

氷盤凍着に伴う直立杭構造物に作用する軸方向氷力について

佐伯 浩*・田中祐人**・酒井雅史**
小野敏行***・尾崎 晃****

1. 緒 言

寒冷地の海岸・海洋に建設される石油掘削リグやその他の杭状の構造物に氷盤が凍着した時、水位の上昇・下降により杭構造物の軸方向に大きな氷力が作用する。水位が上昇する場合には杭を引抜こうとする力が働き、水位が下降する時には杭を押込んだり、坐屈させる力が働く。我が国においては、ダム取水塔や河口部の水位観測塔が、このような力で破壊された例があるし、米国やカナダにおいては、湖沼や海岸の棧橋が引抜かれた例が数多く報告されている。筆者等はすでに Kerr の理論¹⁾を拡張して、氷盤凍着に伴う軸方向氷力の理論式とその結算結果を発表した²⁾。本研究は、軸方向氷力を計算するために必要な海水の凍着強度、曲げ強度、曲げ弾性率それにポアソン比を、実際のオホーツク海の海水を用いて実験的に求めたものである。

2. 海水の凍着強度

海水と海岸・海洋構造物に用いられる材料間の凍着強度に関する試験方法は現在確立していない。コンクリートの場合、鉄筋とコンクリート間の付着強度の試験方法には、引抜試験、押抜試験それに両引試験があり、それぞれの試験方法によって得られる付着強度は異っている。しかし海水と海岸・海洋構造物に用いられる材料の弾性係数や強度の差は鉄筋とコンクリート間のそれらの差より大きいので、海水の場合は引抜と押抜試験の間にはそれ程大きな差はないと考えられる。本研究では、杭径と凍着強度の関係を求めるために、比較的大口径の杭を用いて現地氷盤上で引抜試験を行なった。実験は全て我々が開発した押抜試験装置³⁾を用いて行なわれた。凍着強度 τ_B は、杭径を ϕ 、氷厚を h 、引抜あるいは押抜力を F とする時 $\tau_B = F/(\pi \cdot \phi \cdot h)$ で求められる。まず凍着強度に及ぼす杭径 ϕ の効果を調べるために6種類の異った径の鋼杭を用いて、現地氷盤上で引抜試験を行こなったが、その結果を図-1に示す。(a) 図は、 τ_B

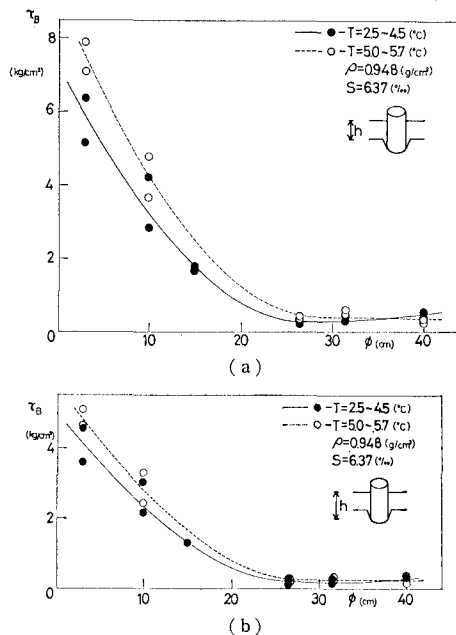


図-1

を計算する時、 h に氷盤の厚さを用いたものであり、(b) 図は、実際に杭に凍着した部分の厚さを h として τ_B を求めたものである。正しい凍着強度は勿論 (b) 図であるが、杭に作用する軸力の計算には氷盤厚 h を用い、凍着によって耐える力の計算には、実際の接触部の氷厚 h' を用いるか、正しい凍着強度 τ_B に (h'/h) を乗じた、割増し凍着強度 $\tau_B \cdot (h'/h)$ を用いるべきである。次に (b) 図より杭径と凍着強度の関係を調べてみると $\phi < 25$ cm の範囲では ϕ の増加とともに τ_B は小さくなり、 $\phi \geq 25$ の範囲では、 τ_B は ϕ に無関係に一定値を示す。一般に供試体の寸法効果は、供試体の代表長と grain の平均径 D_{gr} の比で表わされる。よって杭の周長 $\pi \cdot \phi$ と D_{gr} の比で考えると、今回の平均グレイン径が $D_{gr} \div 1.2$ cm であったので、 $\pi \cdot \phi / D_{gr} < 65$ の範囲では τ_B は $\pi \phi / D_{gr}$ の増加とともに小さくなり、 $\pi \cdot \phi / D_{gr} \geq 65$ では τ_B は一定値となる。また、以後の実験結果は実験のし易さから $\phi = 10$ cm で押抜試験から求めたものであるが、それらの値を実際の大きな構造物の設計に用いる場合には (b)

* 正会員 北海道大学助教授 工学部土木工学科

** 学生員 北海道大学大学院工学研究科

*** 北海道大学工学部土木工学科

**** 正会員 北海道大学教授 工学部土木工学科

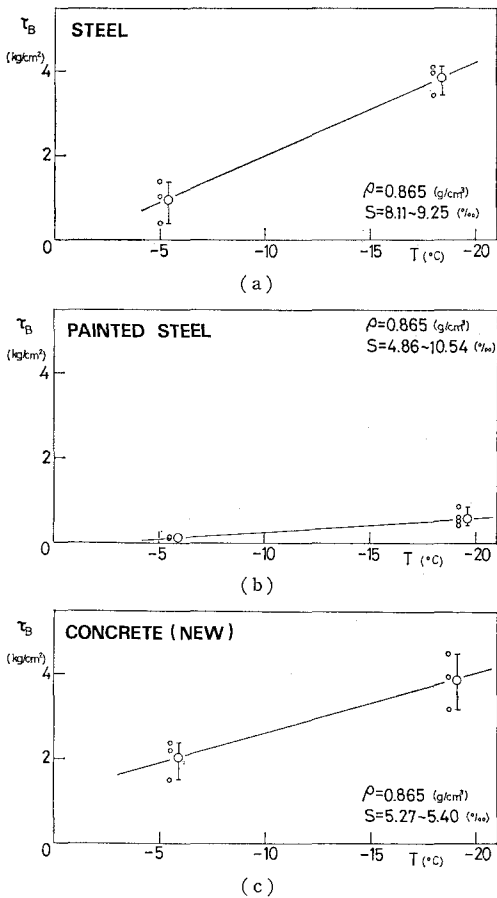


図-2

図から明らかなように、 $\phi=10$ cm で得られた値に 0.09 を乗ずれば良い。次に τ_B と氷温 T の関係を調べたものが図-2である。(a)は鋼管の表面を削ったもので、(b)は、その鋼管に、寒冷地の海岸・海洋構造物に用いられる INERTER 160 を塗装したもので、(c)は 1981 年に作製したコンクリート杭で、いずれも $\phi=10$ cm である。いずれの場合も、 τ_B は氷温 T の低下とともに直線的に増加していて、これは Saeki³⁾ 等の結果とよく一致している。我々は同時に、1979 年に作製したコンクリート杭でも同様に τ_B と T の関係を調べたが、(c)の場合より τ_B は小さいが、その勾配は (c) の場合と同じ

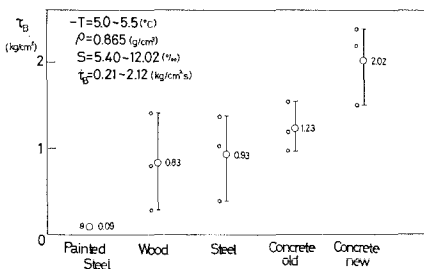


図-3

であった。これは同一の材質でも表面の粗さ、風化の程度等によって τ_B は異なる事を示している。次に $\phi=10$ cm で、同一の試験条件で材質の違いによる τ_B を較べたものが図-3である。同じ粒径の骨材を用いたコン

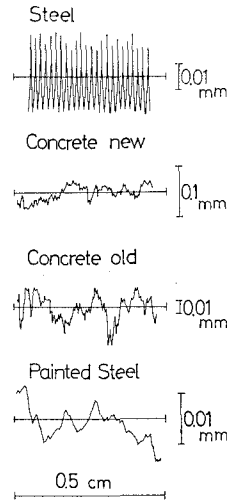


図-4

表-1

Material	$\bar{h}$ mm	$\bar{\lambda}$ mm	$\bar{h}/\bar{\lambda}$
Steel	0.027	0.2	0.135
Concrete new	0.035	0.4	0.0875
Concrete old	0.032	0.6	0.0533
Painted Steel	0.011	1.3	0.0085

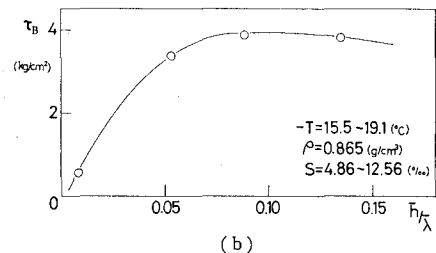
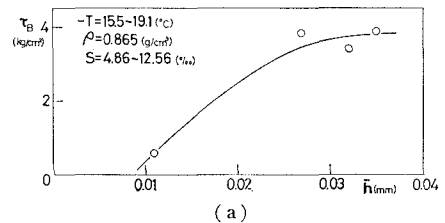


図-5

のであるが、本実験の範囲では、 $\bar{h} < 0.03 \text{ mm}$ の範囲では τ_B と $\bar{h}$ の間には直線の関係があるが $\bar{h} > 0.03 \text{ mm}$ では、 τ_B は $\bar{h}$ にあまり影響されないようである。また (b) の波形勾配 $\bar{h}/\lambda$ と τ_B の関係においても $\bar{h}/\lambda > 0.10$ の範囲では τ_B は $\bar{h}/\lambda$ に関係なく一定値を示している。このことから、 τ_B は材料にも若干関係があるが本質的には表面粗さに関係している事が明らかとなった。

3. 海水の曲げ強度

海水の曲げ強度 σ_f は stress rate, strain rate, 供試体の寸法, 試験の方法に影響を受けるし、海水自身の氷温 brine 体積, 密度あるいは空隙率の影響を受ける事も多く、研究結果から明らかになっている。図-6 は σ_f と

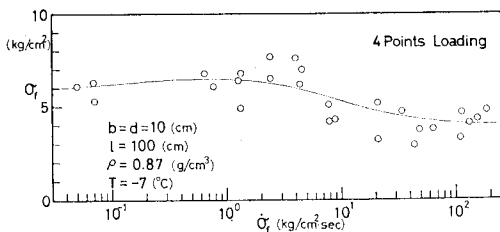


図-6

stress rate $\dot{\sigma}_f$ の関係を調べたものの一例で、 σ_f は $\dot{\sigma}_f$ の影響を受ける。しかし一軸圧縮強度に較べたらその影響度は小さい。 σ_f は $1.0 < \dot{\sigma}_f < 3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ でその最大値を示すが、他の氷温でも、その範囲で最大強度を示す。次に供試体の寸法効果と試験方法の差による σ_f の差を調べたものが図-7である。供試体の高さ d , 幅 b は

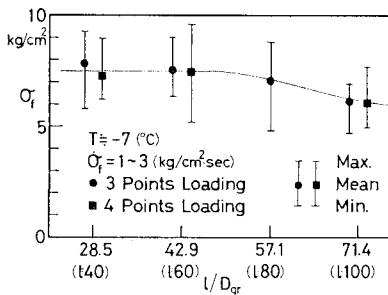


図-7

それぞれ 10 cm である。スパン長 l と grain の平均径の比 $l/Dgr < 50$ では、スパン表に関係なく σ_f は一定値であり、 $l/Dgr > 50$ では、スパン長の増加とともに緩かに σ_f 小さくなる。しかし Saeki^(4),5) 等の現地氷盤での大きな供試体 ($30 \times 30 \times 200 \text{ cm}$) での σ_f は $l=100 \text{ cm}$ の値とほぼ等しく 2~3% 程度小さかった事から、 $l/Dgr > 70$ の範囲でも τ_B はほぼ一定値を示すものと考えられる。また同図より、3 point loading と 4 point loading による差はほとんどない事が判る。次に、 σ_f と氷温の

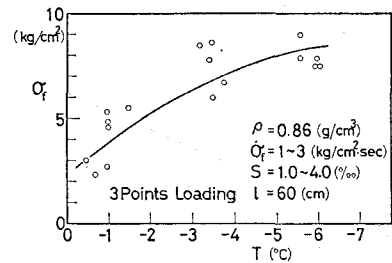


図-8

関係を調べたものが図-8である。海水の他の強度の場合と同じく氷温 T の低下とともに、 σ_f は強くなる。

4. 海水の弾性定数

(1) 海水の曲げ弾性係数

海水においては曲げ弾性係数 E_b は圧縮弾性係数 E_c に較べてはるかに大きい。この E_b も曲げ強度 σ_f の場合と同じように stress rate 等の影響を受ける。 E_b と stress rate $\dot{\sigma}_f$ の関係を調べたものが図-9である。図

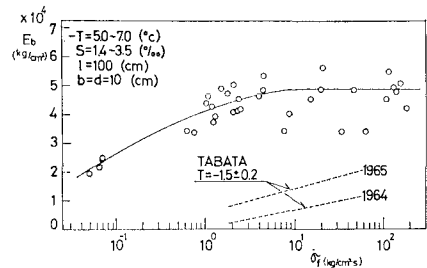


図-9

から明らかなように、 $\dot{\sigma}_f < 10 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の範囲では E_b は $\dot{\sigma}_f$ の増加とともに大きくなるが、それ以上になると E_b はほぼ一定値を示している。Tabata 等の結果は単調増加の傾向があるが、これは氷盤上での片持梁試験であるため $\dot{\sigma}_f$ の増加とともに流体の仮想質量力によって見掛け上 E_b が大きくなっているものと思われる。次に E_b と氷温の関係を調べたものが図-10である。 E_b は氷温 T の低下とともに増大している。同図に示されている

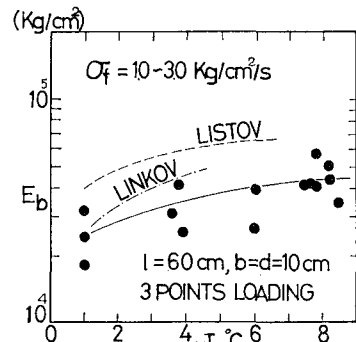


図-10

Listov や Linkov の値は我々の値より大きい、一つには海水そのものの密度、brine の体積の違いもあると思うが、最も重要なのは彼等の実験法が、我々の桁の撓みから求める静的方法と違って、振動法によって求めているからと思われる。一般にどのような材料においても動的方法で求めた弾性の諸定数の方が静定方法で求めたそれより大きくなる。しかし、本研究の目的から考えると静定方法で求めた E_0 の方がより合理的である。

(2) 海水のポアソン比

本研究の目的からすると、ポアソン比を求めるに当っては曲げ試験から求めるべきであるが、海水の場合、歪の測定が非常に困難であるため、ここでは我々が開発した³⁾ ポアソンゲージを用いて一軸圧縮強度試験から求めた。供試体の寸法は径 10 cm、高さ 20 cm の円筒供試体である。実験の結果を図-11 に示す。ポアソン比 ν

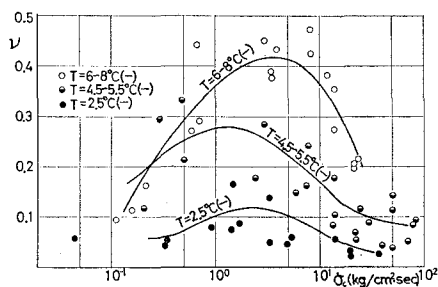


図-11

は $1.0 < \dot{\epsilon}_0 < 10 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の範囲に、氷温に関係なくその peak を示す。また氷温が低い程、 ν は $\dot{\epsilon}_0$ の影響を強く受けている。同様に Linkov は弾性波の速度から $\nu \approx 0.33$ を得ているし、Oliver は北極海で振動法によって $\nu = 0.32 \sim 0.37$ を得ている。軸力を求める目的からすると、静的方法によって我々の求めた ν を用いる方が、より合理的な設計が可能となる。

おわりに本研究を実施するに当たり、お世話になった佐呂間漁業協同組合の方々、現北海道開発局の福本淳氏、中華人民共和国交通部の牛恩宗氏に深甚なる謝意を表する。なお本研究は文部省科学研究費、一般研究 (B) によったものである事を付記する。

参 考 文 献

- 1) Kerr, A. D.: Ice forces on structures due to a change of the water level, Proc. of 3rd IAHR Symp. on Ice Problems, pp. 419~426, 1976.
- 2) 佐伯・小野・山田・尾崎: 直立杭構造物に作用する海水の力に関する研究, 第28回海講論文集, pp. 396~400, 1981.
- 3) Saeki, H., T. Ono and A. Ozaki: Mechanical properties of adhesion strength to pile structures, Proc. IAHR Symp. on Ice Problems, 1981.
- 4) 佐伯・西谷・小野・金・尾崎: 海水の弾性定数と氷盤の耐荷力について, 第27回海講論文集, pp. 353~357, 1980.
- 5) Saeki, H., A. Ozaki and Y. Kubo: Experimental study on flexural strength and elastic modulus of sea ice, Proc. 6th Inter. Conf. of Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions, pp. 536~547, 1981.