

粤港澳大湾区富水软土基础物理参数力学试验研究

刘忠祥* 周秋娟 叶秋梅 李佳轩 周子晴

广东水利电力职业技术学院 市政工程学院 广东广州 510635

摘要: 本文以粤港澳大湾区富水软土地层为研究对象,对试样开展物理试验,物理试验包括含水率试验、密度试验、比重试验以及界限含水率试验;力学试验包括固结试验、无侧限抗压强度试验、直接剪切试验,通过基础物理力学室内试验,最终得出粤港澳大湾区富水软土基础物理力学参数,所得研究成果可为粤港澳大湾区建筑施工技术提供一定的指导意义。

关键词: 富水软土; 物理力学; 含水率试验; 固结试验

引言

本文粤港澳大湾区富水软土地层为研究对象,对试样开展物理力学试验,物理试验包括含水率试验、密度试验、比重试验以及界限含水率试验;力学试验包括固结试验、无侧限抗压强度试验、直接剪切试验,通过基础物理力学室内试验,得出粤港澳大湾区富水软土基础物理力学参数,所得研究成果可为粤港澳大湾区建筑施工技术提供一定的指导意义。

一、土样说明

土扰动后能握成团,摇动时土表面稍出水,手中有湿印,用手捏水即吸回。手捏很软,易变形,土块掰时似橡皮,用力不大就能按成坑。(见图1)

二、物理参数试验

1. 密度试验

土质量密度,一般用符号 ρ 表示,其简称为土的密度,顾名思义,质量密度指土的总质量在其体积中所占的比例,即单位体积土样的质量,国际单位为 kg/m^3 。土体的松紧状态一般用土的密度来反映,在计算其他指标中作为主要的参数依据,如土的孔隙比、土的自重应力等指标,也在计算地基承载力、土体边坡稳定性、基坑挡墙承受的土压力等计算过程中起着重要的参考依据。

土的密度 ρ 与重力加速度 g 的乘积值,称之为重度,



图1 土样情况

是土的重力密度的简称,其单位是 kN/m^3 ,当土为湿状态时,其密度称为土的湿密度,其状态下的重度为湿重度,以此类推,土的干湿状态还分为干状态、饱和状态,故有干重度、饱和重度,而有效密度,是饱和密度与水密度的差值,故有效重度等于饱和重度减去水重度。

(1) 实验方法及原理

环刀法:就是将土样塞满有一定体积的环刀内,称取土样质量后,除以环刀容积的商即是土的密度。环刀法并不是所有土样都合适,它只适用细粒土且不含砾石。

(2) 仪器设备

环刀法需要下列仪器设备:

环刀、天平(精确值为 0.1g)、切土刀、钢丝锯、凡士林等。

(3) 操作步骤

(一) 首先取一个环刀并记录环刀上的编号,再把环

基金项目: 2023年广东省课程思政团队项目(项目编号:KCSZ03005,市政工程学院课程思政团队)

作者简介: 刘忠祥(1993—),男,广州从化人,硕士,讲师,地下与隧道工程专业负责人,从事岩土工程方向教学与研究。

刀放在天平上称取它的质量 m_1 。

(二) 为防止试样原有结构被破坏, 且不应改变其土层承受的荷载方向, 故应取比环刀容积大一些的原状土或试验所需扰动土样。

(三) 在试验之前, 先用凡士林涂抹环刀内壁, 防止在脱模时, 试样粘附与环刀内, 破坏原有结构, 用锋利的一端刀口向试样轻轻挤压, 边挤压边用切土刀与土体成 45° 角慢慢削去环刀外两侧的土体, 当整个环刀占满试样土体时, 削去以下的多余的部分。

(四) 在得到环刀试样时要注意不能将原本孔隙的空间用其他土体填满, 在修平两端环刀试样后, 擦干净环刀外部, 称取环刀试样的总质量 m_2 , 立即盖上玻璃片在两端环刀试样上, 防止水分的蒸发。

(4) 成果整理及结果

按下式分别计算土的湿密度和干密度

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2-2)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (2-3)$$

式中: ρ —湿密度 (g/cm^3), 精确至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$

ρ_d —干密度 (g/cm^3), 精确至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$

m —湿土质量 (g);

m_1 —环刀质量 (g);

m_2 —环刀试样的总质量 (g);

V —环刀容积 (cm^3), 精确至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 。

w —含水量

将测定2次平行试验, 取得其平行差值, 且应不得大于 $0.03 \text{g}/\text{cm}^3$ 。

测得该试样的密度为: $\rho = \rho_d = 1.335\text{g}/\text{cm}^3$ 。

试验结果分析:

表1 密度试验结果

湿土质量 (g)	体积 (cm^3)	湿密度 (g/cm^3)	含水率 (%)	干密度 (g/cm^3)	平均干密度 (g/cm^3)
79.8	60	1.33	31%	1.33	1.335
80.2	60	1.34	31.4%	1.34	

2. 比重试验

(1) 实验方法及原理

比重瓶法: 土的颗粒比重是土在 $105\sim 110^\circ\text{C}$ 下烘至

恒值时的质量与土粒同体积 4°C 纯水质量的比值。比重瓶法适用于粒径小于 5mm 的土, 取其加权平均值作为土粒比重。

(2) 仪器设备

100ml 比重瓶、恒温水槽、胶头滴管、天平(精确值为 0.1g)、砂浴、温度计

(3) 操作步骤

(一) 将试样土烘干后, 碾压烘干土成细颗粒粉末状, 过筛粒径小于 5mm 的土壤筛后称取 15g 土样放入比重瓶内, 称取其总质量。

(二) 在步骤一的基础上, 在比重瓶内注入纯净水至瓶的一半, 将外部水分擦干净, 称取瓶、土和水的总质量。防止土和水中存在空气, 轻轻摇晃比重瓶, 并将其进行砂浴煮沸, 粘性土沸腾后在置其不少于 1h 。

(三) 比重瓶分为两种, 一种是长颈, 一种是短颈, 在第二步骤中应注意纯水注入不同装有烘干粉的瓶内时, 用长颈时可用胶头滴管注水准确至刻度处, 用短颈时注满整瓶即可。测定瓶内稳定的温度, 在土颗粒沉淀, 上层水变清澈时为稳定阶段。

(四) 在称重瓶、土和水的总质量时, 应将瓶盖塞上。

(4) 成果整理及结果

按式 (2.3.1) 计算土粒比重

$$G_s = \frac{m_d}{m_1 + m_d + m_2} G_{wt} \quad (2-4)$$

式中: G_s —土粒比重

m_d —干土质量, g ;

m_1 —瓶、水总质量, g ;

m_2 —瓶、水、土总质量, g ;

G_{wt} —纯水在 $t^\circ\text{C}$ 时的比重(可查表2), 精确

至 0.001g 。

表2 不同温度时水的比重(近似值)

水温/ $^\circ\text{C}$	4.0~ 12.5	12.5~ 19.0	19.0~ 23.5	23.5~ 27.5	27.5~ 30.5	30.5~ 33.0
水的比重	1.000	0.999	0.998	0.997	0.996	0.995

将测定2次平行试验, 取得其平行差值 a ($a \leq 0.02$)。

测得该试样的比重为: $G_s = 2.71$ 。

表3 比重试验记录表(比重瓶法)

温度 ($^\circ\text{C}$)	液体 比重	比重瓶质量 (g)	瓶、干土总 质量(g)	干土质量	瓶、液总质 量(g)	瓶、液、土 总质量(g)	与干土同体积的 液体质量(g)	比重	平均值
23	0.998	30.514	45.500	14.994	128.445	137.918	5.521	2.71	2.71
21	0.998	30.443	45.437	14.986	128.354	137.822	5.518	2.71	

3. 界限含水率试验

细粒土由于含水率不同分别处于流动状态、可塑状态、半固体状态和固体状态。液限是细粒土呈可塑状态的上限含水率；塑限是细粒土呈可塑状态的下限含水率；缩限是细粒土从半固体状态继续蒸发水分过渡到固体状

态时体积不再收缩的界限含水率。

本试验的目的是测定细粒土的液限、塑限和缩限，划分土类、计算塑性指数，供设计、施工使用。各项含水率的测定按《含水率试验》的烘干法进行。

按照土工试验规程测得结果如下：

表4 液塑限联合试验结果

盒号	圆锥下沉深度 H (mm)	盒号	盒质量	盒加湿土质量 m (g)	盒加干土质量 m (g)	水分质量 (g)	干土质量 (g)	含水率 w (%)	平均含水率 (%)	液限 W _L (%)	塑限 W _P (%)
19	4.35	2	10.73	30.72	27.23	3.49	16.5	21%	21%	31.9	18
		3	11.60	31.62	28.12	3.5	16.52	21%			
21	9.95	25	10.37	28.76	24.94	3.82	14.57	25%	25%		
		29	10.70	29.15	25.32	3.83	14.62	25%			
24	16	30	10.73	31.73	26.79	4.94	16.06	31%	31%		
		41	11.66	32.63	27.71	4.92	16.05	31%			
塑性指数 $I_p = \omega_L - \omega_P$						13.9					
液性指数 $I_L = \frac{\omega - \omega_P}{I_p}$						0.88					

表5 黏性土软硬状态的划分

稠度状态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流塑
液性指数	$I_L \leq 0$	$0 < I_L \leq 0.25$	$0.25 < I_L \leq 0.75$	$0.75 < I_L \leq 1$	$I_L > 1$

由表5可以得出该土为软塑状态。

三、力学参数试验

1. 固结试验

本试验的目的是测定试样在侧限与轴向排水条件下的变形和压力，或孔隙比和压力的关系，变形和时间的关系，以便计算土的压缩系数 a_v 、压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 、压缩模量 E_s 、固结系数 C_v 及原状土的先期固结压力 p_c 等。测定项目视工程需要而定。

根据土工试验规程测得结果如下：

表6 固结试验结果

加压历时 (h)	压力 (kpa)	试样总变形量 (mm)	压缩后试样高度 (mm)	孔隙比	压缩模量 (Mpa)	压缩系数 (MPa^{-1})
0				1.03	0.85	2.4
24	50	1.22	18.78	0.91	2.03	1
24	100	1.659	18.341	0.86	5.075	0.4
24	200	2.112	17.888	0.82	6.77	0.3
24	400	2.652	17.348	0.76		

2. 直接剪切试验

土的抗剪强度是土受到外界荷载时，土体的一部分滑动对于另一部分土体产生了抵抗极限剪切强度。分别

测试在不同垂直压力下的4个试样，得到在其剪切面施加水平剪力时因破坏产生的剪应力，而内摩擦角和凝聚力是根据库伦定律得出。直接剪切试验方法可分为快剪、慢剪及固结快剪，其另一种说法为不排水剪、排水剪、固结不排水剪。

(1) 实验方法及原理

快剪适用于细粒土（渗透系数小于10cm/s）。

(2) 仪器设备

直剪仪、天平（精确值为0.1g）、环刀、秒表、加压设备、位移量测设备等。

(3) 操作步骤

(一) 选取已测定含水量与密度的原状土；

(二) 将原状土分成4个同等试样进行剪切试验，施加的不同垂直压力的差值应大致相同，取一个垂直压力为现场预定最大压力，其余3个中，一个略大于预定最大压力，另外两个均略小于预定最大压力。可直接一次施加，但前提是要轻轻的，防止试样挤出被破坏，另外当试样为松软土质时，应分级施加；

(三) 试样安装与剪切

直剪仪（四联剪）采集操作过程：

① 装上制备好的土样。把透水石、滤纸先放在直剪

仪器的最下框的上方,把环刀里的试样用另一块透水石轻轻推至切盒框内,盖上盖子。

②为了能方便移动或放取容器时,要对齐传压板与横梁压头的位置,将指针指向零。

③选择快剪方式试验时,拔出插销,垂直压力逐级增加。

④按F1键选择剪切速率。将快剪参数输入至土工试验数据采集软件中,勾选按速率采样。一般剪切量为4mm。

⑤点击标有“仪器状态”的范围后,试验开始,听到语音结束后,按F3的按钮,计算机自动会记录采样的数据。

⑥若操作过程是在四联剪仪器上进行的时候,根据语音与文字提示,选择有一联为不进行的“采样”范围上然后确认“放弃”选项。

⑦按停止键(F3),接着按快退键(F6)是电脑有语音提示结束时。仪器显示“空闲”数据自动存盘。

(4) 成果整理及结果

(一) 按式(3.3.1)计算试样的剪应力:

$$\tau = \frac{CR}{A_0} \times 10 \quad (2-5)$$

式中: τ —剪应力, kPa;

C—测力计率定系数, N/0.01mm

R—测力计读数, 0.01mm;

A_0 —试样面积, cm^2 ;

10—单位换算系数。

(二) 绘制纵坐标剪应力 τ 与横坐标剪切位移 Δl 的变化曲线, 见图。

(三) 每个曲线中的抗剪强度 S 是该曲线中的稳定值或峰值, 如图中箭头所示。没有以上两个特殊点时, 则取 $\Delta l = 4\text{mm}$ 时纵坐标的多少即为抗剪强度 S , 图中 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 为相应的垂直压力。

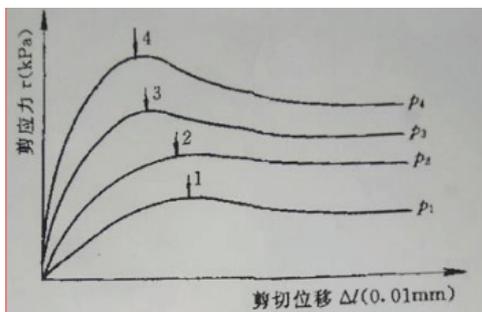


图2 剪应力与剪切位移的关系曲线

(四) 绘制纵坐标抗剪强度 S 与横坐标垂直压力 p 的

关系曲线, 如图。根据各点, 绘制一条离各个点最近的一条直线。内摩擦角 ϕ 为直线的倾角, 粘聚力 c 为直线在纵坐标轴上的截距。



图3 抗剪强度与垂直压力的关系曲线

测得该试样的粘聚力 $c = 1.83\text{kPa}$, 内摩擦角 $\phi = 5.82^\circ$ 。

3. 无侧限抗压强试验

(1) 为防止原状土样粘至仪器上, 可在无限侧压仪器的上下底座涂上一层凡士林, 或土样两端。为防止水分蒸发, 在气候干燥时, 土样周围应涂一层薄薄的凡士林。

(2) 转动无限侧压仪器的手轮, 使试样能够放置其中, 调动底座, 使加压板刚好接触, 后将测力计读数调零。

(3) 应匀速转动手柄, 轴向应变速度为 $1\% \sim 3\%/\text{min}$ 。轴向应变用 ε_1 表示, 当 $\varepsilon_1 > 3\%$ 时, 间隔 0.5% 应变读数记录, $\varepsilon_1 \geq 3\%$ 时, 间隔 1% 应变读数记录。试验完成时间为 $8 \sim 10\text{min}$ 。

(4) 当测力计读数出现峰值时, 继续进行 $3\% \sim 5\%$ 的应变后停止试验; 当读数无峰值时, 试验应进行到应变达 20% 为止。

(5) 进行试样破坏描述。

一、成果整理与结果

(一) 轴向应变

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (2-7)$$

式中: ε_1 ——轴向应变 (%) ;

Δh ——轴向变形 (mm) ;

h_0 ——试样的初始高度 (mm)。

(二) 校正后的试样面积

$$A_a = \frac{A_0}{1 - 0.01\varepsilon_1} \quad (2-8)$$

式中: A_a ——校正后试样面积 (cm^2) ;

A_0 ——试样初始面积 (cm^2)。

(三) 试样所受的轴向应力:

$$\sigma = \frac{C \cdot R}{A_a} \times 10 \quad (2-9)$$

式中: σ ——轴向应力 (kPa);

C——测力计率定系数 (N/0.01mm);

R——测力计读数 (0.01mm);

10——单位换算因数。

其测得软土土样结果如下:

表7 无侧限抗压强度试验结果

试验前试样高度 $h_0=8.0\text{cm}$ 试验前试样直径 $D_0=3.8\text{cm}$ 试验前试样面积 $A_0=12\text{cm}^2$ 试样质量 $m=122.72\text{g}$ 试样密度 $\rho=1.28\text{g/cm}^3$ 轴向变形 $\Delta h=0.01\text{mm}$ 测力计率定系数 $C=26.968\text{N}/0.01\text{mm}$ (或 N/mV) 原状试样无侧限抗压强度 $q_u=11.2\text{KPa}$ 原状试样无侧限抗压强度 $q'_{u}=11.3\text{KPa}$ 灵敏度 $S_r=1$				试样破坏情况: 土样呈鼓腰破坏形状, 无裂痕	
测力计量表读数 $R/ (0.01\text{mm})$ (1)	轴向变形 $\Delta h/\text{mm}$ (2)	轴向应变 $\varepsilon_1/ (\%)$ $\frac{\Delta h}{h_0}$	校正后面积 $A_a/ (\text{cm}^2)$ $\frac{A_0}{1-0.01\varepsilon_1}$	轴向荷载 $P/ (\text{N})$ $C \times (1)$	轴向应力 $\sigma/ (\text{KPa})$ $\frac{P}{A_a} \times 10$
0.5	2.1	26.25	12.03	13.48	11.2
0.5	2.0	25	12.03	13.48	11.2

结论

本文以富水软土地层为研究对象, 对试样开展物理力学试验, 根据试验得出的基本物理力学参数, 现得结论如下:

表8 物理指标

含水率	干密度	湿密度	土粒比重	液限	塑限	塑性指数	液性指数
30.2%	1.335g/cm ³	1.335g/cm ³	2.71	31.9%	18%	13.9	0.88

表9 力学指标

压缩系数 a_{1-2} (MPa ⁻¹)	压缩模量 a_{1-2} (MPa)	无侧限抗压强度 (kpa)	粘聚力 (kpa)	内摩擦角 (°)
0.4	5.075	11.3	1.83	5.82

参考文献

[1] 马博, 滕继东, 张升, 等. 考虑温度和压融效应的冻土强度准则研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(04): 1417-1425.

[2] 黄坤, 蔡国军, 姜云瀚, 等. 中主应力对冻结砂土强度特性影响机理研究[J/OL]. 工程力学, 1-12[2025-11-26]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20250117.1508.009>.

[3] 吴建, 周志芳, 王浩, 等. 太湖隧道湖相沉积软土工程特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(02): 63-70.

[4] 赵冬, 丘建金, 龚旭亚, 等. 深圳西部地区海积软土指标及相关性研究[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(08): 44-48. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2024.08.010.

[5] 张玉芝, 王玺, 王盟, 等. 冻融过程中冰水相变对非饱和粉土动力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(07): 1799-1808. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0872.

[6] 刘勤龙, 李旭, 姚兆明, 等. 冻土强度特性及其主控因素综述[J]. 冰川冻土, 2023, 45(03): 1092-1104.