

海氷と諸材料間の凍着強度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ADFREEZE BOND STRENGTH BETWEEN SEA ICE AND VARIOUS MATERIALS

宇佐美宣拓¹・寺島貴志²・阿部慎也¹・佐藤光一³・佐伯浩⁴

Norihiro USAMI, Takashi TERASHIMA, Shinya ABE, Koichi SATO and Hiroshi SAEKI

¹学生会員 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 工博 パシフィックコンサルタンツ(株)

³正会員 新日本製鉄(株) 札幌支店

⁴フェロー会員 工博 北海道大学大学院 工学研究科 教授

In cold regions, vertical ice load acts on pile structures due to water level changes, such as tides and swells, as the ice sheet adheres to them. Therefore the vertical ice loads must be fully considered in the design of maritime structures constructed in icy sea areas. When we calculate the ice load, many parameters are needed. One of them, the adfreeze bond strength is an important parameter to calculate the ice load at abfreeze bond failure. And Terashima et al. reported when ice sheet is thick, adfreeze bond failure is easy to occur.

In this study, we show the characteristic of five testing method for adfreeze bond strength between sea ice and various materials, and make the experiment about three testing method for comparison of the influence by changing the testing method. Finally the authors proposed the adfreeze bond strength which is directly used in design.

Key Words : Adfreeze bond strength, testing method, sea ice

1. 研究の目的

寒冷地の海岸、海洋、マリーナなどに建設される直立構造物に氷盤が凍着している状態で水位変動があると、構造物に鉛直方向氷荷重が作用する。この鉛直方向氷荷重を算定する際に必要となるパラメータは多数有るが、現地の氷盤の状況によって決定される物性値としては、氷盤の曲げ強度 σ_f 、及び氷盤と構造物との間の凍着強度 τ_B とがあげられる。寺島ら¹⁾の研究によると、氷荷重が作用することで破壊する氷盤の形態のうち、氷厚が厚い場合には凍着破壊を起こすことが多いとの解析結果、ならびに実験結果を得ており、この場合、最大氷荷重を算定する際に、凍着強度が非常に重要な要素となる。

本研究は、凍着強度に関する各種の実験方法の特徴を述べるとともに、過去に行われた凍着強度の実験結果をもとに、凍着強度を実際の設計に使用可能なように整理したものである。

2. 凍着強度試験方法

(1) 凍着現象と試験方法

氷と構造物が凍着し、様々な要因で氷盤が破壊することで剥離する場合(凍着破壊)、構造物には氷荷重が作用するが、実際の凍着現象²⁾には以下のような例が考えられる。

- i. 海岸、海洋に建設された杭などの構造物に氷盤が凍着し、水位変動に伴い凍着破壊する場合。
- ii. 同様に岸壁に凍着した氷盤が凍着破壊する場合。
- iii. 砕氷船に凍着した氷盤が砕氷船の進行とともに剥離する場合。
- iv. 構造物に凍着している氷盤が動き出した場合。

また、氷盤と構造物の破壊形態としては、図-1に示すように、氷と構造物の凍着面に対し、接線方向に荷重が作用して破壊する場合(Type(a))と、凍着面の法線方向に荷重が作用し、引張られる形で破壊が生ず

るもの (Type(b)) とに分類される。これよりわかるように、氷盤と構造物の凍着現象、ならびに破壊現象は多様なものとなっている。一方で、凍着強度を求める実験方法としては図-2 に示す様に a) Pull Out, b) Push Out, c) Twist, d) Shear, e) Tension の 5 種類の方法が提案されている。これらのうち、前者 4 種は、凍着面に平行に荷重を与えることから破壊形態の Type (a) を、最後の Tension は、凍着面の法線方向に荷重を与えることから Type (b) のケースを想定したものであり、凍着強度を求める試験を行う際には、想定する現象に合わせて試験方法を選択する事が望ましいと考えられる。

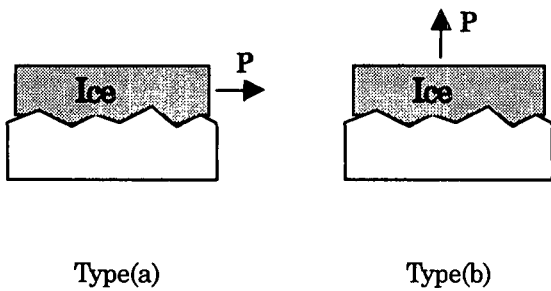
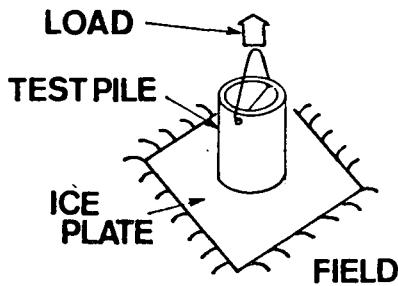
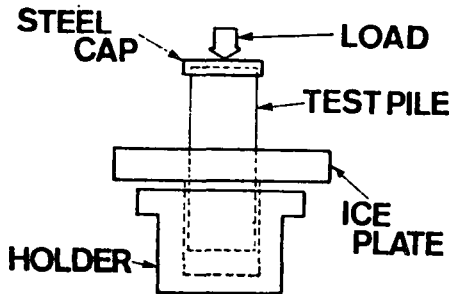


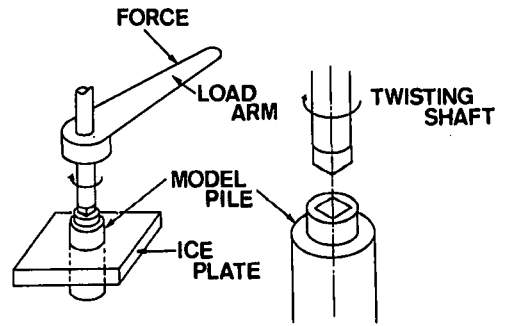
図-1 氷と構造物の破壊形態



a) Pull Out



b) Push Out



c) Twist



d) Shear



e) Tension

図-2 凍着強度試験方法

(2) 試験方法別凍着強度

前節で紹介した破壊形態のうち、水位変動により構造物に鉛直氷荷重を生じさせることで実際に起きる破壊現象は概ね Type (a) であることより、実際に採用される試験方法は Pull Out, Push Out, Twist, Shear のうちのいずれかであろう。これらの試験方法はそれぞれ想定する現象が異なっており、その違いのため Pull Out, Push Out の試験方法ではせん断力とともに曲げモーメントが作用することになる。本節では、Pull Out, Push Out, Twist の 3 種類の方法で凍着試験を行い、試験方法の違いが凍着強度に与える影響について考察する。

実験は北海道のサロマ湖、および北海道大学の開発科学実験所で行われた。実験条件は氷厚が 10cm 程度、氷温が約 -5°C である。使用した模型杭はスチール製のもので、Twist 試験の時は、ねじりに耐えられる

よう、他と比べ十分な剛性を持たせるため肉厚の厚いものを使用した。これらの模型杭の杭径は 3~41cm の範囲である。

(3) 凍着強度の算定式

実験で得られた最大氷荷重から以下の式によって凍着強度を算出する。

Pull Out, Push Out 試験の場合

$$\tau_B = P / 2\pi ah \quad (1)$$

ここで、 τ_B : 凍着強度 (MPa)

P : 最大氷荷重 (N)

a : 杭半径 (mm)

h : 氷厚 (mm)

Twist 試験の場合

$$\tau_B = \frac{Pl}{2\pi a^2 h} \quad (2)$$

ここで、 τ_B : 凍着強度 (MPa)

P : アームに作用する最大荷重 (N)

a : 杭半径 (mm)

h : 氷厚 (mm)

l : 杭中心から荷重 P が作用するまでの距離 (mm)

(4) 実験結果

実験結果を図-3 に示しているが、これは縦軸に凍着強度を、横軸には杭径 ($2a$) を氷厚 (h) で無次元化した量を与え、3つの試験方法による実験結果をプロットしたものであり、○が Push Out 試験、□が Pull Out 試験、△が Twist 試験の結果を示している。

図より、Push Out 試験の結果はやや小さめに出ているが、これは氷温の範囲が-3.6~-5.5℃と、他の2つの実験と比べて氷温がやや高かったことから、凍着強度の一般的性質としての氷温が低いほど強度は増加するという性質(図-5)に沿うものである。したがって、同じ条件下における実験結果のばらつき、あるいは天候の不安定な冬期間の実験のため氷温、氷厚の条件が各ケース必ずしも一致していないこと等を考慮すると、試験方法の違いが凍着強度に与える影響はそれほど大きいものではないといえることができる。

また、寺島ら¹⁾は淡水氷について凍着強度は杭径と氷厚の比 $2a/h$ の値が1付近で急激に小さくなり、1を超えるとやがて一定値に近づくとの実験結果を得ているが、海水についても同様な傾向が見られる。

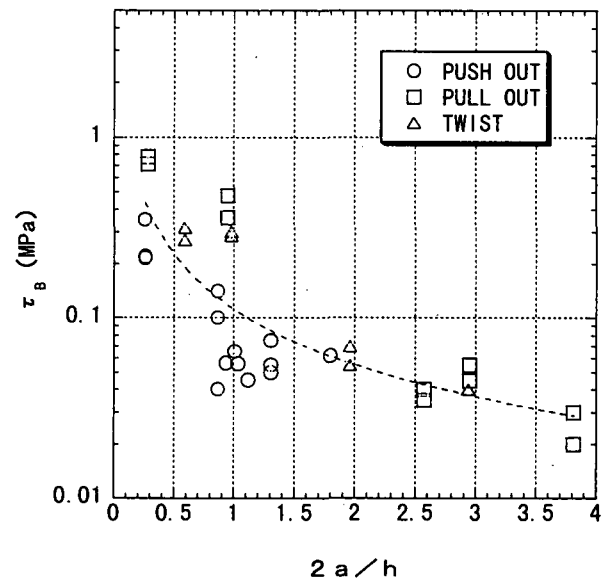


図-3 試験法別凍着強度

また、鋼管杭と海水との実験結果について氷温別に示したものが図-4 である。□が氷温約-5℃、△が-2~-3℃の実験結果であり、試験方法は先ほどと同様の3種の試験方法を用いた。これより、氷温の値に関わり無く、 $2a/h$ の値が1を超えた付近で凍着強度の値が小さくなり、やがて一定値に近づく傾向が見られる。よって設計の際には、図中に引かれた近似曲線により凍着強度を推定すべきである。

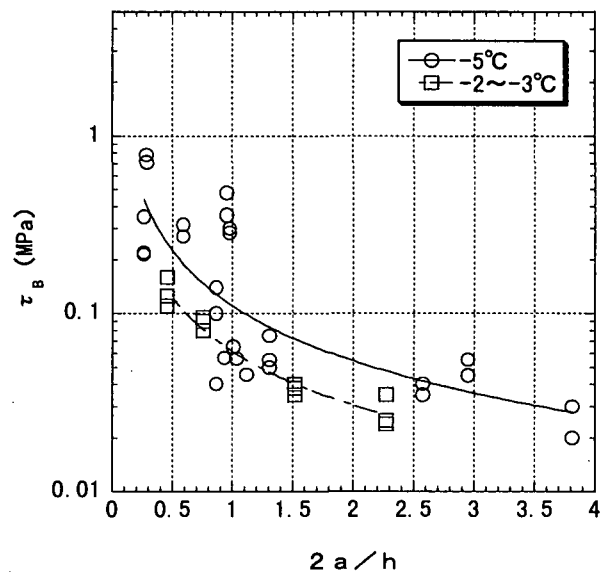
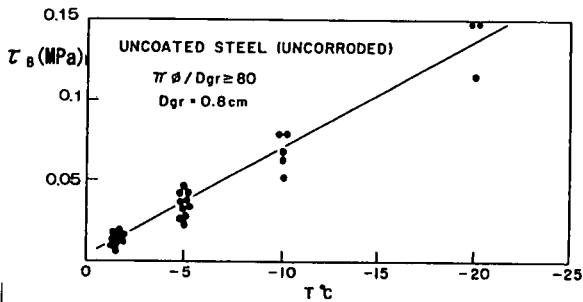


図-4 温度別凍着強度 (Steel)

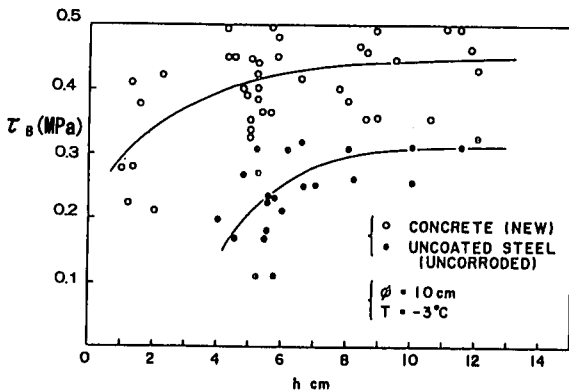
3. 合成化学材料の凍着強度

(1) 凍着強度の一般的性質

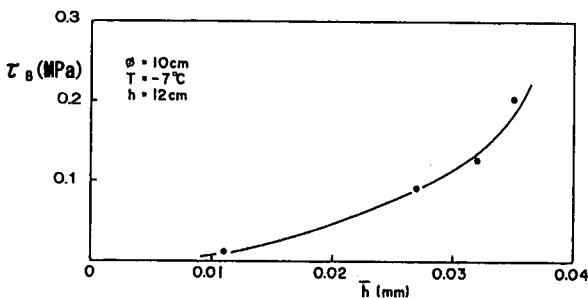
凍着強度の一般的性質として図-5 に示すように氷温、氷厚、杭径、ならびに材料の表面粗さが大きく影響してくることが、中澤ら³⁾によって明らかとなっている。凍着強度が小さいほど構造物に作用する最大氷荷重も小さくなるのであるが、これらのパラメーターのうち、人工的に制御可能なものは、材質あるいは表面のコーティングなど表面粗さのみである。本章では鋼管を、種々の合成化学材料により被覆した円筒形材料について実験を行い凍着強度を求めた。⁴⁾



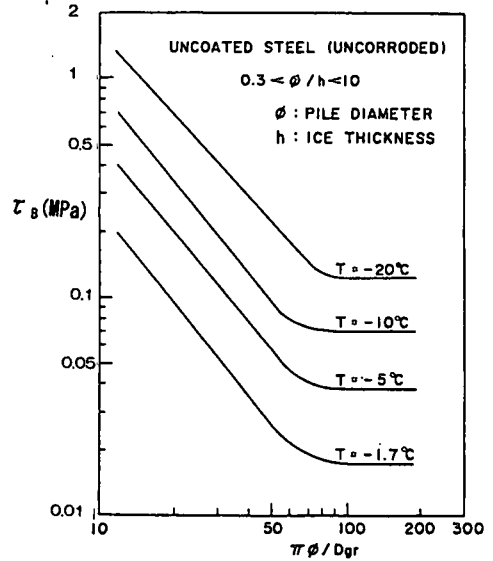
氷温の影響



氷厚の影響



表面粗さ（波高）の影響



杭径の影響

図-5 凍着強度と各要素との関係

(2) 実験方法

実験は、氷温、氷厚の条件をなるべく一定にするため、北海道大学の開発科学実験所の可搬型海水用低温装置内で行った。用いた材料は LDPE（低密度ポリエチレン）、HDPE（高密度ポリエチレン）、ウレタン、耐摩耗ウレタン（軟質ウレタン）、レジンモルタル、ポリエステル、それに一般に用いられる鋼管、及びコンクリート（old、new）である。実験条件を以下に記す。

- ・氷温：氷温は気温によって値が変化するが、一般的には積雪が断熱材としての作用をすることから、断面の中層・下層部では $-1.8 \sim -4 ^\circ \text{C}$ 程度のことが多いといわれている。よって、氷温が $-20 ^\circ \text{C}$ を下回ることがまれであるため、氷温の最低値を $-20 ^\circ \text{C}$ とし、 $-10 ^\circ \text{C}$ 、 $-5 ^\circ \text{C}$ の3種類について実験を行った。
- ・氷厚：凍着強度は氷厚にも影響を受け、氷厚が増加するほど凍着強度も増加するが、氷厚がおおよそ 8 cm をこえるとその影響は少なく、凍着強度の値が一定値に近づく。従って今回は影響範囲外の氷厚 $9.0 \sim 15.7 \text{ cm}$ の範囲で実験を行った。
- ・杭径：図-5にも示した様に、凍着強度は杭径の大きさに影響されるが、今回は実験の容易さの関係から、杭径が $10, 12 \text{ cm}$ のものを用了。

なお、以上のほかに凍着強度に影響を与える要因として応力速度や歪速度があり、応力速度が $0.01 \sim 0.1 \text{ MPa/s}$ 、歪速度が $0.1 \sim 1.0 \text{ mm/s}$ の範囲で緩やかなピークを示すが、両者ともそれほど大きな影響を与える要因ではないことが知られている。今回の実験で

はそれぞれの値が上記の範囲内になるように条件を設定した。

試験方法は、前章より試験方法の違いによる影響が小さいとの結果を得ているため、実験の容易さから Pull Out 試験を採用した。

3) 実験結果

図-5より明らかなように氷厚は8cm、杭径は20cmを超えたあたりで凍着強度への影響は極めて小さくなる。また北海道において結氷した氷盤は最大で50cm程度まで厚さを増し、実際に使用される杭径も20cm以上のものが多い。このことより、実際の設計が可能なよう、実験結果を図-5を用いて氷厚、杭径をともに20cmの場合に換算した値を図-6に示す。これより、被覆材を巻いていない鋼管より大きな凍着強度を示したものは、ポリエステルとレジンモルタルであるが、これらの供試体は加工がかなり雑であり、表面の凹凸が激しいため、この結果からは、これら2種類の材料の優劣を一概に判断することはできない。

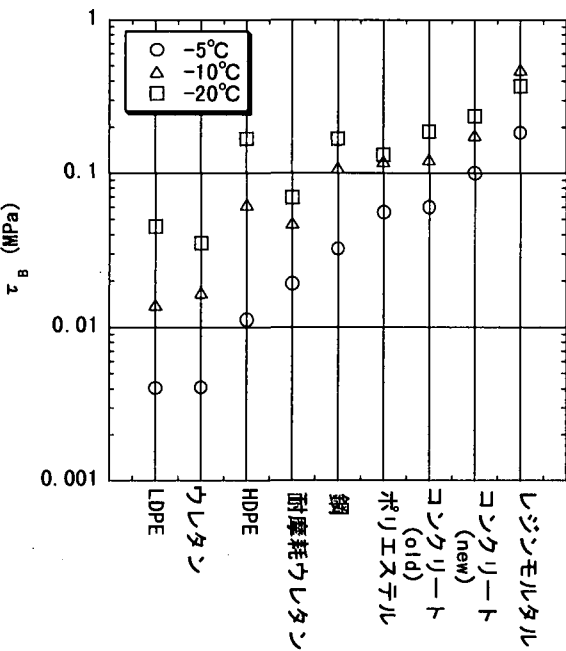


図-6 重防食鋼管と海水の凍着強度

最後に実際の凍着現象は、結氷する海域において、比較的低緯度に位置する北海道沿岸においては、日中は太陽からの輻射熱により、構造物の温度が上がり、氷と構造物が凍着していない場合が多い。一方夜間には逆に急激な気温の低下と、逆輻射により構造物から熱が急激に奪われることから、構造物と氷が凍着する

と考えられる。また、潮汐のため、氷盤と構造物は凍着しては破壊し、冬期間に何度も凍着及び曲げ破壊を繰り返し、さらにフラッキング現象も同時に起こることもある。このように、構造物と氷盤は、凍着と破壊を繰り返しながら、氷厚を増してゆく場合もあるし、前者のような場合もあることから、対象地点の気象、海象、氷象とともに、構造物近傍の海水の挙動にも充分配慮する必要がある。

4. 結論

- 1) 凍着強度に関する実験方法の種類についてそれらの特徴を明らかにした。
- 2) 試験方法の違いが凍着強度に与える影響については、それほど大きくないことが明らかになった。
- 3) 氷と諸材料間との凍着試験方法については、標準試験方法が確立されていないため、想定する状況に合わせて試験方法を選択する必要がある。
- 4) 合成化学材料で被覆した鋼管と海水との凍着強度を実験的に求めた結果、加工を施さない鋼管に比べ、凍着強度を小さくすることが可能であるといえる。
- 5) 実際の設計で使用可能なように、杭径20cm以上、氷厚20cm以上に換算した凍着強度を各料別、氷温別に示した。

参考文献

- 1) 寺島貴志、中澤直樹、原文宏、宇佐美宣拓、佐伯浩：氷盤と構造物の凍着強度に関する研究、第14回寒地技術シンポジウム論文・報告集、pp.406-409、1998。
- 2) 佐伯浩、後藤克人、小野敏行、山下俊彦、エイジ・L・スエガ：氷と諸材料間の凍着強度の試験方法に関する研究、第4回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp.306-313、1985。
- 3) 中澤直樹、五十嵐昇、竹内貴弘、小野敏行、佐伯浩：海水と構造物表面間の凍着強度について、第1回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp.172-177、1985。
- 4) 大槻富有彦、佐々木広輝、杉野文秀、小野敏行、佐伯浩：重防食鋼管に対する海水の凍着強度に関する実験的研究、海洋開発論文集、Vol.3、pp.167-172、1987。

(1999. 4. 19 受付)