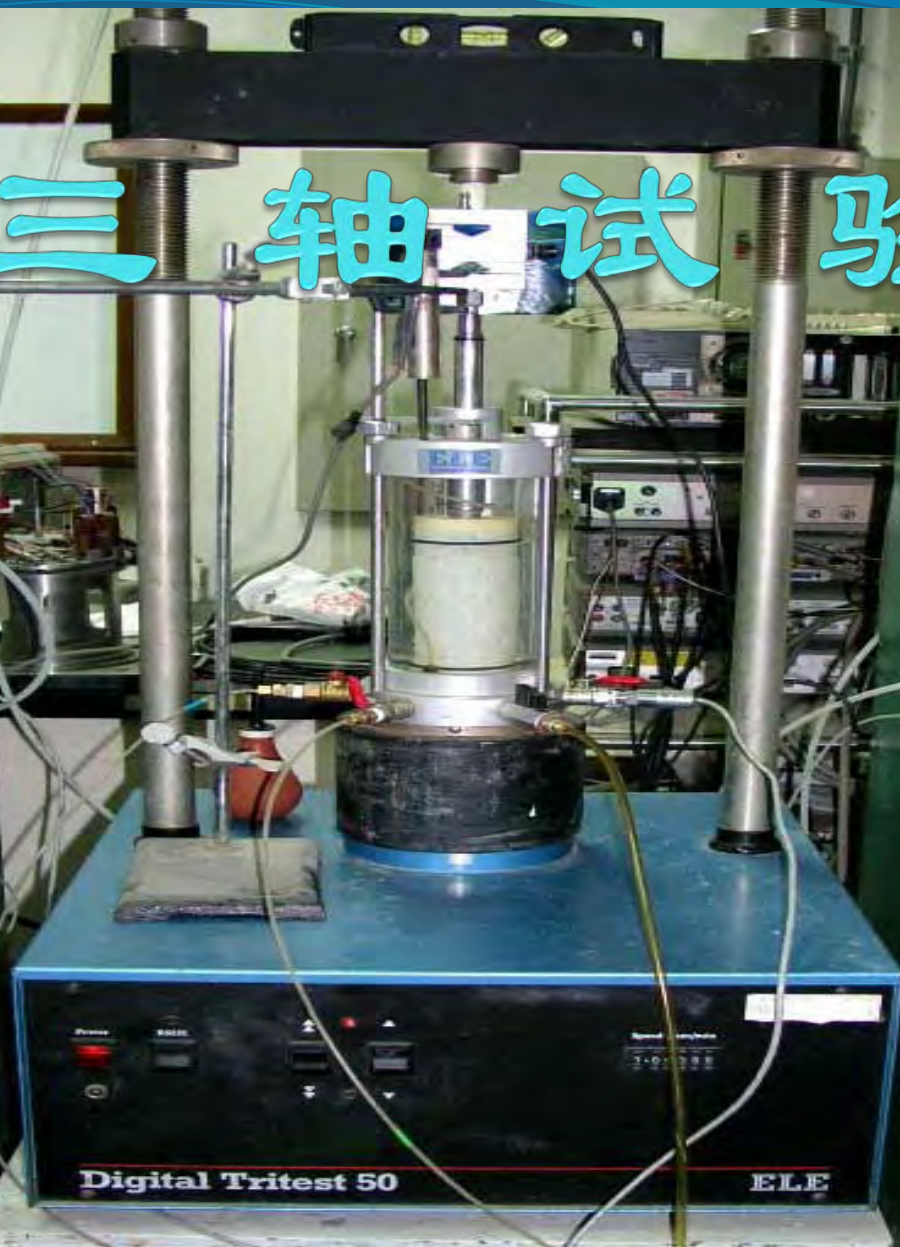


三轴试验



三轴压缩试验

SL237—017—1999

1 目的和适用范围

1.0.1 三轴压缩试验是测定土的抗剪强度的一种方法,它通常用3~4个圆柱形试样,分别在不同的恒定周围压力(即小主应力 σ_3)下,施加轴向压力[即产生主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)],进行剪切直至破坏;然后根据摩尔—库仑理论,求得抗剪强度参数。

1.0.2 本规程适用于测定细粒土和砂类土的总抗剪强度参数和有效抗剪强度参数。根据排水条件的不同,本试验分为不固结不排水剪(UU);固结不排水剪(CU 或 $\overline{\text{CU}}$)和固结排水剪(CD)等3种试验类型。

1 不固结水排水剪(UU)试验是在施加周围压力和增加轴向压力直至破坏过程中均不允许试样排水。本试验可以测得总抗剪强度参数 c_u 、 φ_u 。

2 固结不排水剪(CU 或 $\overline{\text{CU}}$)试验是试样先在某一周围压力作用下排水固结,然后在保持不排水的情况下,增加轴向压力直至破坏。本试验可以测得总抗剪强度参数 c_{cu} 、 φ_{cu} 或有效抗剪强度参数 c' 、 φ' 和孔隙压力系数。

3 固结排水剪(CD)试验是试样先在某一周围压力作用下排水固结,然后在允许试样充分排水的情况下增加轴向压力直到破坏,本试验可以测得有效抗剪强度参数 c_d 、 φ_d 和变形参数。

2 引用标准

GB4540—84《应变控制式三轴仪》。

SL118—95《应变控制式三轴仪校验方法》。

SL237—011—1999《击实试验》。

GB/T15406—94《土工仪器的基本参数及通用技术条件》第一篇:室内土工仪器。

3 仪器设备

3.1 仪器设备

3.1.1 应变控制式三轴仪:如图 3.1.1 所示,有反压力控制系统、周围压力控制系统、压力室,孔隙水压力量测系统,试验机等。其技术条件应符合 GB/T15406—94 规定。

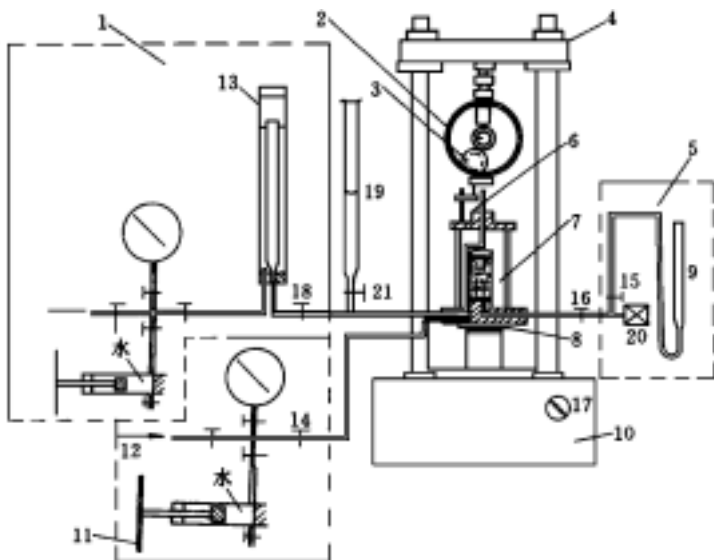


图 3.1.1 三轴仪组成示意图

- 1—反压力控制系统;2—轴向测力计;3—轴向位移计;4—试验机横梁;5—孔隙压力测量系统;6—活塞;7—压力室;8—升降台;9—量水管;10—试验机;
11—周围压力控制系统;12—压力源;13—体变管;14—周围压力阀;
15—量管阀;16—孔隙压力阀;17—手轮;18—体变管阀;19—排水管;
20—孔隙压力传感器;21—排水管阀

3.1.2 附属设备。

1 击实筒:见图 3.1.2—1。

2 饱和器:见图 3.1.2—2。

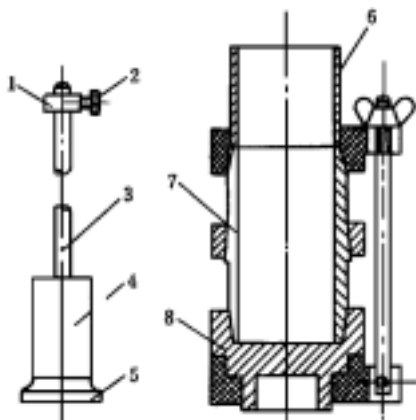


图 3.1.2—1 击实筒

1—套环;2—定位螺丝;3—导杆;4—击锤;
5—底板;6—套筒;7—饱和器;8—底板

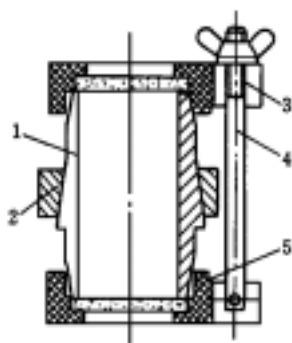


图 3.1.2—2 饱和器

1—土样筒;2—紧箍;3—夹板;
4—拉杆;5—透水板

3 切土盘:见图 3.1.2—3。

4 切土器和切土架:见图 3.1.2—4。

5 分样器:见图 3.1.2—5。

6 承膜筒:见图 3.1.2—6。

7 制备砂样圆模:见图 3.1.2—7,用于冲填土或砂性土。

3.1.3 天平:称量 200g,分度值 0.01g;称量 1000g,分度值 0.1g;称量 5000g,分度值 1g。

3.1.4 量表:量程 30mm,分度值 0.01mm。

3.1.5 橡皮膜:对直径 39.1mm 和 61.8mm 的试样,橡皮膜厚度以 0.1~0.2mm 为宜;对直径 101mm 的试样,橡皮膜厚度以 0.2~0.3mm 为宜。

3.2 仪器设备的检定和校准

3.2.1 天平:应按相应的检定规程规定进行检定。

3.2.2 应变控制式三轴仪:应按 SL118—95 规定的方法进行校准。

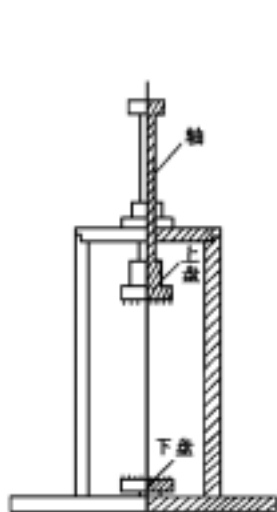


图 3.1.2—3 切土盘

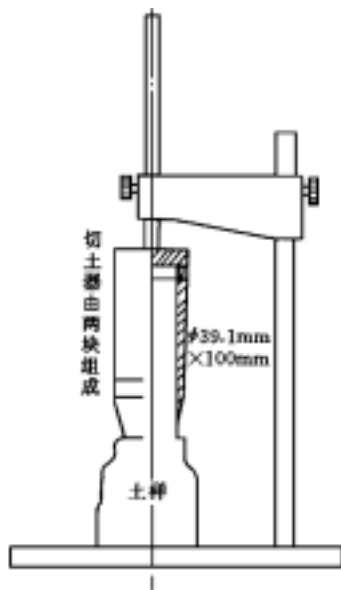


图 3.1.2—4 切土器和切土架

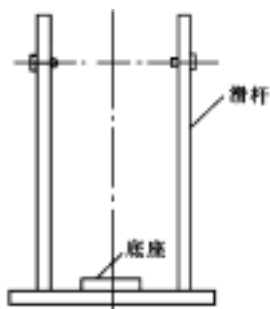
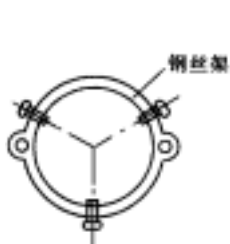


图 3.1.2—5 原状土分样器

3.2.3 量表:应按 JG379—95《大量程百分表检定规程》进行检定。

3.3 仪器检查

3.3.1 周围压力控制系统和反压力控制系统的仪表的误差应小于量程的 $\pm 1\%$ ，采用传感器时，其误差应小于量程的 $\pm 0.5\%$ ，根据试样的强度大小，选择不同量程的测力计，最大轴向压力的准确度不小于 1% 。

3.3.2 孔隙压力量测系统的气泡应排除。其方法是：孔隙压力量测系统中充以无气水（煮沸冷却后的蒸馏水）并施加压力，小心打开孔隙压力阀，让

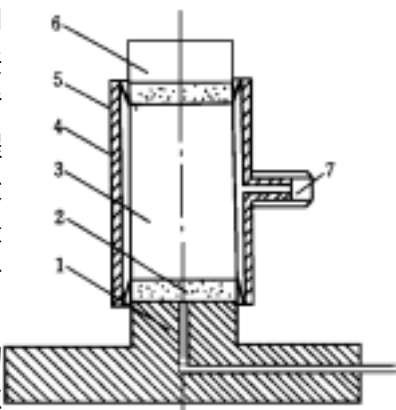


图 3.1.2-6 承膜筒安装示意图

1—压力室底座；2—透水板；3—试样；4—承膜筒；5—橡皮膜；6—上帽；7—吸气孔

管路中的气泡从压力室底座排出。应反复几次，直到气泡完全冲出为止（若用零位指示器时，将零位指示器中的水银移入贮槽内，关闭量管阀，用调压筒对孔隙压力测量系统加压排除气泡，需要注意，不要使贮槽内水银冲出指示器。排气完毕后，从贮槽中移回水银，关闭孔隙压力阀，用调压筒施加压力）。

孔隙压力量测系统的体积因数，应小于 $1.5 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{kPa}$ 。

3.3.3 排水管路应通畅。活塞在轴套内应能自由滑动，各连接处应无漏水漏气现象。俟仪器检查完毕，关周围压力阀、孔隙压力阀和排

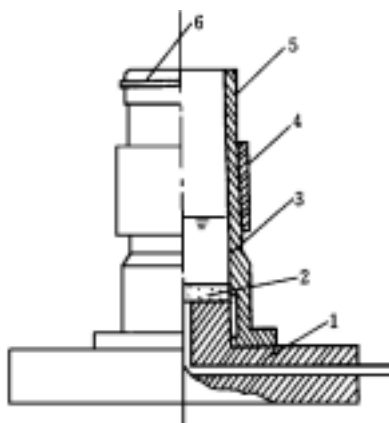


图 3.1.2-7 制备砂样圆模

1—压力室底座；2—透水板；3—制样圆模（两片合成）；4—紧箍；5—橡皮膜；6—橡皮圈

水阀，以备使用。

3.3.4 橡皮膜在使用前应仔细检查。其方法是扎紧两端，在膜内

充气,然后沉入水下检查应无气泡溢出。

3.3.5 仪器检查的各项结果应符合 SL118—95 的规定。

4 操作步骤

4.1 试样制备

4.1.1 试样尺寸应符合下列要求。

试样高度 H 与直径 D 之比 (H/D) 应为 2.0 ~ 2.5, 对于有裂隙、软弱面或构造面的试样, 直径 D 宜采用 101mm。

4.1.2 原状土试样制备。

1 对于较软的土样, 先用钢丝锯或削土刀切取一稍大于规定尺寸的土柱, 放在切土盘的上、下圆盘之间, 见图 3.1.2—3。再用钢丝锯或削土刀紧靠侧板, 由上往下细心切

削, 边切削边转动圆盘, 直至土样的直径被削成规定的直径为止。然后按试样高度的要求, 削平上下两端。对于直径为 10cm 的软粘土土样, 可先用分样器(图 3.1.2—5)分成 3 个土柱, 然后再按上述的方法, 切削成直径为 39.1mm 的试样。

2 对于较硬的土样, 先用削土刀或钢丝锯切取一稍大于规定尺寸的土柱, 上、下端削平, 按试样要求的层次方向, 放在切土架上, 用切土器切削, 见图 3.1.2—4。先在切土器刀口内壁涂上一层油, 将切土器的刀口对准土样顶面, 边削土边压切土器, 直至切削到比要求的试样高度约高 2cm 为止, 然后拆开切土器, 将试样取出, 按要求的高度将两端削平。

试样的两端面应平整, 互相平行, 侧面垂直, 上下均匀。在切样过程中, 若试样表面因遇砾石而成孔洞, 允许用切削下的余土填补。

3 将切削好的试样称量, 直径 101mm 的试样准确至 1g; 直径

表 4.1.1 土样粒径与试样直径的关系表

试样直径 D (mm)	允许粒径 d (mm)
39.1	$d < \frac{1}{10} D$
61.8	$d < \frac{1}{10} D$
101.0	$d < \frac{1}{5} D$

61.8mm和39.1mm的试样准确至0.1g。试样高度和直径用卡尺量测,试样的平均直径按式(4.1.2)计算:

$$D_0 = \frac{D_1 + 2D_2 + D_3}{4} \quad (4.1.2)$$

式中 D_0 ——试样平均直径,mm;

D_1 、 D_2 、 D_3 ——分别为试样上、中、下部位的直径,mm。

取切下的余土,平行测定含水率,取其平均值作为试样的含水率。

对于同一组原状试样,密度的差值不宜大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$,含水率差值不宜大于2%。

4 对于特别坚硬的和很不均匀的土样,如不易切成平整、均匀的圆柱体时,允许切成与规定直径接近的柱体,按所需试样高度将上下两端削平,称取质量,然后包上橡皮膜,用浮称法称试样的质量,并换算出试样的体积和平均直径。

4.1.3 扰动土试样制备(击实法)。

1 选取一定数量的代表性土样(对直径39.1mm试样约取2kg;61.8mm和101mm试样分别取10kg和20kg),经风干、碾碎、过筛(筛的孔径应符合本规程表4.1.1规定),测定风干含水率,按要求的含水率算出所需加水量[计算方法参照SL237—011—1999中式(4.1.1)]。

2 将需加的水量喷洒到土料上拌匀,稍静置后装入塑料袋,然后置于密闭容器内至少20h,使含水率均匀。取出土料复测其含水率。测定的含水率与要求的含水率的差值应小于 $\pm 1\%$ 。否则需调整含水率至符合要求为止。

3 击样筒的内径应与试样直径相同。击锤的直径宜小于试样直径,也允许采用与试样直径相等的击锤。击样筒壁在使用前应洗擦干净,涂一薄层凡士林。

4 根据要求的干密度,称取所需土质量。按试样高度分层击实,粉质土分3~5层,粘质土分5~8层击实。各层土料质量相等。每层击实至要求高度后,将表面刨毛,然后再加第2层土料。如此继续进行,直至击实最后一层。将击样筒中的试样两端整平,取出称其质量,一组试样的密度差值应小于 $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 。

4.1.4 冲填土试样制备(土膏法)。

1 取代表性土样风、过筛,调成略大于液限的土膏,然后置于密闭容器内,储存 20h 左右,测定土膏含水率,同一组试样含水率的差值不应大于 1%。

2 在压力室底座上装对开圆模和橡皮膜(在底座上的透水板上放一湿滤纸,连接底座的透水板均应饱和),橡皮膜与底座扎紧。称制备好的土膏,用调土刀将土膏装入橡皮膜内,装土膏时避免试样内夹有气泡。试样装好后整平上端,称剩余土膏,计算装入土膏的质量。在试样上部依次放湿滤纸、透水板和试样帽并扎紧橡皮膜。然后打开孔隙压力阀和量管阀,降低量水管,使其水位低于试样中心约 50cm,测记量水管读数,算出排水后试样的含水率。拆去对开模,测定试样上、中、下部位的直径及高度,按本规程式(4.1.2)计算试样的平均直径及体积。

4.1.5 砂类土试样制备

1 根据试验要求的试样干密度和试样体积称取所需风干砂样质量,分三等分,在水中煮沸,冷却后待用。

2 开孔隙压力阀及量管阀,使压力室底座充水。将煮沸过的透水板滑入压力室底座上,并用橡皮带把透水板包扎在底座上,以防砂土漏入底座中。关孔隙压力阀及量管阀,将橡皮膜的一端套在压力室底座上并扎紧,将对开模套在底座上,将橡皮膜的上端翻出,然后抽气,使橡皮膜贴紧对开模内壁,见图 3.1.2—7。

3 在橡皮膜内注脱气水约达试样高的 1/3。用长柄小勺将煮沸冷却的一份砂样装入膜中,填至该层要求高度^①。

4 第 1 层砂样填完后,继续注水至试样高度的 2/3,再装第 2 层砂样。如此继续装样,直至模内装满为止。如果要求干密度较大,则可在填砂过程中轻轻敲打对开模,务使所称出的砂样填满规

① 对含有细粒土和要求高密度的试样,可采用干砂制备,用水头饱和或反压力饱和。

定的体积。然后放上透水板、试样帽,翻起橡皮膜,并扎紧在试样帽上。

5 开量管阀降低量管,使管内水面低于试样中心高程以下约 0.2m(对于直径 101mm 的试样约 0.5m),在试样内产生一定负压,使试样能站立。拆除对开模,按本规程 4.1.2 之 3 量试样高度与直径,复核试样干密度。各试样之间的干密度差值应小于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 。

4.2 试样饱和

4.2.1 抽气饱和。将装有试样的饱和器置于无水的抽气缸内,进行抽气,当真空度接近当地 1 个大气压后,应继续抽气,继续抽气时间宜符合下列要求:

粉质土 大于 0.5h

粘质土 大于 1h

密实的粘质土 大于 2h

当抽气时间达到上述要求后,徐徐注入清水,并保持真空度稳定。待饱和器完全被水淹没即停止抽气,并释放抽气缸的真空。试样在水下静置时间应大于 10h,然后取出试样并称其质量。

4.2.2 水头饱和。对于粉土或粉质砂土,均可直接在仪器上用大头饱和。其方法是先按本规程 4.3.1 之 1 至 4 步骤安装完毕(试样顶用透水帽),然后施加 20kPa 的周围压力,并同时提高试样底部量管的水面和降低连接试样顶部固结排水管的水平面,使两管水面差在 1m 左右。打开量管阀、孔隙压力阀和排水阀,让水自下而上通过试样,直至同一时间间隔内量管流出的水量与固结排水管内水量相等为止。

4.2.3 二氧化碳(CO₂)饱和。二氧化碳饱和适用于无粘性的松砂、紧砂及密度低的粉质土。二氧化碳的饱和装置见图 4.2.3,其步骤如下。

1 试样安装完成后,装上压力室罩,将各阀门关闭,开周围压力阀对试样施加 40~50kPa 的周围压力。

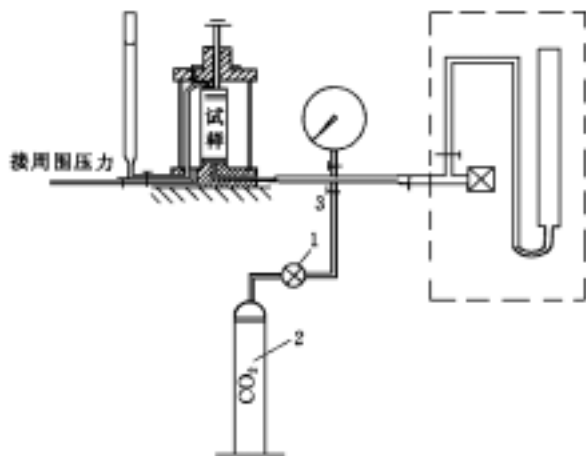


图 4.2.3 二氧化碳饱和装置图

1—减压阀;2— CO_2 储气瓶;3—供气阀

2 将减压阀调至 20kPa,开供气阀使 CO_2 气体由试样底部输入试样内。

3 开体变管阀,当体变管内的水面无气泡时关闭供气阀。

4 开孔隙压力阀及量管阀、升高量管内水面,使保持高于体变管内水面约 0.2m。

5 当量管内流出的水量约等于体变管内上升的水量为止,再继续水头饱和后,关闭体变管阀及孔隙压力阀。

4.2.4 反压力饱和。按本规程 4.2.1、4.2.2 或 4.2.3 规定进行试样饱和,并用 B 值(孔隙压力系数)检查饱和度,如试样的饱和度达不到 99%,可对试样施加反压力以达到完全饱和。

施加反压力装置见图 3.1.1。其步骤如下。

1 试样装好以后装上压力室罩,关孔隙压力阀和反压力阀,测记体变管读数。先对试样施加 20kPa 的周围压力预压。并开孔隙压力阀待孔隙压力稳定后记下读数,然后关孔隙压力阀。

2 反压力应分级施加,并同时分级施加周围压力,以尽量减

少对试样的扰动。在施加反压力过程中,始终保持周围压力比反压力大 20kPa。

反压力和周围压力的每级增量对软粘土取 30kPa。对坚实的土或初始饱和度较低的土,取 50~70kPa。

3 操作时,先调周围压力至 50kPa,并将反压力系统调至 30kPa,同时打开周围压力阀和反压力阀,再缓缓打开孔隙压力阀,待孔隙压力稳定后,测记孔隙压力计和体变管读数,再施加下一级的周围压力和反压力。

4 算出本级周围压力下的孔隙压力增量 Δu , 并与周围压力增量 $\Delta \sigma_3$ 比较,如 $\Delta u / \Delta \sigma_3 < 1$,则表示试样尚未饱和,这时关孔隙压力阀、反压力阀和周围压力阀,继续按上述规定施加下一级周围压力和反压力。

5 当试样在某级压力下达到 $\Delta u / \Delta \sigma_3 = 1$ 时,应保持反压力不变,增大周围压力,假若试样内增加的孔隙压力等于周围压力的增量,表明试样已完全饱和;否则应重复上述步骤,直至试样饱和为止。

4.3 试样安装和固结

4.3.1 不固结不排水剪试验(UU 试验)。

1 对压力室底座充水,在底座上放置不透水板,并依次放置试样、不透水板及试样帽。对于冲填土或砂性土的试样安装,分别按本规程 4.1.4 或 4.1.5 规定进行。

2 将橡皮膜套在承膜筒内,两端翻出筒外(见图 3.1.2—6),从吸气孔吸气,使膜贴紧承膜筒内壁,然后套在试样外,放气,翻起橡皮膜的两端,取出承膜筒。用橡皮圈将橡皮膜分别扎紧在压力室底座和试样帽上。

3 装上压力室罩。安装时应先将活塞提升,以防碰撞试样,压力室罩安放后,将活塞对准试样帽中心,并均匀地旋紧螺丝,再将轴向测力计对准活塞。

4 开排气孔,向压力室充水,当压力室内快注满水时,降低进水速度,水从排气孔溢出时,关闭排气孔。

5 关体变管阀及孔隙压力阀,开周围压力阀,施加所需的周围压力。周围压力大小应与工程的实际荷载相适应,并尽可能使最大周围压力与土体的最大实际荷载大致相等。也可按 100、200、300、400kPa 施加。

6 旋转手轮,同时转动活塞,当轴向测力计有微读数时表示活塞已与试样帽接触。然后将轴向测力计和轴向位移计的读数调整到零位。

4.3.2 固结不排水剪试验(测孔隙压力, $\overline{CU}$ 试验)。

1 开孔隙压力阀及量管阀,使压力室底座充水排气,并关阀。将煮沸过的透水板滑入压力室底座上。然后放上湿滤纸和试样,试样上端亦放一湿滤纸及透水板。在其周围贴上 7~9 条浸湿的滤纸条〔宽度为试样直径的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{6}$ 左右〕,滤纸条上端与透水石连接^①。

2 按本规程 4.3.1 之 2 规定将橡皮膜套在试样外。橡皮膜下端扎紧在压力室底座上。

3 用软刷子或双手自下向上轻轻按抚试样,以排除试样与橡皮膜之间的气泡。对于饱和软粘土,可开孔隙压力阀及量管阀,使水徐徐流入试样与橡皮膜之间,以排除夹气,然后关闭。

4 开排水管阀,使水从试样帽徐徐流出以排除管路中气泡,并将试样帽置于试样顶端。排除顶端气泡,将橡皮膜扎紧在试样帽上。

5 降低排水管,使其水面至试样中心高程以下 20~40cm,吸出试样与橡皮膜之间多余水分,然后关排水管阀。

6 按本规程 4.3.1 之 3 和 4 的规定,装上压力室罩并注满水。然后放低排水管使其水面与试样中心高度齐平,并测记其水面读数。关排水管阀。

7 使量管水面位于试样中心高度处,开量管阀(若用零位指

① 如要施加反压力饱和试样,所贴的滤纸条必须中间断开约 1/4 试样高度。或自底部向上贴至 3/4 试样高度处。

示器时用调压筒调整零位指示器的水银面于毛细管指示线),测读传感器,记下孔隙压力计起始读数,然后关量管阀。

8 按本规程 4.3.1 之 5 的规定,施加周围压力,并调整各测力计和位移计读数。

9 打开孔隙压力阀(若用零位指示器,用调压筒先将孔隙压力计读数调至接近该级周围压力大小,然后缓缓打开孔隙压力阀,并同时旋转调压筒,使毛细管内水银面保持不变),测记稳定后的孔隙压力读数,减去孔隙压力计起始读数,即为周围压力与试样的初始孔隙压力 u 。

注:如不测孔隙压力。可以不做本款要求的试验。

10 开排水管阀的同时开动秒表,按 0、0.25、1、4、9min、...时间测记排水管水面及孔隙压力计读数。在整个试验过程中(零位指示器的水银面始终保持在原来位置),排水管水面应置于试样中心高度处。固结度至少应达到 95%(随时绘制排水量 ΔV 与时间平方根或时间对数曲线见图 4.3.2 (a)、(b)或孔隙压力消散度 U 与时间对数曲线)。

11 如要求对试样施加反压力时,则按本规程 4.2.4 规定进行。然后关体变管阀,增大周围压力,使周围压力与反压力之差等于原来选定的周围压力,记录稳定的孔隙压力读数和体变管水面读数作为固结前的起始读数。

12 开体变管阀,让试样通过体变管排水,并按本规程 4.3.2 之 9 及 4.3.2 之 10 规定进行排水固结。

13 固结完成后,关排水管阀或体变管阀,记下体变管或排水管和孔隙压力计的读数。然后转动细调手轮,到测力计读数开始微动时,表示活塞已下试样接触,记下轴向位移计读数,即为固结下沉量 Δh 。依此算出固结后试样高度 h_c 。然后将测力计、垂直位移计读数都调至零。

14 其余几个试样按同样方法安装试样,并在不同周围压力下排水固结。

4.3.3 固结排水试验(CD 试验)。

① 若试样的主固结时间已经掌握,也可不读排水管和孔隙压力的过程读数。

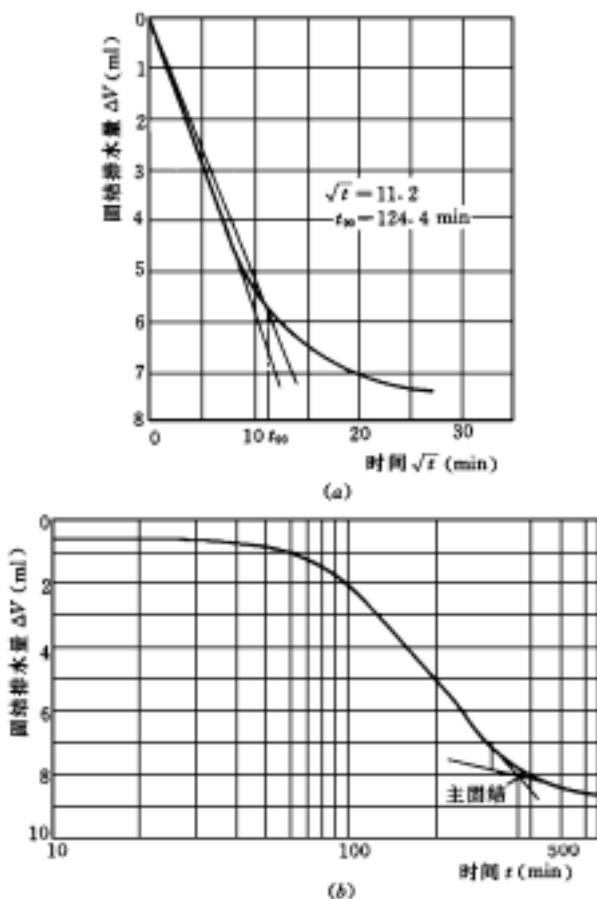


图 4.3.2 排水量与排水时间的关系曲线
(a) 固结排水量与时间平方根曲线; (b) 固结排水量与时间对数曲线

1 试样安装按本规程 4.3.2 之 1~6 规定进行。

2 排水固结按本规程 4.3.2 之 9~14 规定进行。

4.4 试样剪切

4.4.1 试验机的电动机启动之前,应按表 4.4.1 规定将各阀门关闭或开启。

表 4.4.1 各阀门开关状态

试验方法	体变管阀 (18)	排水管阀 (19)	周围压力阀 (14)	孔隙压力阀 (16)	量管阀 (15)
UU 试验	关	关	开	关	关
$\overline{\text{CU}}$ 试验 (测孔隙压力)	关	关	开	开	关
CU 试验	关	关	开	关	关
CD 试验	开	开	开	开	关

注:试验中用体变管或排水管。

4.4.2 试验的剪切应变速率按表 4.4.2 规定选择。

表 4.4.2 剪切应变速率表

试验方法	剪切应变速率 (%/min)	备 注
UU 试验	0.5~1.0	
$\overline{\text{CU}}$ 试验 (测孔隙压力)	0.1~0.5 0.1~0.05 <0.05	粘质土 粘质土 高密度粘性土
CU 试验	0.5~1.0	
CD 试验	0.012~0.003	

4.4.3 开动电动机,合上离合器,进行剪切。开始阶段,试样每产生轴向应变 0.3%~0.4%测记测力计读数和轴向位移计读数各 1 次。当轴向应变达 3%以后,读数间隔可延长为 0.7%~0.8%各测记 1 次。当接近峰值时应加密读数。如果试样为特别硬脆或软弱土的可酌情加密或减少测读的次数。

4.4.4 当出现峰值后,再继续剪 3%~5%轴向应变;若测力计读数无明显减少,则剪切至轴向应变达 15%~20%。

4.4.5 $\overline{\text{CU}}$ 试验(测孔隙压力),测读轴向位移计时应同时测读孔隙压力计的读数;CD 试验,测读轴向位移计时,应同时测读体变管读数或排水管读数。

4.4.6 试验结束后关闭电动机,关周围压力阀, $\overline{\text{CU}}$ 试验(测孔隙压力)应关闭孔隙压力阀;CD 试验,则应关闭孔隙压力阀和体变管阀。然后拔出离合器,倒转手轮,开排气孔,排去压力室内的水,拆

除压力室罩,揩干试样周围的余水,脱去试样外的橡皮膜,描述破坏后形状,称试样质量,测定试验后含水率。

对于 39.1mm 直径的试样,宜取整个试样烘干;61.8mm 和 101mm 直径的试样允许切取剪切面附近有代表性的部分土样烘干。

4.4.7 对其余几个试样,在不同周围压力下以同样的剪切应变速率进行试验。

5 计算和制图

5.1 计算

5.1.1 试样的高度、面积、体积及剪切时的面积计算公式列于表 5.1.1。

表 5.1.1 高度、面积、体积计算表

项 目	起始	固 结 后		剪切时校正值
		按实测固结下沉	等应变简化式	
试样高度 (cm)	h_0	$h_c = h_0 - \Delta h_c$	$h_c = h_0 \times \left[1 - \frac{\Delta V}{V_0} \right]^{1/3}$	
试样面积 (cm ²)	A_0	$A_c = \frac{V_0 - \Delta V}{h_c}$	$A_c = A_0 \times \left[1 - \frac{\Delta V}{V_0} \right]^{2/3}$	$A_a = \frac{A_0}{1 - 0.01 \varepsilon_1}$ (不固结不排水剪) $A_a = \frac{A_c}{1 - 0.01 \varepsilon_1}$ (固结不排水剪) $A_a = \frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - \Delta H_i}$ (固结排水剪)
试样体积 (cm ³)	V_0	$V_c = h_c A_c$		

表中 Δh_c —— 固结下沉量,由轴向位移计测得,cm;

ΔV —— 固结排水量(实测或试验前后试样质量差换算),
cm³;

ΔV_i —— 排水剪中剪切时的试样体积变化,按体变管或排水
水管读数求得,cm³;

ε_1 ——轴向应变, % $\left\{ \begin{array}{l} \text{不固结不排水剪中的 } \varepsilon_1 \text{ 等于 } \frac{\Delta h_i}{h_0}, \text{ 固结} \\ \text{不排水剪及固结排水剪中的 } \varepsilon_1 \text{ 等于 } \frac{\Delta h_i}{h_c} \end{array} \right\};$

Δh_i ——试样剪切时高度变化, 由轴向位移计测得 (cm),
为方便起见, 可预先绘制 $\Delta V \sim h_c$ 及 $\Delta V \sim A_c$ 的关系线备用。

5.1.2 按式(5.1.2)计算主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$):

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (5.1.2)$$

式中 σ_1 ——大主应力, kPa;

σ_3 ——小主应力, kPa;

C ——测力计率定系数, N/0.01mm;

R ——测力计读数, 0.01mm;

A_a ——试样剪切时的面积, cm^2 ;

10——单位换算系数。

5.1.3 按式(5.1.3)计算有效主应力比 σ'_1 / σ'_3 :

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma'_3} + 1 \quad (5.1.3)$$

式中 $\sigma'_1 = \sigma_1 - u$, kPa;

$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$, kPa;

σ'_1 、 σ'_3 ——有效大主应力和有效小主应力, kPa;

σ_1 、 σ_3 ——大主应力与小主应力, kPa;

u ——孔隙水压力, kPa。

5.1.4 按式(5.1.4-1)、式(5.1.4-2)计算孔隙压力系数 B 和 A :

$$B = \frac{u}{\sigma_3} \quad (5.1.4-1)$$

$$A = \frac{u_d}{B(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (5.1.4-2)$$

式中 u ——试样在周围压力下产生的初始孔隙压力, kPa;

u_d ——试样在主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 下产生的孔隙压力, kPa。

5.2 制图

5.2.1 根据需要分别绘制主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ε_1 的关系曲线(图 5.2.1-1);有效主应力比 (σ'_1/σ'_3) 与轴向应变 ε_1 的关系曲线(图 5.2.1-2);孔隙压力 u 与轴向应变 ε_1 的关系曲线(图 5.2.1-3);用 $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \right)$ 与 $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \left(\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \right)$ 作坐标的应力路径关系曲线(图 5.2.1-4)。

5.2.2 破坏点的取值。以 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或 σ'_1/σ'_3 的峰点值作为破坏点。如 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和 σ'_1/σ'_3 均无峰值,应以应力路径的密集点或按一定轴向应变(一般可取 $\varepsilon_1 = 15\%$, 经过论证也可根据工程情况选取破坏应变)相应的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或 σ_1/σ_3 作为破坏强度值。

5.2.3 绘制强度包线。

1 对于不固结不排水剪切试验及固结不排水剪切试验,以法向应力 σ 为横坐标,剪应力 τ 为纵坐标。在横坐标上以 $\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2}$ 为圆心, $\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2}$ 为半径(f 注脚表示破坏时的值),绘制破坏总应力圆后,作诸圆包线。该包线的倾角为内摩擦角 φ_u 或 φ_{cu} 。包线在纵轴上的截距为粘聚力 c_u 或 c_{cu} 。见图 5.2.3-1 及图 5.2.3-2。

2 在固结不排水剪切中测孔隙压力,则可确定试样破坏时的有效应力。以有效应力 σ' 为横坐标,剪应力为 τ 为纵坐标。在横坐标轴上以 $\frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2}$ 为圆心,以 $\frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{2}$ 为半径,绘制不同周围压力下的有效破坏应力圆后,作诸圆包线,包线的倾角为有效内摩擦角 φ' ,包线在纵轴上的截距为有效粘聚力 c' 。

3 在排水剪切试验中,孔隙压力等于零,抗剪强度包线的倾角和在纵轴上的截距分别以 φ_d 和 c_d 表示,如图 5.2.3-3。

4 如各应力圆无规律,难以绘制各圆的强度包线,可按应力

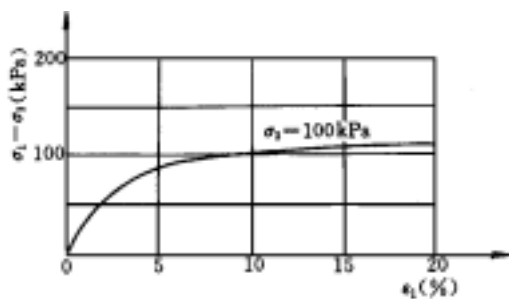


图 5.2.1—1 主应力差与轴向应变关系曲线

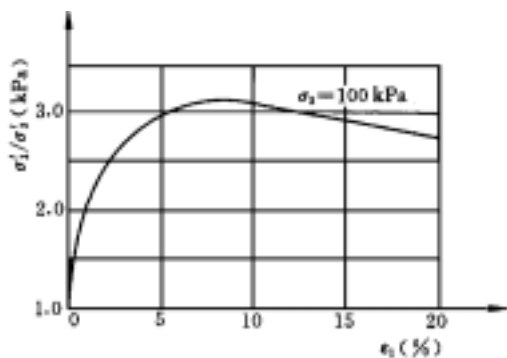


图 5.2.1—2 有效主应力比与轴向应变关系曲线

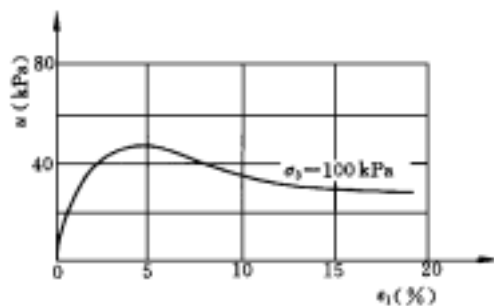


图 5.2.1—3 孔隙压力与轴向应变关系曲线

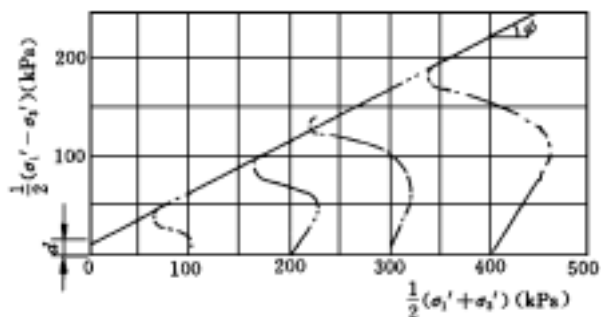


图 5.2.1—4 应力路径曲线(正常固结粘土)

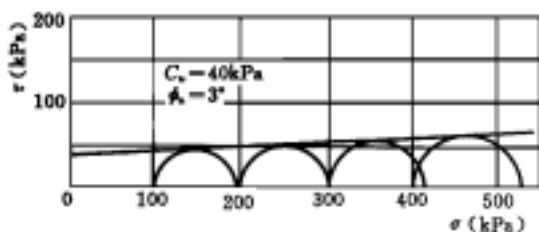


图 5.2.3—1 不固结不排水剪强度包线

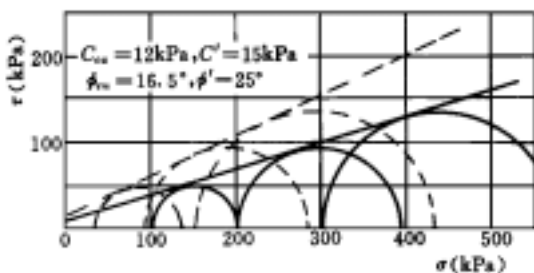


图 5.2.3—2 固结不排水剪强度包线

路径取值,即以 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right)$ 作纵坐标, $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)$ 作横坐标,绘制应力圆,作通过各圆之圆顶点的平均直线。见图

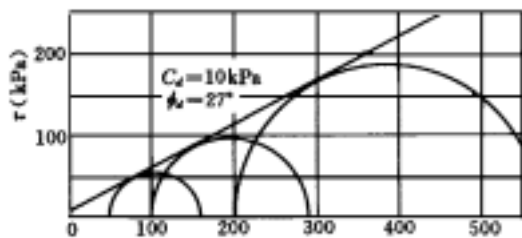


图 5.2.3—3 固结排水剪强度包线 σ (kPa)

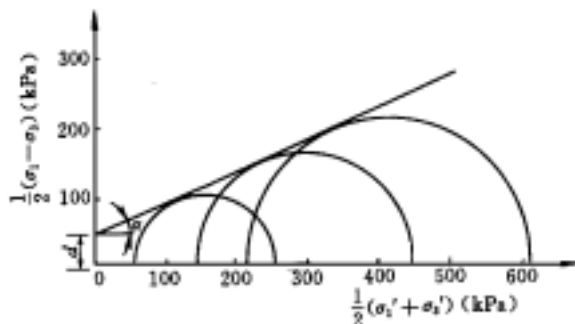


图 5.2.3—4 应力路径包线

5.2.3—4。根据直线的倾角及在纵坐标上的截距,按下列两式计算 φ' 和 c' :

$$\varphi' = \sin^{-1} \tan \alpha \quad (5.2.3-1)$$

$$c' = \frac{d}{\cos \varphi} \quad (5.2.3-2)$$

式中 α ——平均直线的倾角($^\circ$);

d ——平均直线在纵轴上的截距, kPa。

5.3 变形参数的整理

5.3.1 E 、 μ 变形参数的整理按本规程“附 a”的方法进行。

5.3.2 E 、 B 变形参数的整理按本规程“附 b”的方法进行。

6 记 录

6.0.1 本试验的记录格式如表 6.0.1—1、表 6.0.1—2、表 6.0.1—3。

表 6.0.1—1 三轴压缩试验记录表

工程名称 _____ 试 验 者 _____
 土样编号 _____ 计 算 者 _____
 土样说明 _____ 校 核 者 _____
 试验方法 _____ 试验日期 _____

试 样 状 态				周围压力 σ_3 (kPa)	
	起始值	固结后	剪切后		
直径 D (cm)				反压力 u_0 (kPa)	
高度 h (cm)				周围压力下的孔隙压力 u (kPa)	
面积 A (cm ²)				孔隙压力系数 $B = \frac{u}{\sigma_3}$	
体积 V (cm ³)				破坏应变 ε_f (%)	
质量 m (g)				破坏主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kPa)	
密度 ρ (g/cm ³)				破坏大主应力 σ_{1f} (kPa)	
干密度 ρ_d (g/cm ³)				破坏孔隙压力系数 $\bar{B}_f = \frac{u_f}{\sigma_{1f}}$	
试样含水率					
	起 始 值		剪切后		
盒 号				相应的有效大主应力 σ'_1 (kPa)	
盒质量 (g)				相应的有效大主应力 σ'_3 (kPa)	
盒加湿土质量 (g)				最大有效主应力比 $\left[\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} \right]_{\max}$	
湿土质量 (g)				孔隙压力系数 $A_f = \frac{u_{df}}{B(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$	
盒加干土质量 (g)					
干土质量 (g)					
水质量 (g)					
含水率 ω (%)					
饱和度 S_r					
试样破坏情况的描述	呈鼓状破坏 				
备 注					

表 6.0.1—2 三 轴 压 缩 试 验 记 录 表

土样编号 _____
周围压力 _____
试 验 者 _____

计 算 者 _____
校 核 者 _____
试验日期 _____

加反压力过程							说明 (检验 结果)	固 结 过 程						说 明	
时间	周围压力 σ_3 (kPa)	反压力 u_o (kPa)	孔隙压力 u (kPa)	孔隙压力增 量 Δu (kPa)	试样体积变化			时间 (min)	量 管		孔隙压力		体变管		
					读数 (cm^3)	体变量 (cm^3)			读数	排水量	读数 (kPa)	压力值 (kPa)	读数 (cm^3)		体变值 (cm^3)

表 6.0.1—3 三 轴 压 缩 试 验 记 录 表

土样编号 _____
试验方法 _____
试验日期 _____

试验者 _____
计算者 _____
校核者 _____

周围压力： 剪切应变速率： 测力计率定系数：						kPa mm/min N/0.01mm		固结下沉量：Δ <i>h</i> = cm 固结后高度： <i>h_c</i> = cm 固结后面积： <i>A_c</i> = cm ²									
轴向变形 读数 Δ <i>h_i</i> (0.01 mm)	轴向应变 $\varepsilon_i = \frac{\Delta h_i}{h_c}$ (%)	试样校正 后面积 $A_s = \frac{A_c}{1 - \varepsilon_i}$ (cm ²)	测力计 表读数 <i>R</i> (0.1mm)	主应力差 (<i>σ₁</i> − <i>σ₃</i>) = $\frac{RC}{A_s} \times 10$ (kPa)	大主应力 <i>σ₁</i> = (<i>σ₁</i> − <i>σ₃</i>) + <i>σ₃</i> (kPa)	孔隙压力		试样体积变化				有效大 主应力 <i>σ'₁</i> (kPa)	有效小 主应力 <i>σ'₃</i> (kPa)	有效主 应力比 $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ (kPa)
						读数	压力值 (kPa)	排水管		体积变化							
										读数	排出 水量 (cm ²)	读数	体变量 (cm ³)				

附 a E 、 μ 模型参数的资料整理

a.1 切线弹性模量和切线泊松比的计算

a.1.0.1 按下列两式计算切线弹性模量:

$$E_t = Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \times \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (a.1.0.1-1)$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (a.1.0.1-2)$$

式中 E_t ——切线弹性模量, kPa;

σ_3 ——周围压力, kPa;

P_a ——大气压力, kPa;

R_f ——破坏比, 数值小于 1;

φ ——土的内摩擦角, (°);

c ——土的粘聚力, kPa;

K 、 n ——试验常数。

a.1.0.2 切线泊松比按下列两式计算:

$$\mu = \frac{G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)}{(1 - A)^2} \quad (a.1.0.2-1)$$

$$A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]} \quad (a.1.0.2-2)$$

式中 G 、 F 、 D ——试验常数;

其余符号见本规程式(a.1.0.1)

a.2 应力应变的计算

a.2.0.1 按下列三式计算体积应变和侧向应变:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c} \quad (a.2.0.1-1)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (a.2.0.1-2)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_1}{2} \quad (a.2.0.1-3)$$

式中 ε_v ——试样在剪切过程中的体积应变，%；

ΔV ——试样的剪切过程中的体积变化， cm^3 ；

V_c ——试样固结后的体积， cm^3 ；

ε_1 ——轴向应变，%；

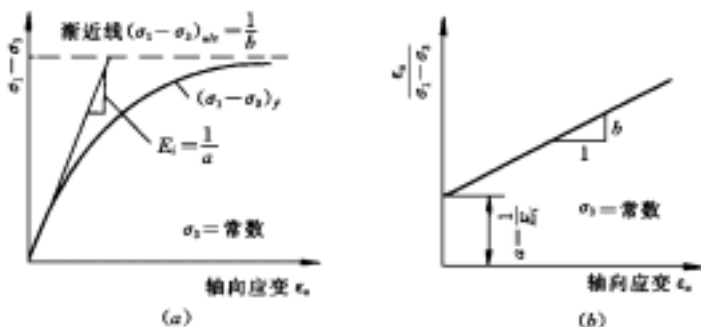
ε_3 ——侧向应变，%。

a.2.0.2 主应力差的计算按本规程式(5.1.2)进行。

a.3 试验常数的求得

a.3.0.1 绘制应力—应变关系曲线。

根据康德纳的建议，在 σ_3 为常量下，三轴试验的应力应变关系近似双曲线关系，如附图 b3.0.1 (a)。



附图 a.3.0.1 三轴试验的应力应变关系

(a) 双曲线应力应变关系；(b) 变换纵坐标的双曲线

双曲线关系式：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (a.3.0.1-1)$$

变换纵坐标，如图 a.3.0.1(b)：

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 \quad (a.3.0.1-2)$$

式中 a ——初始切线模量 E_i 的倒数；

b ——主应力差渐近值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的倒数。

由 a 和 b 即可求得初始切线模量和主应力差的渐近值。

按式(a.3.0.1—3)计算破坏比 R_f ：

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (a.3.0.1-3)$$

式中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ——主应力差的破坏值, kPa；

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ ——主应力差的渐近值, kPa。

a.3.0.2 绘制 E_i 和 σ_3 的关系曲线。

根据筒布对压缩试验的研究, 初始切线模量与固结压力有以下关系：

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (a.3.0.2)$$

式中 p_a ——大气压力, kPa。

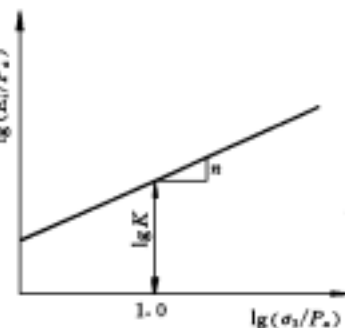
K 、 n 由 $\lg E_i \sim \lg \sigma_3$ 曲线(附图 a.3.0.2)确定。

a.3.0.3 绘制轴向应变与侧向应变关系曲线。

假定轴向应变 ε_a 与侧向应变 ε_r 成双曲线关系(附图 a.3.0.3), 即：

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_r}{f + D\varepsilon_r} \quad (a.3.0.3-1)$$

变换纵坐标, 如图 a.3.0.3 (b)：



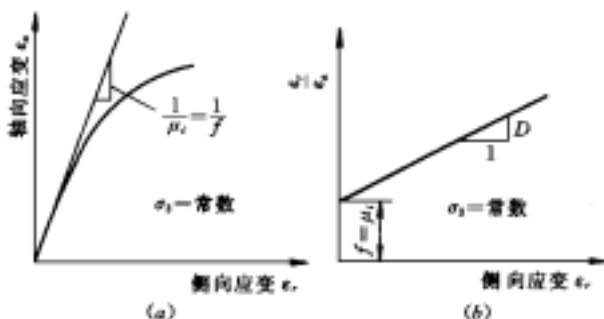
附图 a.3.0.2 $\lg E_i \sim \lg \sigma_3$ 关系曲线

$$\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} = f + D\varepsilon_r \quad (a.3.0.3-2)$$

式中 f ——初始切线泊松比；

D ——轴向应变渐近值的倒数。

从图 a.3.0.3 中求得 f 、 D 值。



附图 a.3.0.3 轴向应变与侧向应变关系

(a) 双曲线主应变关系; (b) 变换纵坐标的双曲线

a.3.0.4 绘制 μ_i 与 $\lg \sigma_3$ 关系曲线(附图 a.3.0.4):

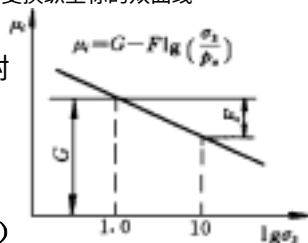
$$\mu = G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)$$

(a.3.0.4)

式中 μ_i ——不同 σ_3 作用下的初始泊松比;

G, F 由 $\mu_i \sim \lg \sigma_3$ 关系曲线求得。

式(a.1.0.1)和式(a.1.0.2)中共有 8 个参数; $K, n, R_f, c, \varphi, G, D, F, c$ 和 φ 根据库伦—摩尔包线确定, 如本规程图 5.2.3—3。



附图 a.3.0.4 $\mu_i \sim \lg \sigma_3$ 关系曲线

附 b E, B 模型参数的资料整理

b.1 切线弹性模量和切线体积模量的计算

b.1.0.1 切线弹性模量按下列两式计算:

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \times \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \varphi)}{2 c \cos \varphi + 2 \sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (\text{b.1.0.1-1})$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (\text{b.1.0.1-2})$$

式中 E_t ——切线弹性模量, kPa;
 σ_3 ——周围压力, kPa;
 P_a ——大气压力, kPa;
 R_f ——破坏比, 数值小于 1;
 φ ——土的内摩擦角, ($^\circ$);
 c ——土的粘聚力, kPa;
 K 、 n ——试验常数。

b.1.0.2 切线体积模量按式(b.1.0.2)计算:

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (\text{b.1.0.2})$$

式中 B_t ——切线体积模量, kPa;
 K_b 、 m ——试验常数;
 其余符号见式(b.1.0.1)。

b.2 主应力差、体积应变和侧向应变的计算

b.2.0.1 主应力差、体应变和侧向应变的计算, 见本规程“附 a”式(5.1.2)和式(a.2.0.1)。

b.3 试验常数的推算

b.3.0.1 绘制应力—应变关系曲线。

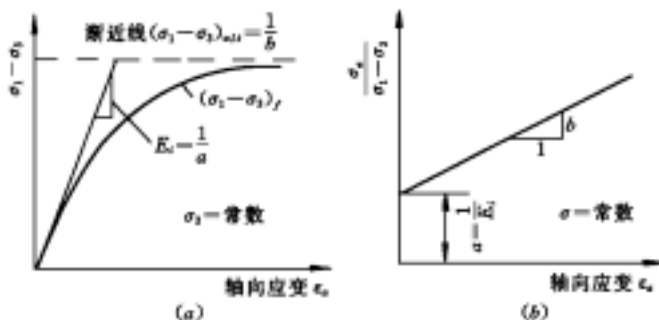
根据康德纳的建议, 在 σ_3 为常量下, 三轴试验的应力应变关系近似双曲线关系。如附图 b.3.0.1 (a)。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (\text{b.3.0.1-1})$$

变换纵坐标, 如附图 b.3.0.1 (b)。

$$\frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_a \quad (\text{b.3.0.1-2})$$

取应力水平 70% 和 95% 两点的连线, 求得 a 和 b 。 a 为直线在纵坐标上的截距; b 为直线的斜率。由 a 和 b 即可求得初始切线模量和主应力差的渐近线(附图 b.3.0.1)。



附图 b.3.0.1 三轴试验的应力应变关系

破坏比按式(b.3.0.1-3)计算:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (\text{b.3.0.1-3})$$

式中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ——主应力差的破坏值, kPa;

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ ——主应力差的渐近值, kPa。

b.3.0.2 绘制 E_i 和 σ_3 的关系曲线。

根据简布对压缩试验的研究, 初始切线模量与固结压力有以下关系:

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (\text{b.3.0.2})$$

在双对数坐标纸上绘制 $E_i/p_a \sim \sigma_3/p_a$ 关系曲线(附图 b.3.0.2)确定 K、n 值。

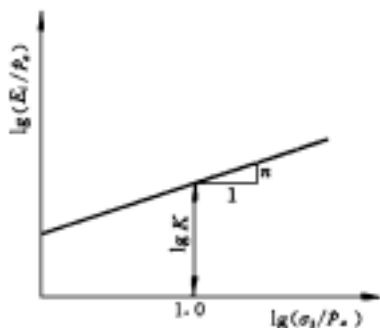
b.3.0.3 初始切线体积模量按式(b.3.0.3)计算:

$$B_i = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3 \varepsilon_v} \quad (\text{b.3.0.3})$$

式中 B_i ——初始切线体积模量, kPa;

ε_v ——与应力水平对应的体积应变, %。

取值原则: 若土样的体应变曲线在强度值的 70% 以前未出现峰值, 则取 $0.7 (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 应力水平及相应的体应变 ε_v ; 对于体应变曲线在强度值的 70% 之前出现峰值, 则体应变应取峰值及取对应的应力水平。



附图 b.3.0.2 $\lg E_i \sim \lg \sigma_3$

关系曲线

b.3.0.4 在双对数坐标上绘制 $B_i/p_a \sim \sigma_3/p_a$ 关系曲线。见图 b.3.0.4。

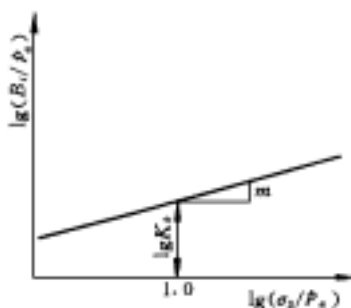
b.3.0.5 式 (b.1.0.1) 和 式 (b.1.0.2)中共有 7 个参数, K 、 n 、 c 、 φ 、 R_f 、 K_b 、 m_0 、 c 和 φ 根据摩尔—库仑包线确定。

当无粘性土的摩尔包线呈弯曲时,应将每一周围压力下的 φ 值求出,绘制 $\varphi \sim \lg \sigma_3$ 曲线,并按式 (b.3.0.5) 计算 φ 值:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/p_a) \quad (b.3.0.5)$$

式中 φ_0 ——当 σ_3/p_a 为 1 时的 φ 值, (°);

$\Delta\varphi$ ——当 σ_3 增加 10 倍时 φ 的减小量, (°)。



附图 b.3.0.4 $\lg B_i \sim \lg \sigma_3$ 关系曲线

试样采取、制作、试验过程图片说明









































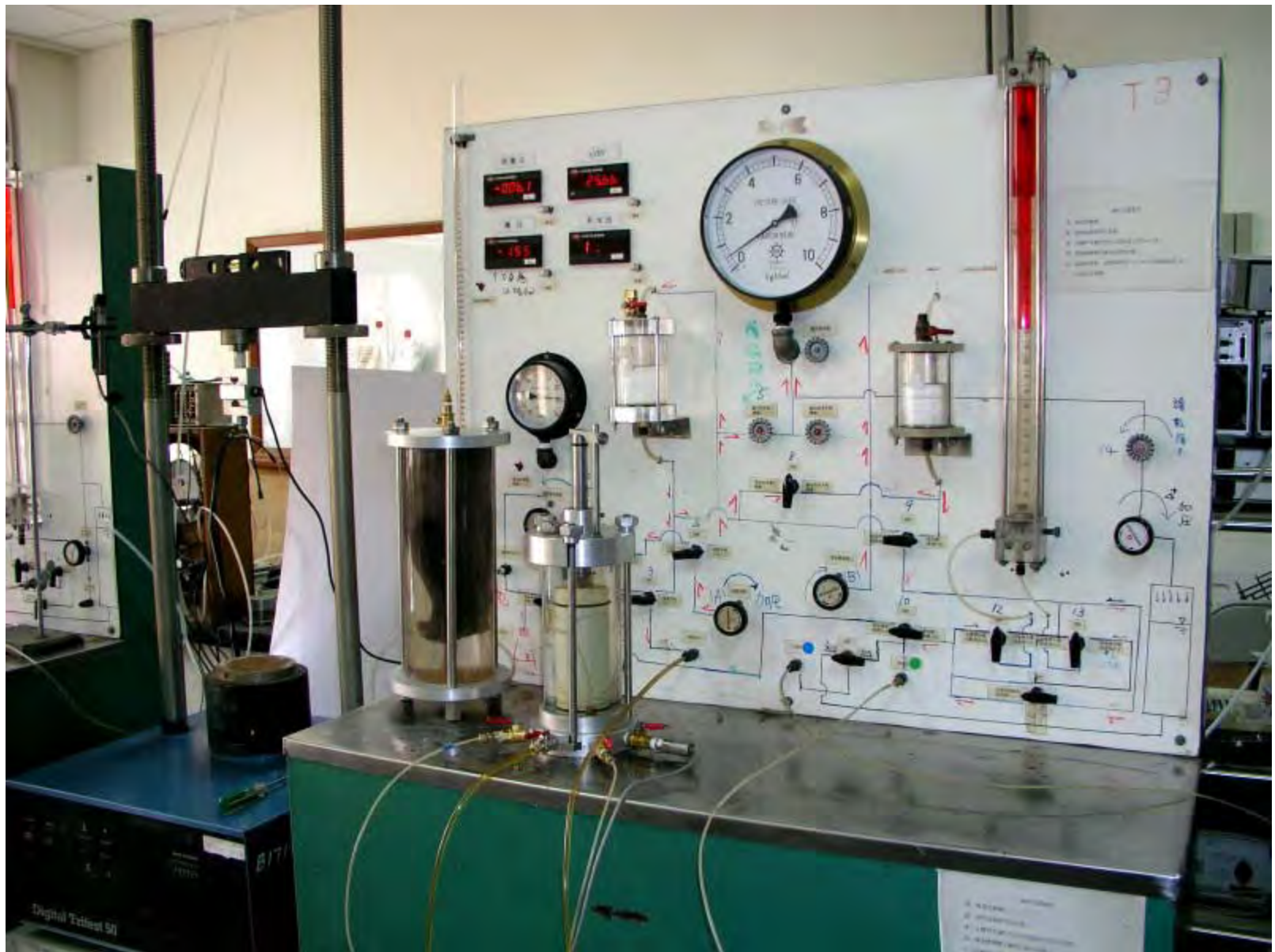




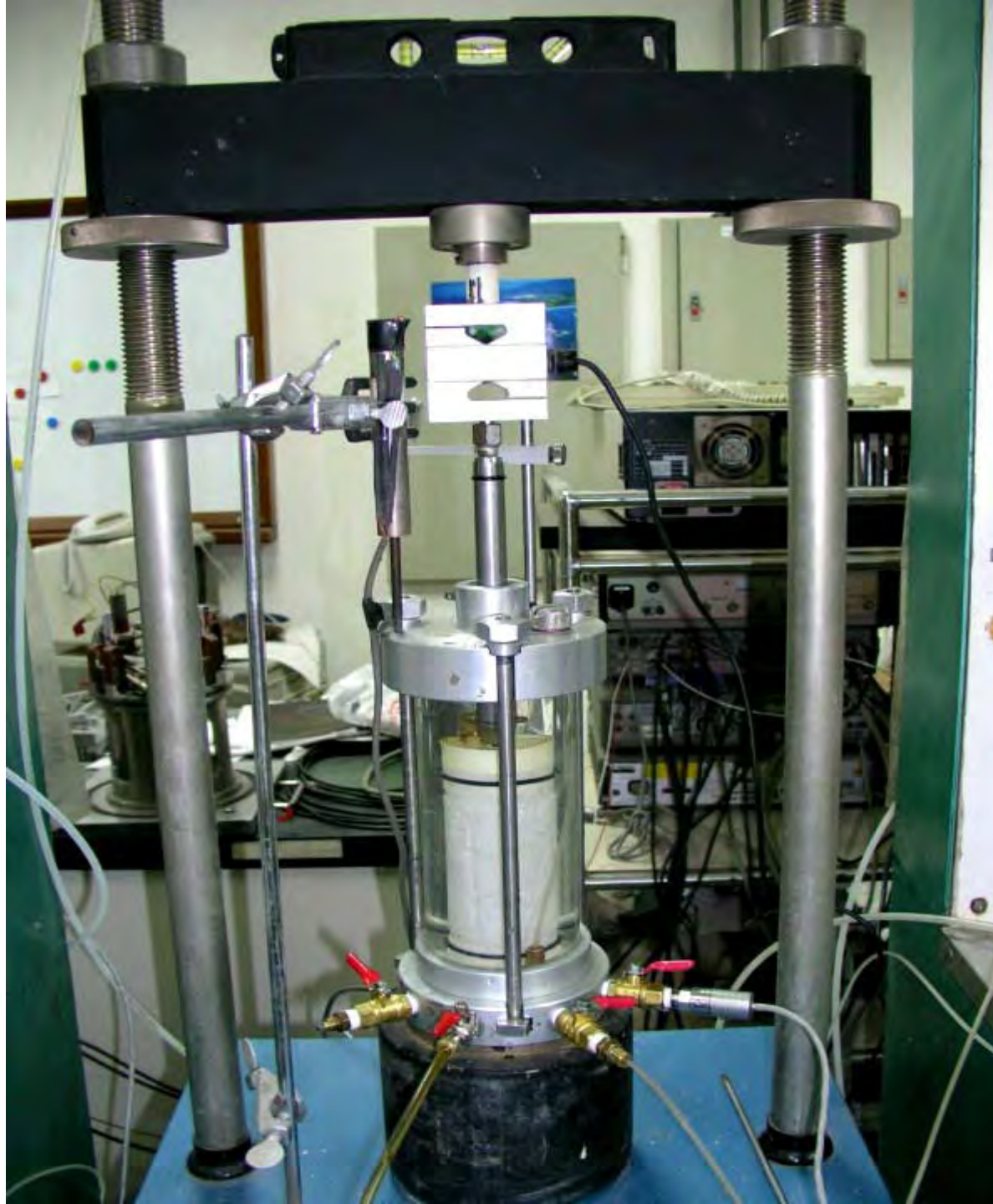














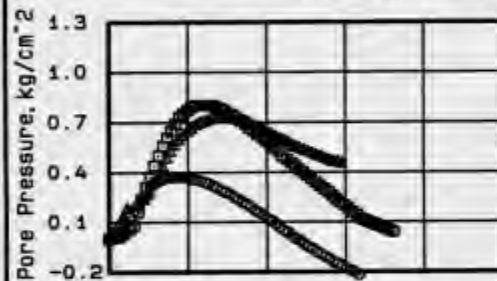




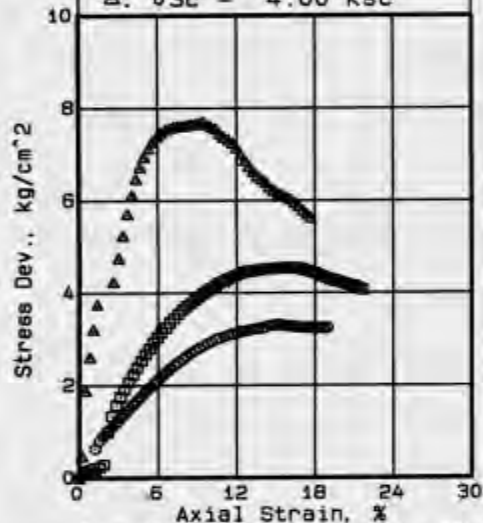
TRIAXIAL COMPRESSION TEST REPORT

Test No.: TBN1

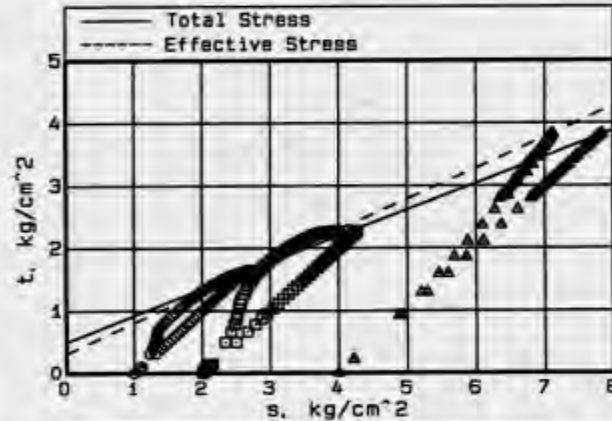
Test Type: CU



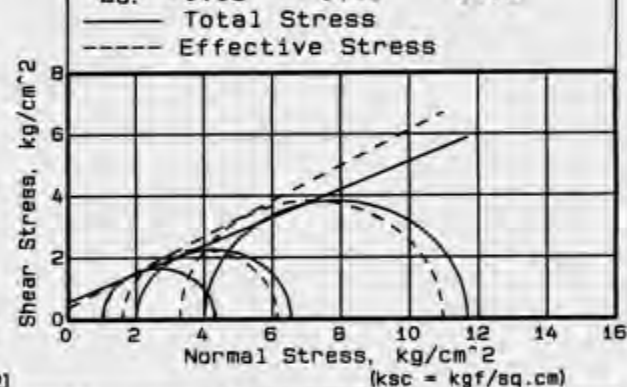
○: $\sigma_{3c} = 1.00$ ksc
 □: $\sigma_{3c} = 2.00$ ksc
 △: $\sigma_{3c} = 4.00$ ksc



$(s = (\sigma_1 + \sigma_3)/2, \quad t = (\sigma_1 - \sigma_3)/2)$



○, ksc □, ksc △, ksc
 σ_3 : 1.00 2.00 4.00
 σ_1 : 4.30 6.53 11.67
 Δu : -0.03 0.40 0.72



Sample No.	○	□	△
Nat. Moist. %	23.42	22.81	22.37
Dry Den., T/cu.m	1.656	1.722	1.680
Diameter, cm	5.08	5.08	5.13
Height, cm	10.20	10.20	10.20
Void Ratio	0.624	0.562	0.602
Cu, kg/sq.cm	0.55	C', kg/sq.cm	0.36
ϕ_u , deg.	25.09	ϕ' , deg.	29.68
Soil Type: yellow silty clay			

Bore Hole No.: TBN1
 Depth, m.:
 Spe. Gravity, $G_s = 2.69$
 Liq. Limit, LL =
 Pla. Index, PI =
 Tested by: CWC, JSW, SYC
 Checked by: S.H.N.
 Date: 01/03/05