

直立杭構造物に作用する海水の力に関する研究

佐伯 浩*・小野 敏行**・山田 満***・尾崎 晃****

1. 緒 論

本研究は寒冷地海岸、海洋における海水の影響を受ける抗構造物に関して主として二つの問題について取り扱ったものである。一つは海中に独立して建設されている円断面直立抗に海水盤が付着（凍着）している場合に、水位の上昇、下降により、抗構造物に上下方向の軸力が作用する。水位が上昇する場合には鉛直上向の軸力が作用し、抗を引き抜く力が作用するし、水位が下降する場合には鉛直下向の軸力が作用し、抗を押込んだり、坐屈させるような力が作用するがこの問題を取り扱っている。もう一つは、今まで、抗構造物に作用する全氷力については数多くの研究成果が発表されているが、未だ、氷圧力の分布形状に関する研究は皆無である。本研究は、実験の容易さから、矩形断面抗に作用する氷圧力の分布形状と氷盤の破壊性状を実験的に調べた。

2. 抗構造物に作用する軸方向の氷力

図-1 に示すように、半径 a の円断面抗構造物に氷盤

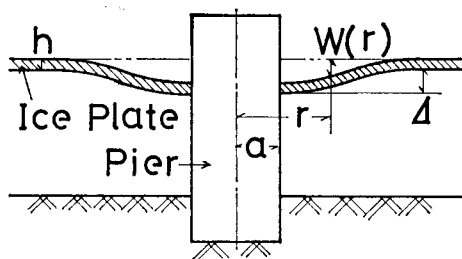


図-1

が付着（凍着）した場合に、水位の上昇、下降に伴って抗構造物に軸方向の力が作用する。水位の変動が非常に緩やかな場合には、氷が粘弾性的な性質を示すために応力緩和が起こり、それ程大きな力は作用しないが、水位変化が比較的急な場合には、氷盤は弾性体とみなされ、抗に大きな軸方向力を及ぼす。Kerr¹⁾ は水位変動による

抗に作用する軸力を次のようにして求めている。まず、氷盤の撓み式は次式で示される。

$$D\nabla^4 W + \omega_0 \cdot W = 0 \quad a < r < \infty \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 W は半径 r 地点の沈下量、 ω_0 は海水の単位体積重量それに D は平板剛度で次式で示される。

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

ここで E はヤング率、 h は氷厚それに ν はポアソン比であり、 ∇^4 は次式で示される。

$$\nabla^4 = \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

(1) 式の一般解は次式で示される。

$$W(r) = A_1 \cdot \text{ber}(\lambda r) + A_2 \cdot \text{bei}(\lambda r) + A_3 \cdot \text{Ker}(\lambda r) + A_4 \cdot \text{Kei}(\lambda r) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $A_1 \sim A_4$ は境界条件により決まる定数であり、 λ は次式で表わされる。

$$\lambda = (\omega_0 / D)^{1/4}$$

$r = \infty$ において $W(r) = 0$ であるから、

$$A_1 = 0, \quad A_2 = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$r = a$ において $W(r) = \Delta$ 、たわみ角が 0 であるから、

$$W(a) = \Delta, \quad (dW/dr)_{r=a} = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

となり、 A_3, A_4 は次式で示される。

$$A_3 = -\{\Delta \text{Kei}'(\lambda a)\} / K_1, \quad A_4 = \{\Delta \text{Ker}'(\lambda a)\} / K_1 \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで K_1 は次式で示される。

$$K_1 = \text{Kei}(\lambda a) \text{Ker}'(\lambda a) - \text{Kei}'(\lambda a) \text{Ker}(\lambda a) \quad \dots\dots\dots(8)$$

従って氷盤の撓み式は次式で示される。

$$W(r) = \Delta \cdot \{-\text{Kei}'(\lambda a) \text{Ker}(\lambda r) + \text{Ker}'(\lambda a) \text{Kei}(\lambda r)\} / K_1 \quad \dots\dots\dots(9)$$

図-2 のように、抗に作用する軸力を P とすると、抗のまわりの力の釣合より次式が得られる。

$$P = -2\pi a \cdot Q_{rr}(a) \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで $Q_{rr}(a)$ は半径 a における氷のせん断力であり、その基本式は次式で示される。

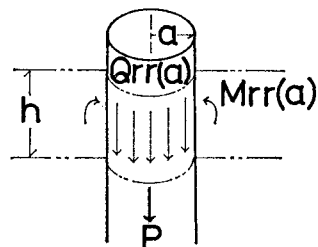


図-2

* 正会員 北海道大学工学部土木工学科助教授

** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

*** 正会員 三井造船(株)鉄構土木事業部設計部

**** 正会員 北海道大学工学部土木工学科教授

$$P = 2\pi a D \lambda^3 \left[\{Ker'(\lambda a)\}^2 + \{Ker''(\lambda a)\}^2 \right] / K_1 \quad (11)$$

よって杭に作用する軸力は (11) 式で求める事ができる。(11) 式は水位が Δ だけ上昇した場合であるが、水位が Δ だけ下降した場合には Δ に $-\Delta$ を入れてやれば良い事になる。Kerr は最終的に (11) 式を求めていて、この式より杭構造物に作用する軸力を求めれば良いとしている。この計算結果を図-3 に示す。図からも明らかなよ

$$P_B = 2\pi a h \cdot \tau_B \quad (12)$$

水位の変化による杭構造物と氷盤の剝離の限界は次式で示される。

$$P_B = P \quad (13)$$

(11), (12) 式を (13) 式に代入すると次式を得る。

$$\tau_B = \Delta \cdot D \cdot \lambda^3 \left[\{Ker'(\lambda a)\}^2 + \{Ker''(\lambda a)\}^2 \right] / h \cdot K_1 \quad (14)$$

各氷厚に対する計算結果を図-4 に示す。図中の曲線の

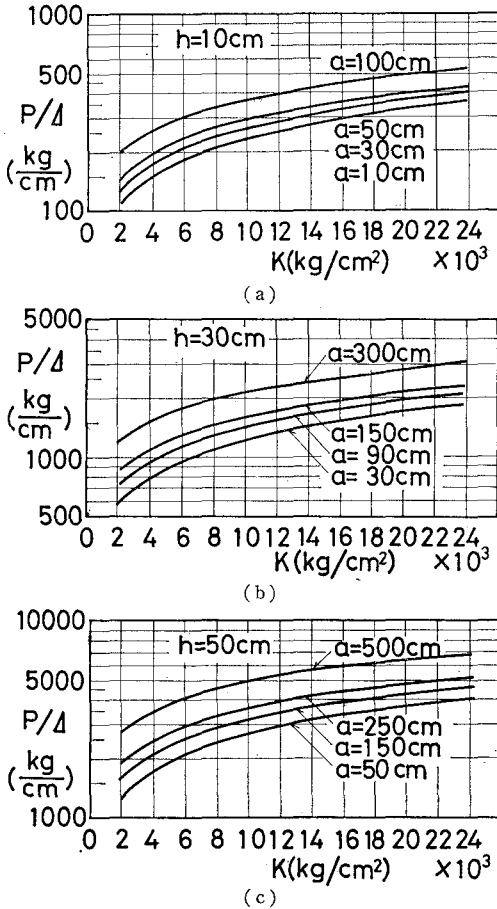


図-3

うに、他の条件が同一であるなら a が大きくなればなる程、 h が大きくなる程、 K が大きくなる程、また Δ が大きくなる程、軸力 P は大きくなる事が判る。

しかし、Kerr の計算によると、水位の変化量 Δ が大きくなるにつれて軸力 P は無制限に大きくなるが、現実には水位の変化量 Δ が大きくなると、曲げモーメントにより氷盤が曲げ破壊を起こすか、氷盤と杭構造物の接触面に働くせん断力が氷盤と杭面との付着力を越える事により剝離が起こるはずである。

(1) 杭構造物と氷盤が剝離する条件

氷と杭構造物材料間の付着強度を τ_B とすると、杭と氷盤の付着力 P_B は次式で表わされる。

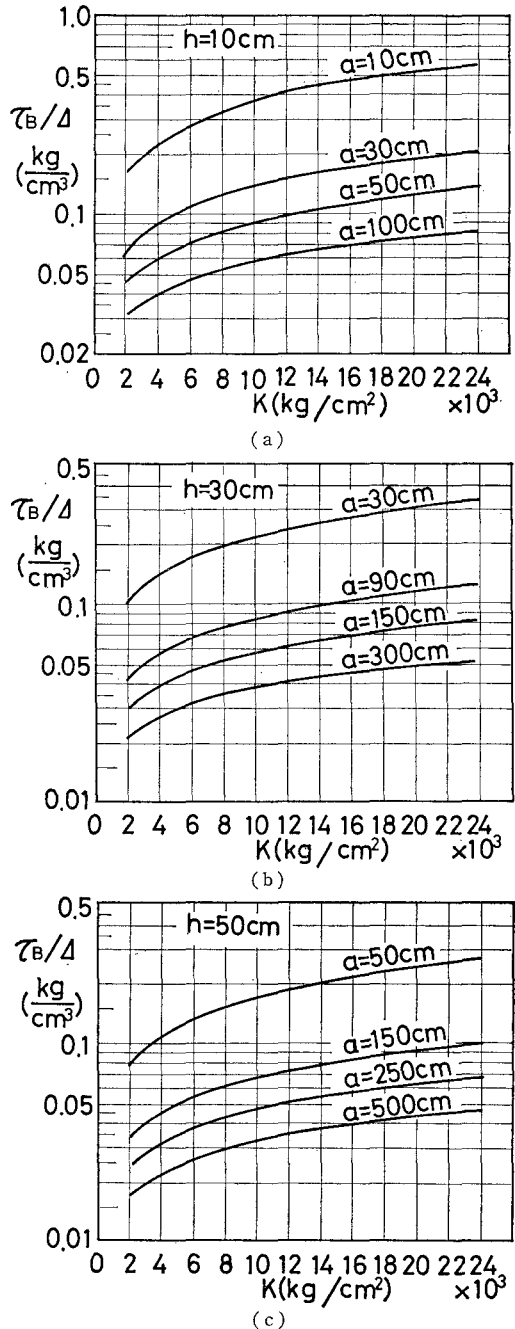


図-4

下側の領域が杭構造物と氷盤が剝離する領域である。この計算結果から、氷盤の杭構造物材料への付着強度 τ_B が弱ければ弱いほど、 (a/h) が小さければ小さいほど、杭構造物と氷盤間の剝離が起り易い事が明らかとなった。また、他の条件が同じであるなら、弾性係数が大きいほど剝離が起り易い。

(2) 氷盤が曲げ破壊を起こす条件

平板の弾性理論より曲げモーメントは次式で示される。

$$M_r = -D \left\{ \frac{d^2 W}{dr^2} + \nu \frac{1}{r} \frac{dW}{dr} \right\} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$M_\phi = D \left\{ \frac{1}{r} \frac{dW}{dr} + \nu \frac{d^2 W}{dr^2} \right\} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここで M_r は半径に直角な断面に作用する曲げモーメントであり、 M_ϕ は半径に平行な断面に作用する曲げモーメントである。杭構造物と氷盤の接点での氷盤の曲げモーメントは次式で示される。

$$(M_r)_{r=a} = -D \cdot \Delta \cdot \lambda^2 \cdot K_2 / K_1 \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$(M_\phi)_{r=a} = \nu \cdot D \cdot \Delta \cdot \lambda^2 \cdot K_2 / K_1 \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$K_2 = Kei'(\lambda a) Kei(\lambda a) + Ker'(\lambda a) Ker(\lambda a) \quad \dots\dots\dots(19)$$

(17), (18) 式により、曲げモーメントによって氷盤の応力が曲げ強度 σ_B に達した時の条件は次式で示される。

$$\sigma_B = \pm 6(M_r)_{r=a} / h^2 = \mp 6D \cdot \Delta \cdot \lambda^2 \cdot K_2 / (h^2 \cdot K_1) \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$\sigma_B = \pm 6(M_\phi)_{r=a} / h^2 = \pm 6 \cdot \nu \cdot D \cdot \Delta \cdot \lambda^2 \cdot K_2 / (h^2 \cdot K_1) \quad \dots\dots\dots(21)$$

上式より、氷盤が曲げ破壊を起こす時の水位の上昇量 Δ_{max} を求める事ができる。

$$\Delta_{r, max} = \sigma_B \cdot h^2 \cdot K_1 / (6D \lambda^2 K_2) \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$\Delta_{\phi, max} = \sigma_B \cdot h^2 \cdot K_1 / (6 \cdot \nu \cdot D \lambda^2 K_2) \quad \dots\dots\dots(23)$$

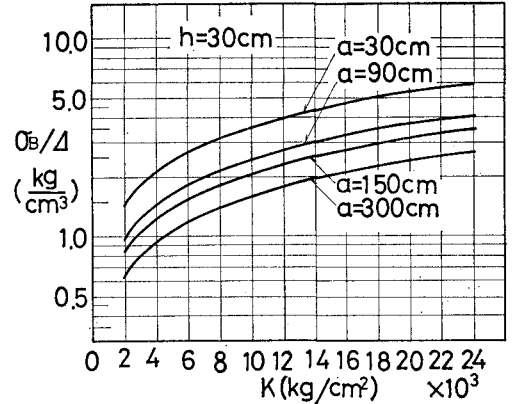
上の2つの式を較べると、 $\nu < 1.0$ であるから、(22) 式で示される $\Delta_{r, max}$ の方が小さいので、氷盤が曲げ破壊する時には、先に放射状のクラックが生じ、次に同心円状のクラックが発生する事が判る。氷盤が曲げ破壊する時の杭に作用する最大の軸力 P_{max} は次式で計算される。

$$P_{max} = \pi a \lambda h^2 \sigma_B \cdot [\{ Ker'(\lambda a) \}^2 + \{ Kei'(\lambda a) \}^2] / 3K_2 \quad \dots\dots\dots(24)$$

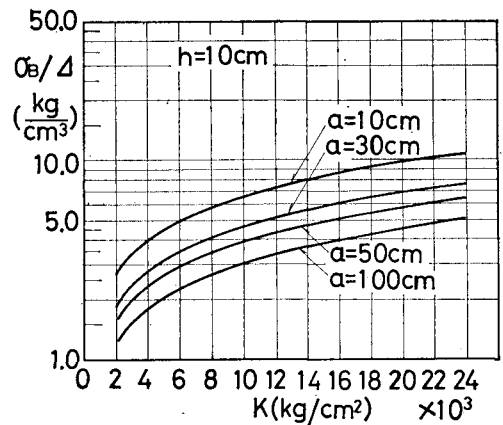
(22) 式を計算した結果が 図-5 である。図中の曲線の上側の領域では曲げ破壊が起り、その場合の軸力は (24) 式で計算する事ができる。また曲線の下側の領域では氷盤が曲げ破壊をしないのであるから軸力は (11) 式で計算すればよい。次に (14) 式と (22) 式より、 (σ_B / τ_B) は次式で計算でき、その結果を 図-6 に示す。

$$\sigma_B / \tau_B = 6K_2 / (h \cdot \lambda) [\{ Ker'(\lambda a) \}^2 + \{ Kei'(\lambda a) \}^2] \quad \dots\dots\dots(25)$$

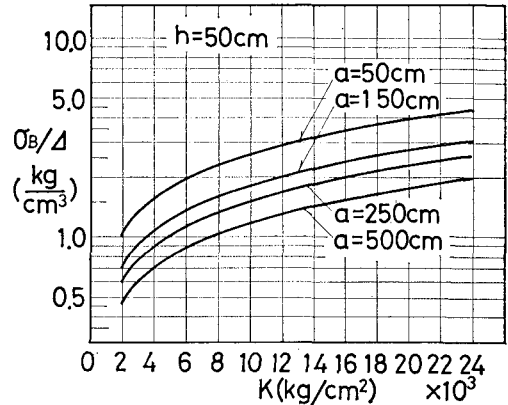
これらの曲線上では氷盤の杭からの剝離と曲げ破壊が同時に起こる事を示したもので、これらの曲線より上の領域では氷盤と杭との間で剝離が先に起こり、曲線の下側



(a)



(b)



(c)

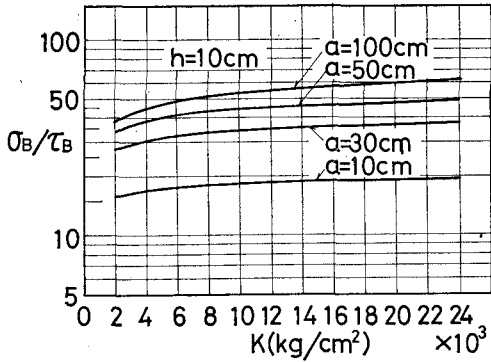
図-5

の領域では曲げ破壊が先に起こる事を示している。

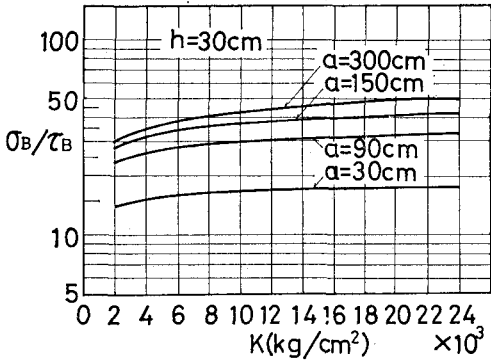
(3) 軸力 P の算定方法

杭構造物に付着した氷盤が水位の上昇、下降によって作用する軸力の実際の計算手順について述べる。

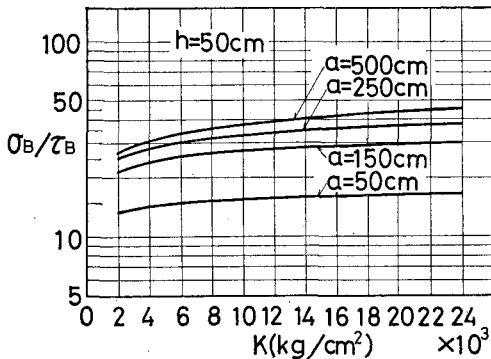
a) 設計の対象となる氷盤の氷厚 h 、ヤング率 E 、ポアソン比 ν 、曲げ強度 σ_B それに氷と杭構造物材料間の付着強度 τ_B を求めておく。



(a)



(b)



(c)

図-6

b) σ_B/τ_B を計算し、図-6 を利用して氷盤が曲げ破壊をするか、剝離を起すかどうかを調べる。

c) もし先に剝離を起す場合には、予想される水位変化量から τ_B/Δ を計算し、図-4 より実際に剝離が起る場合には (12) 式より軸力 P を計算する。もし剝離が起らない場合には (11) 式で P を計算する。

d) 曲げ破壊が先に起る場合には、予想される水位変化量から σ_B/Δ を計算し、図-5 より実際に曲げ破壊が起るかどうかを調べる。もし曲げ破壊が起る場合には、(24) 式より P を計算し、曲げ破壊が起らない場合には (11) 式より P を計算する。

3. 直立杭構造物に作用する氷圧力分布

直立杭構造物に作用する全氷力に関しては過去に数多くの研究成果が発表されているが、氷力の分布（氷圧力の分布）形状に関する研究は皆無に等しい。オホーツク海に面したサロマ湖の新湖口の工事に使われた仮設構造物の型鋼が、海水のためフランジが曲がり、断面係数が非常に小さくなった例もあるように、海水の影響を受ける海岸、海洋構造物の部材の設計のためには、氷圧力の分布形状が明らかにされねばならない。

(1) 実験方法及び実験装置

この氷圧力分布の実験は2種類の実験方法により行なわれた。一つは現地の氷盤の一部をT型状に切り抜き、そこに控板を取り付けたオイルジャッキの先端に矩形断面杭を取りつけて氷盤に貫入させる方法で²⁾、もう一つは筆者等が開発した氷圧力測定装置²⁾を用いた実験である。前者の実験はサロマ湖の氷盤上で行こなわれ、杭の断面形状は矩形とし杭幅 B は 20 cm とした。杭の前面には、図-7 に示すように 23 個の穴をあけ、4 個の半

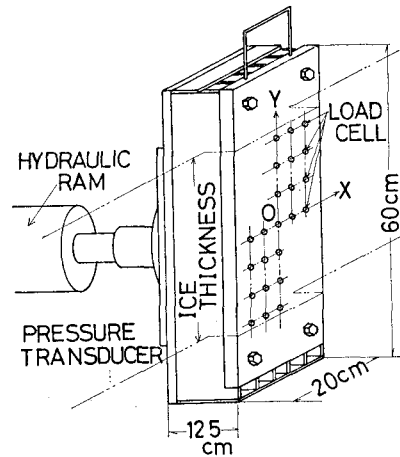


図-7

導体小型荷重計を4個用いて、位置をずらしながら圧力分布を測定した。また使わない穴はボルトで埋めて、杭表面を可能な限りなめらかにした。また杭に作用する全氷力はオイルジャッキ内の圧力を圧力変換器を用いて測定し、杭の氷盤への貫入速度はストローク 100 mm の変位計を用いて測定した。

(2) 実験結果と考察

実際の無限氷盤上での実験においては氷厚 h は約 25 cm で、氷盤の表面から 3~4 cm は雪のため粒状結晶の水で強度も比較的弱く、また下面から 2~3 cm の部分は、氷厚増加の過程にあり、Skelton Layer をなして、表層と同じく強度は弱い。また本実験中の氷温は平均して、2.0~2.3°C であった。また、この氷盤の成長方向に垂直方向にとった円筒供試体（径 10 cm、高さ 20 cm）

の一軸圧縮強度 σ_c は、荷重速度 $\dot{\sigma}_c = 1.0 \sim 3.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$ の範囲で約 $22 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$ で、ヤング率は約 9000 kg/cm^2 であった。実験の一部を図-8に示す。図中の P_A は杭と氷盤との接触面積 ($B \times h$) で、杭に作用する全氷力 F を割ったもので、杭に作用する平均圧力強度を意味する。また T は、杭に力がかかった時からの経過時間 t を最大全氷力を示す氷盤破壊時までの経過時間 t_B で割ったものである。図(a)は杭の貫入速度が $V = 0.0063 \text{ cm/s}$ と最も遅い場合の実験結果である。 $T \leq 0.6$ の範囲では

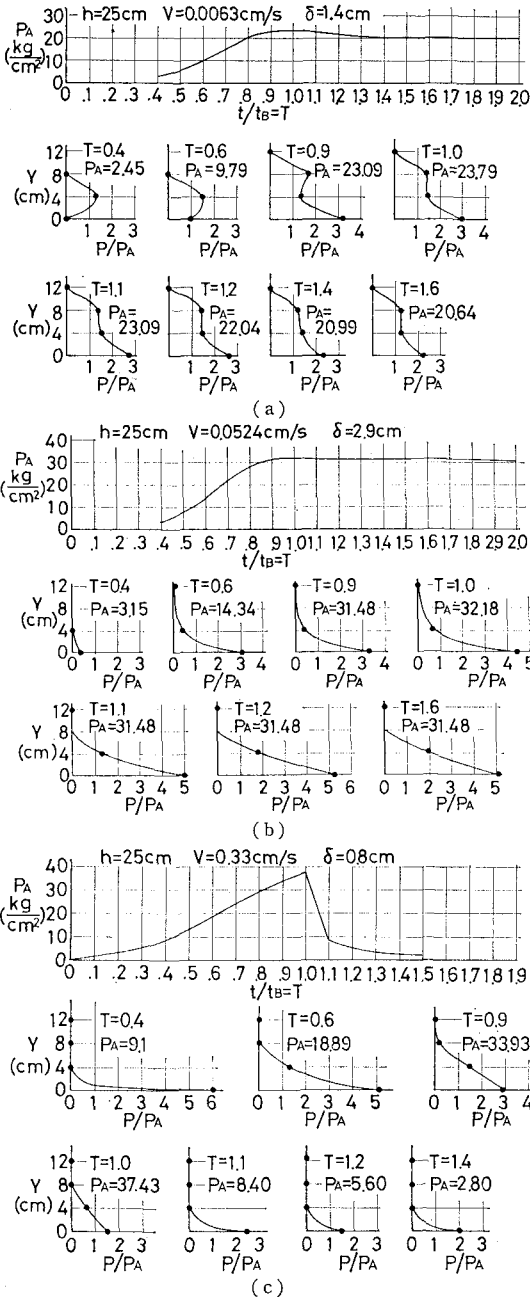


図-8

中心部では小さい氷圧力 P を示すが、 $T > 0.6$ の範囲では中心部で最大の氷圧力を示す。そして最大の平均氷圧力を示す点を氷盤の破壊点とするなら、破壊後も氷力及び氷圧力分布ともに変化をしない。これはすでに筆者等が氷盤の破壊モードを調べた時に貫入速度が遅い場合、図-9(a)に示すような破壊性状を示した事と良く一致

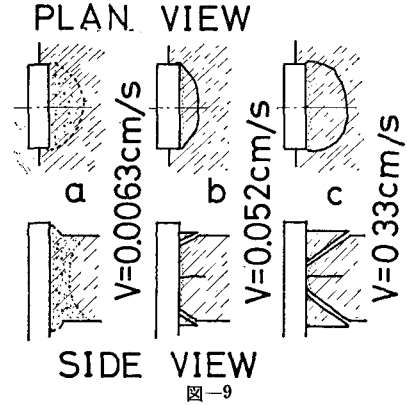


図-9

している³⁾。次に図-8の(c)は貫入速度の最も大きい $V=0.33 \text{ cm/s}$ の場合であるが、この場合杭の中心部で最大の氷圧力を示す。また、 $0.6 < T < 0.9$ の範囲では杭中心部の氷圧力は約 100 kg/cm^2 となり、一軸圧縮強度の約5倍の値を示す事が明らかとなった。また氷盤が破壊した後は急に氷力は小さくなり、上層・下層面近くの氷圧力は零となり、この時図-9(c)に示すような、上・下面で楔形に氷盤の一部がはがれる。この現象は貫入速度 V が大きい程、氷の強度が強い程顕著になる事がすでに報告されているが³⁾ その事実とよく一致している。次に $V=0.0524 \text{ cm/s}$ の場合には、 $V=0.33 \text{ cm/s}$ の場合とよく似かよっていて、上下層の一部で楔形に氷盤の剝離が起こり、図-9(c)の場合に相当する。また、中心部の最大氷圧力は、 $1.0 < T$ で $120 \sim 150 \text{ kg/cm}^2$ となっていて、一軸圧縮強度の5~6倍となっている。以上の結果から、杭構造物に作用する氷圧力の分布形状は一様分布ではなく、氷盤の接触面の中心部で非常に大きな氷圧力が作用していて、その氷圧力は一軸圧縮強度の5~6倍になる事が明らかとなった。また、氷圧力分布の時間的な変化と全氷力の時間的な変化から、氷盤の破壊性状が詳細に説明できた。

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) Saeki, H., K. Hananaka and A. Ozaki: Experimental study on ice forces on a pile, Proc. of 4th International Conf. of Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, pp. 695~706, 1977.
- 3) Saeki, H. and A. Ozaki: Ice forces on piles, P. Tryde ed., Physics and Mechanics of Ice, Springer-Verlag, pp. 242~350, 1979.