

直立杭構造物に作用する氷圧分布と氷盤の破壊周期について

佐伯 浩*・田中祐人**・小野敏行***
酒井雅史****・尾崎 晃*****

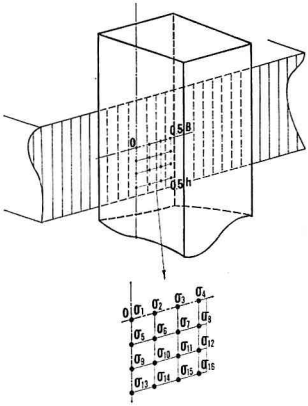
1. 序

海氷の影響を受ける寒冷地の直立構造物の設計にあたっては、1) 静的氷力、2) 動的氷力、3) 氷盤凍着に伴う杭軸方向氷力、4) ice jamming の効果、5) pile up の効果、6) 構造物の磨耗等のほか、複数杭構造物の場合には、杭相互の干渉効果等も考慮に入れる必要がある。直立杭状構造物に及ぼす海氷の効果については、今までには主に、杭構造物に作用する全氷力（静的氷力）が考えられていたが過去の寒冷地の杭構造物の被害例を見ると多種多様である¹⁾。本研究は、主に直立杭構造物に作用する氷圧力分布と、杭構造物が氷盤に貫入する場合の氷盤の破壊周期を取り扱っている。

2. 実験方法と実験装置

実験装置の検定を除いて、すべての実験はオホーツク海に面したサロマ湖で行った。サロマ湖の海氷は、通常2月初旬では20～30 cmの氷厚であるが、積雪の影響を受けて、氷質はそれほど良いとは言えない。そこで、実際の海氷盤に3.5 m×2.5 mの穴をあけ、新たに結氷させて良質の氷盤を作り、それを実験に用いた。氷厚は12～14.5 cmで氷盤の密度は平均して0.90 g/cm³、塩

分量は8‰、平均のグレインの径は10 mmであった。実験には、実験のし易さから矩形断面とし、その装置の写真を図一1に示す。杭が氷盤と接する面は20 mm厚のステンレス板で、図一2に示す様に、16個の圧力変換器が取り付けられている。この16

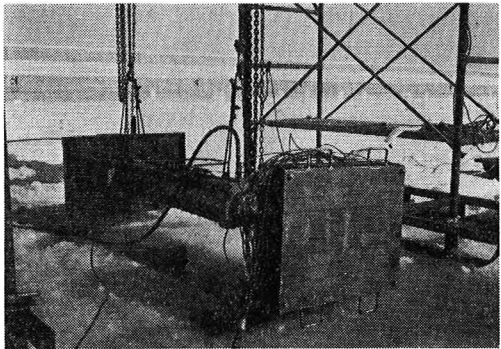


図一2

個の圧力変換器で、海氷の圧力分布を測定する。前報²⁾

表一1

RUN	B (cm)	h (cm)	σ_B (kg/cm ²)	T_B (sec)	$\dot{\epsilon}$ ($\times 10^{-8} \cdot \text{sec}^{-1}$)
1	20	12.0	—	—	—
2	20	12.0	19.1	13.0	2.05
3	20	12.0	18.1	10.0	2.64
4	20	12.0	21.3	11.8	2.53
5	20	12.0	—	—	—
6	20	12.0	15.7	2.30	12.4
7	20	12.0	21.8	24.3	0.815
8	20	12.0	18.9	40.8	0.719
9	20	12.0	20.0	48.0	0.856
10	40	14.5	28.9	—	0.343
11	40	14.5	30.9	28.8	0.280
12	40	14.5	27.9	26.1	0.667
13	40	14.5	26.8	1.13	1.33
14	40	14.5	25.3	1.10	1.76
15	40	14.5	—	—	—
16	40	14.5	13.1	37.5	0.379
17	60	14.5	24.7	7.63	0.779
18	60	14.5	26.8	8.5	0.610
19	60	14.5	—	—	—
20	60	14.5	30.0	1.62	1.60



図一1

* 正 会 員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
** 正 会 員 工修 川崎製鉄(株) 構造技術研究所
*** 北海道大学工学部
**** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
***** 正 会 員 工博 北海道工業大学教授 土木工学科

の同様の実験では、4個の小型荷重計を用いたが、予備実験の結果、圧力変換器でも十分な精度が得られることが明らかとなった。矩形断面杭に作用する全氷力はオイルジャッキのシリンダー内の油圧を圧力変換器で測定した。また、杭の貫入速度は変位計で、氷盤の破壊性状は目視とビデオカメラで測定した。実験は、杭幅 20, 40, 60 cm に対して 20 ケース行ったが、その諸元を表-1 に示す。

3. 氷盤の破壊周期

氷盤に杭が貫入する場合、氷盤は断続的に破壊する。氷盤の破壊特性の大まかな分類についてはすでに報告しているが^{3), 4)}、今回は主に氷盤の最初から破壊後の氷力変動周期について調べた。この様な氷盤の断続的な破壊と杭構造物の相互干渉による被害は、ボスニア海の海中燈台などで起っていて、その被害例から見ると、比較的小さな径で固有振動数の小さい構造物に多い様で、この種の研究は Määtänen⁵⁾、Matlock et al.⁶⁾ によって行われている。しかし、

氷盤の破壊周期を調べた研究は見当たらない。実験結果から破壊モードを歪速度 $\dot{\epsilon}$ で分類すると 図-3 のごとくなる。氷盤に杭が貫入場合の歪速度の計算は、Michel⁷⁾ の求めた $\dot{\epsilon} = v/4B$ を用いて行った。B は杭幅であり、v は杭の貫入速度である。図中の σ は、杭に作用する全氷力 F を氷盤との接触面積 $B \times h$ (氷厚) で除したもので、

平均圧力を示す。 σ_B は、最大の氷力を示す時の平均圧力強度を意味し、 T_B は荷重開始から最大氷力を示すまでの時間で破壊時間という。最初の氷盤の破壊後は、氷盤は周期的に破壊するが、その周期を T_p 、その平均氷圧力を σ_p とする。図から明らかなように氷盤の破壊性状は大きく 3 つに分類される。歪速度 $\dot{\epsilon}$ が $\dot{\epsilon} \leq 0.9 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の範囲では、氷圧力 σ は杭の貫入とともに緩やかに上昇し、最大氷力を示した後は、断続的な破壊をしながら緩やかに氷圧力 σ は小さくなっていく。これは、前報で圧壊領域とした破壊性状に一致する。次に B に示す歪速度が $1.0 \times 10^{-3} \leq \dot{\epsilon} \leq 3.0 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の範囲では、氷圧力 σ は比較的急に上昇した後急に破壊が起

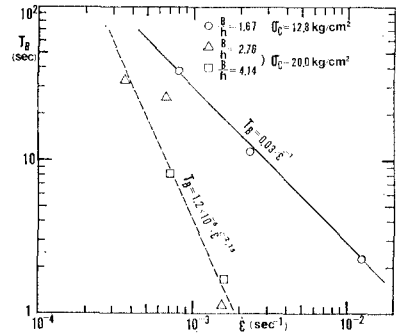


図-4

こり、その後は周期的に破壊を続ける。これは、遷移領域の破壊と名付けているもので、この領域の歪み速度の時、最大の氷力を示す。次に C に示す歪み速度が $\dot{\epsilon} \geq 10.0 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の範囲では、最大氷圧力を示す時、杭に接触している領域の氷盤が楔状に破壊し、その後は短い周期で破壊を繰り返す、せん断破壊領域と名付けている領域の破壊様式である。一般に、今まで杭に作用する氷力の研究は、 T_B 時の氷力を意味し、 $\sigma_B \times h \times B$ で表わされる。最大の氷力を示す。よって、その最大の氷力は杭構造物に作用する静的氷力として設計に用いられる。しかし、最初の氷盤破壊後はその氷力そのものは小さいが周期的に破壊するため、杭構造物の固有振動数に近づくとき相互干渉を起こし杭構造物の変形も静的氷力の場合に比べて大きくなるが報告されている¹⁰⁾。まず、 T_B と歪み速度 $\dot{\epsilon}$ との関係を調べたものが 図-4 である。図からも明らかな様に、 $\dot{\epsilon}$ が大きくなると T_B は小さくなり、同一の歪み速度でもアスペクト比 B/h が小さいほど、大きな T_B を示し、同一のアスペクト比であるなら $T_B = K \cdot \dot{\epsilon}^n$ で示され、実験結果から次式が得られた、

$$T_B = 0.03 \cdot \dot{\epsilon}^{-1} \quad B/h = 1.67 \dots (1)$$

$$T_B = 1.2 \times 10^{-8} \cdot (\dot{\epsilon})^{-2.15} \quad B/h > 2.76 \dots (2)$$

この理由は、Croasdale⁸⁾ や Reinike⁹⁾ の限界塑性理論を用いた矩形断面杭に作用する氷力理論から、アスペクト比が $B/h \leq 2.5$ の範囲では、 B/h が小さくなればなるほど、氷盤内の応力状態は側方圧の影響を強く受け二軸応力状態に近づき、 $B/h > 2.5$ の範囲では側方圧の影響はほとんど受けないことによるものと思われる。以上のことから判断すると、 B/h が実験の範囲を超える $B/h \geq 4.1$ の範囲でも、 $B/h = 2.75, 4.1$ の場合の結果と一致するものと思われる。次に、最大氷力発生後の周期的な破壊領域における周期 T_p と平均応力 σ_p の関係を示したものが 図-5 である。図 (a) は歪み速度が $\dot{\epsilon} = 7.9 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で $B/h = 1.67$ の場合であるが、図からも明らかな様に、 T_p が大きくなればなるほど σ_p も大きくなることが判り、また、 σ_p/σ_B は常に 1.0 より小さい。図 (b) : $\dot{\epsilon} = 2.1 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の場合の結果であ

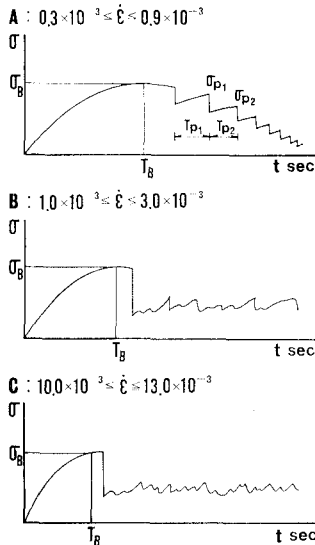
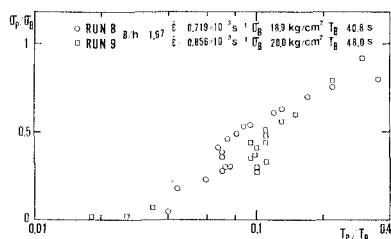
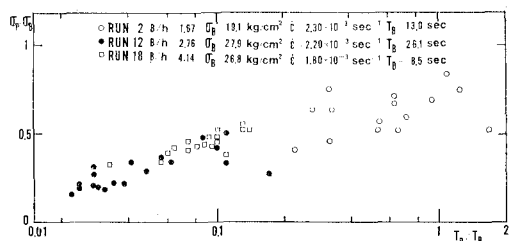


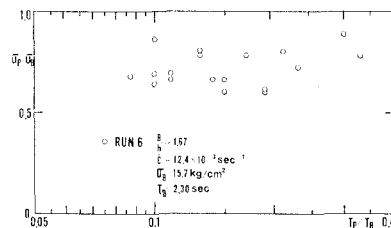
図-3



(a)



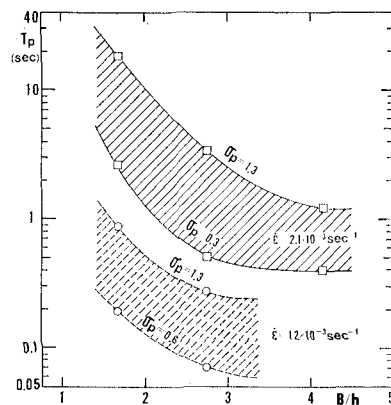
(b)



(c)

図—5

るが、図 (a) と同様 $T_p/T_B < 0.4$ の範囲では T_p が大きくなるほど σ_p は大きくなるが、 $T_p/T_B \geq 0.4$ の範囲では T_p に関係なく σ_p は一定値をとる。また、全体的に見てアスペクト比 B/h が大きいほど T_p/T_B は小さい範囲を示している。図 (c) は歪み速度の大きい範囲であるが、 T_p/T_B の変化に対して σ_p/σ_B の変化は非常に小さいことが判る。図—5 の結果をまとめたものが図—6 である。歪み速度 $\dot{\epsilon}$ とアスペクト比 B/h が与え



図—6

られると T_p の範囲が得られることになる。実測の氷力は一見周期的に見えるが、実際には不規則変動をしている。本来であるなら σ_p の周波数に対するスペクトルを求めるべきであるが、現在のオイルジャックのストロークが 1 m と短いため、データ数が不足で定常不規則変動とは見なさないからである。実際の現象においては、杭構造物の振動と氷盤の破壊がお互いに干渉し合って、氷盤の破壊周期も変化することが予想されるので、シミュレーションの目安程度でかまわないと思われる。氷盤の破壊と杭構造物の振動の相互干渉に関する実験結果によると¹⁰⁾、動的応答増率が最大 2.3 にまでもなることが報告されているが、そうすると静的最大氷力よりも大きくなり、構造物の設計にあたっては、動的解析が是非とも必要であることを示している。また、この氷盤破壊に伴う杭構造物の振動のため当然、構造材料の疲労現象も設計にあたっては考慮せねばならない。

4. 杭構造物に作用する氷圧力分布

杭構造物に作用する氷の水平力が、構造物の設計にとって最も重要であるが、杭径の大きい肉厚の薄い構造物の場合には、極部座屈も考慮せねばならない。この様に、杭構造物の応力計算にあたっては氷圧力の分布形状が与えられねばならない。また、杭構造物に極部座屈が起ると、直立杭構造物に作用する氷力が次の式 (3)¹¹⁾ で表わされることから、形状係数 c の値が変化し、杭構造物に作用する氷力も変わることになる。

$$F = c\sqrt{B} \cdot h \cdot \sigma_0 \quad (3)$$

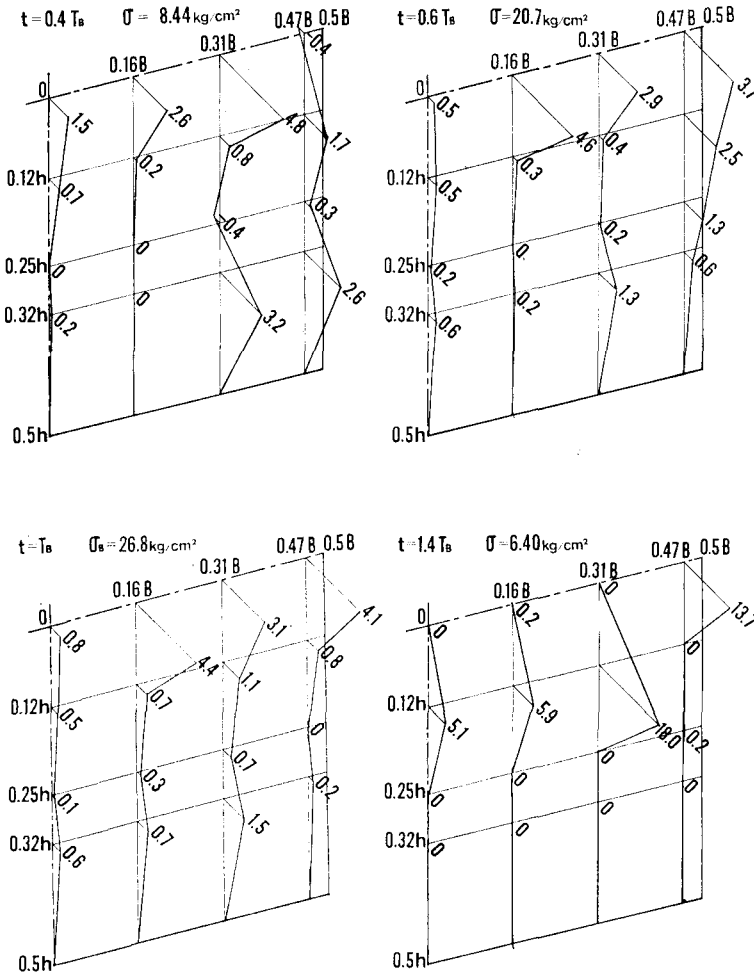
F : 氷力 (kg), c : 形状係数 ($\text{cm}^{1/2}$), B : 杭の幅 (cm), h : 氷厚 (cm), σ_0 : $\dot{\epsilon} = 1 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の径 10 cm, 高さ 20 cm の円筒供試体を用いた圧縮強度。

さて、氷圧力分布の時間変化を調べたものの一例が図—7 である。この図は、杭幅 60 cm で、アスペクト比が $B/h = 4.1$ 、歪み速度が $\dot{\epsilon} = 0.6 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の場合の実験値である。荷重が作用し始めてからの時間を t とし、 $t = 0.4 \cdot T_B$, $0.6 \cdot T_B$, $1.0 \cdot T_B$ それに $1.4 \cdot T_B$ の場合の氷圧力分布を示している。氷圧力分布形状はかなり複雑であるが、この図から判断すると時間 t に関係なく、氷厚の中心線が大きい氷圧力を示しているし、また杭の中心線から離れるほどに作用する氷圧力は大きくなる。この傾向は、アスペクト比が $B/h = 0.275$, 1.67 の場合でも同様な結果を示している。また、図—7 において、 $t = 0.4 \cdot T_B$ で、氷圧力がゼロになっているが、これは杭面と氷盤が未だ完全に接触していないためである。現地氷盤上での実験であるため、氷盤の切断はチェーンソーで行ったため、切断面は完全に滑かではないことによるものと考えられる。また、 $t = 1.4 \cdot T_B$ の場合にも氷圧力がゼロを示す点が氷盤の下面近傍に多く見られるが、こ

RUN 18

$$\sigma_0 = 26.8 \text{ kg/cm}^2, \dot{\epsilon} = 0.610 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}, T_0 = 8.5 \text{ sec}$$

$$B/h = 4.14$$



図—7

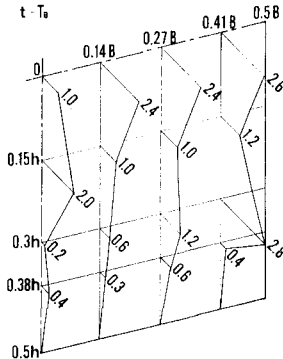
れは、杭の貫入に伴って、氷力は増加し、最大の氷力を示す時に杭構造物に接する領域の氷盤の上下面が歪状に破壊するために、 $t = 1.4 \cdot T_B$ 時には杭に接する氷盤の上・下面には氷が密着していないためである。図—8に歪み速度 $\dot{\epsilon} = 0.610 \sim 0.815 \times 10^{-3} \cdot \text{sec}^{-1}$ の各アスペクト比に対する、最大氷力時 ($t = T_B$) の氷圧分布を示す。同図からも明らかに氷厚の中心軸 ($h = 0$) 上が大きな氷圧を示し、杭端部 ($0.5B$) の方が大きい氷圧を示す。筆者の1人、佐伯は $B = 20 \text{ cm}$, $B/h = 0.8$ の条件で同様の実験を行っている²⁾が、歪み速度 $\dot{\epsilon} = 0.625 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の場合、本実験の圧力分布形状とはかなり違って、氷厚方向の分布は氷厚の中心軸の方が大きくて今回の結果と似寄っているが、杭幅方向の分布では杭の中心が杭の端部よりはるかに大きくなっている。つまり、杭と氷盤の接触部の中央部に非常に大きな氷圧が作用している。以上の結果から判断すると、アスペクト比が小さいと、杭近傍の氷盤中の応力は三軸状態となっていて、最大の氷圧力は、海水の一軸圧縮強度 σ_0 の

RUN 7

$$\sigma_0 = 21.8 \text{ kg/cm}^2, \dot{\epsilon} = 0.815 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}, T_0 = 24.3 \text{ sec}$$

$$B/h = 1.67$$

$$t = T_0$$



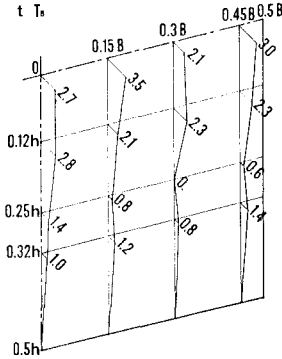
(a)

RUN 12

$$\sigma_0 = 27.9 \text{ kg/cm}^2, \dot{\epsilon} = 0.667 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}, T_0 = 26.1 \text{ sec}$$

$$B/h = 2.76$$

$$t = T_0$$



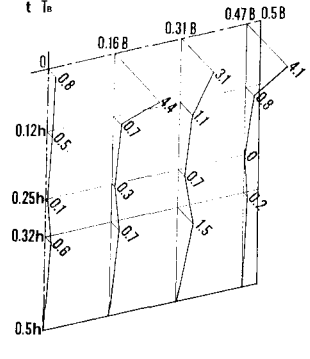
(b)

RUN 18

$$\sigma_0 = 26.8 \text{ kg/cm}^2, \dot{\epsilon} = 0.610 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}, T_0 = 8.5 \text{ sec}$$

$$B/h = 4.14$$

$$t = T_0$$



(c)

図—8

5～6倍になる。さて、氷圧力の分布形状をまとめたものを図-9に示す。これは、図-2に示すように杭面の一部で測定したものであることと、過去の氷盤内の強度分布測定結果から同一の氷盤でも局所的に、また、鉛直方向にも強度なかなりバラツキが見られることから図-9が完全に正確とは言えないが、この圧力分布を積分して求めた氷力は、ジャッキのシリンダーの内圧から得ら

れる氷力の80～120%であったことから判断すると実用上は十分と思われる。同一のアスペクト比でも、歪み速度によって氷圧力分布形状は異なる。全氷力が最も大きい歪み速度は $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ であるが、この時の最大氷力発生時の氷圧力分布は、氷厚中心線上に集中している。

また、 $\dot{\epsilon} < 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ 、 $\dot{\epsilon} > 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ の場合にはアスペクト比に関係なく氷圧力は杭全体に作用している。また、局部的には、海水の一軸圧縮強度 σ_0 の4～8倍の氷圧力が作用することになるので、構造物の設計にあたっては、氷圧力分布を考慮した応力解析が必要である。なお、本研究では実験のしやすさから矩形断面構造物についての検討を行ったが、現在円断面杭構造物の実験の準備中である。

あとがき

本研究の現地実験にあたっては、現、埼玉県庁土木部勤務の小倉 滋氏、大成建設(株)の傅、土屋の両氏に多大の労を煩わした。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 北海道開発局：氷海航行支援技術に関するフィジビリティスタディー—氷海域の港湾・沿岸工学に関する調査—, 1983年。
- 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) Saeki, H. and A. Ozaki: Ice Forces on Piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde, Springer-Verlag, pp. 342～350, 1980。
- 4) 佐伯 浩・浜中建一郎・西谷一典・小野敏行・尾崎 晃：海岸構造物に作用する海水の力に関する研究(5)，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 490～494, 1979。
- 5) Määttänen, M.: Stability of Self-excited Ice-induced Structural Vibrations, Proc. of P.O.A.C., pp. 684～694, 1977。
- 6) Matlock, H., Dawkins, W. P. and Panak, J. J.: A Model for the Prediction of Ice-Structure Interaction, Offshore Technology Conference, Paper number OTC 1066。
- 7) Michel, B. and N. Toussaint: Mechanics and Theory of Indentation of Ice Plates, Jour. of Glaciology, Vol. 19, No. 81, pp. 285～300, 1977。
- 8) Croasdale, K. R.: Indentation Tests to Investigate Ice Pressures on Vertical Piers, Jour. of Glaciology, Vol. 19, No. 81, pp. 301～311, 1977。
- 9) Reinicke, K. M. and R. Remmer: A Procedure for the Determination of Ice Force, Proc. IAHR Symposium on Ice Problems, pp. 219～237, 1978。
- 10) 船舶・海岸プロジェクト事業本部：氷海資源開発技術の研究，三井造船技報，第117号，pp. 56～70, 1983。
- 11) Saeki, H., K. Hamanaka and A. Ozaki: Experimental Study on Ice Force on a Pile, Proc. P.O.A.C., Vol. 2, pp. 695～707, 1977。

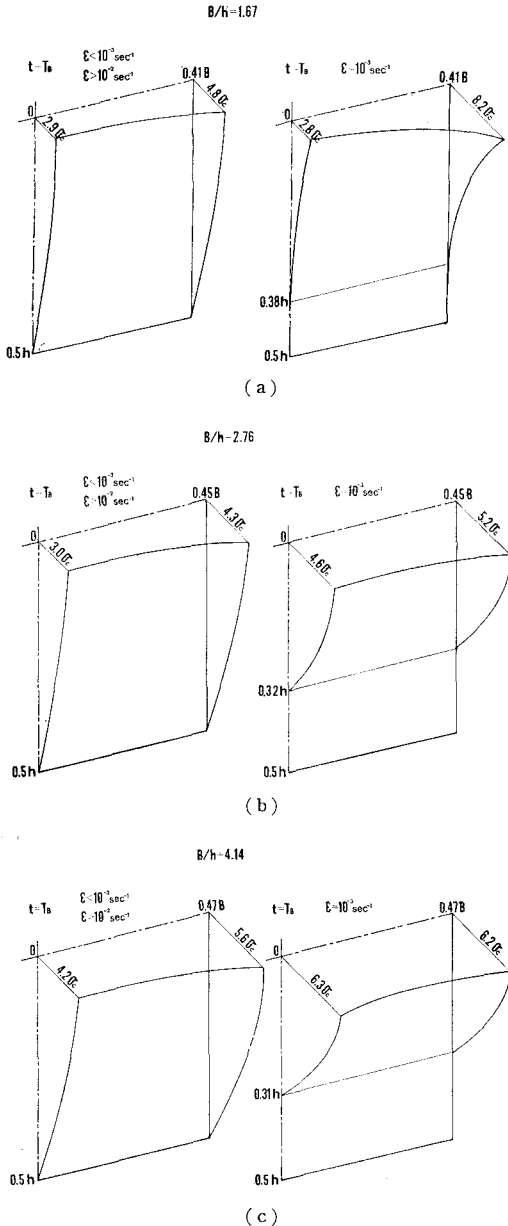


図-9