

多脚海洋構造物に作用する全氷力の評価について

Total Ice Forces on Multi-legged Structures

竹内貴弘*, 岡本 智**, 小野敏行***, 佐伯 浩****

Takahiro.Takeuchi, Satoshi.Okamoto, Toshiyuki.Ono, Hiroshi.Saeki

The total horizontal ice force acting on multi-legged structures in ice-infested seas is estimated by summing the force on a single pile. Non-simultaneous loading of first peak force and subsequent force acting on each pile as well as simultaneous loading of first peak force are considered in the method. It is obtained that total ice force of non-simultaneous loading, which is more realistic case, is estimated to be approximately 80% of that of simultaneous loading.

keyword, total ice force, multi-legged structures, ice-infested seas

1. はじめに

北部オホーツク海, ボツ海のように氷に覆われた海域に構造物を建設する場合, 氷力の評価は必要不可欠である。北極海のように氷象条件の厳しい海域では, 構造物はその安定上大型となる。これに対して, 氷象条件の比較的マイルドな地域では, 複数の杭から構成された多脚杭構造物も有効な形式となる。また, 水産資源の確保を目的とした海水制御構造物の氷力評価, 及び, 河川・海岸の栈橋に作用する氷力の算定においても, 複数の杭から構成された構造物に作用する氷力の評価法が必要である。単杭に作用する氷力の算定式は, 鉛直・傾斜・cone型断面の各々の場合において, 実験・理論・経験的に多数提案されている(中沢ら1986)。一方, 鉛直杭から構成された多脚構造物に作用する全氷力は, 単杭に作用する最大氷力を組合せることにより算定可能なことが, 佐伯ら(1984)により最初に示された。本研究では, 佐伯らの研究結果に基づき, 多脚杭には非同時的に最大氷力(初期氷力)が作用する点を考慮し, 初期氷力の後に発生する継続氷力(竹内ら, 1991)を含めた全氷力の評価を行った。ここでは, 四本脚・九本脚構造物を例に取り上げて, 全氷力の計算結果を報告する。

2. 計算法

1) 佐伯ら(1984)のモデル

多脚構造物と氷盤の相互作用形態は, 四本脚の場合, 図-1に示されているように四つのstageに分類される。すなわち, ①半無限氷盤先端が単杭(a)と相互作用する状態, ②単杭(a)には氷力が作用した状態で, 単杭(b)には隅角部を有する氷盤が作用する状態, ③単杭(a)と単杭(b)には氷力が作用した状態で, 単杭(c)には隅角部を有する氷盤が作用する状態, ④単杭(a), 単杭(b), 単杭(c)には氷力が作用した状態で, 単杭(d)には片持梁形状の氷盤が作用する状態, となる。したがって, 図1の状況は, 図-2に示されている三つのタイプの氷盤と構造物の相互作用モデルを組み合わせるにより再現される。

2) 各TYPE時の氷力(図2, 参照)

TYPE 1(a)時の氷力(F_s)は, 以下のSaeki式(1977, 1978, 1979, 1984, 1986)により推定できる。

$$F_s = K' \cdot C \cdot D^{0.5} \cdot h \cdot S \quad (1)$$

K' : 歪速度の関数として与えられるscale factor,

C : 構造物の形状で決まる係数。円形は5.0, 交角90°のくさび形は4.5, 矩形は6.8,

D : 構造物の幅,

h : 氷厚,

S : 歪速度が $10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ のオーダーで変形させた時の氷の一軸圧縮強度。

この式は, 最大氷力の初期氷力に基づいて実験的に提案された式である。また, この時の氷力の時系列は, 図-3の様に氷盤の同時破壊に基づく初期氷力($F_{\max}$)₁(= F_s), その後の断続的な圧縮破壊に基づく継続氷力(F_{sub})₁と

* 正会員 清水建設㈱技術研究所海洋環境 G (〒135 東京都江東区越中島3-4-17)

** 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

**** 正会員 北海道大学工学部土木工学科教授

なる。TYPE 1(b)の氷力は、Saeki et al.(1979,1984), Kato and Sodhi(1984)の研究報告に基づき計算できる。ここでは、杭間隔(K*D)が杭径(D)以上離れている時には、各杭には独立に氷力が作用するとし、(1)式で氷力は計算できる。

TYPE 2の時の氷力は、Saeki et al.(1984,1986)の過去の佐呂間湖のフィールド実験データを基に評価した。この時の実験条件は、アスペクト比(W/h)が約5、氷温(T)が-3℃、氷盤貫入時の歪速度は $10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ のオーダーであり最大氷力を与える条件であった。この時の氷力に関する時系列データは、図-3の様に示され、初期氷力値 $(F_{\max})_2$ 、その後の連続的な圧縮破壊に基づく継続氷力 $(F_{\text{sub}})_2$ となる。

TYPE 3の時の氷力は、Sodhi(1980)のBuckling解析及びSaeki et al.(1984,1986)の過去の佐呂間湖のフィールド実験結果に基づき、次式で評価できる。

$$F=2*\lambda *W' * \gamma * Lb^2 \quad (2)$$

$$(\sin(\alpha L/Lb))/\alpha = (\sin(\beta L/Lb))/\beta, \quad (\lambda > 1) \quad (3)$$

$$Lb=(E*h^3/12/\gamma)^{0.25}, \quad (4)$$

$$\alpha=((\lambda -1)/2)^{0.5} \quad (5)$$

$$\beta=((\lambda +1)/2)^{0.5} \quad (6)$$

上式は、beam形の氷盤の両端がfixという条件で誘導されている。また、 γ は水の単位体積重量、Eは氷の弾性係数である。

次に、 $(F_{\max})_1(=F_s)$ の値を単杭に作用する氷力の基準とし、各杭にはこの氷力の係数倍の力が作用するとし、各杭に作用する氷力の本数分を加え合わせるにより、全氷力を評価した。ここで、次式で各条件時の氷力の係数 $(0 < K1, K2, K3 < 1; D/h=5.0$ の時)を決定した。

$$K1=(F_{\max})_2/(F_{\max})_1=(F_{\max})_2/F_s=0.54*EXP(0.123*x/D) \quad (0 < x/D < 5) \quad (7)$$

$$K2=(F_{\text{sub}})_2/(F_{\max})_2=K3/K1=0.859*EXP(0.004*x/D) \sim 0.859 \quad (8)$$

$$K3=(F_{\text{sub}})_2/(F_{\max})_1=(F_{\text{sub}})_2/F_s=0.464*EXP(0.127*x/D) \quad (0 < x/D < 4) \quad (9)$$

$$(F_{\text{sub}})_1/F_s=0.771 \quad (10)$$

図4に、K1とK3の実験結果とその回帰曲線(CK1(7)式、CK3(9)式)を示す。また、図5に、K2の実験結果とCK1,CK3から導かれた曲線(CK2,(8)式)を示す。

3) 多脚杭に作用する全氷力の計算法

図6は、九本脚構造物と氷盤の相互作用形態である。図1、図6中の寸法は、次式で計算出来る。

$$y1=D*\{(K+1)\sin\theta -1\} \quad (11)$$

$$y2=D*\{(K+1)(\cos\theta -\sin\theta)-1\} \quad (12)$$

$$x1=W'=D*\{(K+1)\cos\theta -1\} \quad (13)$$

$$L1=D*\{(K+1)\cos\theta -0.5\} \quad (14)$$

$$L2=D*\{(K+1)(\cos\theta +\sin\theta)-0.5\} \quad (15)$$

$$z1=D*\{(K+1)(\cos\theta -2\sin\theta)-1\} \quad (16)$$

$$z2=D*\{(K+1)(2\sin\theta -\cos\theta)-1\} \quad (17)$$

計算手順は、四本脚を例にした場合以下のstepとなる。最大氷力(初期氷力)で評価する場合はfst、継続氷力で評価する場合はsubを付記し区別した。

step1)

氷厚h、構造物の幅D、氷の一軸圧縮強度S、氷の弾性係数E、杭貫距離Kを与える。

step2)

氷盤進入角度 θ を与える。式(11)～(17)により y1,y2,L1,L2,x1,z1,z2を計算する。

(step3)

- ・杭(a)の氷力F1は、fstの時(1)式より、subの時(1),(10)式で評価。
- ・杭(b)の氷力F2は、 $x1/D \geq 5$ の条件下では、fstの時(1)式より、subの時(1),(10)式で評価。 $x1/D < 5$ の条件下では、fstの時(1),(7)式より、subの時(1),(9)式で評価。
- ・杭(c)の氷力F3は、 $y1/D \geq 5$ の条件下では、fstの時(1)式より、subの時(1),(10)式で評価。 $y1/D < 5$ の条件下では、fstの時(1),(7)式より、subの時(1),(9)式で評価。
- ・杭(d)の氷力F4は、① $y1/D \geq 5$ かつ $y2/D \geq 5$ の条件下では、fstの時(1)式より、subの時(1),(10)式で評価。② $y1/D < 5$ もしくは $y2/D < 5$ の条件下では、fstの時(1),(7)式より、subの時(1),(9)式で評価。③(2)～(6)式より評価。これらの3氷力の中の最小値をF4とする。

(step4)

$$\text{全氷力} = \sum_i F_i, \text{ at given } \theta \quad (18)$$

(step5)

step2～step4を、 θ の値を変化させて計算を繰り返し、与えられたK値に対しての最大全氷力を算定する。

(step6)

K値を変化させて、step2～step5の計算を繰り返す。

以上の計算においては、杭に氷盤が僅かでも接触した場合は、(7)式においては0.54, (9)式においては0.464を用いた。

次に、 $M_i (i=1, 2, \dots, 9)$ は、単杭に作用する氷力 F_s に対する倍率とする。特に、九本脚構造物の場合は、氷盤の幾何学形状より、 $M_5=M_2$, $M_6=M_4$, $M_7=M_8=M$, $M_9=M_3$ となる。

・四本脚の場合、全氷力($F_{(4)}^{sub}$, $F_{(4)}^{fst}$)は以下の式で計算できる。

(sub)

$$F_{(4)}^{sub}=2 \quad \theta=0^\circ \quad (19)$$

$$F_{(4)}^{sub}=M_1^{sub}+M_2^{sub}+M_3^{sub}+M_4^{fst} \quad 0<\theta<45^\circ \quad (20)$$

$$F_{(4)}^{sub}=M_1^{sub}+2*M_2^{fst} \quad \theta=45^\circ \quad (21)$$

(fst)

$$F_{(4)}^{fst}=2 \quad \theta=0^\circ \quad (22)$$

$$F_{(4)}^{fst}=M_1^{fst}+M_2^{fst}+M_3^{fst}+M_4^{fst} \quad 0<\theta<45^\circ \quad (23)$$

$$F_{(4)}^{fst}=M_1^{fst}+2*M_2^{fst} \quad \theta=45^\circ \quad (24)$$

・九本脚の場合、全氷力($F_{(9)}^{sub}$, $F_{(9)}^{fst}$)は以下の式で計算できる。

(sub)

$$F_{(9)}^{sub}=3 \quad \theta=0^\circ \quad (25)$$

$$F_{(9)}^{sub}=M_1^{sub}+2*(M_2^{sub}+M_3^{sub}+M_4^{sub})+M_5^{sub}+M_6^{fst} \quad 0<\theta<26.565^\circ \quad (26)$$

$$F_{(9)}^{sub}=M_1^{sub}+2*M_2^{sub}+M_3^{sub}+M_4^{sub}+M_5^{fst}+M_6^{fst} \quad \theta=26.565^\circ \quad (27)$$

$$F_{(9)}^{sub}=M_1^{sub}+2*(M_2^{sub}+M_3^{sub}+M_4^{sub})+M_5^{sub}+M_6^{fst} \quad 26.565<\theta<45^\circ \quad (28)$$

$$F_{(9)}^{sub}=M_1^{sub}+M_2^{sub}+M_3^{sub}+M_2^{fst}+M_3^{fst} \quad \theta=45^\circ \quad (29)$$

(fst)

$$F_{(9)}^{fst}=3 \quad \theta=0^\circ \quad (30)$$

$$F_{(9)}^{fst}=M_1^{fst}+2*(M_2^{fst}+M_3^{fst}+M_4^{fst})+2*M_5^{fst} \quad 0<\theta<26.565^\circ \quad (31)$$

$$F_{(9)}^{fst}=M_1^{fst}+2*(M_2^{fst}+M_3^{fst}+M_4^{fst}) \quad \theta=26.565^\circ \quad (32)$$

$$F_{(9)}^{fst}=M_1^{fst}+2*(M_2^{fst}+M_3^{fst}+M_4^{fst})+2*M_5^{fst} \quad 26.565<\theta<45^\circ \quad (33)$$

$$F_{(9)}^{fst}=M_1^{fst}+2*(M_2^{fst}+M_3^{fst}) \quad \theta=45^\circ \quad (34)$$

3. 計算結果

アラスカのクック湾の典型的な次の氷象条件下で、四本脚・九本脚構造物の全氷力の計算を行う。

氷厚 $h=1\text{m}$, 構造物幅 $D=5\text{m}$, 氷の一軸圧縮強度 $S=5\text{MPa}$, 氷の弾性係数 $E=3\text{GPa}$, 杭間距離 $K=2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20$ 。

初めに、四本脚構造物の計算結果を示す。図7と図8は、氷盤進入角度 θ に対する全氷力の計算値 $F_{(4)}^{sub}$, $F_{(4)}^{fst}$ を杭間距離 K の値に応じて示したものである。 $F_{(4)}^{sub}$, $F_{(4)}^{fst}$ は、 θ の値に応じて山形を描く。図9は、杭間距離 K と全氷力の最大値 $F_{(4)}^{max}$ の関係を示したものである。 fst の場合、(K)が13を越えると全氷力は単杭の氷力(F_s)4.0倍となり、また、 sub の場合、(K)が13を越えると全氷力は単杭の氷力(F_s)の3.3倍となる。図10は、杭間距離 K に対して全氷力が最大となる角度を示す。杭間距離 K が14より小さい時は、26もしくは27°において全氷力がピークとなり、杭間距離 K が14以上の時は、 K の値に応じて複数の角度に対してピークを示す。また、 fst, sub の違いに対する、最大全氷力を与える角度の違いはほとんど無い。

同様に、九本脚構造物の場合の計算結果を示す。図11, 図12は、氷盤進入角度 θ に対する全氷力の計算値 $F_{(9)}^{sub}$, $F_{(9)}^{fst}$ を杭間距離 K の値に応じて示したものである。 $F_{(9)}^{sub}$, $F_{(9)}^{fst}$ は、 θ の値に応じて二つの山形を描く。図13は、杭間距離 K と全氷力の最大値 $F_{(9)}^{max}$ の関係を示したものである。 fst の場合、(K)が19を越えると全氷力は単杭の氷力(F_s)の9.0倍となり、また、 sub の場合、(K)が19を越えると全氷力は単杭の氷力(F_s)の7.2倍となる。図14は、杭間距離 K に対して全氷力が最大となる角度を示す。杭間距離 K が11以下の時の全氷力は、 K の値に応じて27, 33, もしくは34°の時ピークを表し、杭間距離 K が11より大きい時は、18, 19, 22, 23, 26, もしくは

27°の時ピークとなる。また、fst,subの違いに対する、最大全氷力を与える角度の違いは少ない。

また、加藤ら(1988),(1989a,1989b),(1990)は、鉛直・cone型の複数の杭から構成された多脚構造物に作用する氷荷重の実験的な研究を多数行っている。図15は、 D/h が約2.5の条件での加藤らの実験結果と上記計算結果($D/h=5$ の実験結果に基づく)を比較したものである。 D/h の値に違いがあり完全に正確な比較は出来ないが、加藤らの実験結果は、subによる計算結果を越えない。この原因は、各杭に作用する最大氷力が、非同時的に杭に作用するためであり、fstよりもsubの計算結果に近い値を示す。

4. まとめ

- (1)初期氷力、継続氷力を考慮した多脚杭構造物に作用する全氷力の計算法を示した。
- (2)アラスカのクック湾の典型的な氷象条件下で、四本脚・九本脚構造物の全氷力の計算を行い、次の結果を得た。
 - ①四本脚構造物に作用する全氷力は、fstの場合、 (K) が13を越えると全氷力は単杭の氷力(F_s)4.0倍となり、また、subの場合、 (K) が13を越えると全氷力は単杭の氷力(F_s)の3.3倍となる。最大全氷力が作用する角度は、 K の値に応じて変化し、杭間距離 K が14より小さい時は、sub,fstの両方において、26,27°の時に全氷力がピークとなり、杭間距離 K が14以上の時は、 K の値に応じて複数の角度に対してピークを示す。
 - ②九本脚構造物に作用する全氷力は、fstの場合、 (K) が19を越えると全氷力は単杭の氷力(F_s)の9.0倍となり、また、subの場合、 (K) が19を越えると全氷力は単杭の氷力(F_s)の7.2倍となる。全氷力が最大となる角度は、 K の値に応じて変化し、 K の値が11より小さい時は33,34°で、 K の値が11より大きい時は18,19°である場合が多い。
 - ③加藤の四本脚構造物に作用する実験結果と本計算結果を比較した場合、アスペクト比の違いはあるが、実験結果はsubの計算結果を越えることはなかった。これは、氷盤の破壊に起因した各杭に作用する氷力には、非同時性が作用している為と判断出来る。
 - ④sub場合の全氷力の計算結果は、fstの場合の計算結果の約80%となった。
- (3)上記の計算法は、杭がランダムに並んだ多脚杭構造形式の全氷力評価にも適用できる。

参考文献

- Kato,K. and Sodhi,D.S. (1984), "Ice action on two cylindrical structures", Journal of Energy Resources Tech.,vol.106,pp.107-112.
- Kato,K.(1988), "The design ice force estimating system for a structure level sheet interaction," In proceeding 9th IAHR Ice Symp.,Sapporo, pp.361-370.
- 加藤一行, 岸本弘晴, 三田重雄 (1989a), "円錐脚型多脚氷海構造物に作用する氷荷重の要素試験", 海洋開発論文集, vol.5, pp.31-36.
- 加藤一行, 岸本弘晴, 三田重雄 (1989b), "円錐脚型多脚氷海構造物に作用する氷荷重", 海岸工学論文集,第36巻, pp.683-687.
- 加藤一行, 岸本弘晴, 三田重雄, 林口清次 (1990), "多脚型氷海構造物に作用する氷荷重に関する実験的研究", オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム, 第5回, pp.146-150.
- 中沢直樹, 竹内貴弘, 小野敏行, 佐伯浩, (1986), "海洋構造物に作用する氷力式の評価", 海洋開発論文集, vol.2, pp.115-120.
- Saeki,H., Hamanaka,K. and Ozaki,A.(1977), "Experimental study on ice force on a pile",In proceeding 4th POAC., Newfoundland, Canada, pp.695-706.
- Saeki,H., Ono,T.,Ozaki,A. and Abe,S.(1978), "Estimation of sea ice forces on pile structures",In proceeding 5th IAHR Ice Symp., Lurea, Sweden, pp.465-478.
- Saeki,H. and Ozaki,A.(1979) "Ice forces on piles",IUTAM Symp.,Copenhagen,Denmark,pp.343-350.
- 佐伯浩, 小野敏行, 竹内貴弘, 酒井雅史, 押川定生 (1984), "多脚海洋構造物に作用する海水の力に関する研究", 海岸工学講演会論文集, 第31巻, pp.547-551.
- Saeki,H.,Ono,T.,Takeuchi,T.,Suenaga,E. and Sakai,M. (1986)"Total ice forces on the clusters of cylindrical piles,"In proceeding 5th OMAE,Tokyo,pp.461-466.
- Sodhi,D.S. and Nevel,D.E. (1980), "Review of buckling analysis of ice sheet," CRREL Special Rept., 80-26, pp.131-146.
- 竹内貴弘, 岡本智, 折谷徳弘, 山下俊彦, 佐伯浩 (1991), "矩形断面の直立構造物に作用する氷力に関する研究", 海岸工学論文集, 第38巻, pp.696-700.

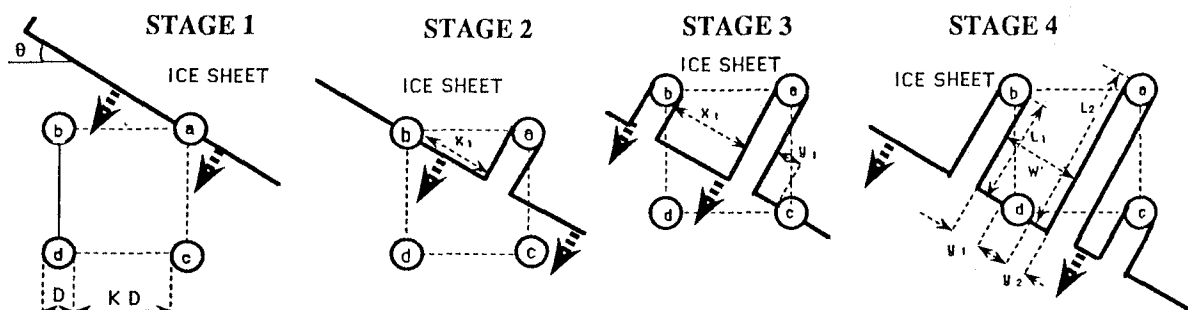


図1 四本脚構造物と氷盤の貫入模式図

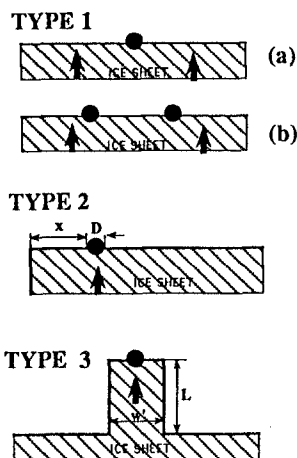


図2 模式化された氷盤の作用形態

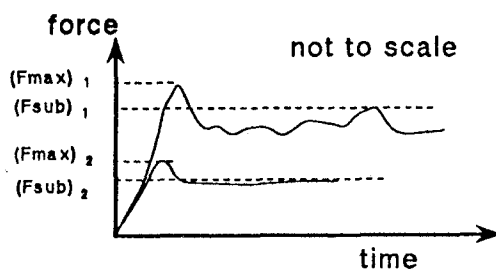


図3 TYPE 1,TYPE 2の氷力の時系列

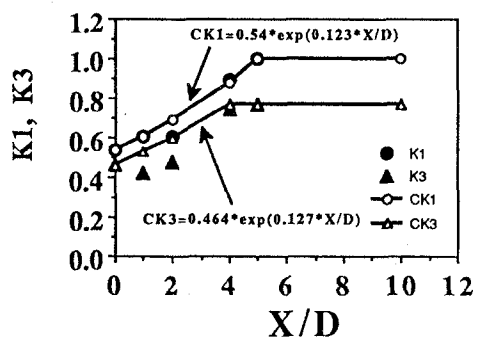


図4 K1, K3とx/Dの関係

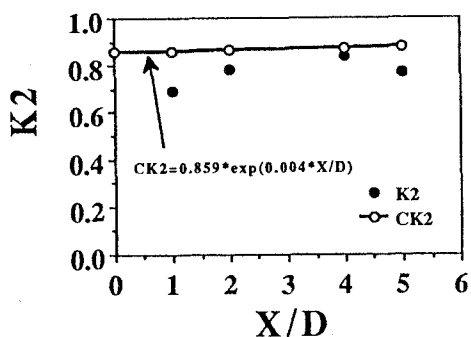


図5 K2とx/Dの関係

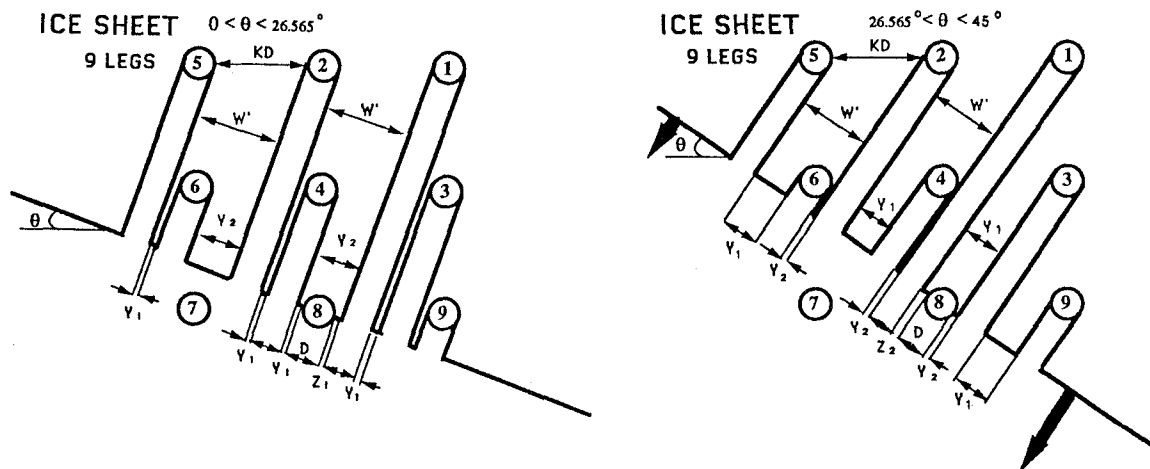


図6 九本脚構造物と氷盤の貫入模式図

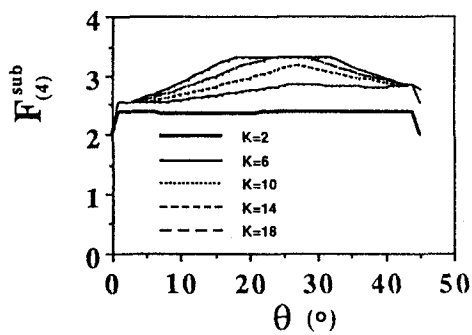


図7 $F_{(4)}^{sub}$ と θ の関係

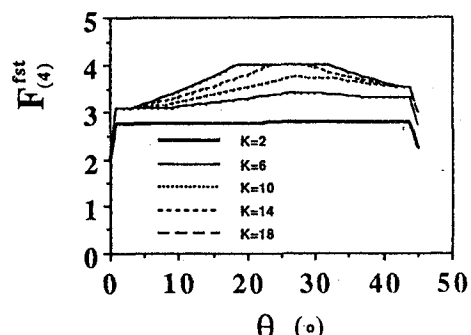


図8 $F_{(4)}^{fst}$ と θ の関係

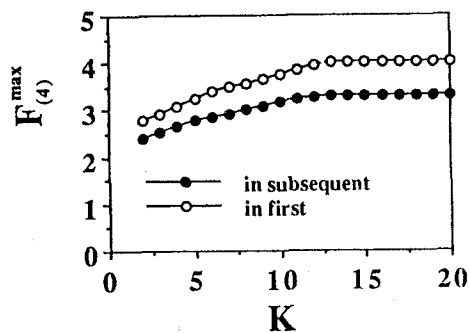


図9 $F_{(4)}^{max}$ とKの関係

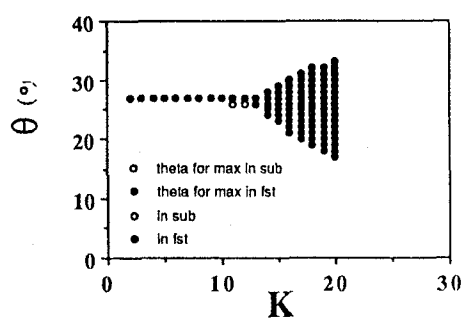


図10 Kと最大氷力を与える θ の関係（四本脚の場合）

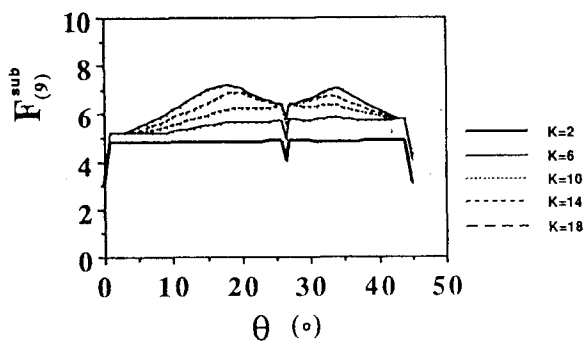


図11 $F_{(9)}^{sub}$ と θ の関係

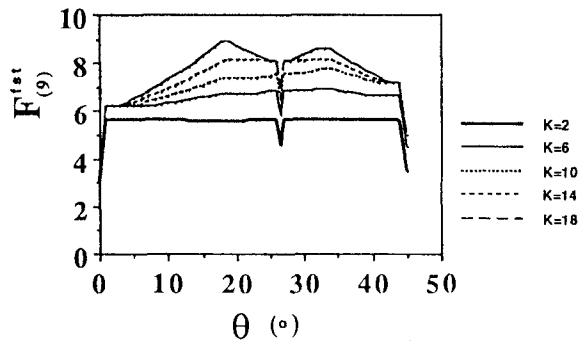


図12 $F_{(9)}^{fst}$ と θ の関係

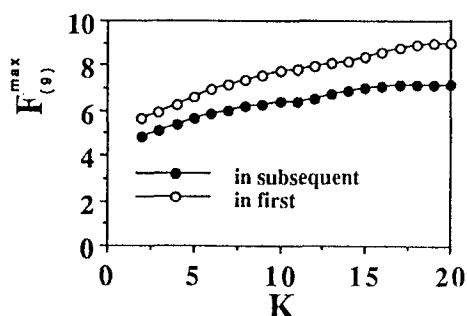


図13 $F_{(9)}^{max}$ とKの関係

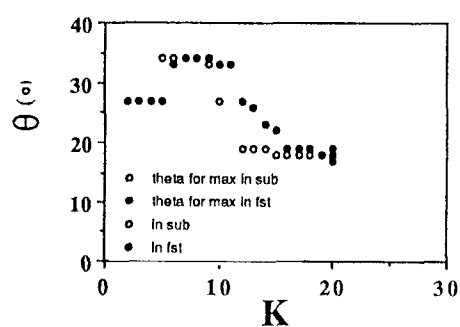


図14 Kと最大氷力を与える θ の関係（九本脚の場合）

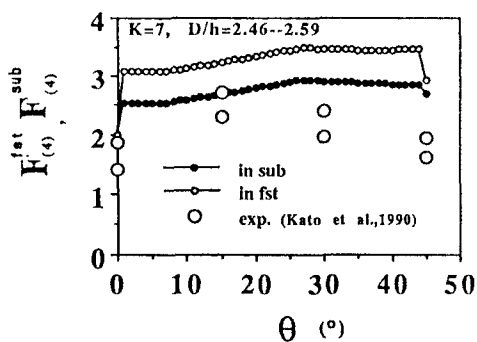


図15 加藤ら(1990)の実験結果と本計算結果との比較