

II—5 海水のせん断強度に関する研究

北大工 (正)	佐伯 浩
○五洋建設 (正)	立田 実
パシフィックコンサルタンツ (正)	中澤 直樹
北大工	小野 敏行
北大工 (正)	浜中 建一郎
北大工 (正)	尾崎 晃

§1 緒 論

海水の耐荷力を考える上で、せん断強度は欠くことの出来ない重要な要素である。土やコンクリート等の材料では各種強度試験が確立されており、その決められた試験方法でせん断試験も行なわれている。海水については未だ決められた試験方法が確立されていないのが現状である。

本研究は海水用のせん断試験機を製作し、海水の直接せん断試験法の確立及びせん断強度を求めようとするものである。

§2 実験方法

1) コンクリートの直接せん断試験方法

コンクリートのせん断試験方法には図-1の様な直接せん断試験方法が用いられて来た。これは最大荷重 P を測り、せん断応力が横断面 A に一様に分布するものと仮定して次式より求める。

$$\tau = P / A$$

しかし、この方法は図にも示したように曲げや斜めの圧縮の影響が入り、完全な試験方法とは言えない。コンクリートの直接せん断強度は圧縮強度の $1/4 \sim 1/6$ で、引張強度の $2.3 \sim 2.5$ 倍である。断面の高さ、あるいは幅が大きくなるか、またはスパン l が大きくなるとせん断強度は小さくなる。

2) 土の直接せん断試験方法

土の直接せん断試験は土の供試体のある定まった面でせん断し、その面上のせん断応力とせん断強さを直接調べる試験である。その主な目的は、予定されたせん断面上の鉛直応力 σ とせん断強さ τ との関係から、安定計算に必要な強度定数 C, ϕ を求めることである。

一面せん断試験は直接せん断試験の一種でせん断面が一つであり、その一方の側 (上手部又は下手部) を他方に対してせん断面にそつて直接的に動かしてせん断するものである。図-2に土のせん断試験の種類を示した。

土の一面せん断試験機の主要部分は次の4つである。(図-3)

- 供試体を入れるせん断箱
- 鉛直応力を加える (あるいは鉛直変位をコントロールする) 装置

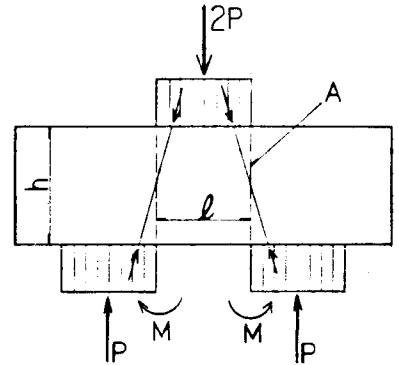
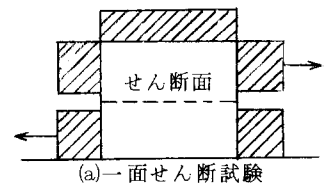
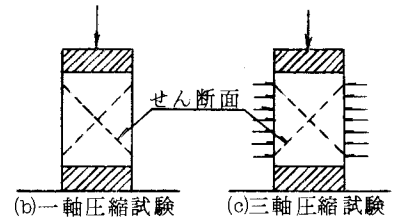


図-1



(a) 一面せん断試験



(b) 一軸圧縮試験

(c) 三軸圧縮試験

図-2

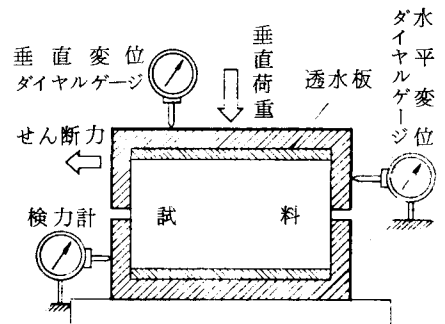


図-3

○せん断力を加える（あるいはせん断変位を与える）装置

○各種の測定装置（力計、ダイヤルゲージ）

上下に分かれたせん断箱に試料を入れ、一定の鉛直応力のもとで、上箱又は下箱にせん断力を加える。そのとき試料に生ずるせん断抵抗を、検力計で測定できるようになっている。供試体は直径 60mm，厚さ 20mm の円板形のを標準とする。鉛直荷重は、試料が現場で受ける応力の範囲を含んで、4段階以上に変えて試験する。また、せん断速度は間ゲキ水圧を考慮しない場合は 1mm/min 以上で、間ゲキ水圧を考慮する場合は 0.05mm/min

で行うのが標準である。せん断中のせん断力、水平変位及び鉛直変位測定用ダイヤルゲージの読みとりは、連続した応力—変位曲線が描けるような間隔で行なう。せん断は、せん断変位がピークを越えたのち一定値に落ちつくか、あるいは、せん断変位がピークに達するまで続けられる。これらの試験結果をそれぞれの鉛直応力について水平変位—せん断応力曲線、および水平変位—鉛直変位曲線にまとめる。せん断応力にピークのある場合は、そのときの τ の値を、その鉛直応力に対するせん断強さ τ_s とする。また図—4 のように、横軸に鉛直応力、縦軸にせん断強さをとり、各段階の鉛直応力とせん断強さの直線関係から、土の内部摩擦 ϕ と粘着力 c を求める。

ここで、鉛直応力 σ_v 、およびせん断応力 τ_s は、次式で求まる。

$$\sigma_v = P / A, \quad \tau_s = S / A$$

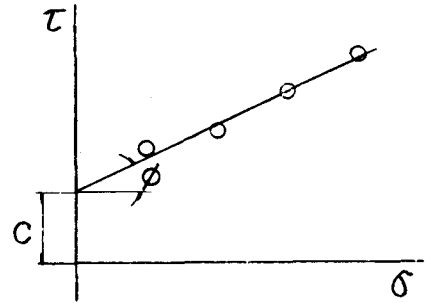
P：鉛直荷重 (kg)

A：供試体断面積 (cm²)

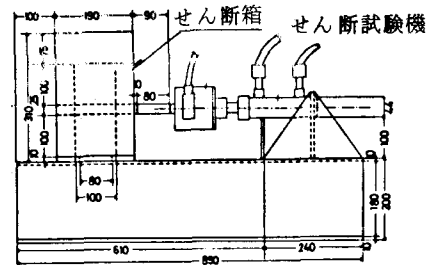
S：せん断力 (kg)

3) 水のせん断試験機

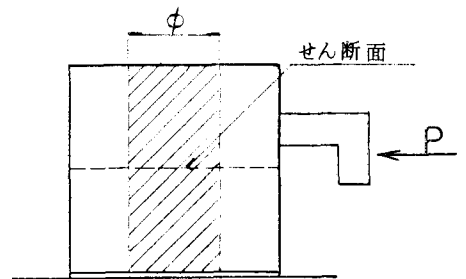
水の直接せん断試験機には一面せん断試験機と二面せん断試験機が採用された。図—5 に試験機を示した。これらの原理は一面せん断試験機図—6 においては図—3 に示した土の一面せん断試験機とほとんど同じである。二面せん断試験機図—7 は、三層に別れている層のうち上下層を固定し、中央層に水平荷重を加えることにより上下面 2 面でせん断しようとするものである。両者共鉛直荷重をかけることが出来るように設計された。さらに二面せん断試験機は中央のせん断厚 l' を $l'=2.5, 5.0, 10.0\text{cm}$ に変化させ、せん断強度 τ_s に与えるせん断厚 l' の影響を測定できるものである。両試験機の主要部分は土のせん断試験機に同じである。加圧部にオイルジャッキを用い、ロードセルを介して水平荷重 P の値を記録計に送る。また、ダイヤルゲージをセットして、変化も同時に測定できる。供試体のせん断は、steel 製のせん断箱内で行われる。鉛直荷重は、供試体にかぶせたキャップを通して供試体に伝えられ、その大きさは自由に



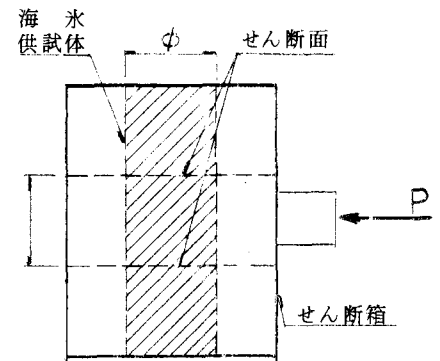
図—4



図—5



図—6



図—7

変える事ができる。

4) 海水供試体形状

供試体形状は本来、長方形や正方形でもさしつかえないのであるが、整形し易いという点や供試体の作成から試験機へのセットに至る一連の操作中、供試体の破損の心配がより少ないという点等から円形供試体が採用されており、これは土のせん断試験においても同様である。直接せん断試験の場合、一般に注意すべきことは、供試体とせん断装置との間に隙間があると、供試体に曲げ応力が働き曲げによる破壊を起こし、せん断応力度を小さく見積ることがあるが、電動コアドリルによつて整形された円筒形供試体はほぼ一定の直径をもっていることが確認されている。

また、佐伯(1978)は海水の一面せん断試験を行ない、その結果として、供試体の径は実用上 10 cm 程度が適当である事、供試体の高さ(l)も $(l/\phi) < 2$ が望ましい事を示しているので、それらの結果を前提として以後の実験を行った。

5) 二面せん断試験におけるせん断厚(l)

二面せん断強度 τ_s に関するせん断厚効果を図-8に示した。供試体の長さは $l=2.5\sim 30\text{cm}$ せん断厚は $l=2.5\ 5.0\ 10.0\text{cm}$ である。図からも明らかな様に、 $l/\phi \geq 0.5$ の範囲では l/ϕ に関係なく τ_s の値はほぼ一定値を示すのに対して、 $l/\phi < 0.5$ の範囲では l/ϕ が小さくなるにつれて τ_s は小さい値を示している。

$l \geq 5\text{cm}$ すなわち、 $l/\phi \geq 0.5$ の範囲では図-9に示すように両面がきれいにせん断されているのに対し $l=2.5\text{cm}$ 、 $l/\phi=0.25$ の場合には中間層はほとんど圧壊の状態であつた。これはせん断と同時に圧縮の影響も強く出ているためと思われる。以上の結果より、二面せん断試験においては $l/\phi \geq 0.5$ 以上が適当であると思われる。Grain size (氷の結晶の集まりの面積を求め、それを円の面積と考えた時の直径 D_{gr}) との関係から $l=10.0\text{cm}$ が採用された。

図-10に一面せん断試験におけるせん断後の海水供試体を示した。

§3 一面せん断強度に対する荷重速度の影響

図-11 から図-13に一面せん断強度に対する荷重速度の影響を示した。図-11は鉛直応力 $\sigma_v=0$ とした時の結果であり、図-12は $\sigma_v=2.14\%$ 氷温 $T=-2\sim -3^\circ\text{C}$ 、図-13は $\sigma_v=2.14\%$ $T=-3.2\sim -4.2^\circ\text{C}$ における結果である。

図-12, 13において $\dot{\tau}_s=1.0\%$ sec近傍でピークを有しているが、実験値の分散から考えて両者共 $0.01 < \dot{\tau}_s < 50\%$ secの範囲では τ_s は $\dot{\tau}_s$ の変化にかかわらず一定値を示すと考えてさしつかえない。

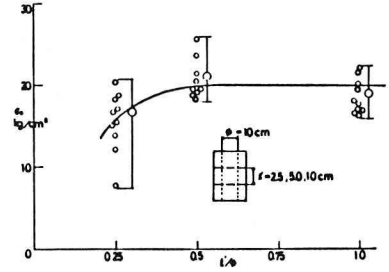


図-8

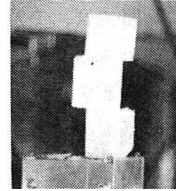


図-9

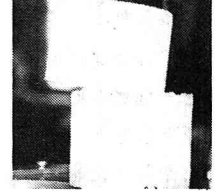


図-10

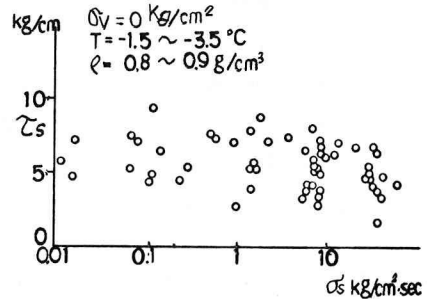


図-11

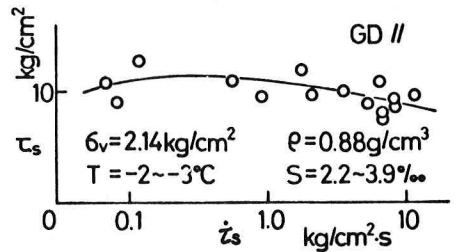


図-12

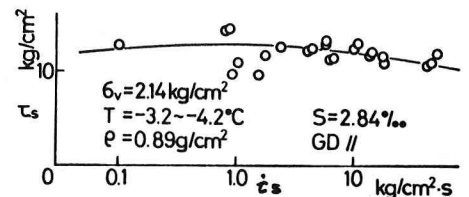


図-13

§ 4 一面せん断強度に対する歪速度の影響

図-14に水温 $T=-2\sim-3^{\circ}\text{C}$ 図-15に $T=-3.2\sim-4.2^{\circ}\text{C}$ の結果を示した。それぞれ一定範囲において最大値をとる傾向があるが、マクロ的に見た場合、歪速度の影響はほとんどないと考えてよい。従つて、§3の結果と合わせ、一面せん断強度に対する荷重速度及び歪速度は無関係と考えられる。

§ 5 水温 T と一面、二面せん断強度 τ_s の関係

海水の強度には水温及び純氷率が非常に強い影響力を有しているが、これは水温と海水の密度 (P) 及び塩分量 (S) におきかえられる。本実験の範囲では、 P 及び S がほぼ一定値であるので強度は近似的に水温のみの関数となる。図-16に水温 T と一面せん断強度 τ_s 、図-17に T と二面せん断強度 τ_c の関係を示した。一面せん断強度においては全般的に、又、二面せん断強度においては $T<-3^{\circ}\text{C}$ 以下において水温の低下に伴い τ_s はほぼ直線的に増加していることがわかる。これは Butkovich の結果と一致しており、圧縮強度においても成立していることが示されている。

§ 6 一面せん断強度と二面せん断強度の比較

$\dot{\epsilon}_s = 1.0 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $\phi = 10\text{cm}$ で、一面せん断の場合 $l = 20\text{cm}$ 二面せん断の場合 $l = 30\text{cm}$ で同一の海水を用いて両試験方法の比較を行なつた。その結果を図-18に示す。せん断厚はともに 10cm である。一面せん断強度は二面せん断強度に較べて約 36% 程小さい値を示す。これは図-19に示すようにせん断の時、曲げや圧縮が同時に作用するためであるが、供試体の上下両方で供試体を拘束する二面せん断の方が一面せん断に較べて、それらの影響が小さいためと思われる。

§ 7 一面せん断強度 τ_s と一軸圧縮強度 σ_c の関係

コンクリートの強度に対しては古くから非常に多くの研究成果の積み重ねがあり、各強度間の関係も調べられている。そのため一軸圧縮強度を調べれば、他の強度のおおよその値は得られる。図-20は海水の一面せん断強度 τ_s と一軸圧縮強度 σ_c の関係を調べたものである。 τ_s/σ_c の値は水温 $T=-20\sim-8^{\circ}\text{C}$ の範囲において一定値 $\tau_s/\sigma_c = 0.213$ の値を示している。

水の圧縮強度 σ_c は水温の低下とともにほぼ直線的に増加することから σ_c の増加にかかわらず τ_s/σ_c は一定値 0.213 を示すと考えてさしつかえない。コンクリートの場合、Graf の実験によると図-21に示すように σ_c に関係なくほぼ一定の値 $\tau_s/\sigma_c = 0.23$ である。従つて海水の場合の 0.213 に非常に近い値を示していることがわかる。

§ 8 一面せん断強度と海水成長軸に対する荷重方向の関係

海水の成長方向に対する供試体の採取方向を図-22に示した。図-23はせん断強度に対する成長方向及び荷重方向の影

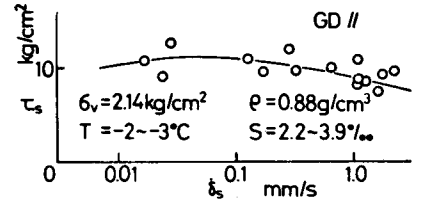


図-14

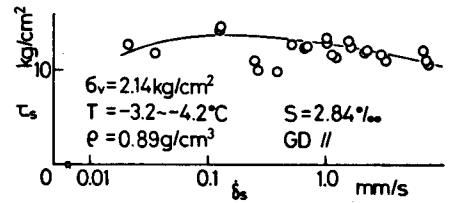


図-15

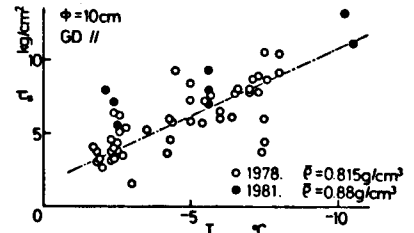


図-16

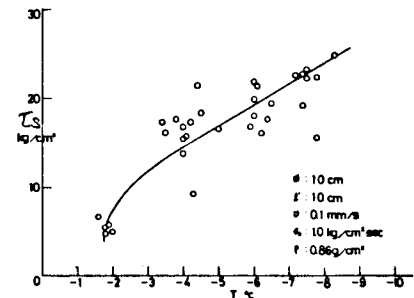


図-17

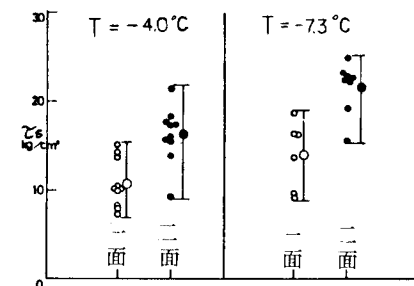


図-18

響を示した図である。図、左から

- a 水平に抜いた供試体に、成長方向に直角に荷重をかけたもの。
- b 水平に抜いた供試体に、成長方向に 45° の角度で荷重をかけたもの。
- c 水平に抜いた供試体に、成長方向に平行に荷重をかけたもの。
- d 鉛直に抜いた供試体

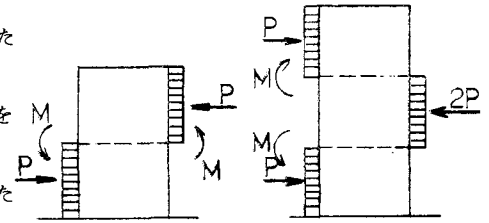


図-19

水平に抜いた供試体では、直角に荷重をかけるよりも、平行に荷重をかける方が、大きな値を示している。図-24に示した様に成長方向に直角に荷重をかけた場合(a)は、せん断は供試体の両端のみで行なわれ、それ以外の場所では氷の結晶同士の付着が断たれ剥離状態となつている。成長方向に平行に荷重をかけた場合(b)は供試体の周辺部において結晶のせん断が行なわれ、結晶同士の剥離は中心部で生じている。黒塗り部が結晶がせん断された部分であり、白い部分は結晶同士の剥離が生じた部分である。結果として、結晶のせん断面積(黒塗り部)が大きい程、せん断強度が大きい値となつている。(c)は成長方向に 45° の角度で荷重をかけた場合であり、強度としても中間の値を示している。

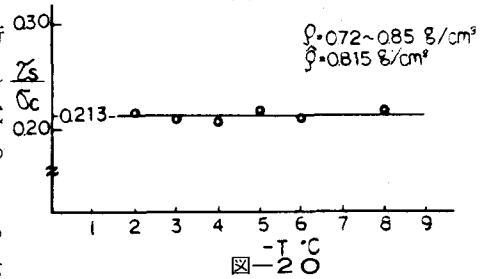


図-20

§9 一面せん断強度と鉛直応力

1) 土のせん断破壊

土の場合、破壊包絡線を直線とみなすことができ、これは、クーロンの線形式

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$

と表わす。

σ : 鉛直応力

C : 粘着力

ϕ : 内部摩擦角

2) 海水のせん断破壊

海水の成長方向に平行及び垂直な軸を持つ二種類の円筒供試体において、氷温 -2~-14℃ の範囲について、せん断強度と鉛直応力との関係を調べた。図-25は氷温 -2~-3℃ におけるせん断方向が海水の成長方向と平行である場合の両者の関係を表わしたものである。●印はその鉛直応力における平均値である。これによると、せん断強度 τ_s は、鉛直応力 σ_v に比例して鉛直応力の増加と共に直線的に増加している。これは、土のせん断強度におけるクーロンの破壊包絡線である $\tau = C + \sigma \tan \phi$ の式と一致し、海水の場合にも、粘着力に関する項 C と内部摩擦角に関する項 $\tan \phi$ が存在することになり、任意の断面の応力状態を知ることが出来る。この関係は、他の氷温の場合も成立し、図-26、図-27はそれぞれ -4.5~-6℃、-9~-14℃ における場合の鉛直応力との関係を表わしたものである。

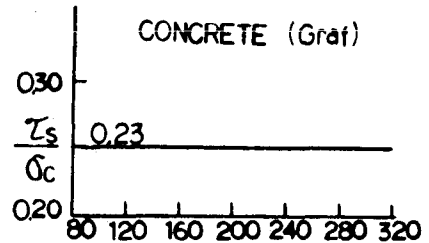


図-21

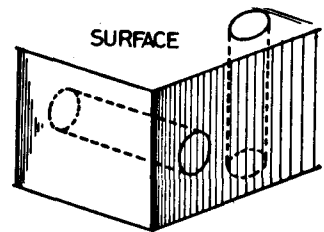


図-22

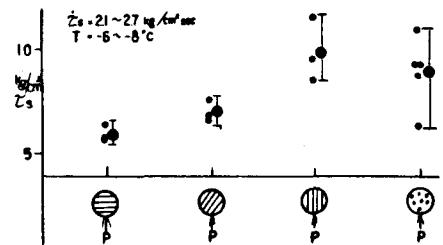


図-23

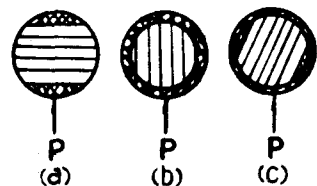


図-24

$\tau_s = C + \sigma_v \tan \phi$ なる直線関係が全てにおいて成立していることがわかる。図-28は海水の成長方向に直角にせん断した場合の関係である。これによりせん断方向に關係なくクーロンの式が成立している。図-25~図-27における平均値を1つの図に表わしたものが図-29である。これによると、氷温が低下するにつれて、粘着力に相当する項C、つまり、鉛直応力 $\sigma_v = 0$ におけるせん断強度は増加する。また、内部摩擦角に相当する項 $\tan \phi$ 、つまり直線の傾きは、氷温に關係なくほぼ一定値を示すという結果を得た。以上より、各氷温においてせん断強度 τ_s と鉛直応力 σ_v に

$$\tau_s = C + \sigma_v \tan \phi$$

なる直線關係が成立することが明らかとなつた。図-29より、今回の実験に使用した海水において、クーロンの破壊包絡線の式は、次の様に表わすことができる。

$$\tau_s = \tau_{v=0} + \sigma_v \tan 50^\circ$$

$\tau_{v=0}$: $\sigma_v = 0$ のときのせん断強度

参考文献

佐伯, 広井:「海水のせん断強度について」

第34回年次学術講演会

土質試験法: 土質工学会

コンクリートハンドブック:

赤井「土質力学」: 朝倉書店

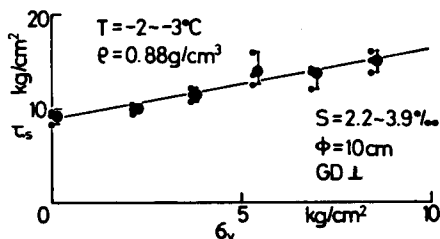


図-28

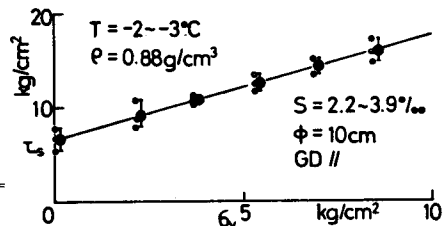


図-25

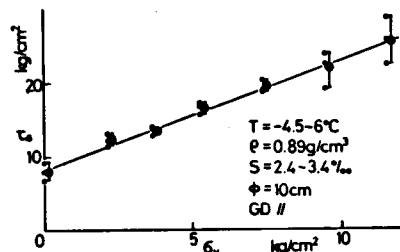


図-26

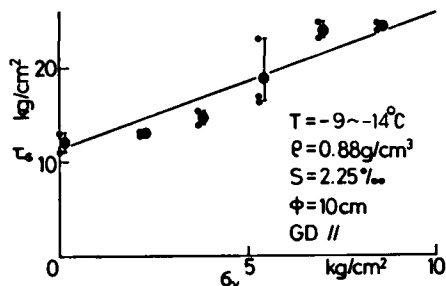


図-27

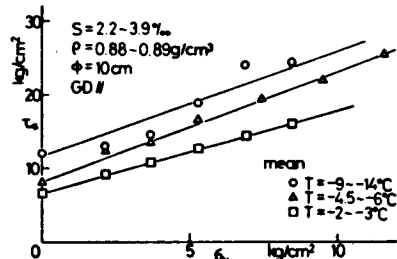


図-29