

海洋構造物に作用する氷力式の評価

パシフィックコンサルタンツ㈱ 正会員 中澤 直樹

北海道大学

正会員 竹内 貴弘、小野 敏行

佐伯 浩

1. 概 要

氷海域の海洋、海岸に構造物を建設する場合、氷盤の移動により構造物に水平、鉛直方向の氷力が作用する。中でも、水平氷力は構造物の設計外力として支配的なものの一つである。この氷力は構造物の型式、氷盤の状態、構造物に対する氷盤の作用形態、そして氷の強度に大きく影響される。さらに氷の強度自体も、供試体寸法、歪速度、荷重速度、氷温等に大きく依存する。水平氷力の算定式は現在まで数多く提案されているが、前述の様に、その影響因子が多いため、提案式における諸数値の評価の違いにより算出される氷力にも大きな違いが表われる。また、提案式の適用においても不明確な点が多い。

本研究は、主に、水平氷盤により直立構造物に作用する水平氷力の算定式を紹介し、その支配因子を明らかにしながら、実用へのアプローチを試みたものである。

2. 水平氷力

氷海域において、風、海流、潮流等により運ばれる氷はpack ice状の比較的小さな氷からice ridge に至るまで広い範囲にわたり、それらにより構造物に作用する水平氷力もさまざまである。この氷力は氷盤と構造物の相互作用条件により次の様に分類される。

- I) 氷盤が比較的小さい速度で構造物に作用する場合、
- II) 氷盤が波浪により高速で構造物に作用する場合、
- III) 氷盤が構造物に凍着した状態から水平に動く場合、
- IV) 氷盤が構造物の一部に、局部的に作用する場合、
- V) 氷海中に剛性の低い柱状の構造物を設置した場合－振動。

これらの作用形態による氷力は氷の破壊時に最大となるため、その圧縮強度、曲げ強度、せん断強度等の力学特性を明らかにすることが重要である。特に直立構造物に氷盤が作用する場合は水平氷力が最も重要で支配的な氷力となり、その時の氷の主な破壊形式は圧縮破壊である。従って、氷の圧縮強度特性が明らかにされなければならない。さらに経験、実験、そして理論によって提案された、それぞれの式の実用に当っては、その式の目的と適用条件、そして適用範囲が明確にされていなければならない。水平氷力の提案式は一般に次式で表わされる。

$$F = f(\alpha, w, h, \sigma_c) \quad (1)$$

F : 水平氷力

α : 構造物の形状、歪速度、アスペクト比等により決定される係数

w : 構造物の幅

h : 氷厚

σ_c : 氷の圧縮強度

水平氷力(F)は構造物の幅(w)と氷厚(h)が同一条件の場合、係数(α)と氷の圧縮強度(σ_c)の評価に大きく依存する。また、氷の圧縮強度は歪速度や、それに伴う破壊様式に大きく影響されるため、どのような条件のもとで決定された圧縮強度を用いるかということが、算定式の適用に当っては重要な問題となる。

3. 氷の圧縮破壊様式と圧縮強度特性

3-1. 圧縮破壊様式

構造物に作用する最大氷力は、構造物が氷盤と、ある条件のもとで相互作用を起こしたときに、氷盤が破壊するのに必要な力（破壊荷重）を意味する。従って、氷の状態により起こりうる破壊様式のうち、最小の荷重で破壊する様式で氷盤は破壊することになる。図-1. に佐伯とMichelによる破壊様式と貫入試験における歪速度（ $\dot{\epsilon}_p$ ）の関係を示した。 $\dot{\epsilon}_p$ が増加するにつれて破壊様式はductile からtransition, brittleへと移行する。氷力を表わす係数 K' はtransition領域で最大値を示し、brittle領域で減少し、一定値に近づく。

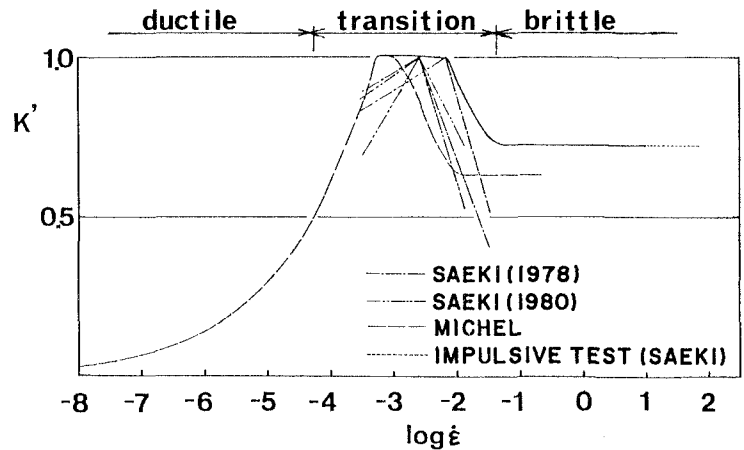


図-1. 氷力係数及び破壊型式と貫入試験における歪速度の関係

3-2. 圧縮強度特性

氷の圧縮強度は供試体の寸法、供試体の形状、歪速度、荷重速度、氷温、塩分量、密度等に依存する。以下に著者等による圧縮強度の実験結果の一部を示す。

1) 供試体寸法の影響

図2に圧縮強度に対する供試体長の影響を示した。円筒供試体径

は $\phi = 10 \text{ cm}$ である。供試体長が増加するにつれて、圧縮強度は減少する。

2) 歪速度の影響

氷は粘弾性体であるため、歪速度の影響を受ける。図3. に圧縮強度と歪速度（ $\dot{\epsilon}$ ）の関係を示した。

σ_c は $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ 付近で最大値を示していることがわかる。Schwarzによる海水、Gold & Krousz、Cartar & Michel等による淡水氷の実験も同様の傾向を示している。

3) 荷重速度の影響

図4. に荷重速度（ $\dot{\sigma}_c$ ）の影響を示した。 σ_c は $10 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 付近で最大値を示す。Peytonによる結果も同様の傾向を示している。

以上1)～3)まで示した様に氷の圧縮強度は多くの因子の影響を受けることより、氷力式の圧縮強度（ σ_c ）の評価においては、その評価方法及び基準が示されていることが必要である。

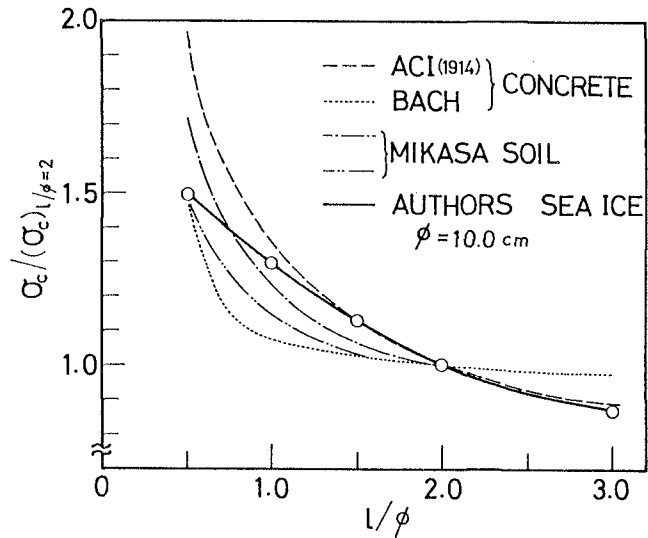


図-2. σ_c に対する供試体寸法 (l/ϕ) の影響

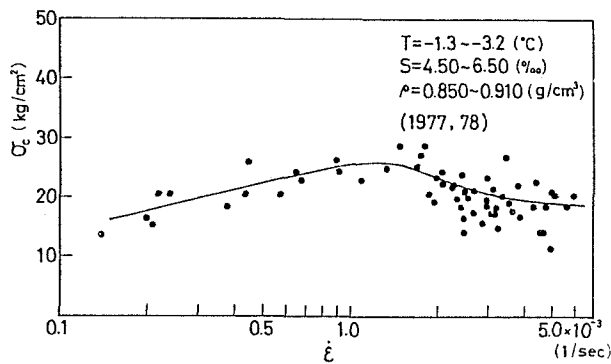


図-3. σ_c に対する歪速度 $\dot{\epsilon}$ の影響

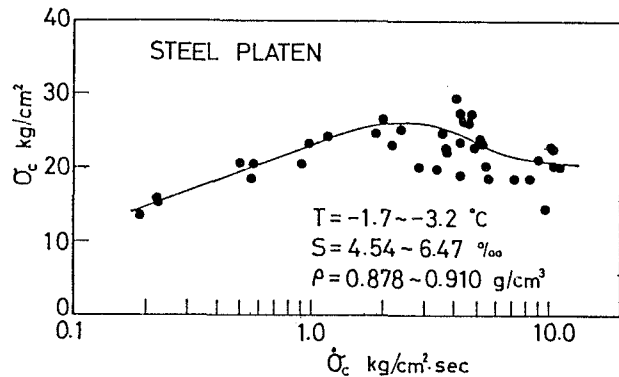


図-4. σ_c に対する荷重速度 $\dot{\sigma}_c$ の影響

提 案 者	提 案 式	備 考
1) A.P.I. (米国石油研究所)	$C W h \sigma_c$	経 験 式 C: 0.3 ~ 0.7, $\sigma_c = 14 \sim 35 \text{ kg/cm}^2$ A: 気象係数, m: 形状係数 K1: 形状係数 K2: 接触係数 K3: アス ペクト比による係数 Cn: 傾斜角によ る係数, Ci: 貫入速度
2) U.S.S.R	$m A W h \sigma_c$	
3) AASHO	$W h \sigma_c$	
4) MÄÄTTÄNEN	$K_1 K_2 K_3 W h \sigma_c$	
5) Neill	$C_n C_i W h \sigma_c$	
6) Saeki	$K' C \sqrt{W h} \sigma_c$	実 験 式 K': $\dot{\epsilon}_p$ による関数, C: 形状係数 C: 形状係数 C: 形状係数, V: 貫入速度
7) Hirayama & Shwarz	$3.57 \sqrt{W h} \sigma_c$	
8) N.K.K (日本鋼管)	$C \sqrt{W h} \sigma_c$	
9) H.H.I (三菱重工)	$C V^{-0.25} \sqrt{W h} 1.1 \sigma_c$	
10) I.H.I (石川島播磨重工)	$2.0 W 0.4 h 1.6 \sigma_c$	
11) Bercha & Danys	$m W h \sigma_c$	式 m: 形状, 接触係数 m: 形状係数
12) Afanasev	$m (1 + 5h/w) 0.5 W h \sigma_c$	
13) Korzhavin	$I m K W h \sigma_c$	
14) Gold & Frederking	$N (V/W)^\alpha W h$	理 論 式 Ω: 氷盤の面積, ρ: 氷の密度
15) Michel	$V h \sqrt{2} \rho \sigma_i \Omega \tan \alpha$	
16) Reinicke	$[1.4 + 0.97h/w] W h \sigma_c$	
17) Morgenstern & Nutfall	$[1 + 0.304h/w] W h \sigma_c$	
18) Tryde	$[0.8 + 1.2h/w] W h \sigma_c$	
19) Croasdale	$[A + B h/w] W h \sigma_c$	

σ_c : 氷の圧縮強度, h : 氷厚, W : 構造物の幅

表-1. 水平氷力算定の提案式

4. 水平氷力算定式

表1. に水平氷力算定の提案式を示した。大まかに経験式、実験式、理論式に分類することができる。

4-1. 経験式

表1. により経験式は(2)式で表わされる。

$$F = \alpha \cdot w \cdot h \cdot \sigma_c \quad (2)$$

α : 定数

これらの式は氷と構造物の接触面積 ($w \times h$) に氷の圧縮強度を乗じたものである。実測結果に合うように定数 α を乗じて補正する形となっている。A.P.I 式の場合、 $\sigma_c = 14.0 \sim 35.2 \text{ kg/cm}^2$ の範囲を示し、 $c = 0.3 \sim 0.7$ として補正値を与えている。しかしながら、その c の決定法が示されておらず、又、 σ_c を求めるための試験法も決められていない。また AASHO その他の式についても、 σ_c の試験法が示されていないし、いかなる貫入条件も規定されていない。一般的に、経験式は試験法によって大きく値の違う σ_c についての評価基準が示されていないところに実用への疑問が残る。

4-2. 実験式

表1. より実験式は(3)式で表わされる。

$$F = \beta \cdot (w)^{n_1} \cdot (h)^{n_2} \cdot \sigma_c \quad (3)$$

β, n_1, n_2 : 定数

これらの式は、実験結果に基づき、構造物の幅(w)や氷厚(h)に対する補正が行なわれている。

Saeki 式では、 c は構造物形状係数で、 K' は $\dot{\epsilon}_p (= v/4w, v$: 相対速度)に依存する係数、 $n_1 = 0.5, n_2 = 1$ としている。

Hirayama & Shwarz 式は定数は 3.57 で $n_1 = 0.5, n_2 = 1.1$ を示している。両者とも σ_c の決め方について、歪速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ 1/sec 程度での実験を示し、 σ_c が最大値を与える $\dot{\epsilon}$ で圧縮強度試験をすべきであるとしている。又、試験法についても明確に示されている。

M.H.I 式は、 c が形状に依存し、 $n_1 = 0.5, n_2 = 1.1$ である。式に貫入速度 v が含まれており、また $\dot{\epsilon} = v/2w$ の歪速度で σ_c を求めるとしている。

I.H.I 式は現地試験から導かれた式で c は構造物の形状係数である。 σ_c は $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \sim 10^{-2}$ 1/sec で図1. のtransitionの領域の値を用いている。

4-3. 理論式

表1. より理論式は(4)式で表わされる。

$$F = (\gamma + \delta \cdot h/w) w \cdot h \cdot \sigma_c \quad (4)$$

γ, δ : 定数

$F_n = F/w \cdot h \cdot \sigma_c$ を無次元氷力とすると、これは(4)式よりアスペクト比のみの関数となることがわかる。理論式では、あらかじめ氷盤の破壊型式を仮定し、その仮定に従って式を得ている。

例えばReinickeの式はHill型の破壊を仮定することにより、また、Morgenslern & Nuttall 及びTryde は楔型の破壊を仮定することにより算定式を導いている。

Gold & Frederking の式及び、Michelの式は σ_c が考慮されておらず、又、相対速度(v)が増加すればする程、水平力(F)が増大する形となっているが、図1. に示す様に、 $\dot{\epsilon}_p$ が増大しても、brittle の範囲では減少し一定値に近づくことより、適当範囲が示されねばならない。

5. 算定式の評価

以上のことより、水平氷力の算定式は以下に示すことが考慮されたものであることが望ましい。

I) 構造物の形状

II) 構造物と氷盤の相対貫入速度と構造物の代表幅より求まる、貫入に伴う歪速度

III) 氷盤の破壊様式

IV) 構造物の寸法、氷厚及びアスペクト比

V) 氷の圧縮強度の決定法

経験式の場合、一般的に貫入速度の効果が考慮されておらず、又、 σ_c と $\dot{\epsilon}$ の関係及びその試験法についても不明確な点が多いことが問題と思われる。

実験式の場合は σ_c の試験法及びその時の歪速度($\dot{\epsilon}$)が示されているものもあるが、実用に際しては、貫入試験における歪速度($\dot{\epsilon}_p$)に対する補正を考慮した式が望ましい。

理論式の場合は破壊の型式をあらかじめ、仮定して式を導いたものであるから、その適用範囲は制限されてしまう。従って、仮定した破壊を生じさせる歪速度($\dot{\epsilon}$)で実験を行った場合に得られる σ_c の値を用いなければならない。

6. 結 論

以上のように、提案式から水平氷盤による水平氷力を計算する場合、氷の圧縮強度 (σ_c) の評価により、氷力に大きな違いが生ずる。 σ_c の特性から分かるように、試験法によって得られる値が違ってくる事や、同一の試験においてもデータのバラツキが大きい事が、大きな原因となっている。従って、提案式を用いて氷力を計算する場合は、次の事項に留意しなければならない。

- I) 経験式、実験式においては氷の圧縮強度 (σ_c) の決め方が明確で妥当なものであること。さらに貫入速度の効果が考慮されていること。
- II) 理論式においては、氷の圧縮強度 (σ_c) は、仮定した破壊が発生するような貫入試験における歪速度 $\dot{\epsilon}_0$ で試験を行って決定された σ_c を用いること。
- III) 最近の傾向として、構造物が大型化している。従来の式は大きなアスペクト比の場合に適用することについては問題が多い。今後はアスペクト比の大きい場合、及び ice ridgeによる氷力にも適用可能なものが望ましい。

7. 参考文献

- 1) 川崎哲郎, 石川暁, 田口義明, 戸沢秀, 縄田卓生, “氷荷重推定に関する一考察” 寒地技術シンポジウム '85 論文集P.138 - 143, 札幌市, 1985年11月
- 2) Saeki, H., Hamanaka, K., Ozaki, A., “Experimental Study of Ice Force on a Pile”. POAC 77, St. Jones, Canada, 1977.
- 3) 加藤一行, “氷板の座屈荷重”, 第7回海洋工学シンポジウム, 論文集P.255 - 264, 東京, 昭和59年 6月
- 4) Kato, K., & D.S. Sodhi, “Ice action on pairs of cylindrical and conical structure” CRREL Report ,83-25 ,1983.
- 5) 柳沢一郎, 加藤一行, 小嶋初徳, 山下三郎, 松島義男, “構造物に作用する氷荷重”. 第7回海洋工学シンポジウム論文集P.265 - 274, 東京, 昭和59年 6月.
- 6) 加藤一行, “氷板と垂直構造物との相互作用について”. 寒地技術シンポジウム '85. 論文集P.144 - 149. 札幌市, 1985年11月.
- 7) 竹内貴弘, 小野敏行, エイジ L スエナガ, 佐伯浩, “Tower 型海洋構造物に作用する全氷力について” 寒地技術シンポジウム '85. 論文集P.156 - 161, 札幌市, 1985年11月.
- 8) Croasdale, K.R., 1975, “Ice Forces on Marine Structures ”. Third International Symposium on Ice Problems, I.A.H.R.
- 9) Croasdale, K.R., Morgenstern, N.R., and Nuttal, J.B., 1977, “Indentation Tests to Investigate Ice Pressures on Vertical Piers”. Journal of Glaciology, vol 19, NO.81, P.301 - 312.
- 10) Edwards, R.Y., Croasdale, K.R., 1976, “Model Experiments to Determine Ice Forces on Conical Structures ” Symposium on Applied Glaciology, Cambridge, England, 1976.
- 11) Afanasev, V.P., Dolgoplov, Y.V. and Shraishtein, Z.I., 1971. “Ice Pressure on Individual Marine Structures”. In Ice Physics and Ice Engineering, Israel Prohram for Scientific Translation 1973. P.50 - 68.
- 12) Michael, B., 1970. “Ice Pressure on Engineering Structures”. CRRL Monograph 111 Blb, Corps of Engineers, U.S. Army, Hanover, New Hampshire, 1970.
- 13) Schwarz, T., Hirayama, K. and Wu, H.C., 1974. “Effect of Ice Thickness on Ice Forces ”. Offshore Technology Conference, Houston, 1974.
- 14) Frederking, R. and Gold, L.W., 1975 . “Experimental Study of Edge Loading of Ice Plates”. Canadian Geotechnical Journal, vol, NO. 4, November 1975, P.456 - 457
- 15) Hirayama, K., Schwarz, J. AND Wu, H., 1974. “An Investigation of Ice Forces on Vertical Structures”. Iowa Institute Hysraulic Research Report, NO.158.
- 16) Korzhavin, K.N., 1971. “Action of Ice Engineering Structures”. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. Translation 260.

- 17) Neill, C.R., "Dynamic Ice Forces on Piers and Piles . An Assessment of Design Guidelines in the Light of Recent Research" . Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 3, NO. 2, 1976. P. 305 — 41.
- 18) Michel, B., and Toussaint, N., 1977, "Mechanisms and Theory of Indentation of Ice Plates" . Symposium on Applied Glaciology, Cambridge, England, 1976. Published in Journal of Glaciology, vol. 19 NO. 81
- 19) Tryde, P., 1972, "A Method of Predicting Ice Pilings" . Prog. Report 25, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, April 1972, P. 17—23