

II—4 海水と土木材料間の摩擦係数に関する研究

北大工学部(正) 佐伯 浩
北見市役所(正) 小野寺輝利
五洋建設(正) 立田 実
北大工学部 小野 敏行

○パシフィックコンサルタンツ(正) 中澤直樹

§1 緒論

近年、極寒冷地における地下資源の開発及び工業化の過程において、海水圧を受ける海岸・海洋に港湾及び石油掘削用プラットフォーム等の土木構造物を建設することが多くなった。また、この様な地域では海水によるLand sliding(図-1, 2)杭に作用する氷圧力、その他砕氷船の摩擦抵抗等、海水の圧力が大きな問題となる。海水に対しては圧縮強度に比べて非常に弱い曲げ強度により、それを破壊することが有効な手段とされており、その構造形式として傾斜型(corn型)構造物が考えられている(図-3)。その場合、海水と接触する土木材料間の摩擦が大きな要素となる。本研究はこの問題を土木構造物材料としてよく用いられるコンクリート及び鋼について、海水との間の摩擦係数及び海水の摩擦機構を調べたものである。

§2 実験装置

試験機の製作上の留意点は、次の4つである。

1. 摩擦試験片を交換できる。
2. 鉛直荷重を増減できる。
3. 海水供試体の寸法を変える事ができる。
4. 移動速度を変える事ができる。

対象とする摩擦試験片の上に海水供試体を載せ、それに鋼製Capをかぶせて、そのCapを油圧ジャッキが押す。ジャッキに取り付けてあるロードセルにより横押し荷重が計測される。Capには載荷装置が取り付けられてあり、最大2 Tbnまで載荷可能である。また、油圧ポンプの油量を制御する事により移動速度を変化させる事ができる。図-4に実験装置を示す。

§3 摩擦試験片

本研究に用いられた試験片は、海岸・海洋構造物材料という面から次の材料を選んだ。

1. Carbon steel rough
表面処理をしていない鋼板
2. Carbon steel pointed
ビニール系のマリン塗料を塗った鋼板
3. Steel stained
塩水でサビさせた鋼板

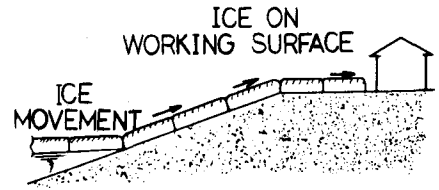


図-1

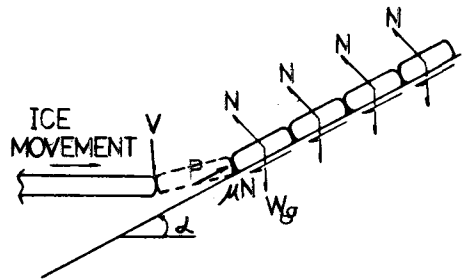


図-2



圧縮破壊

曲げ破壊

図-3

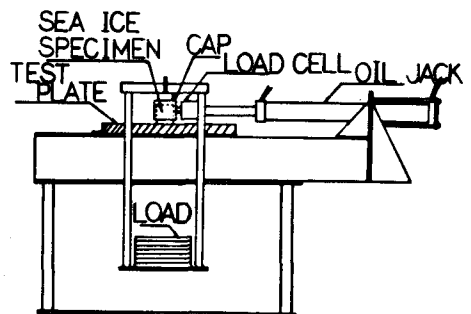


図-4

4. Concrete

表面をコテでならしたコンクリート板

5. 鉄工用ヤスリ

市販の鉄工用ヤスリを何本か継ぎ合わせたもの。

細目, 中目, 荒目の3種類

§ 4 海水供試体及びその形状

実験に用いた海水はサロマ湖の水である。供試体は整形に便利であること及び一連の操作中破損が少ない等の点より円形供試体を採用した。供試体はコアドリルにより円筒形に整形された。又, 供試体の径は, $\phi = 4.5\text{cm}$, 10.0cm , 15.0cm の3種類とした。

§ 5 海水供試体直径の効果

1979年及び1980年における実験結果を図-5, 図-6に示した。 μ_k については両者とも $\phi/Dgr \geq 8$ において一定値を示している。北大低温研田畑等の実験によると, 接触面積が摩擦係数に影響を及ぼすとの結果が出されているのであるが, 本実験において接触面積が9倍の変化をしているにもかかわらず, ほぼ一定の値を示していることより, 接触面積と摩擦係数は無関係であると見なして差しつかえないと思われる。オホーツク海の平均grain sizeはほぼ $10 \sim 12\text{mm}$ であることより, 供試体の径は, その約10倍である, $\phi = 10\text{cm}$ として以後の実験を行った。

§ 6 摩擦係数と鉛直応力の関係

供試体に鉛直荷重 P をかけ, $\text{stress } \sigma = \frac{4P}{\pi \phi^2}$ と摩擦係数の関係を示したものが図-7, 図-8, 9である。供試体は $\phi = 10\text{cm}$ である。

図-7は1979年, 図-8, 9は1981年の実験によるデータである。動摩擦係数 μ_k については, 図より明らかなように σ_v に無関係に一定値を示す。これより圧力融解の影響はほとんどないとみなすことができる。静止摩擦係数 μ_s については $\sigma > 5\text{kg/cm}^2$ の範囲では一定値を示す。荷重をかけることにより海水の凹凸部が破壊され, その破壊片が凹部をうめ接触面を平らにするため荷重の増加と共に μ_s が小さくなる。しかし, ひとたび塑性流動が始まると圧力増加はゆるやかになり μ_s は一定値に近づくものと思われる。

§ 7 摩擦係数と移動速度の関係

移動速度の影響について, マリン塗料を塗った鋼板 (carbon steel painted) 図-10, concrete 図-11 中目のヤスリ図-12の3種を示した。動摩擦係数については図が示す様に速度 V の増加と共に程度の差はあるものの減少傾向を示している。これは移動速度が増大すると摩擦熱により水膜が形成され, 潤滑作用をするものと考えられる。

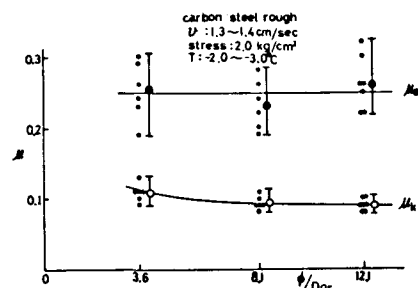


図-5

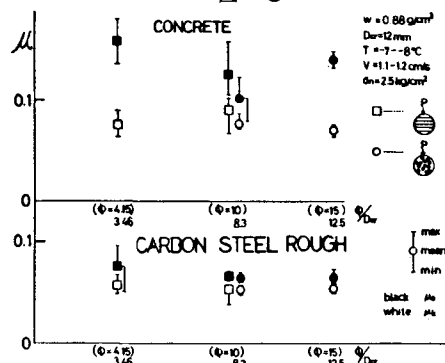


図-6

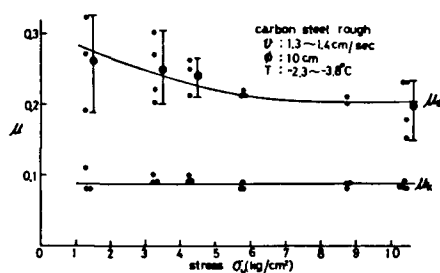


図-7

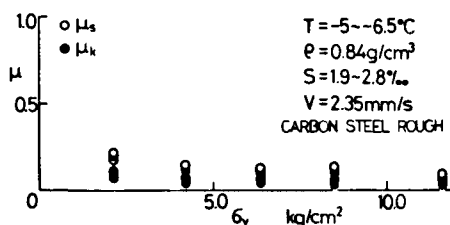


図-8

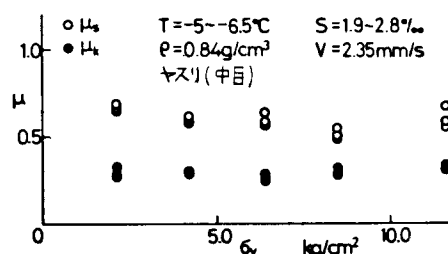


図-9

図-13は、海水に侵したままの鋼板を用いて行つた実験である。動摩擦係数 μ_k は、移動速度の増加にかかわらず微増傾向を示しており、これは、試験片と海水供試体との間に常に水膜が存在しているため、摩擦熱による氷の融解の影響が表われないためと考えられる。図-14に北大低温研田畑等による超低速度での摩擦実験結果を示した。これによると、この様な低速では摩擦熱による水膜の形成がほとんどないため μ_k は速度の減少と共に急激に増加していることがわかる。静止摩擦係数 μ_s については、図-10では速度の増加と共に μ_s も増加傾向を示すが、図-11、図-13ではpeakを有している。これは、静止時に試験片の凹凸に海水がくいまみ、始動時において海水がせん断される影響が表われるものと考えられる。本実験と同時に行なわれたせん断強度試験において、ひずみ速度の変化に対し、せん断強度にpeakが表われているという結果と同じであろう。以上の結果より、動摩擦係数 μ_k については水膜が形成される速度以上であれば μ_k は一定値に近づき、又、静止摩擦係数 μ_s についてはpeakを有する傾向はあるものの速度の変化による影響はほとんど無いとみなして差しつかえない。

§8 海水の成長方向と供試体のとり方による影響

図-15に海水成長方向に対する供試体の採取方向を示した。供試体は鉛直に抜いたものと、水平に抜いたものである。水平に抜いた供試体ではさらに成長方向に垂直と平行の二方向より横押し荷重を加えた。図-16からわかるように動摩擦係数については鋼板及びコンクリートにおいて最大と最小の比が1.2近傍であるためほとんど一定と見なして差しつかえない。又、静止摩擦係数については鋼板ではバラツキが認められるが、コンクリートにおいて増加傾向を示している。これは、せん断試験における結果と一致しており、§7と同様に静止摩擦とせん断強度の強い相関性が表われている。

§9 摩擦係数と水温、材質及び表面粗さの効果

コンクリート、鋼板 (carbon steel rough)、錆びた鋼板 (steel stained)、塗装した鋼板 (carbon steel painted) について水温と摩擦係数の効果を調べた。移動速度は $V > 1.0 \text{ cm/sec}$ であり、前述の様に摩擦熱により氷膜が形成される速度である。図-17, 18, 19は1979年度、又、図-20, 21, 22は1980年度の結果である。動摩擦係数 μ_k についてはコンクリート及び、錆びた鋼の場合は、水温に関係なく一定値を示しているが、普通の鋼と塗装した鋼においては、水温の低下とともに μ_k が上昇する傾向を示している。これは、試験片として用いた材料の熱伝導率に関係しているものと思われる。熱伝導率の大きい程摩擦熱を急速に失ひ、水膜

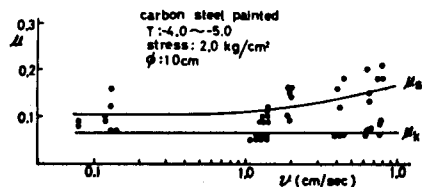


図-10

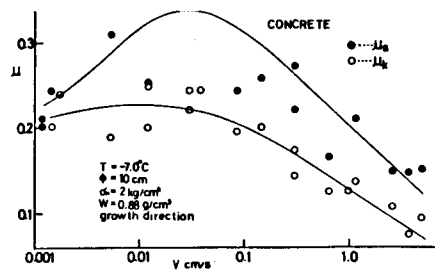


図-11

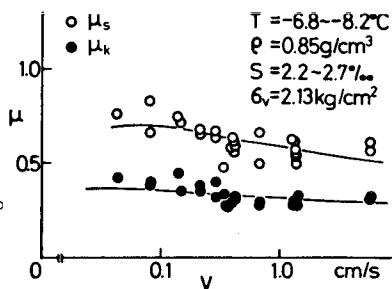


図-12

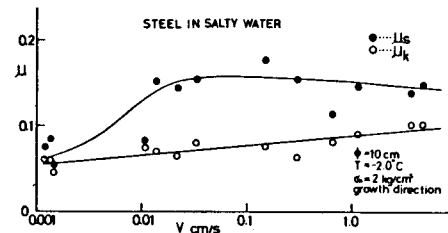


図-13

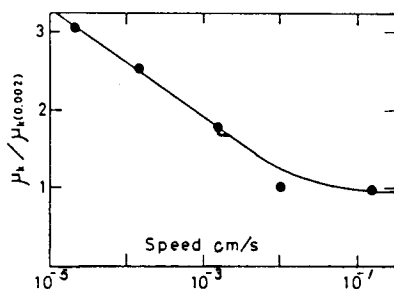


図-14

を形成しにくい状態となる。つまり、氷温が低い程失う摩擦熱が大きいので、氷温が下ることにより、動摩擦係数は大きくなる傾向を示すと考えられる。鋼の熱伝導率は $0.76 \text{ J cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ K}$ であり、コンクリートは $0.01 \text{ J cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ K}$ である。従つて、鋼の方がコンクリートより氷温の影響を大きく受けると考えられる。静止摩擦係数 μ_s については、動摩擦係数 μ_k と同様に、氷温の低下とともに増大する傾向にある。これは、氷のせん断強度に大きく関係している。試験片の凹凸部にめり込んだ氷は、始動時において、せん断破壊されるが、氷のせん断強度は、氷温の低下とともに増大するため、 μ_s も上昇すると考えられる。

μ_k についてはマクロ的に見た場合ほとんど一定値を示すと考えてさしつかえないと思われる。図-17～図-22より動摩擦係数及び静止摩擦係数共試験片材料の表面の粗さに大きく依存していることが明らかになった。ここで、1979年と1980年の実験値を比較してみると、静止摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k とも塗装した鋼板 (carbon steel painted) を除いて同材料において係数に大きな違いが現われている。例えばコンクリートにおいては1979年の μ_k が0.22前後の値をとるのに対し、1980年のそれは0.08となつてゐる。1979年度の実験に用いたコンクリート板の砂の粒径は1.0mmであり、1980年度の砂の粒径は0.3mmであつた。従つて、同じコンクリート板であつても表面は1979年のコンクリート板が非常に粗いものであつた。同様に、錆びた鋼板及び表面処理をしていない鋼板においても表面の粗さに若干の違いが有つたものと思われる。すなわち、同じ材料であつても、その成分及び表面処理の違いが摩擦係数に大きな影響を与えることが明らかとなつた。

§10 表面粗さの効果

§9に示された様に、摩擦は海水と接触する面の粗さに大きく依存していることがわかつたが、ここでは、さらに摩擦係数の法則制を見出すために摩擦係数が大きいと予想される鉄工ヤスリを用いた実験結果を示す。図-23に細目の鉄工ヤスリによる結果を示した。又、図-24, 25は細目, 中目, 荒目による結果をまとめて表わしたものである。図からわかる様に、非常に大きな摩擦係数を示すが、3者共粗さによる差はほとんど見られない。これは図-26に示す様にヤスリの凹凸の角度に関係しているものと思われる。細目, 中目, 荒目の順に溝の深さと間隔は大きくなつてゐるが、凹凸の角度は3者共 $h/b=1/2$ となつてゐる。すなわち、海水とヤスリは接触角が皆同じということになる。従つて、ある程度粗い面においては、海水と接触材料との接触角度が大きく影響してくるものと考えられる。

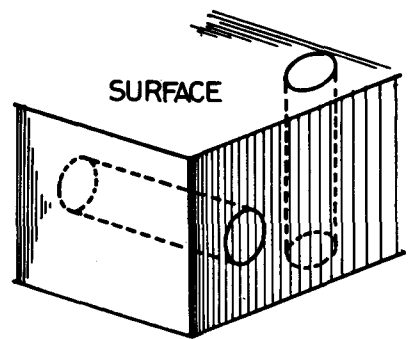


図-15

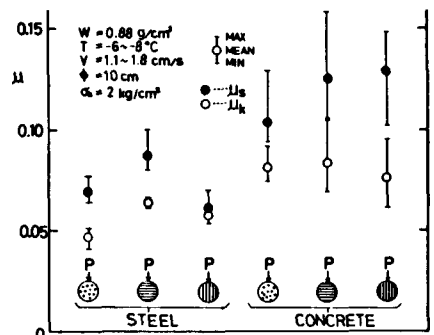


図-16

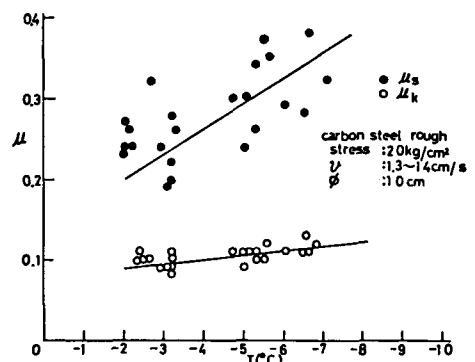


図-17

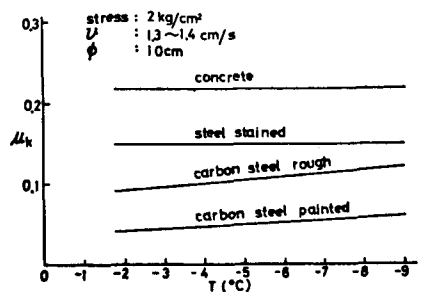


図-18

§ 11 動摩擦係数と静止摩擦係数

図-27, 28に鋼板及び鉄工ヤスリ(細目)による μ_s/μ_k の値を示した。図より constant に $\mu_s/\mu_k \approx 2$ という値を示している。また、図-18, 19及び図-21, 22においても $\mu_s/\mu_k \approx 2$ 近傍の値を示していることがわかる。

§ 12 海水の摩擦機構

以上の実験より摩擦が単なる表面効果とはみなせないことがわかる。ここでは、一般の物体間の摩擦に関する Amontons の法則(摩擦力は物体の見かけのすべり面積に関係なく、荷重に正比例する)について述べてみる。すべりの間に、分子の寸法に比べてはるかに大きな結合が形成されたり、せん断されていることは明らかである。海水と鋼及びコンクリートの様に一方の表面が相手の表面よりやわらかければ、かたい表面の凹凸はやわらかい海水の表面をかなりの深さまで掘りおこすようになる。いま、鉛直荷重を W とすると、接触面積がその荷重をささえるに十分となるまで表面の凹凸は海水中に食い込む。

すると、いま A を真実接触面積、 P を海水の降伏圧力とすると

$$A = W / P \quad \cdots \cdots (1)$$

を得る。いま S を結合部のせん断に要する平均接線応力とすれば、結合部全体をせん断するための全体の力は $A \cdot S$ で与えられ、摩擦力は

$$F = A \cdot S \quad \cdots \cdots (2)$$

で与えられる。真実接触面積 A は W 及び P のみによつて決まるもので、見かけの面積にはよらない。従つて、 F は面の見かけの面積には関係しない。これが Amontons の第1法則であるがこの法則が海水においても成立することは § 5 において証明されている。次に、(1)式を(2)式に代入すると

$$F = W \cdot S / P$$

を得る。この式より、摩擦力は荷重に正比例し、従つて摩擦係数は事実上荷重には関係しない。これが第2法則である。§ 6 及び図-29においては、グラフを直線とみなし、それらを $\tau_f = \mu_k \cdot \sigma_v$ と表わすことが出来ることから、Amontons の第2法則も成立していることが証明された。

§ 13 まとめ

(1) 試験方法

- イ) 摩擦試験片……同材質・材料について、表面処理及び表面仕上げの種類を増すと共に、表面粗度の程度の計測表示が必要である。
- ロ) 海水供試体形状……整形のし易さ及び取り扱いの便利さ等から円筒形供試体が良いと思われる。
- ハ) 海水供試体直径…… grain size の 8~10 倍程度、一般的に $\phi = 10 \text{ cm}$ が望ましい。

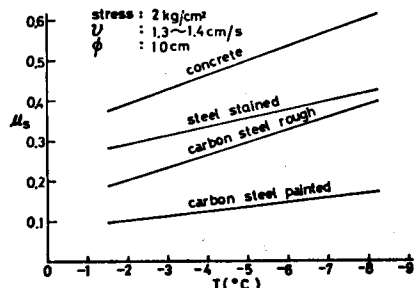


図-19

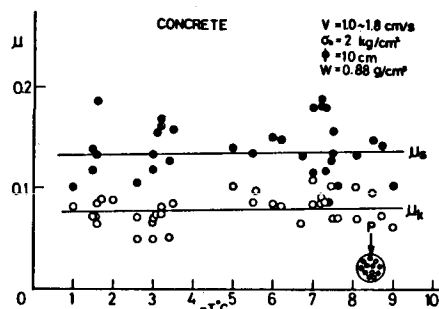


図-20

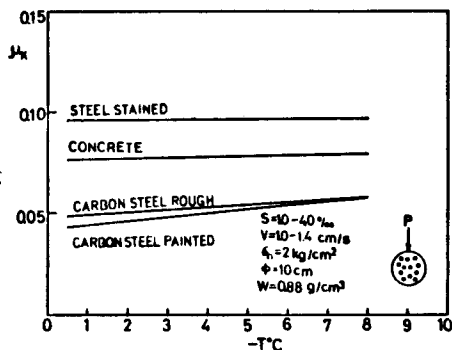


図-21

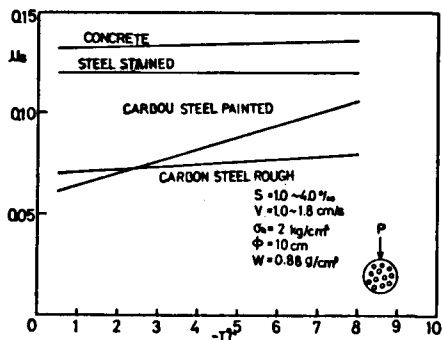


図-22

ニ) 鉛直荷重……圧力融解の影響がほとんどないこと。

Amontons の第 2 法則が成立すること及び実験の容易さ等より $\sigma v = 2\%$ 前後が適当と思われる。

ホ) 移動速度……摩擦熱により水膜が形成される領域である, 1.0 cm/sec 以上, 一般的には $1.0 \sim 2.0 \text{ cm/sec}$ がよい。

ヘ) 海水供試体の採取方向……構造物に作用する摩擦力の方向より成長方向に平行に抜くのが望ましい。

(2) 試験結果

静止摩擦係数 μ_s , 動摩擦係数 μ_k 共に接触面の粗さの程度・形状及び海水のせん断に大きく依存している。又, Amontons の法則が海水においても成立していることが証明された。

参考文献

佐伯・小野・中澤「海水の摩擦係数に関する研究」

第 3 4 回年次講演会

佐伯・尾崎・山田「海水と土木材料間の摩擦係数について」

第 3 5 回年次講演会

対馬・青田・田畑「海水の摩擦」

パウデン・テイパー「固体の摩擦と潤滑」曾田範宗訳

Tabata, Tsushima「Friction measurements of sea ice on flat plates of metals, plastics and coatings」

POAC '79

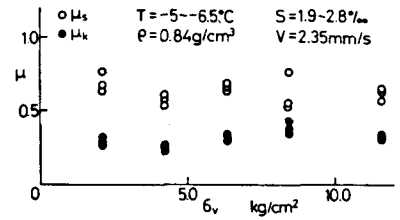


図-23

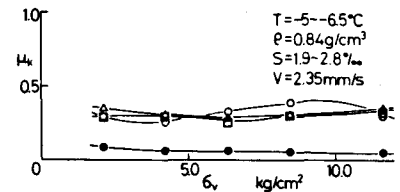


図-24

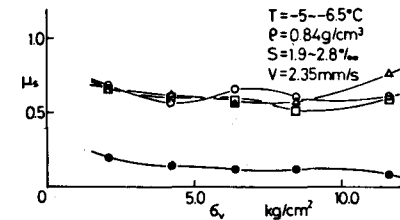


図-25

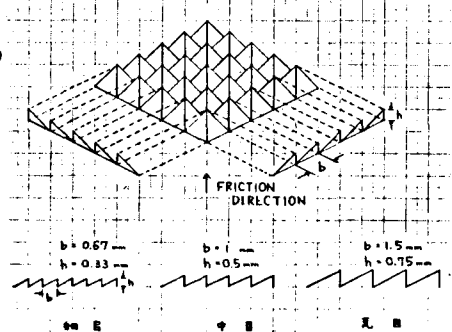


図-26

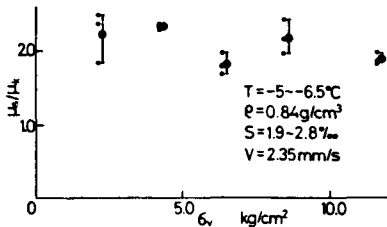


図-27

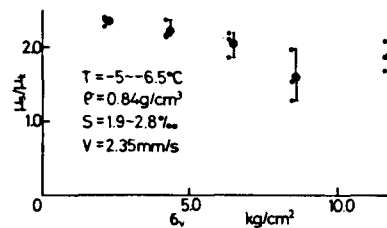


図-28

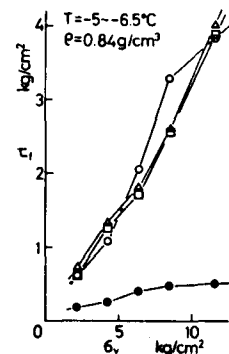


図-29