における氷盤のモーメント分布

氷盤の単位幅当りの曲げモーメントは次式で表わされる。

$$M_x = -D \left[\frac{d^2 W}{dx^2} + \nu \frac{d^2 W}{dy^2} \right] \dots\dots\dots (7)$$

$$M_y = -D \left[\nu \frac{d^2 W}{dx^2} + \frac{d^2 W}{dy^2} \right] \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 M_x , M_y はそれぞれ*x*軸、*y*軸に直角な断面に作用する曲げモーメントである。

式(7)及び式(8)における $d^2 W/dx^2$ と $d^2 W/dy^2$ はそれぞれ次式で表される。

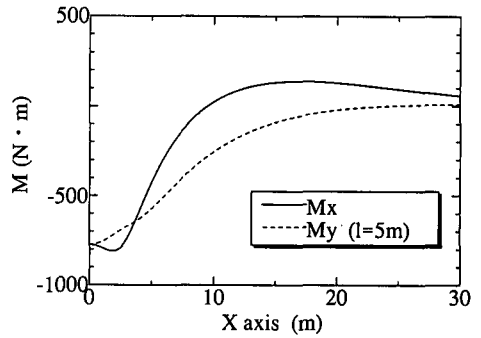
$$\frac{d^2 W}{dx^2} = \frac{P\lambda^4}{2\pi k} \sum_i \left[\frac{1 - \left(\frac{x-x_i}{r_i} \right)^2}{\lambda r_i} \text{kei}(\lambda r_i) + \left(\frac{x-x_i}{r_i} \right)^2 \left\{ \text{ker}(\lambda r_i) - \frac{\text{kei}(\lambda r_i)}{\lambda r_i} \right\} \right] \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{d^2 W}{dy^2} = \frac{P\lambda^4}{2\pi k} \sum_i \left[\frac{1 - \left(\frac{y-y_i}{r_i} \right)^2}{\lambda r_i} \text{kei}(\lambda r_i) + \left(\frac{y-y_i}{r_i} \right)^2 \left\{ \text{ker}(\lambda r_i) - \frac{\text{kei}(\lambda r_i)}{\lambda r_i} \right\} \right] \dots\dots\dots (10)$$

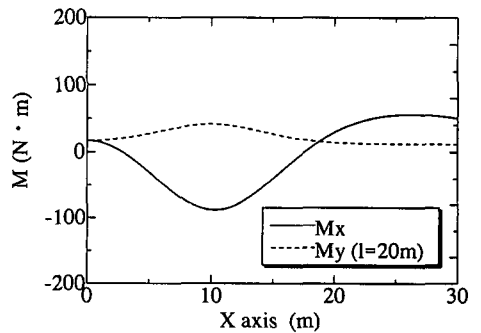
一方、曲げモーメントによって氷盤の曲げ応力が、曲げ強度に達した時に氷盤は破壊し、その条件式は次式で与えられる。

$$\sigma_r = \pm \frac{6M}{h^2} \dots\dots\dots (11)$$

単杭の場合と異なり、4本杭など複数の杭による氷盤のクラックの発生地点をを理論的に解析することは困難であるが、ここでは、*x*方向の曲げモーメントの分布について考察する。



(a) $l=5$ mの場合



(b) $l=20$ mの場合

図-5 *x*方向のモーメント分布の計算値

図-5は式(7)及び式(8)の計算結果である。図より、 $l=5$ mのときには M_x が杭間の中間である $x=2.5$ mの地点で最大となっており、隣り合う杭の中心を結ぶようにクラックが発生するものと予測される。一方、 $l=20$ mの場合には、前者と同様に杭間の中間位置でモーメントの最大値が現れているものの、これは式(11)の条

件を満たしていない。また、相互作用がそれ程大きくないため、それぞれが独立した杭としての破壊形態を示すものと予想される。

3.4 理論値と実測値との比較

著者らが初めて導いた弾性理論による曲げ破壊時の水荷重 P_{max2} と凍着破壊時の水荷重 P_B の理論値と、野外実験における実測値 P_1 , P_4 との関係を図-6 に示す。破壊形態により理論値と実測値で明確な差はないが、理論値と実測値はほぼ一致しているとみなすことができる。

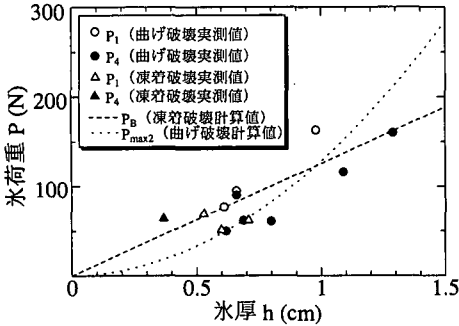


図-6 理論値と実測値の比較

4. おわりに

本研究で得られた主要な結論を要約すると次のとおりである。

a) 1998年12月に、多脚構造物に作用する鉛直方向水荷重の推定方法に関する基礎資料を得ることを目的として、氷盤の破壊形態の観察と水荷重の計測に主眼を置いた初めての野外実験を実施した。実験時における氷厚は3.7 mm~13.7 mmであった。

b) 野外実験における氷盤の破壊形態は2つに分類される。すなわち、1つは、初めに模型杭の周辺より氷盤に放射状クラックが発生し、ある時点において隣接する模型杭から発生している放射状クラックがつながり、4本の模型杭を正方形に結ぶようなクラックの形状となり、更に最終クラックが発生して模型杭が氷盤から完全に引き抜かれる形態である。この破壊形態は、杭間隔が40 cm以下 ($1/a \leq 40$) の場合に認められた。2つめは、放射状クラックは発生するが、放射状クラックはつながることなく、ある時点において各々の模型杭の界面にお

いて凍着破壊が発生して模型杭が引き抜かれる形態である。この破壊形態は杭間隔が60 cm ($1/a \geq 60$) 以上の場合に認められた。いずれの破壊形態においても、模型杭が引き抜かれる瞬間に最大の水荷重が発生した。

c) 野外実験において計測された単杭に作用する水荷重 P_1 と、4本杭の1本あたりに作用する水荷重 P_4 を比較した結果、氷盤の破壊形態が同じの場合には $P_4/P_1 \leq 4$ であることが明らかとなった。

d) 著者らが初めて導いた弾性理論による曲げ破壊時の水荷重 P_{max2} と凍着破壊時の水荷重 P_B の理論値と、野外実験における実測値 P_1 , P_4 との関係は、破壊形態により理論値と実測値で明確な差はないが、理論値と実測値はほぼ一致しているとみなすことができる。

e) 以上のことから、円断面形の多脚構造物に作用する鉛直方向水荷重を推定するには、放射状クラック発生時の水荷重は最大とならないことから、構造物の設置地点における氷盤の物性値から凍着破壊が起こるか、曲げ破壊(同心円状)が起こるかを判定し、単杭に作用する水荷重 P_B あるいは P_{max2} を求め、これらの値に多脚構造物を構成する杭本数を乗ずることにより概ね推定可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 土谷雅人・竹内貴弘・中澤直樹・佐伯 浩 (1986a): 水位変化に伴う多脚海洋構造物に作用する鉛直方向水力, 第2回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 166-171.
- 土谷雅人・竹内貴弘・中澤直樹・佐伯 浩 (1986b): 水位変化に伴う多脚海洋構造物に作用する鉛直方向水力の算定法, 第2回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 172-177.
- 寺島貴志・成田恭一・本田秀樹・大島香織・宇佐美宣拓・佐伯 浩 (1998): 円断面構造物に作用する鉛直方向水荷重の現地実験とその評価, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 786-790.
- 寺島貴志・西畑昭史・本田秀樹・川合邦広・佐伯 浩 (1997): 氷盤凍着時に円断面構造物に作用する鉛直方向水荷重に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 991-995.
- Christensen, F. T. (1986): Interaction between Floating Ice Sheets and Vertical Structures Due to Water Level Fluctuations, Technical University of Denmark.
- Kerr, A. D. (1978): Forces an Ice Cover Exerts on Rows or Clusters of Piles Due to a Change of the Water Level, Proc. of IAHR Ice Symposium 1978, Vol. 1, pp. 511-525, Luleaa, Sweden.
- Wortley, C. A. (1985): Great Lakes Small-Craft Harbor and Structure Design for Ice Conditions: An Engineering Manual, University of Wisconsin Sea Grant Institute.