

直接剪断試験

齋藤 迪孝

1. まえがき

ここで述べるのは直接剪断試験方法についてであるがその前に剪断試験機として具備すべき条件と各種剪断試験機の適否優劣を略述し、現在直接占める位置をはつきりとさせたい。

直接剪断 (Direct Shear) とは破壊が平行移動 (Translatory Displacement) によつて起るものを言うのであつて、振り剪断などはこれに含まれない。従つて主として一面剪断、二面剪断がこれに当るわけであるが、多種多様の装置があつて総括的には述べ難いので、こゝでは主として一面剪断の代表的なものについて説明を加えることとする。

2. 剪断破壊の際の応力状態

土の強度理論はむつかしくてなかなかわかりにくいものであるが、こゝでは慣例に従つて破壊の条件として Coulomb の式が成立つものとする。これを解り易くする為には剪断面上の応力関係で示すと図-1 の如くなる。

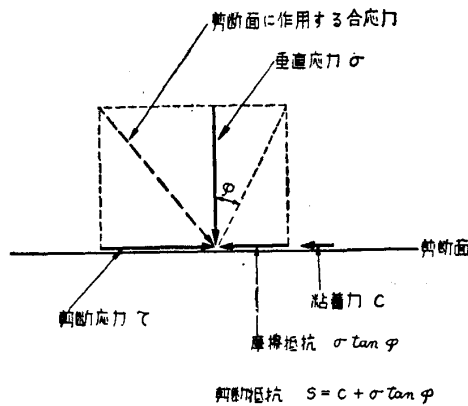


図-1 剪断面に於ける応力関係

即ち剪断抵抗 s は粘着力 c と摩擦抵抗 $\sigma \tan \phi$ とから成り、剪断応力 τ がこれにうちかつと辻りが生ずるのである。

$$\tau \geq s = c + \sigma \tan \phi$$

又主応力関係で示すと図-2 の如くなる。主応力 σ_1 と σ_3 との関係は次の通りである。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi + C \cos \phi$$

或は

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

この際現れる辻り面上の垂直剪断応力は前述の σ, τ

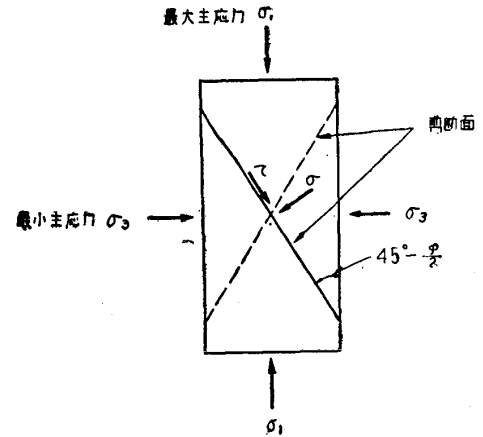


図-2 主応力と剪断面との関係

と同じ関係にあるから、Mohr の円表示を用いると1つの図にまとめられる。

Mohr の円で考えにくい人は図-1 又は図-2 のどち

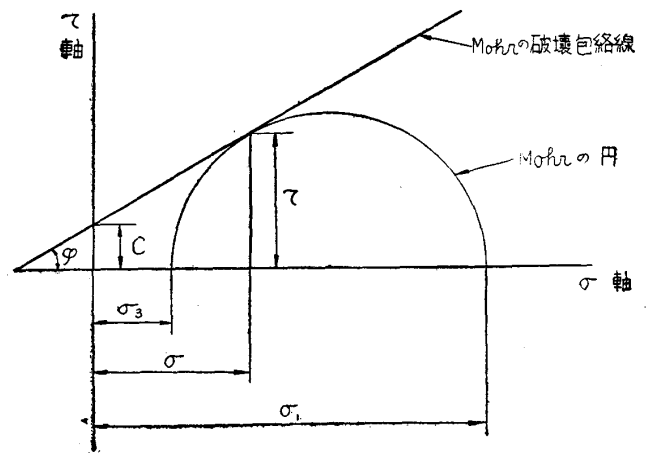


図-3 Mohr の円表示

らかの状態を頭に画くことができれば十分であつて、このような応力状態に置くことが先ず必要である。

次に剪断の為に土に力を加えると土は容積を減少する。土が水で飽和されて居れば圧密と同じ現象が生じ、水が外に排出されて、全部の力が土の骨組に作用する迄に時間がかかる。それ故排水状態の如何によつて、前述の垂直応力 σ 或は主応力 σ_1 及び σ_3 の大きさに差が生じ、加えた力がそのまま有効に伝ふとは限らない。剪断力を作用させる時にも土は容積変化を生じ、こゝでも前述のことが起るのである。それ故試験方法を次のように分けている。

- | | |
|--------|---------------------------|
| 急速剪断 | 加圧並に剪断の何れの場合にも水の流出を許さないもの |
| 圧密急速剪断 | 加圧によって水を流出させて十分圧 |

縮を起させた後、水の流出を許さないで剪断を行うもの

圧密緩速剪断 加圧によつて十分圧密を起させた後残つた水に圧力を生じさせないように緩速で剪断を行うもの

以上の方法の何れも行い得るか、或は特定の方法に限られるか、次の問題となる。

この外、剪断力増大方法に応力制御と歪制御の区分があつて、これによつても試験の難易の差は生じ得る。

以上によつて、剪断方法の適否優劣を決定するものは期待している通りの応力状態を生ずることができかどうかと言うことと、土の容積変化に応じて水の流出入を加減し得るかと言うことに限定されて来るのである。

3. 剪断試験方法の比較

a) 一面剪断 Box Shear

この型式で最も古いのは H. Krey の考へたものであるが、其後 K. Terzaghi 及び A. Casagrande によつて改良されたものが広く使用されている。図-4はその概

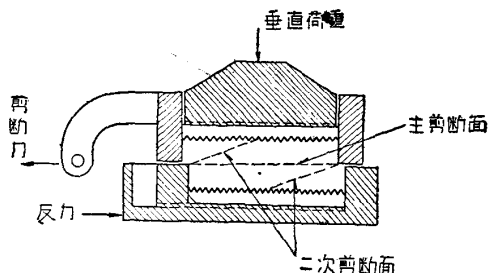


図-4 一面剪断

略の機構を示したもので、上下に分れた箱の中に試料を損め、垂直荷重を加えたまま上箱又は下箱を水平に動かしてその抵抗を測るものである。従つて剪断力は動かされた上箱又は下箱から上又は下の加圧板を通じて土に伝えられるので、土と板との接触面には歯形をつけておかないようにしてある。

この形式の理想的な剪断では図-5の如く一樣な剪断

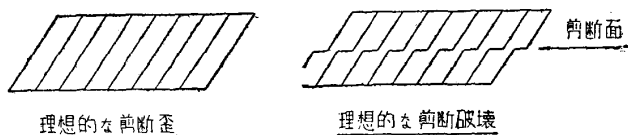


図-5 理想的な剪断

歪がある程度生じてから切り面に沿つて切るものであるが一面剪断の場合は箱の側面に圧す影響がかなり大きくこゝで応力集中が起り逐次破壊 (Progressive Failure) を生ずる。又 $90^\circ \pm \phi$ 中の角度で交る2つの切り面が箱の分割面から発達し、前記の逐次破壊に伴つて次々この面が土中を移動するので広い巾の剪断領域を生ずることが M. J. Hvorslev 其他の実験で証明されて居る。即ち剪断の際の土の変形は図-6の如くなり、一樣には

剪断されない。この剪断領域の巾は土の種類にも関係するが、土の含水量や垂直荷重によつても変つて来る。

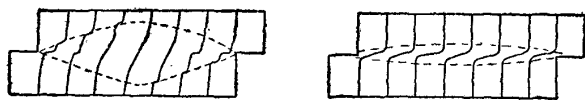


図-6 実際の剪断

剪断を一樣に行わせる為には、力を側面から加えるのではなく、できるだけ上下板を通じて加えるようにする。即ち試料の直径に比して厚さをできるだけ薄くするのがよい。しかし上下面の歯形が土を乱すので、そのような攪乱が影響しない程度とする。今迄に作られた最小厚は直径9~10 cm に対して 8.6 mm 位であるが、実際には約 10 mm が限度であろう。

又剪断歪の進むにつれて有効断面積は減少し、同時に箱面と土との摩擦抵抗が入つて来るので、最終強度を出すには不適當である。

尚容積変化に伴う水の流出入を調節することはその機構上できないから、圧密緩速剪断はすべての土について可能であるが、急速剪断及び圧密急速剪断は粘土又は乾燥砂以外は不可能である。

b) 二面剪断 Transverse Shear

この代表的なものは山口博士の考案になる鉄道省土質調査委員会式のもので、三割箱の中箱を引抜くことによ

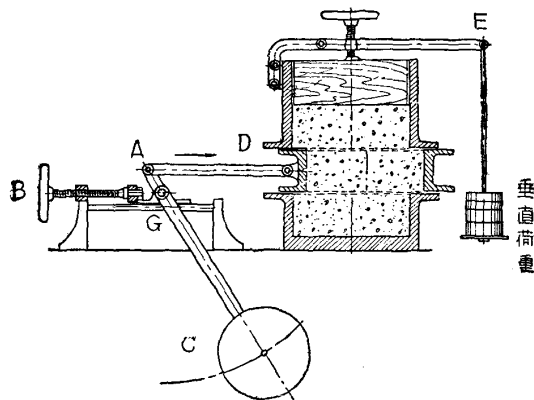


図-7 二面剪断

り二面で剪断を行うものである。W. S. Housel の押抜試験機もこれに属すが、垂直荷重はかけられない。

この場合には応力状態は一面剪断より更に複雑であつて、剪断歪を一樣にする為には試料の厚さを薄くすることができない。従つて逐次破壊の影響が更に大きく入つてくる。剪断歪の進むにつれて有効断面積の減少するの一面剪断と同様であつて、最終強度を出すのに不適當である。又試料の厚さが大となるので排水に時間がかかり圧密緩速剪断には不利である。又側面摩擦の影響が大きい。

c) 平板剪断 Plate Shear

一面剪断の側壁を除いたもので、応力集中による逐次破壊の影響はないが、側壁がないので垂直荷重の大きさ

に限度があり、十分な範囲の試験を行うことができない。今迄には C. A. Hogentogler, T. K. Huizinga 等

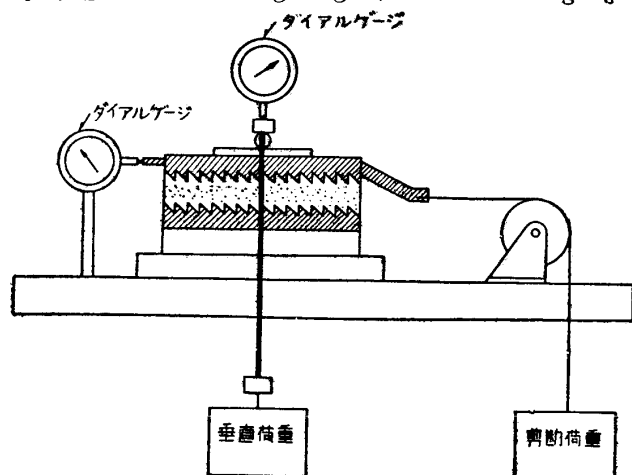


図-8 平板剪断

が試作したことがあるが、主として特殊目的の為に使用されたものであつて、現在では一般には使用されていない。

d) 回転剪断 Rotary Shear

中空試料の内外面から圧力を加え、その一方を軸のま

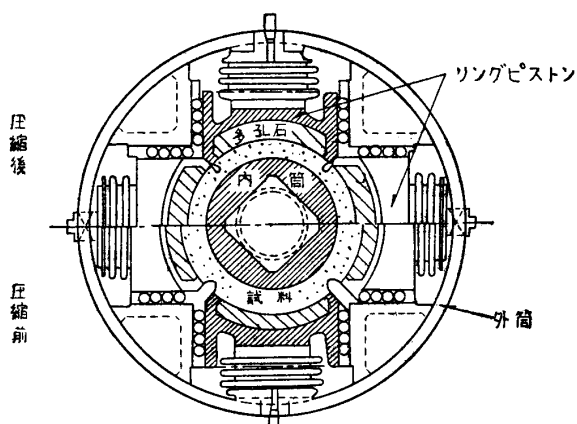


図-9 回転剪断

わりに回転させるもので、今迄に M. J. Hvorslev と A. Casagrande の 2 人が試作しただけであるが、放射状の圧力を加えて土の容積が減少した場合に土との接触面を伸縮させるのが困難な為に現在では使用されていない。

e) 捩り剪断 Torsion Shear

一面剪断の最も不利な点即ち剪断歪の進むにつれて土の有効断面が減少するのを除く為に考えられた方法であつて、土に剪断力を加える方法として側面から摺むのと

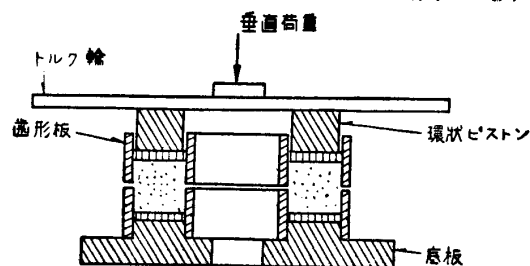


図-10 捩り剪断

上下面の歯形で力を加えるのと2通りある。この場合の不利な点は剪断歪が中心からの距離に比例して変化することで、これを除く為に試料を中空にして歪の小さい中心部を除くことが考えられた。この方法で残された最も不利な点は不攪乱試料でこのような中空試料を作つて試験機に入れることが非常にむづかしいことであつて、再成試料に限られることである。しかし土の有効断面積が変らないので、最大剪断強度のみでなく最終剪断強度も測定し得ることである。水に対する調節は一面剪断と同様である。

f) 単純圧縮 Unconfined Compression

円筒形試料を軸方向に圧縮するもので、内部摩擦角を無視し得る粘性土では粘着力は圧縮強さの $1/2$ として求めることができる。粘着力のない砂質土ではそのままでは試験ができないが、ゴム膜に包み内部を真空にすればこの試験を行うことができる。

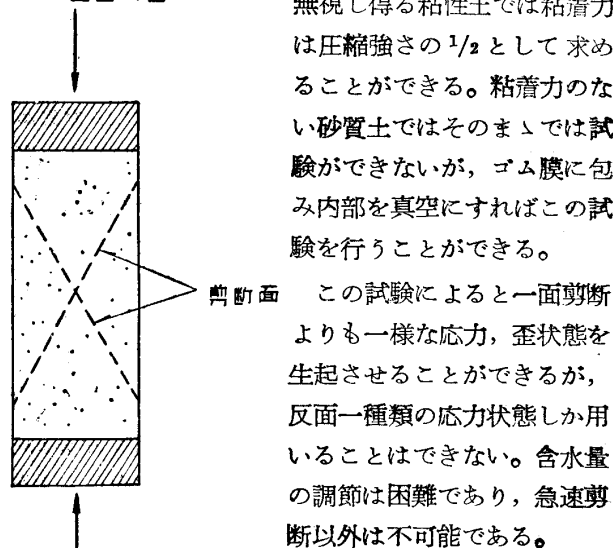


図-11 単純圧縮

g) 三軸圧縮 Triaxial Compression

円筒形試料の周面と軸方向とに夫々異つた大きさの主応力を作させて剪断破壊を起させる方法で、予期する応力状態を生起させる事ができ、最大剪断抵抗を求めるには現在の処最もすぐれた試験方法とされている。周面圧力は液圧によつて加えるので、ゴム膜で試料を覆う必要

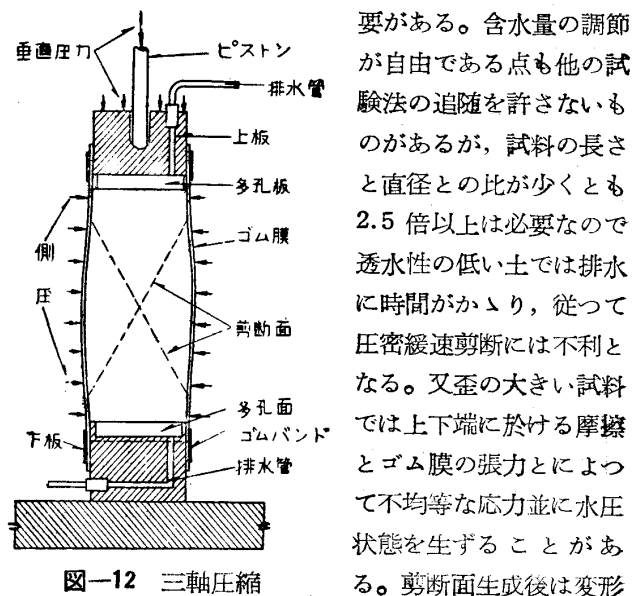


図-12 三軸圧縮

がある。含水量の調節が自由である点も他の試験法の追随を許さないものがあるが、試料の長さとの直径との比が少くとも 2.5 倍以上は必要なので透水性の低い土では排水に時間がかかり、従つて圧密緩速剪断には不利となる。又歪の大きい試料では上下端に於ける摩擦とゴム膜の張力によつて不均等な応力並に水圧状態を生ずることがある。剪断面生成後は変形

が甚しいので最終剪断強度は求められない。

h) 純粹剪断 Pure Shear

W. Kjellman の考案した円形断面のもの、K. H. Ro

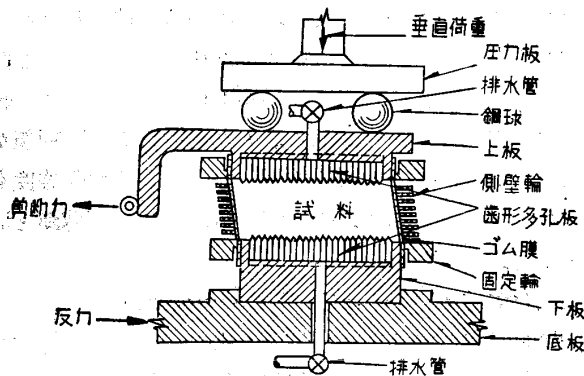


図-13 純粹剪断

scoe の考案した正方形断面のものなどがあり、一面剪断の所でのべた理想的な歪を生じさせることができると考えられている。これは側面抵抗による逐次破壊の影響を除き、有効断面積は不変である等の利点があるが、ゴム膜を用いたものは含水量の調節は可能であるが試料の挿入は困難であり、ゴム膜を用いないものにはその逆のことが起る。又上下面の垂直及び剪断応力を均等に分布させることもむづかしい。

土の強度試験方法は以上のように数多く考案されている。夫々利点、欠点があるが、これらの試験方法と比較すると一面剪断試験に於ける最弱点は逐次破壊による応力の不均一性と、含水量の調節困難な点とにあるのであつて、三軸圧縮試験の発展と共に逐次使用範囲が狭められて来たとは言ふものゝ、装置が簡単で試験が容易であるので、上記の弱点をできるだけ除くように装置と試験方法と使用範囲とに考慮を加えて試験を行えば、十分試験の目的を達成することかできるものである。

以下はまえがき書いたように一面剪断試験について説明を加えることとする。

4. 装 置

図-14は一面剪断試験機の代表的なものであつて、上下に分れた剪断箱がボールベアリングを通して底板上にのつて居り、垂直荷重の作用点を移動させないで剪断を

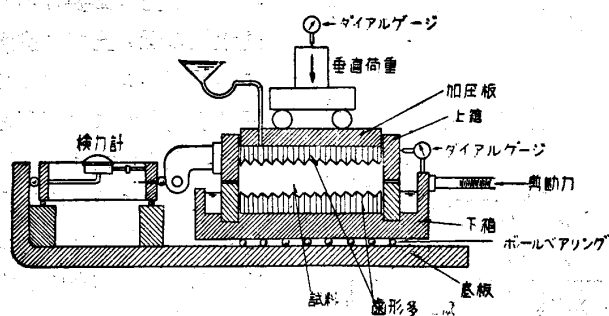


図-14 一面剪断試験機

行ふ為に下箱を移動させるようにしてある。剪断力を土に伝える為には歯形のついた多孔板を用いるが、急速剪断の場合は透水性の多孔板の代りに不透水性の金属板を用いる。垂直荷重を加えるにはレバー式のものが多いが、直接分銅荷重をかけるものもあり、又油圧やバネを用いるものもある。剪断力を加えるには歪制御式のものではスクリューが多く用いられ、応力制御式のものでは分銅荷重をプリー又はレバーと併用する方法が多くとられている。垂直荷重及び剪断力の算定できないものに対しては検力計 (Proving Ring) を用いて測定する。変位については加圧板の上下方向と可動箱 (下箱) の双方の動きをダイヤルゲージを用いて測定する。

試料断面は正方形、長方形、円形等種々あるが、側壁を押し剪断するのでなく、上下面で剪断力を土に伝達するのであるから何れの形でも差支えない。但し試料からとつた試料を用いるとき、或いは試料削成上から言えば円形の方が便利である。直径は 3.5~30 cm の範囲にわたっているが、最も多く使われているのは 5~10 cm のものであつて、この位の方が取扱に便利である。厚さは薄い程よいが、試料削成上と多孔板の歯形の影響を除く為に前述の如く 1 cm の厚さが限度であろう。

この外に必要な器具は次の通りである。

試料削成器又は試料採取筒

粘性土の場合に普通は下端に刃をつけた試料採取筒を押込んで試料をとるが、鋭敏な粘土では試料を甚しく乱すおそれがあるので、その場合には試料削成器とワイヤソーとを用いる。円形断面の場合はロクロ形の削成器が使用される。

天秤 感量 0.1gr. 及び 0.001gr.

乾燥器

デシケータ

キャリパー

直線刃

時計皿

蒸発皿

ストップウォッチ

ゴム膜

其他

5. 試料準備

a) 粘着性のない砂の場合

この場合は空気中で乾燥したものを用いる。炉乾燥したものは大気中の湿度と平衡を保つようになるまで放置した後使用する。

先ず蒸発皿にこの砂を入れて重量を測つた後、剪断試験機の箱の中へ層に分けて入れ、平らにならす。1層の厚さは 1 cm 位が望ましいが、層の境界面が剪断面と一致しないように注意する。砂を密につめる場合は細い棒

で突くか又は柄のついた板でたゞいてしめる。砂をゆるくつめる場合は漏斗などを用いて一定の高さから静かに落す。何れにしても試料全体にわたって様な密度になるように心掛ければならない。

試料をつめ終った後、残りの試料を容器と共に秤量すると、前回の秤量との差から試験機につめた試料の重量が求められる。試料の高さを測れば試験機につめた試料の密度、従つて間隙比が求められる。

b) 乱されな粘性土の場合

この場合試料を試験機の容器の大きさに合せて切るには試料削成器を用いるのが一番よい。正方形又は長方形断面の場合には箱形の削成器を用い、円形断面の場合はロクロ形削成器を用いる。先ず上下面の一方を平らに切った後周面を切り、最後に上下面の他方を平行に切る。切るにはワイヤソーを用い、場合によつて最後の仕上げに直線刃を用いることがある。非常に硬い粘土はワイヤソーで切れないことがあるが、この場合は直線刃で端から少しずつ削って行くのがよい。

試料削成を簡単にする為に先端に刃のついた試料採取筒を押込むことが一般に行われているが、攪乱に鋭敏な粘土に対しては用いない方がよい。

試料を試験機の容器に入れる際は側面摩擦をへらす為に箱の内側壁にグリースをぬり、直角や縁を損傷しないように十分注意をする。試料がこわれ易いか軟い場合には直接試験機の容器に合せて削りながら入れて行くのがよい。

削成した試料の重量、容積を測定し記録する。

又残った試料の一部を用いて含水量の測定を行う。

c) 乱された粘性土の場合

試料をゴム膜でつまみ、指で十分にこねる。この試料を予め成形することなく直接に試験機の容器につめる。この際、中に空気をとじこめないように十分注意する。又土の水分を逃さないように恒温室で行うのが望ましい。これが利用できない時は床に水をまくとか、ぬれ雑布の上で行うとかして水分を逃さぬように努めなければならない。

試料の重量、容積を記録し、又含水量の測定を行うことも前と同じである。

6. 試験方法

試験の記録には土質工学会制定のデータシートを用いると便利である。

先ず試験の方法、即ち急速剪断、圧密急速剪断、又は圧密緩速剪断の何れの方法によるかを決定する。次に剪断時の荷重よりも大きい荷重を予め加える場合は、先行圧密荷重としてデータシートにその大きさを記入する。

次にレバーの荷重調節を行い、正しく設置する。試験機の容器に入れた試料の上に歯形板をのせ、その上加

圧板を置いた後、試料の厚さを決定する。歯形板は急速剪断の場合は金属製のものを、圧密を行う場合には多孔質のものを用いることは前述の通りである。上下の箱の固定装置のあるものはそれをクランプしたまゝでレバーを定位置に設置し、載荷の際の加圧板の沈下を測定し得るようにダイヤルゲージを取付ける。

圧密を行わせる場合には試料よりの水分の蒸発を防ぐ為に布又は紙を水でぬらしてまわりをまく。或は試験機の装置が許すならば、剪断箱全体を平皿に入れ、水に浸し得るようにして置く。この水は垂直荷重をある程度かけてから入れるのであつて、浸水によつて水の表面張力で圧縮されていた土が回復したり、又は著しい吸水膨脹を来したりするのを防ぐ為である。

次に所定の垂直荷重を加える。圧密を行わせる場合には圧密試験と同様に載荷後の時間と沈下との関係を記録する。半対数目盛方眼紙に記入した時間—沈下曲線から一次圧密が終了したかどうか分かる。先行荷重より小さい垂直荷重で剪断を行う場合は荷重減少後の膨脹過程を十分に行わせる。これは圧密の際と同様に時間—膨脹曲線から判定することができる。

一次圧密（又は膨脹）の終了を確認してから上下箱を固定したクランプを外し、上下箱の間を所定の量だけ離し、この両箱か土以外で接続されていないことを確かめる。

次に横方向に力を加え、適当な間隙を置いて時間、水平変位、垂直変位、及び剪断力の読みをとり記録する。

歪制御方法で急速剪断の場合には剪断速度は 1 mm/min 、位が適当で、最初の2分間は15秒毎、それから30秒毎位にとるのが望ましい。そして剪断力が一定になるか、又は水平変位が試料の径の15%になるまで試験を継続する。

緩速剪断の場合には剪断速度は $5 \times 10^{-3} \text{ mm/min}$ 、位が適当である。これは1cm剪断するのに約2日かゝる勘定になる。記録は0.25mm進み毎にとれば十分である。

応力制御方法では予想される剪断力の $1/10$ 毎の段階で荷重を増大し、各段階の荷重を加える毎に上記に準じて記録をとり破壊に到る迄これを続ける。

これが終ると試料をとり出して重量を測り、次で乾燥器に入れて乾燥させた後再び重量を測り、含水量を算定する。

次でこれと同じ方法で垂直荷重を変えて数回、少くとも3回試験を繰返す。

砂について限界間隙比を求めるときは、異つた密度について夫々数回の試験を行う。

7. 計 算

剪断応力 τ は次式で計算される。

$$\tau = \frac{F}{A}$$

ここに F : 剪断力 = (検力計の読み - 最初の検力計の読み) × 換算係数

A : 試料断面積 (最初の断面積と等しいとする)

8. 図 示

圧密を行った場合はその時間-沈下曲線を書く。

歪制御方法では水平変位と剪断抵抗並に垂直変位との関係曲線を書く。最大並に最終剪断抵抗の夫々について垂直応力剪断抵抗曲線を描き粘着力及び内部摩擦角を決定する。

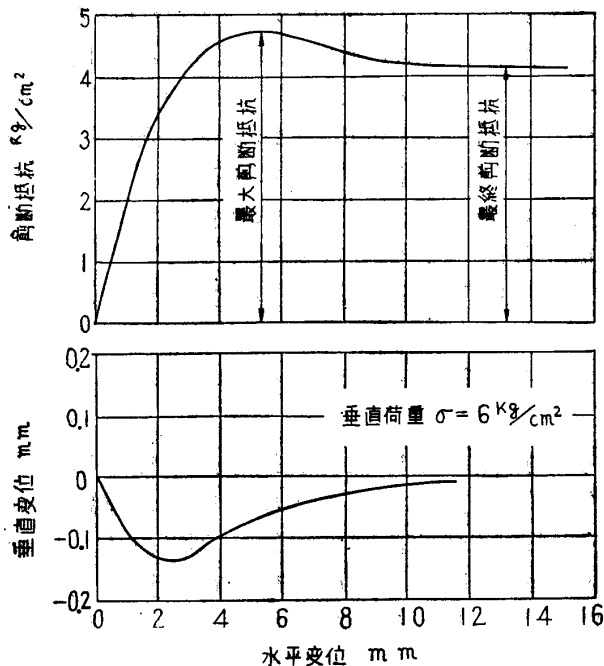


図-15 剪断試験結果図示 (歪制御の場合)

応力制御方法では時間を横座標にとり、それに対する剪断力、水平並に垂直変位との関係曲線を書く。最大剪断力に対する垂直力-応剪断抵抗曲線を描き、粘着力及び内部摩擦角を決定する。

砂について限界間隙比を求めた場合は最大剪断抵抗に

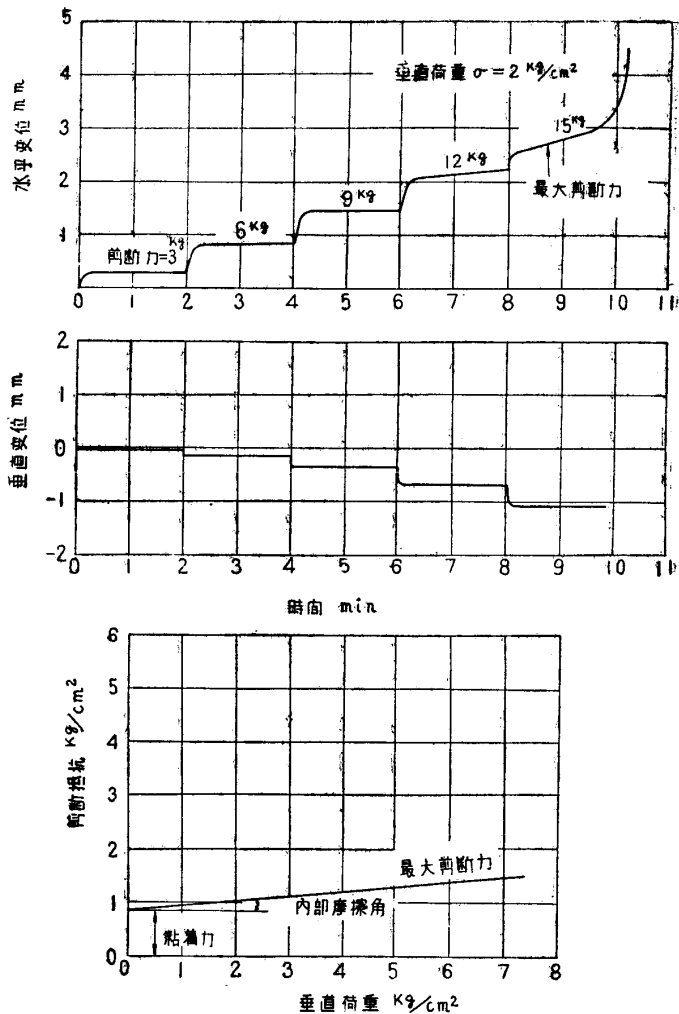


図-16 剪断試験結果図示 (応力制御の場合)

対する垂直変位と初期間隙比とを両軸として同一垂直荷重に対する線 (直線) を書く。これから垂直荷重に応じた限界間隙比を求めることができる。

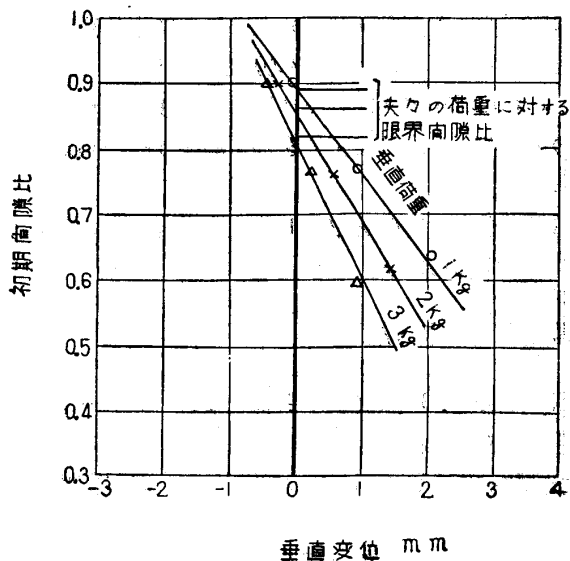


図-17 限界間隙比図示