

氷と諸材料間の凍着強度試験方法と凍着強度

The Comparative Experiments on Various Adfreeze bond strength Test between ice and materials.

原 文宏*・佐伯 浩**・石井 千万太郎**・中沢 直樹***

F.hara, H. Saeki, C. Ishii, N. Nakazawa

This paper summarizes systematic experiments on the adfreeze bond strength between sea ice and building materials used for offshore structures as steel, concrete, as well as a variety of coating materials.

As a result of comparative experiments on various test methods for determining the adfreeze bond strength between ice and different materials, very little difference was observed among the result of those methods. It was also confirmed that a factor affecting the adfreeze bond strength depends more on the coarseness of the surface of building materials than the interfacial free energy on that surface.

Keyword:(ice, Adfreeze bond strength, Test methods)

1. はじめに

海水が凍結する海域で氷盤が構造物に凍着すると、水位の変動に伴い構造物に鉛直方向の水力が作用する。つまり、水位上昇時には上向きに、水位低下時には下向きの押し込み力が作用する。このような鉛直方向の水力によって、栈橋の杭が引き抜かれたり、座屈を起こす被害が発生している。

この氷盤凍着時の水位変化に伴い、杭構造物に作用する鉛直方向水力を計算するためには、杭径、氷盤の厚さ、弾性定数、ポアソン比、曲げ強度、水位変化量及び構造物表面材料と氷盤の凍着強度が与えられなければならない。特に凍着強度は鉛直方向水力を規定する重要なパラメーターである。例えば、氷盤と構造物表面間の凍着強度が強い場合には、図-1(a)のように氷盤と構造物の界面でせん断破壊が起らず、氷盤が曲げ破壊を起こす。また、氷盤と構造物表面間の凍着強度が小さい場合は、氷盤と構造物の界面でせん断破壊をおこし図-1(b)のようになる。このように、氷盤が構造物に凍着した状態で水位が変動した時の、構造物に作用する鉛直方向水力は凍着強度の大きさによって大きく異なる。

本研究は、著者らの行った氷と諸材料間の凍着強度試験に関する過去の研究成果を、凍着試験方法と凍着強度を規定する影響因子の評価という視点から整理し、考察を行ったものである。

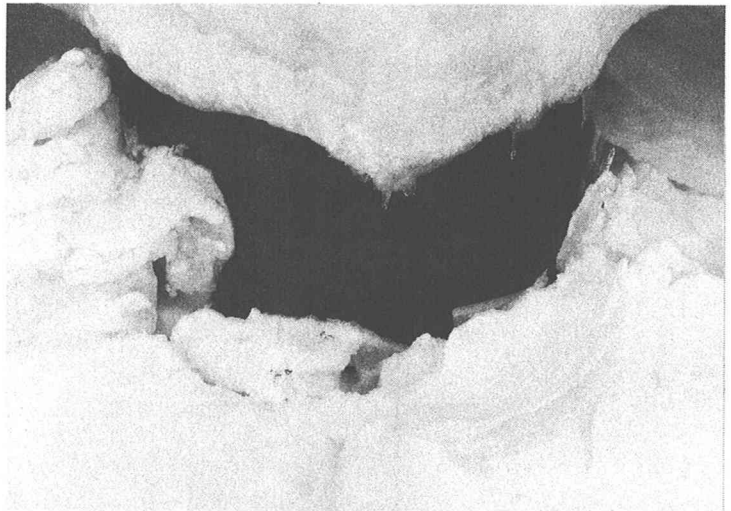


図-1(a) 氷盤が曲げ破壊した状態

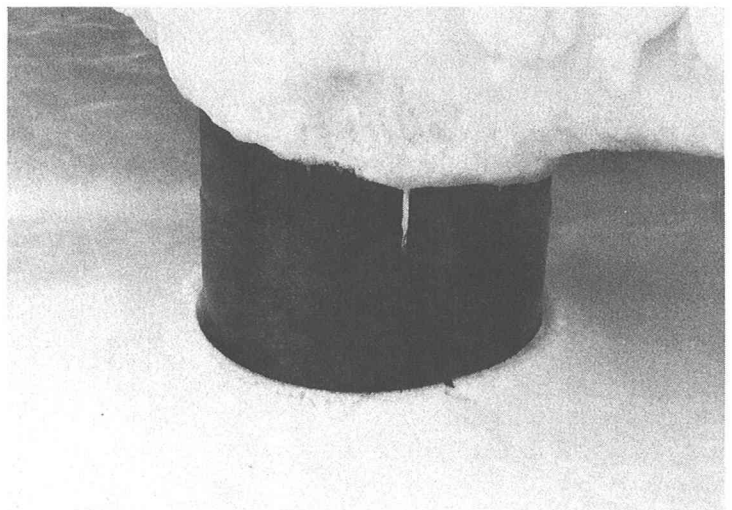


図-1(b) 氷盤と構造物の界面でせん断破壊した状態

* 正会員 北海道大学工学部 (〒160 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 秋田大学鉱山学部

*** 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株)

2. 氷と諸材料間の凍着強度試験方法

(1) 凍着強度試験方法

氷盤と構造物表面が凍着した状態で、外力が加わり破壊する様式は図-3 (a) (b) のような形態に分類される。図-3 (a) の場合は、海水と材料間の自由表面エネルギーと同時に海水のせん断強度と材料表面の粗さが凍着強度に影響を与える。図-3 (b) では自由表面エネルギーと表面粗さに関する接触面積が凍着強度に影響を与える。ただし、一般に海洋構造物に氷盤が凍着した状態で、考えられる作用外力の形態は、水位の変動によって構造物表面に沿って上下方向に作用する場合と凍着した氷盤が風や流れによって推進力を受け構造物表面に水平に作用する場合である。どちらも図-3 (a) の形態であり、図-3 (b) のような破壊様式が海洋構造物と海水の凍着問題で現実に発生するケースは極めて稀である。したがって、凍着試験方法は図-3 (a) のような破壊様式を想定し、以下の4種類の凍着試験方法で凍着強度を測定し、試験方法の違いが凍着強度へ与える影響について検討した。それぞれの実験方法の概念図を図-4 に示す。

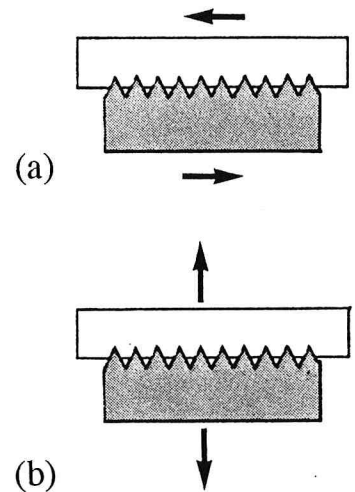


図-3 凍着した氷盤の破壊様式

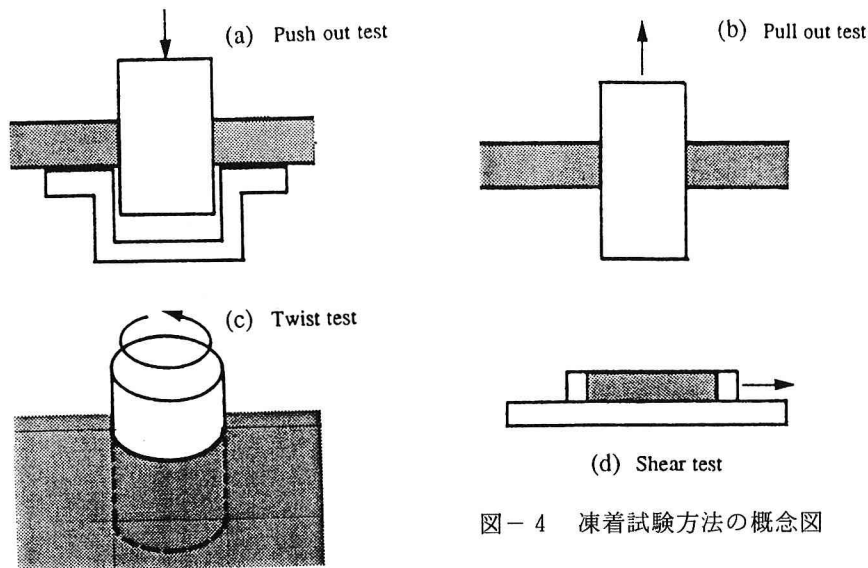


図-4 凍着試験方法の概念図

1) 押し抜き試験 (push out Test)

押し抜き試験は、試験杭の周りに凍着した氷盤が所定の厚さになった時、氷盤を切出し試験杭の周りの氷が一定の厚さになるように、また杭が氷盤に垂直に交わるように氷盤を整形する。滑らかな上面が鋼製箱に接するように供試体の上下を逆にし、鋼製のキャップをかぶせ鋼製箱に付ける。供試体上面を油圧ジャッキで押し、杭に凍着した氷盤を押し抜き、この時の凍着強度を測定する。凍着力はスチールキャップに接続されたロードセルにより測定する。荷重速度と押し抜き速度はジャッキに接続された油圧ポンプを調節することにより自由に変えることができる。(図-5)

凍着強度は(1)により計算される。

ここで

$$\tau_B = \frac{P}{\pi \phi h} \quad \text{..... (1)}$$

τ_B : 凍着強度
P : 押し抜き力
 ϕ : 試験杭の直径
h : 氷厚

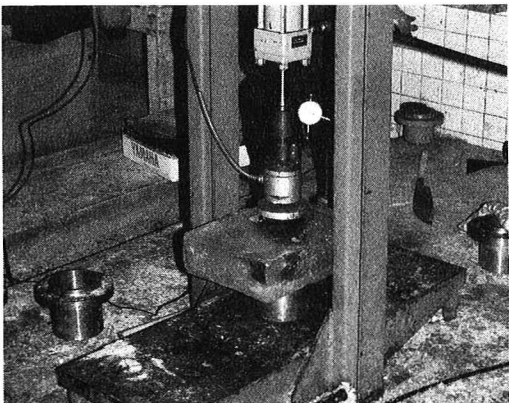


図-5 押し抜き試験装置

2) 引き抜き試験 (pull out method)

引き抜き試験は、試験杭の周りに凍着した氷盤が所定の厚さになった時、試験杭の上に引き抜き試験機を設置し、試験杭から延びたワイヤーをロードセルにつなぎ、油圧ジャッキで引き抜く方法である。(図-6)

凍着強度は(2)式により計算される。

$$\tau_B = \frac{P'}{\pi \phi h} \quad \text{..... (2)}$$

ここで

τ_B : 凍着強度

P' : 引き抜き力

ϕ : 試験杭の直径

h : 氷厚

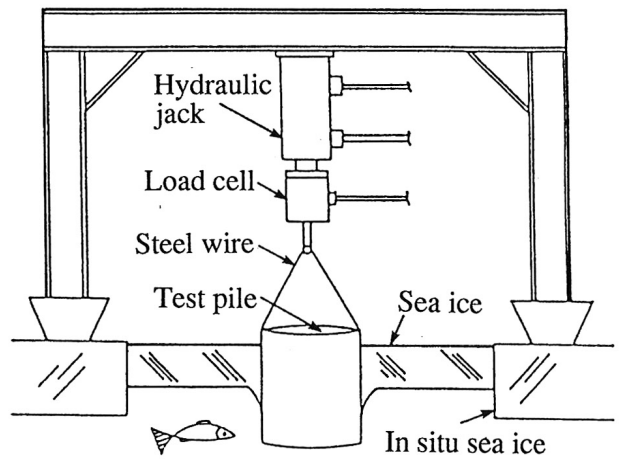


図-6 引き抜き試験装置

3) ねじり試験 (twist method)

ねじり試験は、杭の上面に矩形のホールを取り付けた試験杭に所定の厚さの水を凍着させ矩形に切り出す。切り出した供試体の4すみを鋼製フレームで固定し、矩形のホールに鋼製のリーバアームをセットして、水平に回転させ凍着強度を測定する。(図-7)

凍着強度は(4)式により計算される。

$$\tau_B \cdot \pi \phi h \cdot \phi / 2 = P'' \cdot l \quad \text{..... (3)}$$

$$\tau_B = 2 P'' \cdot l / \pi \phi^2 h \quad \text{..... (4)}$$

ここで

τ_B : 凍着強度

P'' : 回転力

l : レーバアームの長さ

ϕ : 試験杭の直径

h : 氷厚

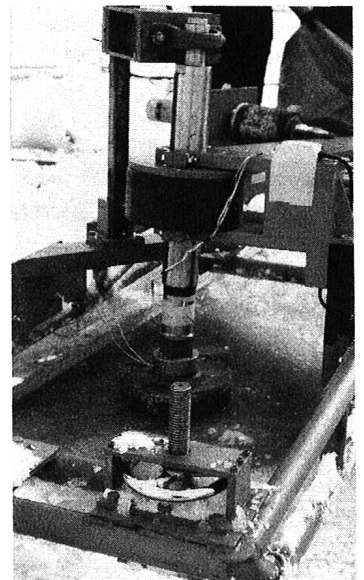
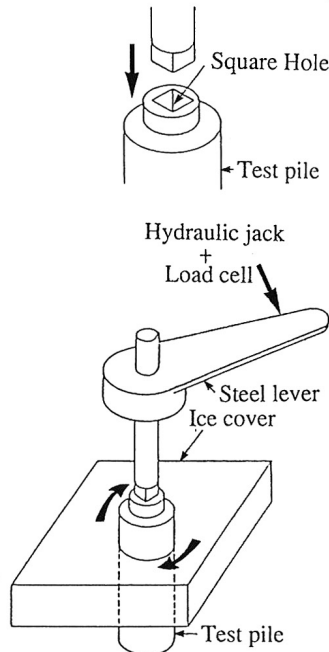


図-7 ねじり試験装置

4) セン断試験 (shear test)

セン断試験は、主に自由表面エネルギーによる氷と材料表面間の凍着力を計測するのに使用される方法で、図-8に示すような装置で凍着強度を測定する。モールド内部の水と鋼板が凍着した状態で、モールドにカラーをかぶせ、カラーとロードセルを連結棒で接続する。実験はスクリュウジャッキで連結棒をかいしてカラーを引っ張り、氷をセン断する。その時のセン断力をロードセルで測定し、凍着強度とする。

凍着強度は(5)式により計算される。

$$\tau_B = \frac{4 P}{\pi \phi^2} \quad \text{..... (5)}$$

ここで

τ_B : 凍着強度

P : セン断破壊の瞬間に

ロードセルにかかった力

ϕ : モールドの内径

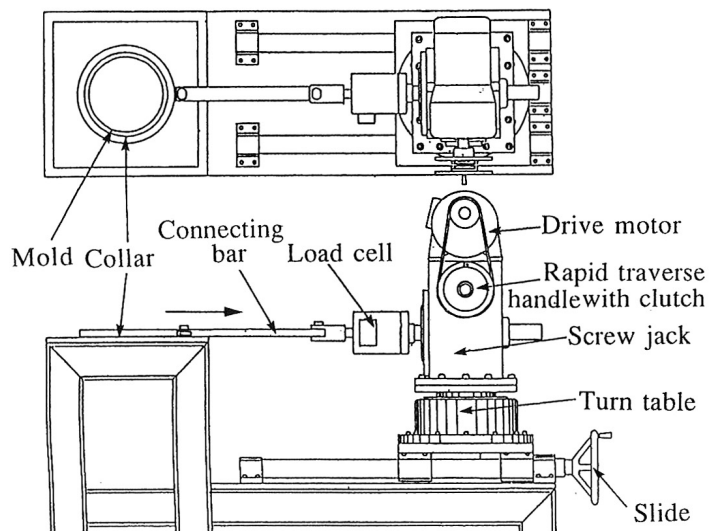


図-8 セン断試験装置

実験にあたっての留意点として、氷が粘弾性体であるために、押し抜き試験の時の押し抜き速度や荷重速度の影響が考えられる。しかし、中沢等が行ったuncoated steel pile についての凍着強度と押し抜き速度の関係及び荷重速度に関する実験では、凍着強度は押し抜き速度、荷重速度の増加に伴ってゆるやかなピークを持った曲線を描くものの、凍着強度は押し抜き速度・荷重速度に大きくは依存しない。(Nakazawa et al 1988) この結果は、佐伯等が行った海水のせん断強度試験の結果とも一致している (Saeki et al 1985) ことから、試験時の押し抜き速度や荷重速度は凍着強度に大きな影響を与えないといえる。また、凍着強度と氷厚の関係では、実験データに多少のバラツキはあるものの、氷厚が増加するにしたがって凍着強度も増加し、氷厚が8 cm以降で一定値となる。(Nakazawa et al 1988)

(2) 試験方法の違いが凍着強度へ与える影響

1) 押し抜き試験、引き抜き試験及びねじり試験の比較

図-4の(a)(b)(c)の3種類の試験法で凍着強度の実験を行った。

試験杭はuncoated steel pile で錆のないものを使用した。それぞれの試験に使用した試験杭の径は押し抜き試験 $\phi = 3 \cdot 5 \cdot 10 \cdot 15 \text{ cm}$ 、引き抜き試験 $\phi = 3 \cdot 10 \cdot 15 \cdot 27 \cdot 41 \text{ cm}$ 、ねじり試験 $\phi = 5 \cdot 10 \cdot 15 \cdot 27 \cdot 41 \text{ cm}$ である。

図-9は、実験結果を、円断面の試験杭の無次元円周(試験杭の円周 $\pi \phi$ ÷ グレインの平均直径 D_{gr})と τ_B の関係で表したものである。ここで D_{gr} はグレインサイズでグレインの面積を円形面積に換算した場合の平均直径で、実験で使用した氷盤は $D_{gr} = 0.8 \text{ cm}$ である。また、実験時の氷温は -1.7°C とした。

図-9から明らかなように、同一径の場合の凍着強度は多少のバラツキはあるものの、試験方法に関係なく、ほぼ同一の値となっている。この傾向はどの杭径においても同様である。したがって、押し抜き試験、引き抜き試験及びねじり試験の3試験については、試験方法の違いが凍着強度に与える影響は小さいと結論づけられる。また、杭径との関係では、杭径が大きくなる程、凍着強度は減少する傾向を示し、 $\pi \phi / D_{gr} \geq 80$ の範囲で一定値となる傾向を示している。

2) 押し抜き試験とせん断試験の比較

図-4の(a)(d)の押し抜き試験とせん断試験について比較実験を行った。押し抜き試験の試験杭は直径5 cmの円筒形のチタン製のパイプを用いた。試験杭にチタンを使用したのは、押し抜き試験用の供試体は作成するのに、水中に3~4日浸す必要があるのに対し、せん断試験用の供試体は僅か数時間で作製可能であることから、水と接触している時間の長短により腐食状態が異なることを考慮して、腐食しにくいチタンを使用した。

図-10は、押し抜き試験とせん断試験の結果を、円断面の試験杭の無次元円周と凍着強度の関係で示したものである。傾向は前述した3種類の実験の比較と同様であり、杭径が大きくなるほど凍着強度が小さくなるような曲線を描き、2つの試験結果はほぼこの曲線上にプロットされることから、押し抜き試験とせん断試験の間にも凍着強度に大きな違いは見られない。

以上のことから、4種類の試験方法から得られた凍着強度には大きな違いはなく、必要に応じて最もやりやす

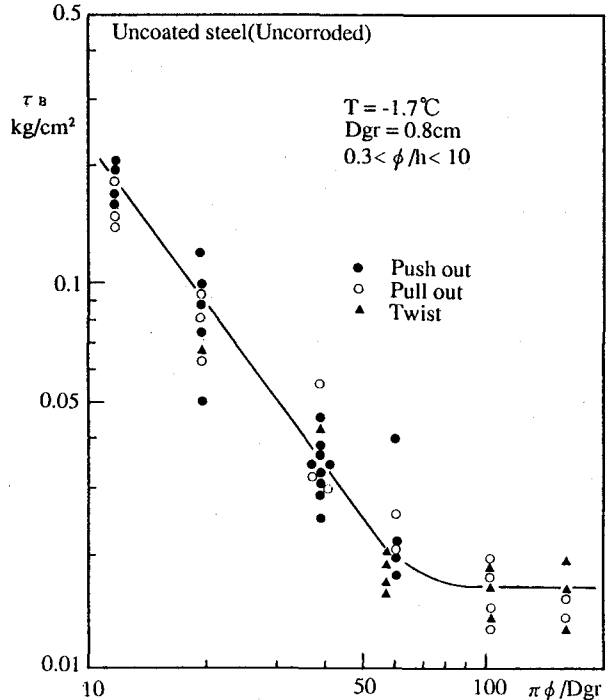


図-9 3種類の試験方法による凍着強度と杭径の関係

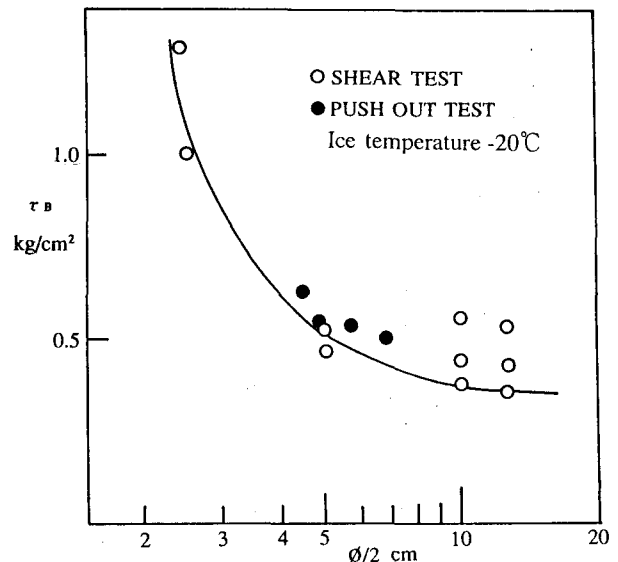


図-10 2種類の試験方法による凍着強度と杭径の関係

い試験方法を採用して良いと結論できる。また、凍着強度は杭径、つまり凍着面積に大きく依存する傾向をしめしており、試験杭の直径が大きくなるほど凍着強度は小さくなり、直径が20～25cmを越えるとほぼ一定の強度となる。

3. 凍着強度の影響因子

(1) 材料の違いによる凍着強度への影響

一般に氷の諸強度が氷温に大きく依存することから凍着強度も、氷温に依存すると考えられる。図-11はコンクリート、LDPE（低密度ポリエチレン）、uncoated steel(uncorroded)、coated steel (INERTA160)の各材料の凍着強度と氷温の関係を示したものである。図から明らかなように氷温が低下するに従って、どの材料も凍着強度が増加しており、比較的材料表面の粗いuncoated steelやコンクリートの温度低下に伴う凍着強度の増加が著しく、表面の滑らかなLDPE、coated steelの凍着強度の増加は緩やかな傾向をしめす。また、同じ氷温条件でのコンクリートの凍着強度にバラツキがあるのも、材料表面の粗さによるものと考えられる。このことは、uncoated steel、coated steel、コンクリートと氷盤の静止摩擦係数の測定結果に幅があることから、材料表面の粗さに起因することを裏づけている。以上のことから、材料の表面積がある程度大きい場合には、凍着強度は氷温に依存するが、材料そのものには依存せず材料表面の物理的な形状に依存すると考えられる。

(2) 表面の粗さによる凍着強度への影響

様々な材料の表面の粗さと氷温-5℃の時の凍着強度の関係を図-12に示す。表面粗度はhight-accuracy surface roughness meterで測定し、10点の平均値で表した。表面粗度と凍着強度の間には強い相関がある。表面粗度が大きくなると凍着強度は急激に増加し小さくなると減少する。また、図から明らかなように、表面粗度が20μ以下では、凍着強度が表面粗度に関係なくほぼ一定の値となる。これは表面が滑らかになってくると、材料表面の粗さよりも他の要因が凍着強度に影響するものと考えられる。

Murase等の高分子化合物の自由表面エネルギーと凍着強度に関する研究で、材料の自由表面エネルギーが大きくなると凍着強度が大きくなると報告されており、高分子材料と淡水氷の凍着強度と材料表面の自由表面エネルギーの間には線形関係があることを述べている。材料表面の粗さが測定されていないため明確なことは言えないが、表面のなめらかな高分子化合物のみの試験結果で自由表面エネルギーと凍着強度の間に強い相関が見られることから、粗度が小さくなると、凍着強度は材料表面の自由表面エネルギーに依存するといえる。

以上のことから、海水と諸材料間の凍着現象の破壊機構を整理すると、大きく二つに分類される。一つは、材料表面が粗く、凹部にある海水がセン断破壊される場合と、もう一つは表面が滑らかな場合で、海水がセン断破壊するより、材料表面の自由表面エネルギーを越えるセン断力が作用した時の剝離破壊である。

つまり、著者等の実験結果からみておよそ粗度20μを境にして、この値より大きい範囲では表面の粗さによって凍着強度は決まり、小さい範囲では材料表面の自由表面エネルギーによって規定される。ただし、一般に海洋構造物に使用する材料を考慮すると、ほとんどの場合、材料表面の粗さによって凍着強度が決定され则认为られる。

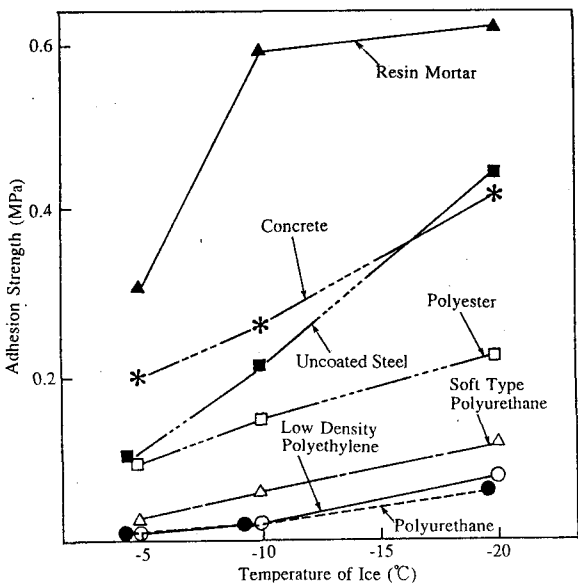


図-11 各種材料の氷温と凍着強度の関係

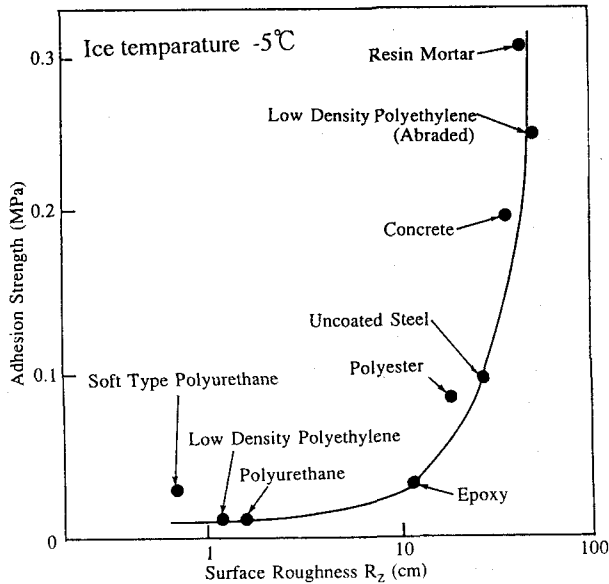


図-12 各種材料表面の粗さと凍着強度の関係

4. 結 論

- (1)押し抜き試験、引っ張り試験、ねじり試験、セン断試験の4種類の試験方法から得られた凍着強度は、多少のバラツキはあるものの大きな違いはなく、必要に応じて最もやりやすい試験方法を採用して良い。
- (2)凍着強度は杭径、つまり凍着面積に大きく依存する傾向をしめしており、試験杭の直径が大きくなるほど凍着強度は小さくなり、直径が20~25cmを越えるとほぼ一定の強度となる。
- (3)凍着強度は水温に依存し、水温が低下するにともなって凍着強度は増加する。しかし、材料そのものには依存せず材料表面の粗さに依存する。
- (4)海水と諸材料間の凍着現象の破壊機構を整理すると、大きく二つに分類される。一つは、材料表面が粗く、凹部にある海水がセン断破壊される場合と、もう一つは表面が滑らかな場合で、海水がセン断破壊するより材料表面の自由表面エネルギーを越える力が作用した時の剝離破壊である。
- (5)著者等の実験結果からみて、およそ粗度 20μ を境にして、この値より大きい範囲では表面の粗さによって凍着強度は決まり、小さい範囲では材料表面の自由表面エネルギーによって規定される。

参考文献

- (1)H. Katoh, K. Suzuki, Y. Kariazono, F. Ohtsuki, K. Sato, H. Saeki:Durability of Coated Steel in Sea Ice Region
Proceedings of The 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,
pp213-pp220, 1989
- (2)H. Saeki, T. Ono, M. Sakai, N. Nakazawa, M. Yamada:Ice Force due to Change in Water Level and Adhesion
Strength between Fresh Water Ice and Various Pile Materials, Proceedings of The 20th IAHR Symposium
of Ice (Moscow), Vol. II, pp1-pp8, 1983
- (3)H. Saeki, N. Nakazawa, T. Ono, E. Suenaga, T. Takeuchi: Testing Methods for Adfreeze Bond Strength between
Various Materials, Proceedings of The IAHR Symposium of Ice
(Iowa), Vol. I, pp377-pp388, 1986
- (4)N. Nakazawa, H. Saeki, T. Ono, T. Takeuchi, S. Kanie:Ice Forces due to Change in Water Level and Adfreeze
bond Strength between Sea Ice and Various Materials, Journal of Offshore Mechanics and Arctic
Engineering, Vol. 110, pp74-pp80, Feb. 1988
- (5)H. Murase, K. Nanishi:On the Relationship of Thermodynamic and Physical Properties of Polymers with
Ice Adhesion, Annuals of Glaciology, pp146-pp149, Jun. 1985
- (6)H. Saeki, T. Ono, N. E. Zong, N. Nakazawa: Experimental Study on Direct Shear Strength of Sea Ice, Annuals
of Glaciology, pp218-pp221, Jun. 1985