

氷盤凍着に伴う大断面構造物に作用する氷力について

佐伯 浩* · 竹内貴弘** · 小野敏行***
 五十嵐 昇**** · 蟹江俊仁*****

1. 緒 論

石油・ガス資源等の掘削や海水制御等を目的として氷海域に建設されている海岸・海洋構造物に氷盤が凍着し潮汐の影響等により水位に変動が起こると構造物に軸方向氷力が作用する事が知られている。水位が上昇する場合には、鉛直上方の軸力が作用し、みかけ上重量が減少した状態となり、これに水平氷力が加わると構造物にとり非常に危険な状態となる。我国では、ダムの取水塔や河口部の水位観測塔が破壊された例がある。また、米国やカナダにおいては、湖沼や海岸の栈橋が引抜かれた例が多数報告されている。これらの被害は、構造物と氷盤との間の凍着による力が原因と推測される。以上のような事情を考慮し、著者らは数年前からジャケット構造物あるいはタワー構造物を対象として凍着による軸方向力の理論式と計算結果を Kerr 理論を拡張して求め、その計算に必要な海水と構造物間の凍着強度 τ_B 、海水の曲げ強度 σ_B 、曲げ弾性率 E 、ポアソン比 ν についての系統的な研究を行ってきた。本研究は、過去の一連の研究結果を踏まえて次の二つの問題解決に取りくんだ。第一に、最近の傾向として構造物の大型化に伴い大断面ケーソンタイプの海洋構造物に作用する軸方向力の算定法である。第二に、正確な凍着強度を測定するための凍着試験法の確立である。著者らは、過去に Push out test, Pull out test を行うことにより τ_B の値を測定したが、得られた値が真の値かどうか疑問が持たれていた。そこで、今回は新たに Twist test を開発し比較する事にした。

2. 大断面構造物に作用する軸方向の氷力

(1) 平板の弾性理論に基づく軸力 P の算定

図-1 に示すように、半径 a の円断面杭構造物に氷盤が凍着した場合に、水位の変動 Δ が緩やかな場合には氷が粘弾性的な挙動を示すが、水位の変動が比較急な場合には氷盤は弾性体とみなされるために杭構造物に大き

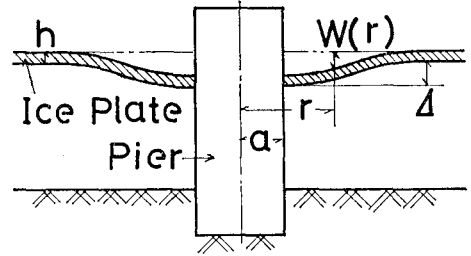


図-1

な軸方向力が作用する。Kerr は氷を弾性体と考えて杭構造物に作用する式を求めている。

$$P = 2\pi a D \lambda^3 \Delta \{Ker'(\lambda a)\}^2 + \{Ker'(\lambda a)\}^2 / K_1 \dots\dots\dots(1)$$

$$K_1 = Ker(\lambda a) Ker'(\lambda a) - Ker'(\lambda a) Ker(\lambda a) \dots\dots\dots(2)$$

$$D = E \cdot h^3 / 12 \cdot (1 - \nu^2) = K \cdot h^3 / 12 \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 a は杭の半径、 D は平板剛度、 w_0 は海水の単位体積重量、 Δ は水位変化量、 E は氷のヤング率、 h は氷厚、 P は軸力、 ν はポアソン比、 $\lambda = (w_0/D)^{1/4}$ である。これらの式から、 Δ が大きくなると P もそれに伴って無限に大きくなる事が示されているが、実際問題として P がある値になると氷盤と構造物が剝離したり、氷盤が曲げ破壊を起こしたりする事が考えられる。これらの適用限界条件を考慮して過去に著者らは氷厚 10~50 cm、杭半径 10~500 cm という値を用いて計算を行っている。

(2) 大断面構造物の場合の計算

本研究は、現在、建設が計画されている構造物が大断面を有する事から、実用上役立つように $h=100\sim400$ cm、 $a=200\sim5000$ cm と範囲を広げ計算を行った。その計算結果を図-2 に示す。以下、適用限界条件にしたがってそれぞれ用いた式と計算結果を示す事にする。

a) 構造物と氷盤が剝離する条件

杭構造物と氷盤の付着力 P_B は次式で示される。

$$P_B = 2\pi a h \cdot \tau_B \dots\dots\dots(4)$$

また、剝離の限界条件 ($P_B=P$) より次式を得る。

$$\tau_B = \Delta \cdot D \cdot \lambda^3 \{Ker'(\lambda a)\}^2 + \{Ker'(\lambda a)\}^2 / h \cdot K_1 \dots\dots\dots(5)$$

(5) 式から各氷厚ごとの計算結果が図-3 に示され、図

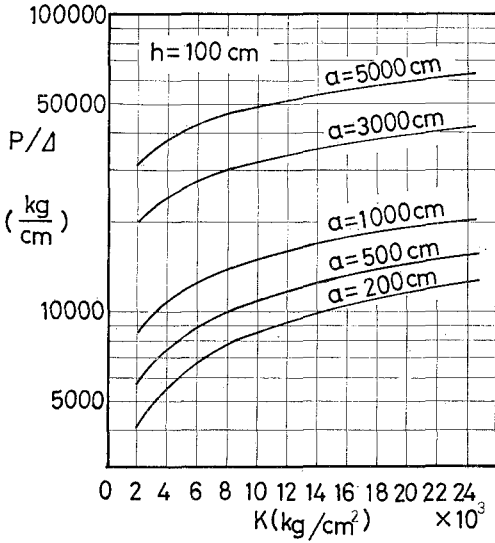
* 正会員 北海道大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科

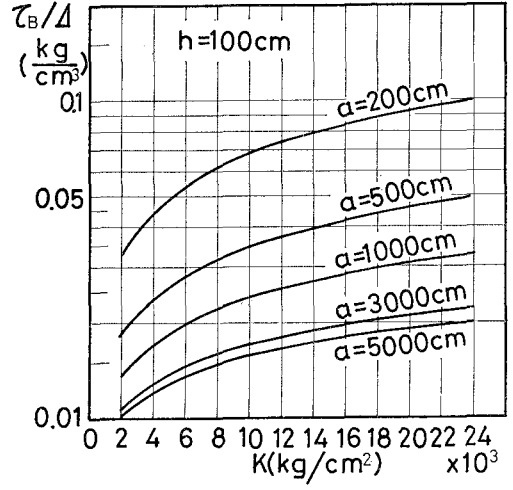
*** 北海道大学工学部土木工学科

**** 正会員 水資源開発公団

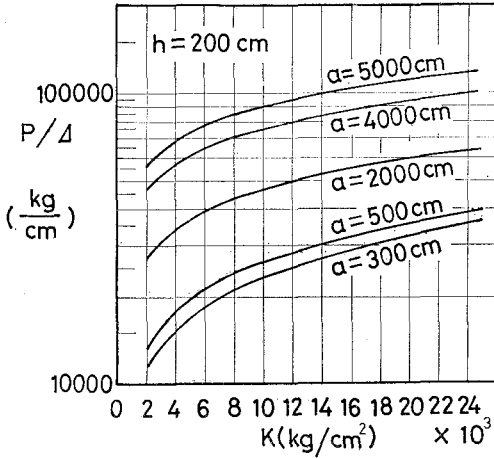
***** 正会員 大成建設土木設計部海洋設計室



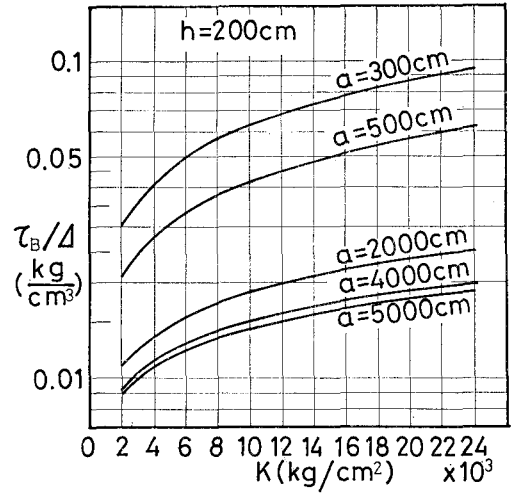
(a)



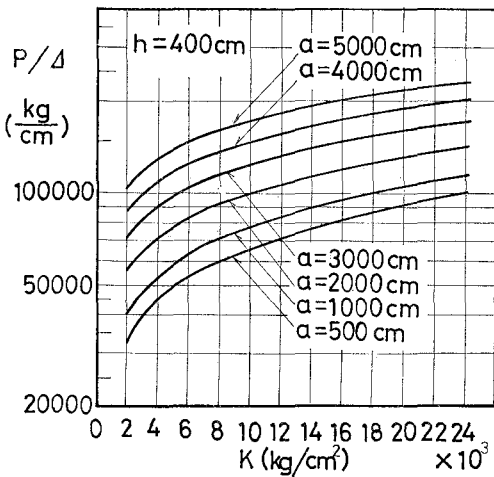
(a)



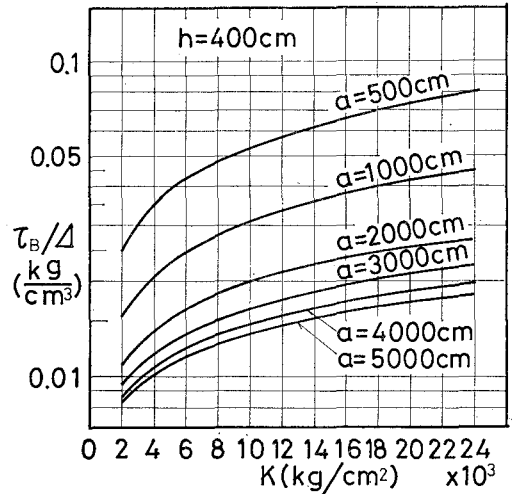
(b)



(b)



(c)



(c)

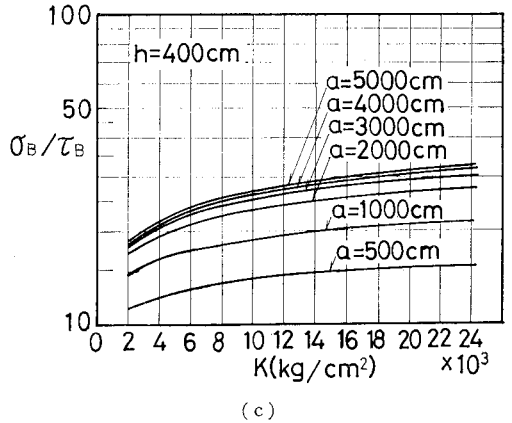
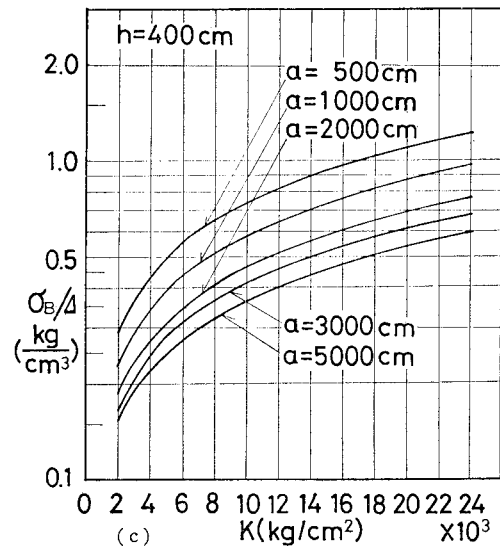
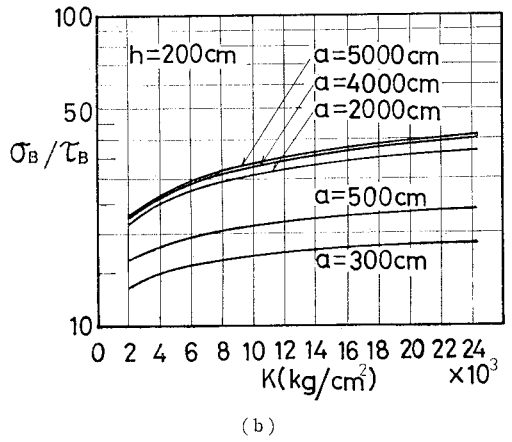
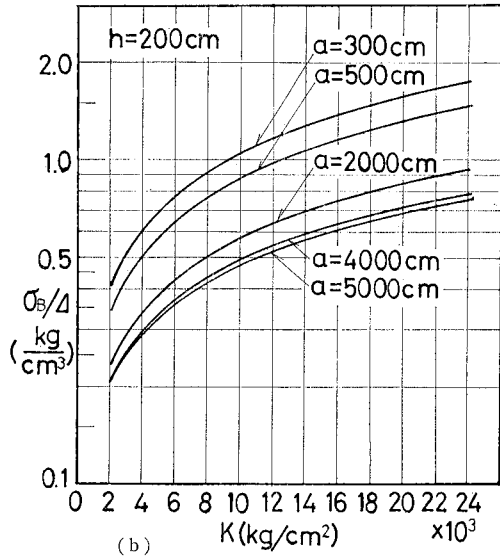
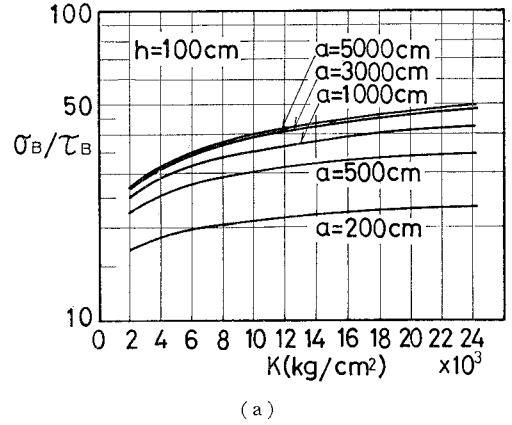
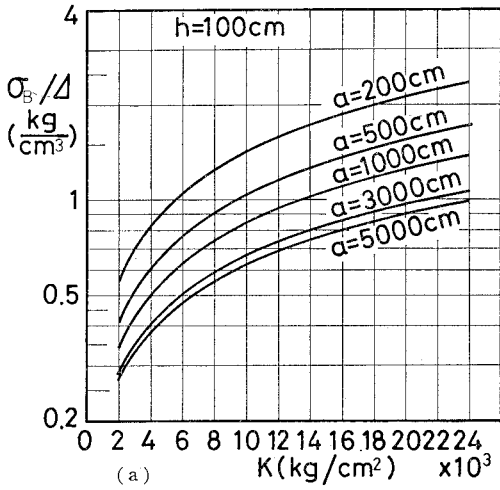


図-5

図-4

中の曲線の下側が構造物と氷盤が剥離する領域である。

b) 氷盤が曲げ破壊を起こす条件

曲げモーメントにより氷盤の応力が曲げ強度 σ_B に達した時の条件から水位の上昇量 A_{max} を求めると次式に

$$A_{max} = \sigma_B \cdot h^2 \times K_1 / (6D\lambda^2 K_2) \dots\dots\dots (6)$$

$$K_2 = Kei'(\lambda a) Kei(\lambda a) + Ker'(\lambda a) Ker(\lambda a) \dots\dots (7)$$

なる。それで、氷盤が曲げ破壊する時に、構造物に作用

する最大軸力 P_{max} は次式で示される。

$$P_{max} = \pi a \lambda h^2 \sigma_B [\{ Ker'(\lambda a) \}^2 + \{ Kei'(\lambda a) \}^2 / 3K_2] \dots \dots \dots (8)$$

(6) 式から計算した結果を図-4に示す。この図中の曲線の上側領域では曲げ破壊が起こり、この時の軸力は(8)式で計算する事ができる。また曲線の下側領域では氷盤が曲げ破壊しないから軸力は(1)式で計算すればよい。また、剝離と曲げ破壊が同時に起こる条件から、(5)と(6)両式より (σ_B / τ_B) は次式となる。

$$\sigma_B / \tau_B = 6K_2 / (h \cdot \lambda) [\{ Ker'(\lambda a) \}^2 + \{ Kei'(\lambda a) \}^2] \dots \dots \dots (9)$$

(9) 式の計算結果を図-5に示す。図中の曲線の上領域では氷盤と杭との間で剝離が先に起こり、下領域では曲げ破壊が先に起こる事を示している。

c) 軸力 P の算定法

図-6が計算手順を示すフローチャートである。この図にしたがって、設計条件の $h, E, \nu, \sigma_B, \tau_B, a, \Delta$ の値から σ_B / τ_B を計算し、図-5を用いて氷盤が曲げ破壊するか、剝離を起こすか調べる。先に曲げ破壊する場合は、 σ_B / Δ を計算し、図-4より曲げが起こるか調べる。もし曲げ破壊が起こるなら(8)式より P を計算する。次に、先に剝離を起す場合は、 τ_B / Δ を計算し、図-3より剝離が起るか調べる。もし剝離が起こるなら(4)式より P を計算し、剝離が起らないなら(1)式より P を計算する。

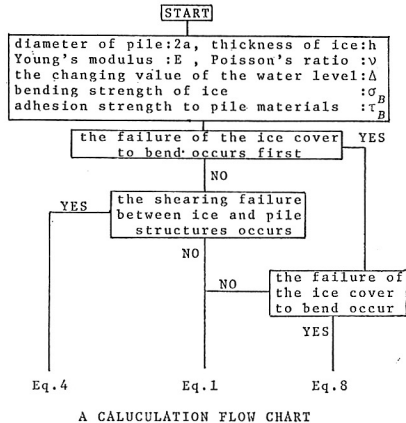


図-6

3. 凍着強度試験法

軸力 P を算定するに当り、 E, σ_B, ν, τ_B の値を与えなければならない。 E, σ_B, ν については過去に、多数の研究報告がされているが、 τ_B についての研究は少なく、以前に著者らが行ったものだけである。そこで著者らは凍着強度の試験法の確立と力学的特性の研究を目的として真の凍着強度の値を測定しようとした。

(1) 凍着強度試験

コンクリートと鉄筋の場合と異って、海水と海岸・海洋構造物材料間の弾性係数や強度の差は大きいために、Push out test, Pull out test によって測定された凍着強度の値には差がないことが過去の著者らの研究から確認されている。しかし、図-7の Push out test の holder と test pile とにすぎ間があったり、供試体が斜めに凍着した状態であると、氷盤に曲げモーメントが作用することになり、得られた値が正確な凍着強度を与えるか疑問がもたれていた。これ迄の結果によると、杭径が小さくなるにつれて凍着強度が大きくなるという傾向が示されていたが、これは杭径が小さい程曲げの影響が強くなるため生じると考えられる。以上の事を解明するために、曲げの影響をうけない Twist test を新たに開発した。写真-1はその装置であり、室内、現地の両方に使えるように設計されている。図-8は、Twist test の主要部である。変位速度はダイヤルゲージによって測定した。用いた pile はねじりに耐えられるように肉厚を従来のもより厚くし、十分な剛性を与えた。凍着強度 τ_B は次式より求める。

$$\tau_B \cdot \pi \phi \cdot h \cdot \phi / 2 = P \cdot l \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 P はアームに作用する最大荷重、 l は pile 中心から力 P が作用する点までの距離、 ϕ は杭径である。

(2) 試験結果の比較

Twist test は、過去の試験結果と比較するために応力速度、変位速度は過去と同様の条件で行った。その結果を図-9に示す。図に示されているように Pull out test, Push out test, Twist test は、杭径の効果について何ら

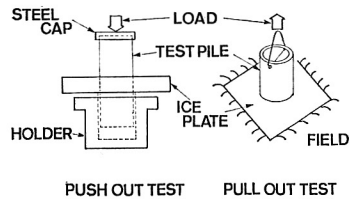


図-7

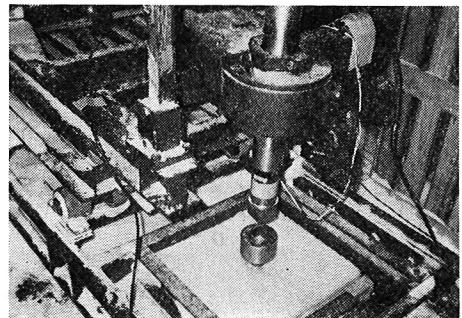


写真-1

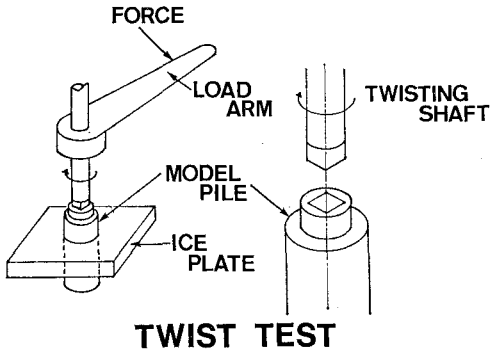


図-8

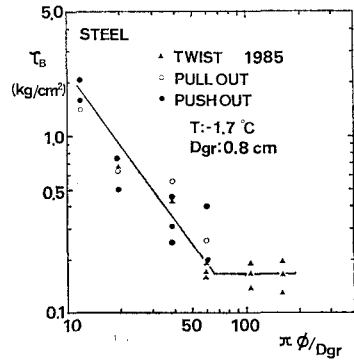
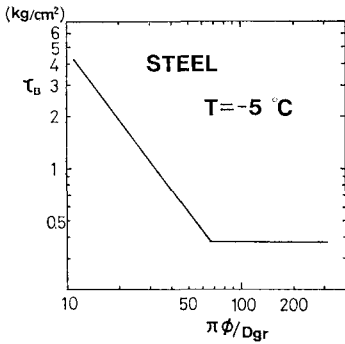
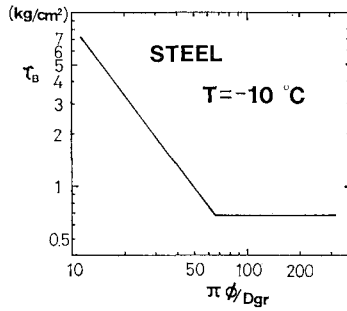


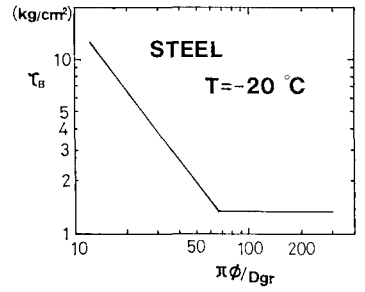
図-9



(a)



(b)



(c)

図-10

差はなく、曲げの影響はない事が確認された。また、Twist test は、現地、室内とも同様な結果を得た。以上の結果から、過去の Push out test, Pull out test によって測定された値は信頼性があり、有効である事が確認できた。よって、過去に測定された値を平均して、各氷温ごとにまとめたものが 図-10 である。各温度とも $\pi\phi/Dgr > 65$ のとき τ_B は一定の値を示す。ここで、実

際に、大断面構造物の設計に必要な凍着強度 τ_B の値は、 $\pi\phi/Dgr > 65$ の時の値を使う必要がある。したがって、 $\pi\phi/Dgr > 65$ において、氷温と凍着強度との関係を 図-11 に示した。この図で求めた値を軸方向の計算に使う事ができる。したがって、今後凍着試験を行う場合には Push out test が一番簡易な方法で凍着強度を求める事ができる。この test は、杭径が小さい場合に適当であると思われる。杭径が大きい場合は実用上 Twist test が有効である。

なお、本研究の一部は倉田奨励金により行なわれた事を付記する。

参考文献

- 1) Kerr, A. D.: Ice forces on structures due to a change of the water level, Proc. of 3rd International Symp. on Ice Problems, pp. 419~426, 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, pp. 396~400, 1981.
- 3) 佐伯 浩・田中祐人・酒井雅史・小野敏行・尾崎 晃: 氷盤凍着に伴う直立杭構造物に作用する軸方向氷力について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 482~485, 1982.

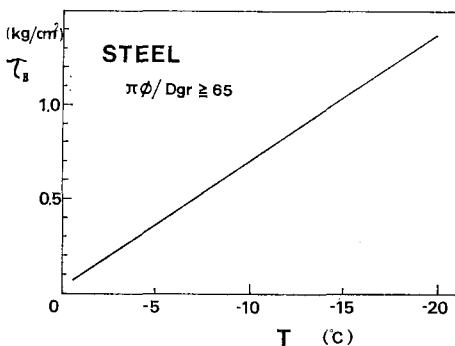


図-11