

直立円断面構造物に作用する海水の摩擦力について

佐伯 浩* ・ 佐々木広輝*・ 山下俊彦***
小野敏行****・ 田中祐人*****

1. ま え が き

氷海域における資源の開発や、それに伴う航路維持のため、海洋構造物や航行支援のための海中燈台が数多く使われ始めている。氷海域に建設される構造物を設計する場合、構造物に作用する全氷力とともに、局部氷圧力あるいは、構造物表面に作用する摩擦応力も重要である。特に大断面の構造物の壁体の設計にとっては氷圧力が重要な設計外力となるし、海水の移動の激しいところでは、コンクリート製海洋構造物の場合はコンクリート表面の摩耗、鋼製構造物の場合には防触のための塗装の摩耗に影響を与える摩擦応力が重要となる。ボスニア湾の海水の移動量の大きい海域では、海中燈台のコンクリート製基礎が年間約 3 cm 摩耗するとの報告があるし、我が国においても、北海道厚岸湾口に建設された橋梁の橋脚部が、防護対策をする以前には、かなりの摩耗があった事が報告されている。以上のことから、本研究は円断面を有する直立構造物に作用する海水氷盤の移動に伴う摩擦力の分布について述べる。近年海水の移動に伴うコンクリートやその他の材料の摩耗量に関する研究が行なわれているが、コンクリートの摩耗量に及ぼす影響因子としては、コンクリートの強度、海水の強度、相対速度、摩擦応力（接触圧×摩擦係数）それに摩耗距離が考えられるが、系統的な実験から、海水の強度に最も関係の深い氷温と摩擦応力に直接関係している接触圧それに摩耗距離であることが明らかにされている。本研究はアスペクト比約 5.0 の場合の摩擦応力の分布を明らかにしたものである。

2. 実験装置と実験方法

実験は全て、オホーツク海に接しているサロマ湖で行った。実験に当っては、氷盤を切り取り、新たに結氷させた氷盤を用いた。実験装置は前報¹⁾の氷圧力分布に用いたものと同じで、円筒模型抗に、三分力が測定可能な

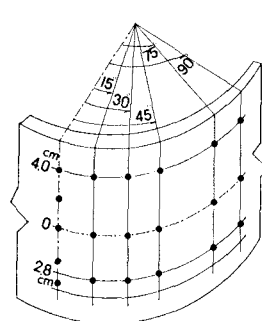


図-1 三分力の測定点

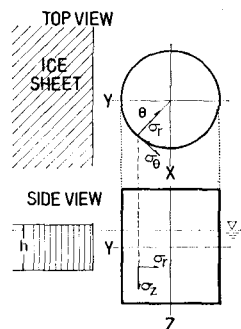


図-2 三分力の記号

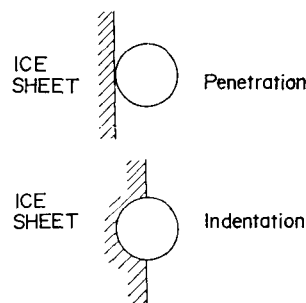


図-3 構造物と氷盤の接触条件

ステンレス製のピンを用いている。測定は、模型杭面 15 個所で三分力計を用い、中心線上 5 個所で圧力変換器を用いて、圧力分布、摩擦応力分布を測定した。図-1 にその測点を示す。またシリンダー内圧の測定より全氷力を測定した。三分力は、図-2 に示すように半径方向応力を σ_r 、水平接線方向応力を σ_θ 、鉛直母線方向応力を σ_z としている。模型杭の直径は 54 cm、氷厚は 9～12.5 cm の範囲で、アスペクト比は約 5.0 である。一般に氷盤と構造物の接触条件は、大きく分けて三つある。しかし、本研究においては、図-3 に示すように二つの条件で実験を行ったが、本解析には主に (b) の Indentation test の結果を用いている。また、構造物表面の摩擦応力 σ_s は次式で求めた。

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2} \dots\dots\dots (1)$$

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木部土木設計部

*** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

**** 北海道大学技官 工学部土木工学科

***** 工修 川崎製鉄(株) エンジニアリング事業本部

3. 実験結果と考察

(1) 法線方向応力（氷圧力） σ_r の分布

構造物に及ぼす最大の氷力は氷盤の破壊時に発生する。また、氷盤の破壊の性状と全氷力の大きさ及び経時変化の形は氷盤の貫入速度に依存する歪速度によって規

定される。図-4 に各歪速度に対する全氷力 F の時間変化を示す。(a) は Ductile Region, (b) は Transition Region, (c) は Brittle Region に近い Transition Region である。この歪速度の違いによって、全氷力の大きさと経時変化の様子はかなり異なることが判る。本研究においては、摩擦応力 σ_s を求めるに当って、図-4

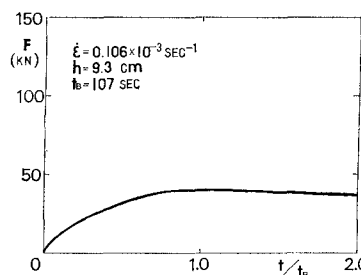


図-4 (a) 全氷力の時間変化

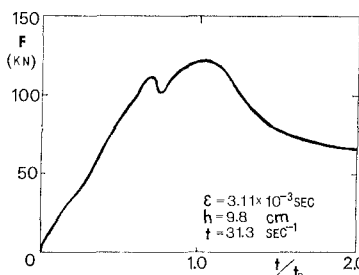


図-4 (b) 全氷力の時間変化

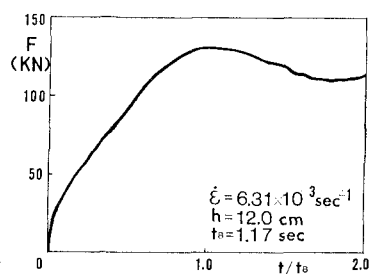
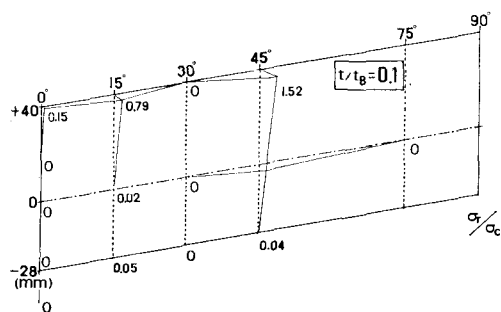
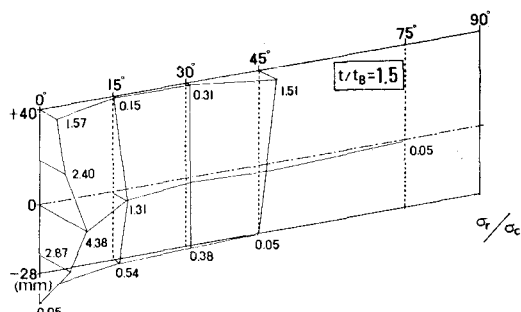
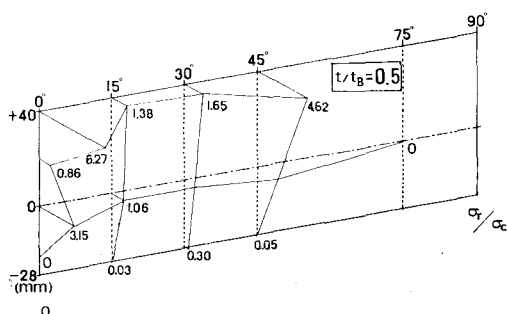
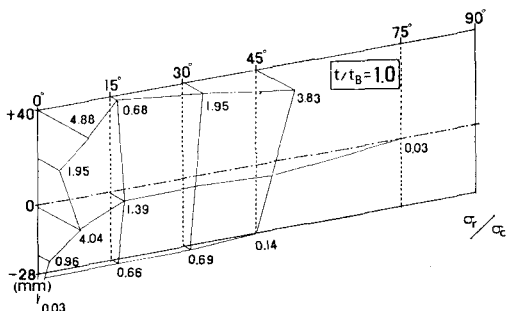


図-4 (c) 全氷力の時間変化

図-5 (a) $t/t_B=0.1$ の σ_r の分布図-5 (d) $t/t_B=1.5$ の σ_r の分布図-5 (b) $t/t_B=0.5$ の σ_r の分布図-5 (c) $t/t_B=1.0$ の σ_r の分布

に示されるような幅広い歪速度の範囲で実験を行った。まず、無次元半径方向応力 (σ_r/σ_c) 分布の時間変化を示したものが図-5 である。図中の t_B は最大氷力発生時間である。また、 σ_c は海水の平均の一軸圧縮強度である。氷盤への貫入速度は 0.565 cm/s で、歪速度は $2.59 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で Transition Region の場合である。 (σ_r/σ_c) の分布形は貫入するにしたがって、その形を大きく変えていくが、模型杭の中心部が大きい氷圧力を示している。また局所的には、海水の一軸圧縮強度の6倍を越えている所も存在する。一般に海水の三軸圧縮強度試験によると、一軸圧縮強度の4～5倍程度の強度を示すことが知られているが、その値より大きい圧力を示している。これは、一軸圧縮強度試験が直径10 cm、長さ20 cmの供試体で行なわれていることと、用いた一軸圧縮強度 σ_c が14本の平均値を用いているためと考えられる。また、海水そのものが異方性の材料であり、かつ内部に気泡やブラインが存在しているため、局所的な強度の分散が大きいこともその理由の一つと考えられる。一般に摩擦力は法線方向応力（接触圧、氷圧力） σ_r に摩擦係数を乗じたものであるから次式で示される。

$$\sigma_s = \mu \cdot \sigma_r \quad \cdots \cdots (2)$$

(2) 式中, μ は摩擦係数である. 過去の海水の摩擦係数に関する研究成果^{1), 2), 3), 5)} より, 摩擦係数が与えられれば, 摩擦力は求められることになる.

(2) 摩擦応力の分布

15 個所に設置された三分力センサーから得られた σ_θ と σ_z を用いて, 式 (1) により, 各測定点の摩擦応力が求められる. 三種類の歪速度に対して, 各測定点の無次元摩擦応力 (σ_s/σ_c), (σ_s/σ_B) を示したものが, 図-6 である. 図-6 より, どの歪速度の場合においても $\theta=30^\circ \sim 45^\circ$ 近傍に非常に大きな無次元摩擦応力が作用している. また, 全体的にみて, 氷厚中心線上 ($z=0$) における無次元摩擦応力が $z=2.8\text{ cm}$, $z=4.0\text{ cm}$ の摩擦応力より大きな値を示している. また, 最大全氷力を示す $1.46 \leq \dot{\epsilon} \leq 3.11 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の範囲が摩擦応力が大きいとは言えないことも明らかとなった. $\theta=30^\circ$ 近傍における摩擦応力が大きいことが明らかとなったが, 塗装した模型杭の貫入試験において, 氷厚中心線上の塗料の摩耗及び剝離が激しい事実とよく一致している. また格子で補強された円筒杭の貫入試験においては, $\theta=0^\circ\text{C}$ のところの変形が大きいことから, 図-5 の σ_r の分布形も妥当性のある結果と判断される. また摩擦応力 σ_s は氷厚中心線より表層側では上方外向きであり, 中心線より下層側では下方外向きであり, 氷盤の破壊性状と良い一致を示している. 図-6 の下段の図は最大全氷力発生時の平

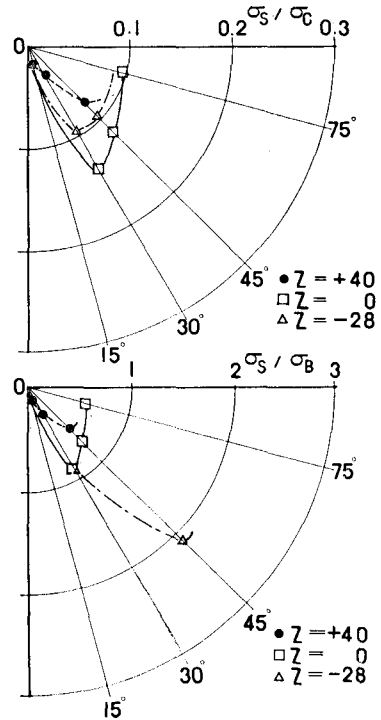


図-6 (b) 無次元摩擦応力の分布
($1.45 \times 10^{-3} \leq \dot{\epsilon} \leq 3.11 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$)

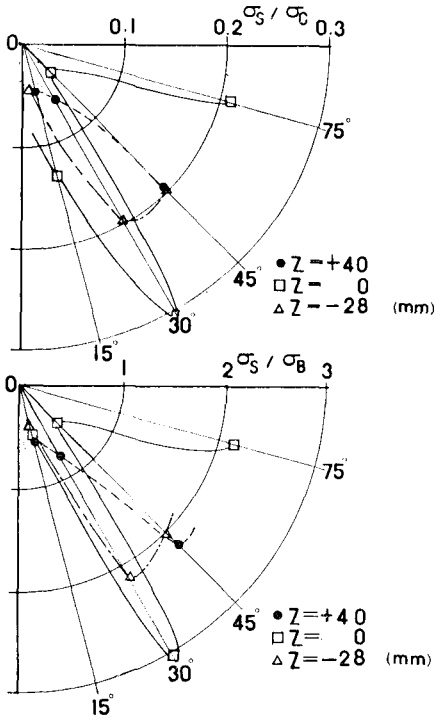


図-6 (a) 無次元摩擦応力の分布
($8.7 \times 10^{-5} \leq \dot{\epsilon} \leq 1.06 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$)

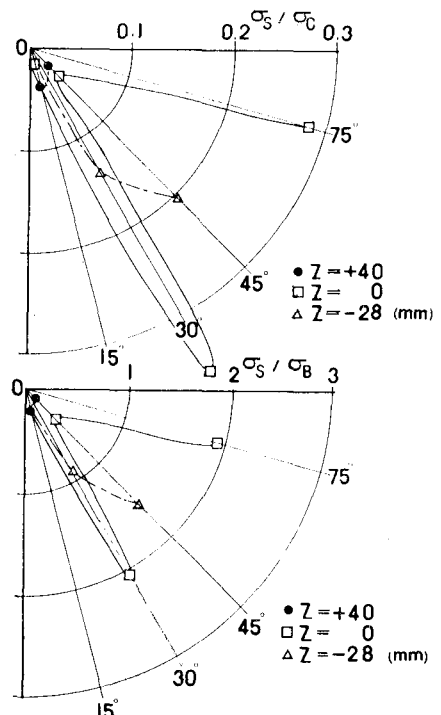


図-6 (c) 無次元摩擦応力の分布
($6.31 \times 10^{-3} \leq \dot{\epsilon} \leq 6.65 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$)

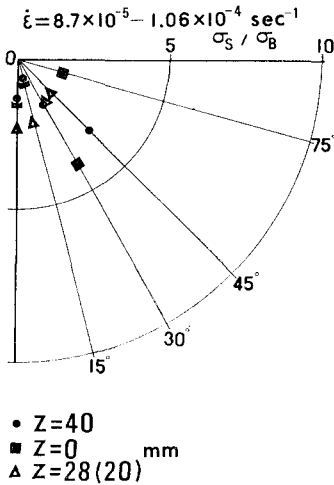


図-7 (a) 無次元摩擦応力分布

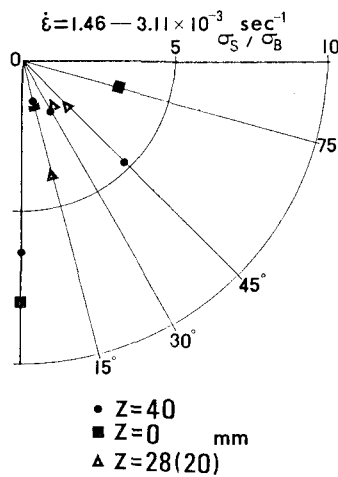


図-7 (b) 無次元摩擦応力分布

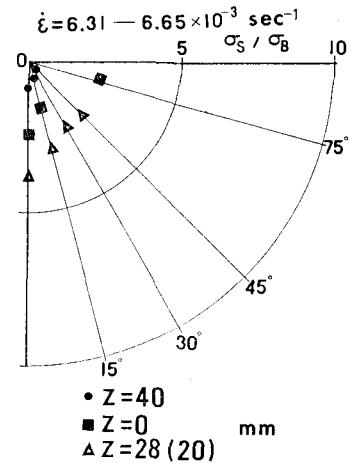
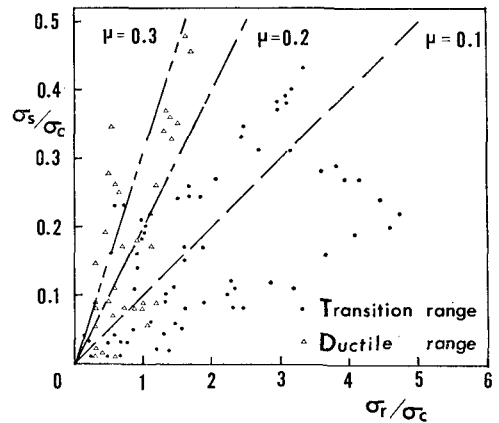


図-7 (c) 無次元摩擦応力分布

均氷圧力 $\sigma_B \frac{F}{Dh}$ で最大氷力発生時 ($t/t_B=1$) の摩擦応力を除して無次元化したものであるが、この傾向も、 σ_s/σ_c の分布形と同一である。 $\theta=30\sim 45^\circ$ で最大の摩擦応力となる。この摩擦応力の分布形状またはその絶対値は、同一の実験条件でも異った形状と大きさを示す。これは、海水そのものが等方等質でないためと考えられる。次に模型杭貫入時に示す各点の最大摩擦力を σ_B で無次元化した結果を示す。全体的にみて各測点の無次元最大摩擦力は氷厚の中心線に近い領域 ($z=0, 2.8\text{ cm}$) が大きく、表層に近いところで小さい摩擦力を示すことが明らかとなった。また、歪速度の小さい Ductile Region の図-7 (a) が、歪速度の大きい場合に比べて無次元最大摩擦力は小さくなることが明らかとなった。

(3) 3 形状分力測定結果の妥当性

円断面に作用する氷力の分布を測定する技術としては、模型杭表面板の撓みあるいは歪みを測定し、氷圧力の分布形状を仮定して妥当氷圧力分布を求める逆問題的取り扱いと、本実験のように直接三分力を測定する方法が考えられる。しかし、円筒状構造物表面では、その測定技術は非常に困難であった。ここでは、本実験の妥当性を確かめることにした。各時刻の各測定点における無次元摩擦係数 σ_s/σ_c と無次元法線方向氷力 σ_t/σ_c (無次元接触圧) の関係を示したものが図-8 である。(2) 式から明らかのように、この勾配が杭表面の摩擦係数となる。模型杭は一定速度で貫入しているため、海水と杭は常にある相対速度を有しているため、この摩擦係数は動摩擦係数を意味している。図

図-8 σ_s/σ_c と σ_t/σ_c の関係

中には、貫入に伴う歪速度 $\dot{\epsilon}$ が $\dot{\epsilon} \leq 1.06 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ の Ductile Region ($V \leq 0.023 \text{ cm/s}$) と $\dot{\epsilon} > 1.46 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の Transition Region ($V \leq 0.318 \text{ cm/s}$) に分けて図示してある。相対速度の遅い Transition Region の摩擦係数の方が、相対速度の速い Transition Region より大きい値を示している。また、Transition Region は $\mu = 0.1$ より大きい場合と小さい場合に分かれているが、

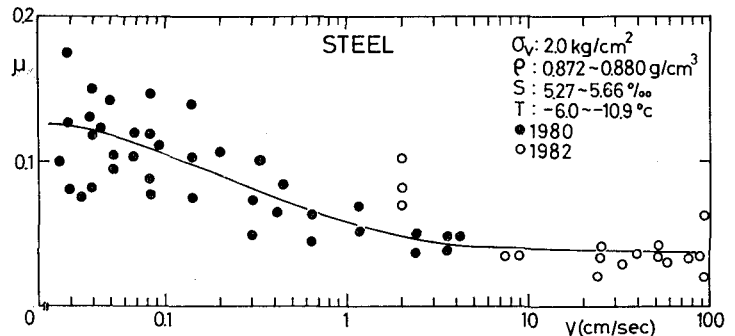


図-9 鋼材に対する相対速度と動摩擦係数の関係

摩擦係数の小さいデータは、相対速度が速い場合に相当している。さて、鋼材と海水間の摩擦係数に及ぼす最も大きな要因は、材料表面の粗さと海水の強度に強い相関を示す氷温、それに相対速度^{1),2),5)}である。本実験においては、氷温には大きな差がなく、杭表面の粗さは、時間の経過によって大きく変化しないものと考えられるので、図-8に示す大きな差は杭表面における氷と材料間の相対速度と考えることができる。図-9は著者の一人、佐伯が行った鋼板に対する動摩擦係数 μ と相対速度 V の関係を示した実験結果である。図からも明らかなように、動摩擦係数は相対速度が大きい程、小さい値を示すことが判る。この鋼板では、 $V=0.023\text{ cm/s}$ で $0.07 < \mu < 0.18$ 、 $V=0.318\text{ cm/s}$ で、 $0.04 < \mu < 0.11$ である。図-8と図-9を較べてみると、Transition Regionでは、よく一致しているが、Ductile Regionでは、 (σ_r/σ_c) の大きい領域で、図-9で示す動摩擦係数より大きめの値を示しているが、杭表面が曲面であるため、未だ表面粗さが測定されていないので速断はできないが、全体としては妥当な摩擦係数を示していると云える。これらより、本研究で採用した円筒杭表面に作用する氷力の三分力測定法の精度は信頼できるものと考えられる。

4. 結 語

- 1) 円断面直立構造物に作用する半径方向(法線方向)氷力 σ_r は氷盤接触面の中心部で最大値を示す傾向がある。また、氷盤の表・下層と $\theta \leq 75^\circ$ の範囲では、 σ_r は小さい値を示す。また $\theta=45^\circ$ の表層は非常に大きい。
- 2) σ_r の分布の貫入にともなう変形は、Indentation Testの場合、パターン化はできなかった。これは、海水の結晶性と非等質性であるためと思われる。また最大氷圧力は、一軸圧縮強度の約4~6倍となっているが、これは一軸圧縮強度の平均値を用いたためと思われる。

強度の分散は平均値の35%程度であることを考えると妥当な値となる。

3) 杭面に作用する摩擦応力は $\theta=30\sim 45^\circ$ で最大の値を示し、氷厚の中心線上が大きい値を示す。これは現実の構造物表面の摩耗の状況と良い一致を示す。

4) 最大の摩擦応力は、歪速度によって異なるが、Transition Regionで一軸圧縮強度の30~35%程度になることがある。

5) 最大氷力時の平均氷圧力の5倍程度が最大の摩擦応力となる。

6) 実測から得られる動摩擦係数 $\mu=\sigma_s/\sigma_r$ は、摩擦係数試験から得られる動摩擦係数と比較的良好一致を示す。このことは、本実験における模型杭表面に作用する三分力の測定が妥当であることを示している。

あとがき

本研究は文部省科学研究費補助金(試験研究1)によった事を付記する。

参 考 文 献

- 1) 佐伯 浩・浅井有一郎・泉 洌・竹内貴弘: 海水によるコンクリートの摩耗に関する研究, 第10回海洋開発シンポジウム論文集, pp. 68~73, 1985.
- 2) 浅井有一郎・今野 潔・梶谷哲彦・竹内貴弘・佐伯 浩: 海水による各種コンクリートの摩耗に関する研究, 海洋開発論文集, No. 2, pp. 85~90, 1987.
- 3) 伊藤喜栄・吉田 明・佐々木広輝・泉 洌・伯佐 浩: 海水による各種コンクリートの摩耗特性, 海洋開発論文集, No. 3, pp. 155~160, 1987.
- 4) 佐伯 浩・田中祐人・佐々木広輝・小野敏行・山下俊彦: 円断面直立海洋構造物に作用する氷力に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 566~570, 1987.
- 5) Saeki, H., Ono, T., Nakazawa, N., Sakai, M. and S. Tanaka: The coefficient of friction between sea ice and various materials used in offshore structures, Jour. of Energy Resources Tech., ASME, Vol. 108, pp. 65~71, 1986.