

土动力学实验技术的几个问题

——张广云先生讲学报告选登

Several problems about Experimental Technique for soil Dynamics

——From Mr. Clarence K. Chan's lecture

一、土动三轴仪及测试技术

三轴试验是对工程十分有用的一种基本测试手段。通常是在三轴室上部测量试样的轴向变形,在试样中部的侧面上测量侧向变形。由于试样两端与上盖板和底座之间的摩擦力以及接触面的变形,使测量结果产生误差。因此,可在试样的中间一段,测量三个部位的侧向变形。轴向变形也可以将LVDT差动变压器式位移传感器安装到三轴室内,测量试样中部的轴向变形,如图1所示。

图2是剪切模量 G 与剪应变 γ 之间的关系。通常剪应变小于 10^{-3} 以下,可用共振柱试验做,大于 10^{-2} 以上可用周期三轴试验求出 G 。如果周期三轴试验做得好,则可求出小于 10^{-2} 应变范围内的 G 。于是,共振柱试验与周期三轴试验求出的 G - γ 曲线可以连接起来。

普通的周期三轴仪在 10^{-2} 应变范围以下做出的 G 往往偏低,如图2中的一段虚线所示。为了做好在 10^{-2} 应变范围以下的 G ,可在上盖板上安装两个非接触式位移传感器,量程为2.5毫米,其装置图如图3a所示。三轴室的装置如图1、图3b所示。在图3b中,可清楚看到

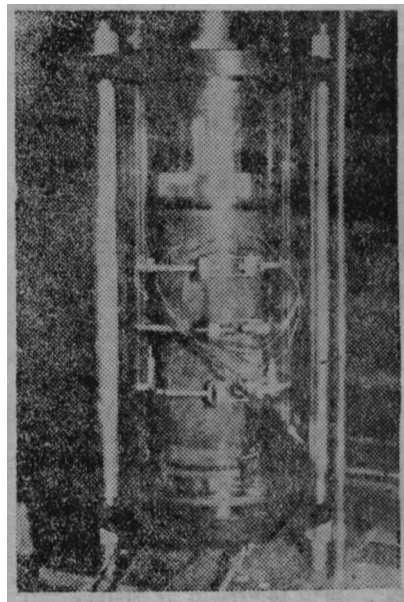


图1

〔编者按〕 张广云先生是美国加州大学伯克利分校土木工程系研究工程师,擅长土动力学的研究,特别是土动力学试验和试验仪器的研究方面,具有丰富的经验。

张广云先生于1982年9月6日~10日应邀来我所讲学,共分五讲,详细论述了土动力学有关现场和室内试验的几个技术问题,他介绍了野外测量土的动力性质的方法,其重点是野外跨孔法试验。他还介绍了有关共振柱试验仪,扭剪仪,单剪仪等各种试验仪器。最后,对如何进行土动三轴试验,提出了自己的看法。由于其中有些对我国当前开展土动力学试验研究颇有价值,限于篇幅,这里仅选登部分内容,供参考。

——本刊编辑部

两个伸向三轴室的非接触式位移传感器。在试样的上盖板上安装两个磁铁,正对着传感器的线圈。这种非接触式位移传感器可测量小变形。若要测量大变形,可以把它抽出来,仍然用LVDT位移传感器测量。

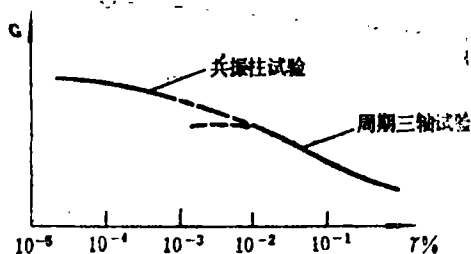


图 2

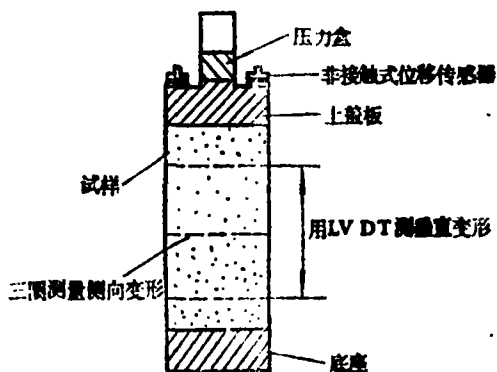


图 3 (a)



图 3 (b)

从图 3 a 可看出, 试样中部安装了三圈测量侧向变形的元件, 用 LVDT 位移传感器测量侧向变形。其装置如图 4 所示。

从图 4 可看出, 在橡皮膜外有几个直径为 1.9 英寸的塑料圈。用一根钢丝绳将它们串起来, 与位移传感器分别组成三个环圈, 固定在试样的中部。

美国的土动三轴仪多数是用伺服控制系统加载, 也有一些是用气动加载的。

图 5 是电-液闭环系统示意图。当指令信号输送到比较器之后, 它可以控制伺服阀的开关, 从而控制液压源, 对激振器施加压力。这时, 试样上部的荷载传感器和 LVDT 位移传感器将有信号输出, 这些输出信号又经反馈转换器而输送到比较器。比较器将反馈信号与指令信号进行比较并将误差信号放大, 改变电流, 使它驱动伺服阀。伺服阀运转就可以修正误差, 使波形保持正弦波。大多数这样的系统都用液压控制伺服阀和驱动装置。

这种闭合回路系统非常灵活, 特别是在 0 ~ 100 赫兹的频率范围内。因为这里有高压液

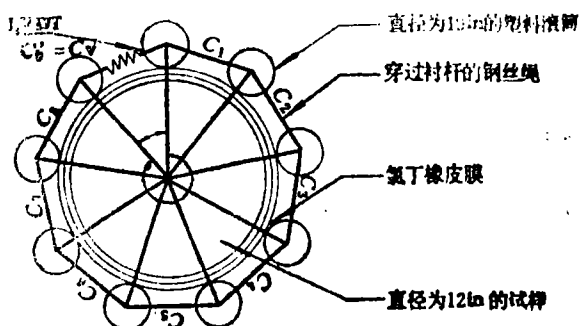


图4

体, 所以, 施加的压力荷载较大, 液压一般可达200公斤/厘米²。

但是, 在这种闭环控制系统中, 试样是作为回路中的一个单元。当试样的变形较小时, 试验结果比较好。在试样接近于破坏时, 试样的变形增大, 变形速率加快。这时荷载波形变小。在调节伺服系统时, 就要在试验前调节试样的模量。可是, 当试样变软时, 模量则低, 伺服系统将失去调节的作用。在这种情况下, 若不知荷载 σ_d , 就无法绘制试验曲线。因此, 必须想办法使 σ_d 保持常数。为此, 除了在荷载传感器上加橡皮垫外, 还可在伺服阀与激振器之间增设两个稳压罐(图6)。使之既可调节压力, 又可当蓄压器使用。

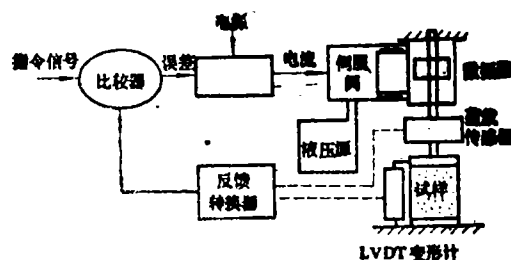


图5 电-液闭环系统示意图

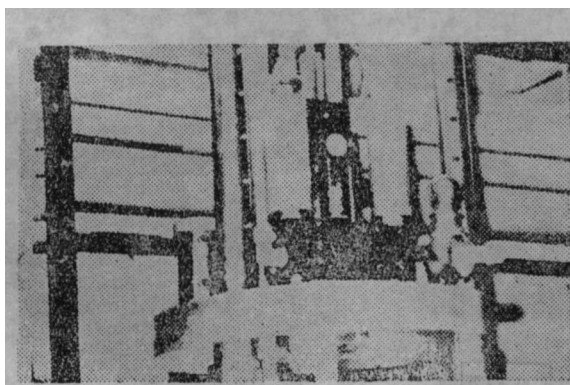


图6

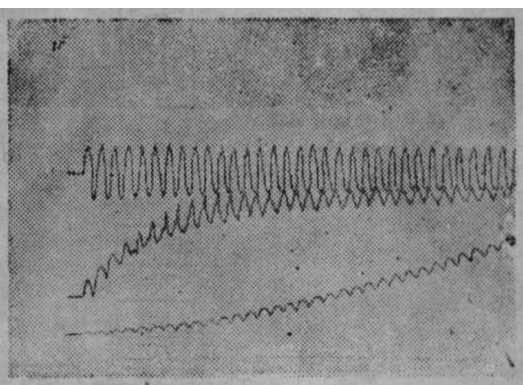


图7

图7是加了稳压罐之后的试验记录波形。下面是动荷载波形, 中间是孔隙水压力波形, 上面是轴向变形的波形。从波形图看出, 加了稳压罐之后, 荷载波形的性能得到改善, 但还有逐渐变小的趋势, 有待进一步改进。

美国MTS公司制造了由一台计算机控制的土动三轴装置, 如图8所示。由于使用计算机, 就可以做到多回路, 试验可以连续进行, 荷载波形也比较稳定, 但造价昂贵。若要降低费用, 又不想用油压作动力, 则可考虑采用气动伺服装置。图9就是这种装置的示意图。

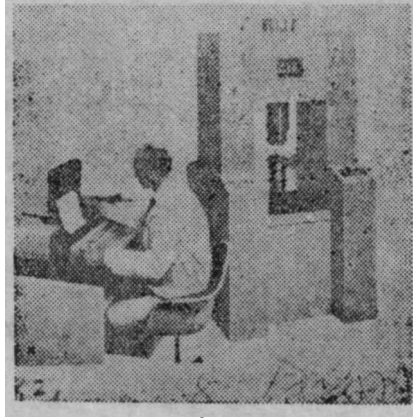


图 8

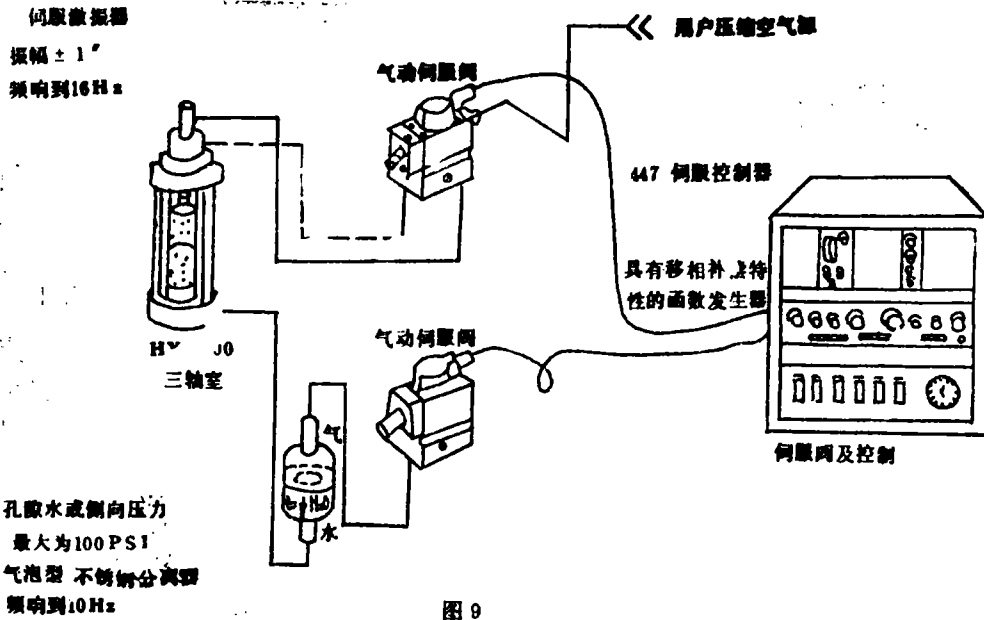


图 9

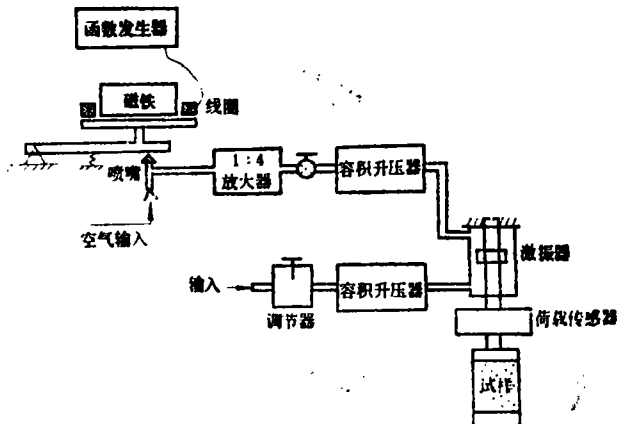


图 10

气动伺服控制装置的体积小, 造价便宜, 气压系统压力低, 只有 8 公斤/厘米^2 , 仅仅只有液压系统压力的 $\frac{1}{30}$ 。

张广云先生用电-气转换器代替过去用驱动马达带动凸轮等机械部分, 设计了一台新的电-气土动三轴仪, 如图10。

在CKC电-气周期加载系统中, 用一个函数发生器产生一个信号, 该信号输送到电-气转换器的线圈中, 线圈产生感应磁场, 于是就产生一个阻止气流自喷嘴流出的向下推力, 从而增大了输出压力。电-气转换器是一个力的平衡装置。由于作用在喷嘴面积上输出压力与输入线圈产生的力相平衡, 后者是由输入电流和永久磁场相互作用形成的。在低于 1 公斤/厘米^2 的压力范围内, 输出压力与直流电流成正比。然后, 利用气动放大器将低压力升高, 并使有限的流量增大。这种放大器是一个气动平衡装置, 其隔膜面积比为 $1:4$ 。放大后的气流经过调节器, 进到容积升压器, 进一步把压力升高一倍, 从而转换为具有大流量的输出压力, 并施加到激振器上。

图11、12、13是CKC电-气土动三轴仪中的三个主要部件的示意图。

图14是CKC电-气式土动三轴仪的照片。它的体积较小。左边是加载系统和三轴室, 右边为控制和测量记录系统。该仪器做出的实验记录波形如图15所示。

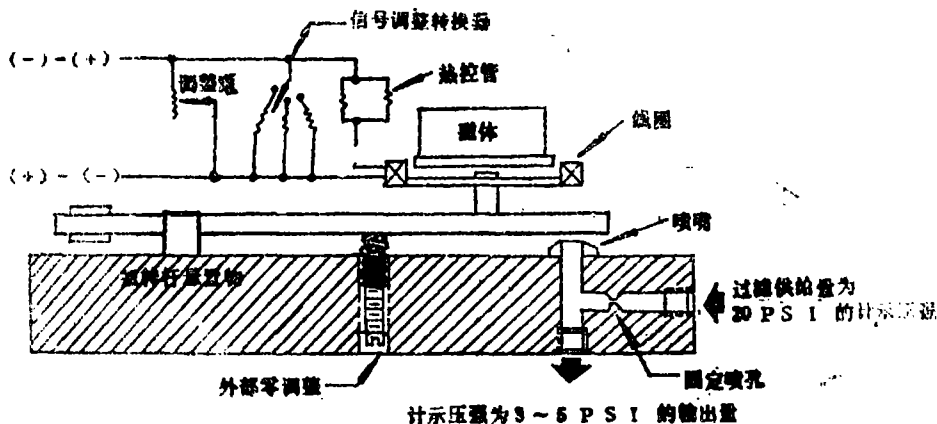


图11

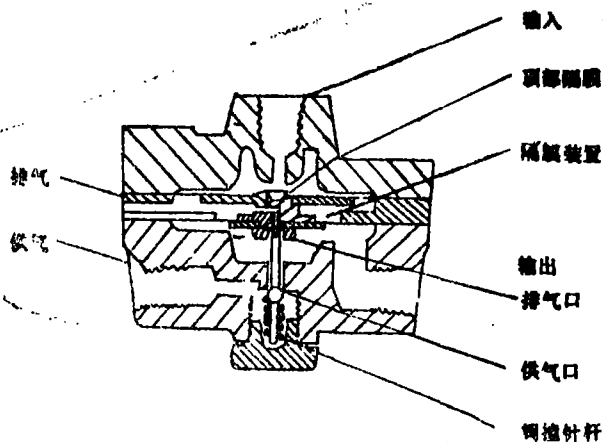


图12

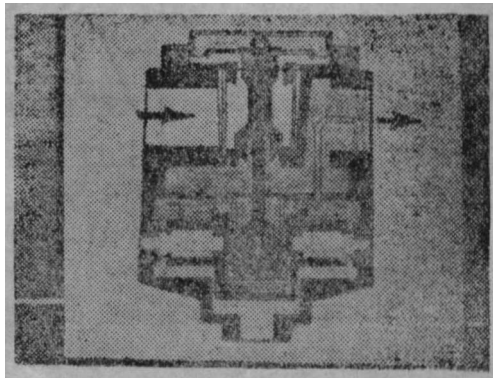


图13

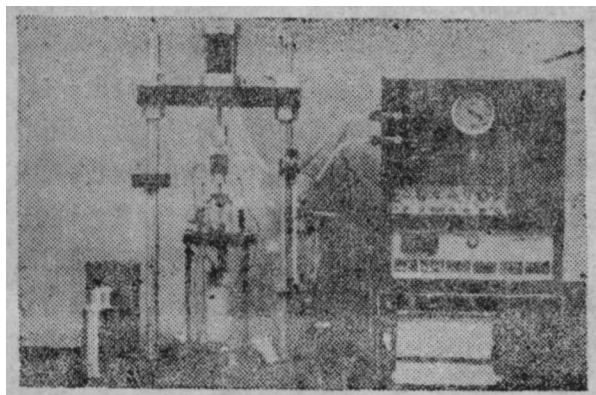


图14

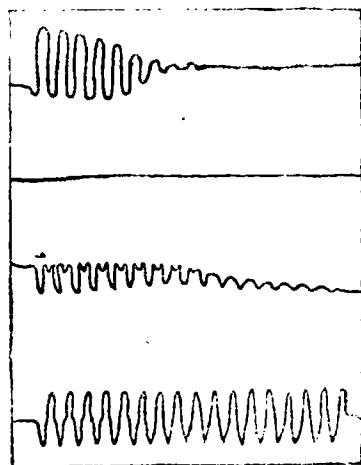


图15

图15中,最上面的波形是变形波形,下面一条直线表示侧向压力,再下是孔隙水压力波形,最底下是动荷载波形。

二、土样制备及饱和技术

要使室内试验测得的强度能代表现场土的强度,试样的制备是关键环节。必须尽可能地取得现场原状土样。土的强度不仅与土的相对密度有关、而且还与其结构、颗粒间的胶结作用、所受的超固结压力以及所受的地震史有关。1975年穆利利斯(Mulilis)、张(Chan)和希德(Seed)等人曾用 Monterey 0#砂做过试验,采用不同的备样方法,在相对密度 $Dr=50\%$,侧向压力 $\sigma'_0 = 8$ 磅/英寸²的相同条件下进行试验,其结果相差很大,如图16所示。

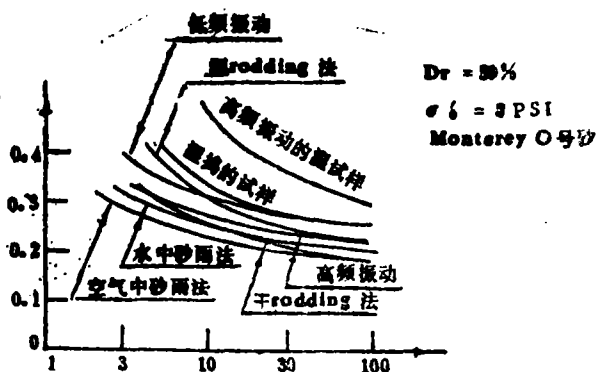


图16 不同压缩过程的周期应力比与初始液化的循环次数的关系

从图16可看出,尽管相对密度相同,应力状态相同,但由于备样方法不同,所以,土的结构也大不相同,试验结果就相差很大。因此,要求尽量减少试样的扰动。

图17是砂雨法制备300毫米直径试样的情况。上部有一个大砂箱,砂箱的底部有个孔,这



图17

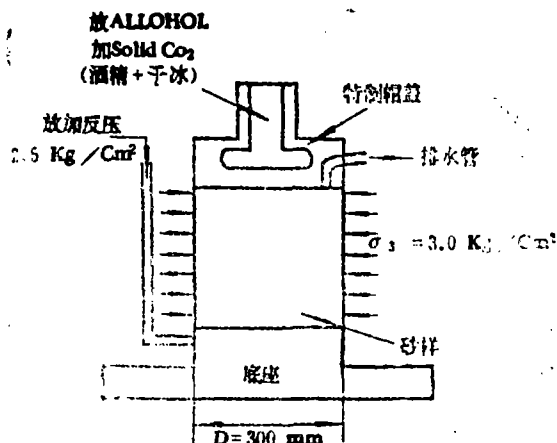


图18

个孔的直径可以调节,并用来控制砂的流量。孔下面接一个管子,管内有5个交叉排列的格子,使砂不能一次从砂箱上直接落到试样的模具上。格子的位置可以调节,从而控制落砂高度,借以调整密度。为了使备样模具上的落砂不形成斜面,管子应均匀地沿周边慢慢移动,使模具内的砂样成一平面,这种方法比较简单。然后,可采用各种方法从300毫米直径的大试样上取得小直径的试样。其中,扰动最小的方法是冻结法取样。

冻结方法如图18所示。当砂样制备好后,在它的上部放一个特制的帽盖,然后套上橡皮膜,抽真空。从底部慢慢地灌进无气水(没有气体的水),使试样饱和,一边施加 σ_3 ,一边施加反压,使 $\sigma_3 = 3.0$ 公斤/厘米²,反压加到2.5公斤/厘米²,待试样饱和之后,在帽盖上放入酒精和干冰。于是,温度可降到零下14~15度。试样便开始从上向下冻结,经过4天,冻结深度可达530毫米。这时,即可以取出钻取小试样。

冻结时必须注意两点:(1)冻结是从上向下冻,冻结过程中体积改变8%~9%,多余的水要从下部排出;(2)为了使试样结构不发生改变,冻结过程中应对试样施加一定的有效压力,最小有效压力约为0.1公斤/厘米²。

在钻取小直径试样时,钻头打进去之后,不能半途停下来。在钻头往下钻的同时,要喷二氧化碳气体,否则,钻孔中的水就会把钻头冻结。只要15秒钟,就可以钻到一定深度。然后用起子或手把试样下的冻土摇断,土样就取出来了。再把两端锯平,做成直径为70毫米的小试样,便可以放在小三轴上进行试验。在化冻时,仍然需要向试样灌入8%~9%的水。

冻结法也可用现场取原状砂土。示意图如图19所示。

用环形钻头打好钻孔之后,用水泥砂浆封住孔底。然后用小管子把冷却剂灌到钻孔中。这样,可以把孔壁周围的土冻结。

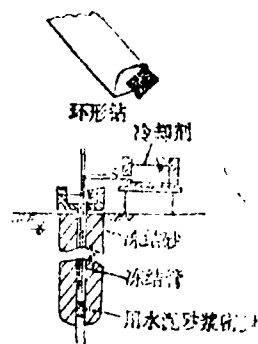


图19 冻结方法

除了砂雨法外, 还可用湿砂锤实法和振动法制备砂样。

图20, 图21是湿砂锤实法制备砂样的照片。先把砂浸湿, 使它的含水量达8%左右, 然后装到备样模具内, 分层击实。

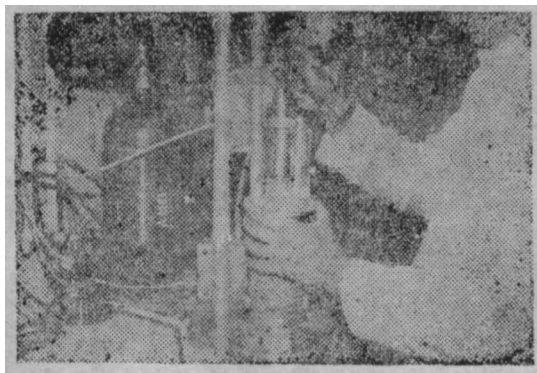


图20



图21

图22是对砂样施加侧向振动的照片。随着砂样一层层地增厚, 侧向也一层层地施加振动。当然, 也可以从顶部施加垂直振动。

关于试样饱和的方法, 有二氧化碳法, 高度真空法, 另外, 还有施加反压法。这些方法可以单独使用, 也可以混合使用。

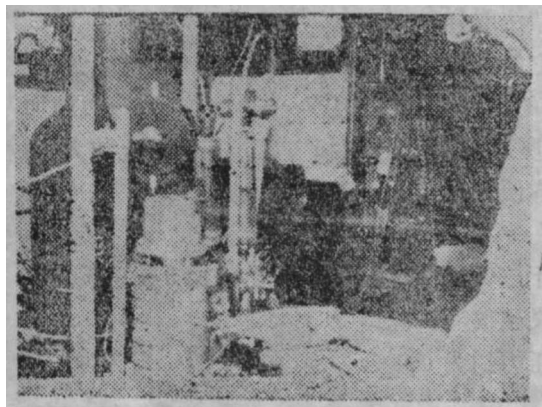


图22

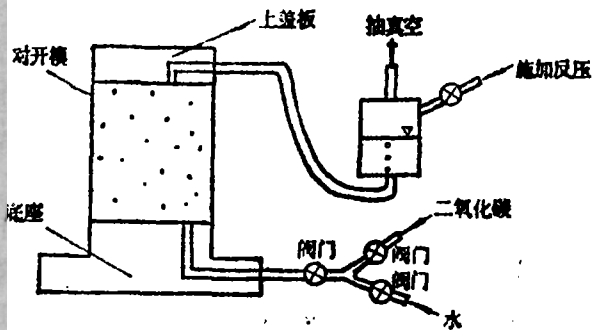


图23

如图23所示, 先把套有橡皮膜的对开模套在三轴室的底座上, 使橡皮膜内充满二氧化碳气体, 将里面的空气排出。然后在一个容器内, 把砂子与二氧化碳充分搅拌之后, 再装进对开模内。在装砂过程中, 也灌进二氧化碳。装完砂后, 把上表面整平, 将上盖板装好, 橡皮膜捆紧, 加一点围压(或抽真空), 然后拆除对开模, 从下部放水, 使试样中的二氧化碳排出去。为了提高饱和度, 还可以施加一点反压。

高真空的方法比较容易。把试件制好之后, 放进三轴室内, 在一个大气压的侧压下, 抽真空, 然后灌进无气水。同样可以施加反压, 提高饱和度。

三、振动台试验技术

希德等人的大型振动台试验,可以很好地模拟地下砂层在地震作用下的受力状态,它的示意图如图24所示。

试件箱是一个能承受50磅/英寸²压力的长方形大箱子。它可在低摩擦滚轮上自由滚动,并与产生水平周期运动的电流激振器的连杆联结,试样放在1英寸厚的“浮动”基板上。试样的底部面积为90×42英寸²,顶部为74×30英寸²,高4英寸。试样顶上包一层橡皮膜,然后再盖上一个产生惯性力的顶盖。

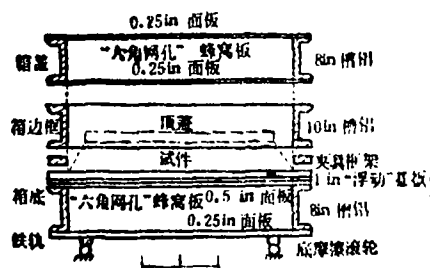


图24

为了避免试件表面的任何微小不平整所产生的应力集中,顶盖的下部在垂直方向上很柔软,它用一层很薄的、但强度很高的橡皮膜包起来。因为顶盖是提供惯性力的装置,所以,它的四周由刚性框架组成,框架内分成许多小栅格,在栅格内放置大小与砂粒径大体相同的钢球。框架底部被橡皮膜包起来,顶部由钢板盖住,顶板上有一管道通向抽真空的设备。当安放顶盖时,可先将其内部抽真空,使橡皮膜承受全部钢球的重量。在试验前放进空气,则钢球重量均匀地分布在砂样上。

砂箱内共布置14个传感器,其中2个测变形的LVDT位移传感器(布置在顶盖上),4个加速度传感器(底板上1个,顶盖上1个,试件上2个),6个孔隙水压力传感器(底板上4个,试件上2个),另外,还布置2个标准基角点(布置在试件上),具体布置情况如图25所示。

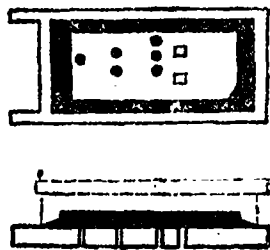


图25 砂箱内的测点布置

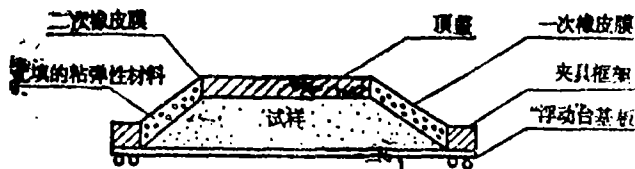


图26

为了更好地模拟现场砂层的受力状态,首先把试样做成平台形,然后,在周围的斜面上充填一层特殊的粘弹性材料,其目的是使斜面上的砂层受力更加均匀,更接近于现场的边界条件,如图26所示。

当粘弹性材料充填完毕之后,盖上第二层橡皮膜,然后再盖上箱盖。于是,在试样上部形成一压力室,从而可在试样上部施加一定的空气压力,使试样的应力状态模拟现场的砂层。

当试样全部安装好之后,进行抽气饱和,或充二氧化碳,将空气排出,再放进无气水、施加反压等使试样饱和,最后施加水平振动,模拟地震力。

在整理报告选登过程中,由于水平有限,不妥之处,敬请同志们批评指正。

郭应桐 余诗刚整理